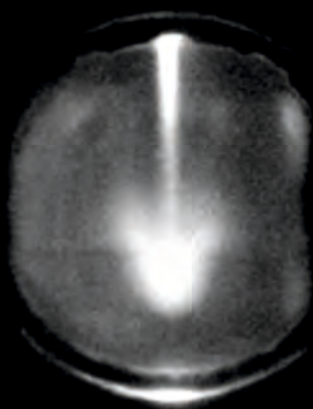
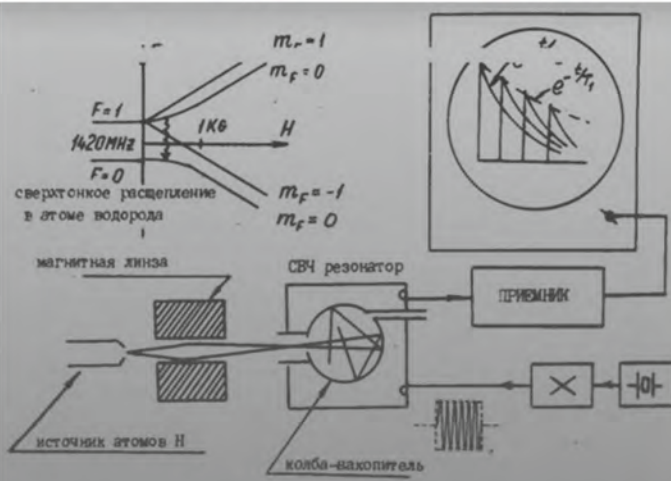




Евгений Борисович ГОРДОН

Воспоминания
 и избранные
 статьи



Евгений Борисович **ГОРДОН**

Воспоминания
и избранные
статьи

Составители:
академик Э.Е. Сон
к.х.н. Д.А. Гордон

Москва 2021



УДК 929.82-94
ББК 63.3(2)6-8
Г 68

Евгений Борисович Гордон. Воспоминания и избранные статьи / [сост. академик Э.Е. Сон, к.х.н. Д.А. Гордон]: отв. ред. Э.С. Медведев, Э.Е. Сон, Я.П. Тоеннис. — М.: Янус-К, 2021, 528 с.

ISBN 978-5-8037-0808-7

В воспоминаниях российских и иностранных коллег, сотрудников, учеников, друзей и близких выдающегося учёного доктора физико-математических наук профессора Евгения Борисовича Гордона (1940–2019) рассказывается о его жизненном пути, о его научной и научно-организационной деятельности. В книге приведены избранные оригинальные статьи в различных областях науки, в которых работал Евгений Борисович. Увидеть и услышать Евгения Борисовича можно в видеозаписи телепередачи «Чёрные дыры. Белые пятна на телеканале «Культура» от 23.03.2018, где он рассказывает о получении металлических нанопроволочек в квантовых вихрях в сверхтекучем гелии (с 14-й по 18-ю мин.) https://tvkultura.ru/video/show/brand_id/20863/episode_id/1717488/video_id/1831086/.

Редакционная коллегия:

Кандидат физико-математических наук О.С. Ржевский, М.Е. Степанов, М.В. Гордон, доктор физико-математических наук Э.С. Медведев, кандидат химических наук Д.А. Гордон, профессор Ян Питер Тоеннис, кандидат физико-математических наук А.В. Карабулин

Рецензент: доктор физико-математических наук Б.М. Смирнов.

Фото Е.Б. Гордона на обложке – из архива А.П. Жаркова.

© Д.А. Гордон, 2021

ISBN 978-5-8037-0808-7



СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие

ВВЕДЕНИЕ

Краткий обзор научной деятельности Евгения Борисовича Гордона. <i>Э.Е. Сон</i>	8
Выдвижение в члены-корреспонденты Российской академии наук.	12
Достижения Е.Б. Гордона в авторском изложении	14
Obituary. <i>J.P. Toennies</i>	24

УЧЕНЫЙ

Воспоминания о Жене. <i>В.Е. Фортков</i>	28
Процессы в лампе Гордона. <i>Б.М. Смирнов</i>	30
Метод Гордона для генерации нитевидных наноструктур. <i>А.В. Карабулин, М.И. Кулиш, В.И. Матюшенко, Б.М. Смирнов, Э.Е. Сон, А.Г. Храпак</i>	34
Visit to Kyoto: Experiments with solid helium. <i>T. Wakabayashi</i>	47
Водородный мазер, химические лазеры, UF ₆ , Бакуриани и шаровая молния. <i>А.И. Никитин</i>	54
Нанопроволоки. <i>Т.В. и С.А. Губины</i>	60
Нанокатализ. <i>Т.Н. Ростовщикова</i>	66
Пионерские работы, высочайшая квалификация, широта научной эрудиции, глубокое понимание природы вещей, преданность науке, бойцовский характер, харизматическое обаяние, дружелюбие, отеческое отношение к молодёжи. О Евгении Борисовиче Гордоне как бы со стороны. <i>Н.В. Классен</i>	68
Письмо Е.Е. Никитина. <i>Д.А. Гордон</i>	72
Его энтузиазм передавался другим. <i>И.И. Ходос</i>	74
Он был классным экспертом по химической физике. <i>Е.А. Кузнецов</i>	75
Экспертный совет ВАК. <i>О.В. Малышкина</i>	77
И талантливый учёный, и прекрасный механик. <i>В.К. Энман</i>	78
Он был удивительным рассказчиком и докладчиком. <i>В.Б. Ефимов</i>	79
Вдохновенность, увлечённость и глубина. <i>А.Н. Иванова</i>	81

СОТРУДНИЧЕСТВО С ЗАРУБЕЖНЫМИ КОЛЛЕГАМИ

Германия. Ян Питер Тоеннис. <i>Д.А. Гордон</i>	84
Швейцария. Антуан Вайс и Сильвия. <i>Д.А. Гордон</i>	87
Голландия. Джорджио Фроссати и Яссу. <i>Д.А. Гордон</i>	90
Польша. Анджей Ежовски и его команда. <i>Д.А. Гордон</i>	94
Америка. <i>Д.А. Гордон</i>	96



Финляндия. Марку Расенен. <i>Д.А. Гордон</i>	102
Япония. <i>Д.А. Гордон</i>	104

УЧИТЕЛЬ

Поздравление с 60-летием от сотрудников лаборатории квантовых систем .	130
В следующий раз получится лучше! А в седьмой – вообще идеально!	
<i>А.В. Карабулин</i>	131
He didn't compromise. <i>Т. Kumada</i>	133
Самый удивительный человек. <i>М.Е. Степанов</i>	135
Он был великолепным психологом. <i>А.С. Гордиенко</i>	140
Мастер элегантных оценок. <i>О.С. Ржевский</i>	141

ВОСПОМИНАНИЯ БЛИЗКИХ, ДРУЗЕЙ И РОДНЫХ

Женя. Наша жизнь с ним. <i>Д.А. Гордон</i>	146
Женя и дом. <i>Д.А. Гордон</i>	157
Непростой был человек. <i>С.Е. Гордон</i>	159
Каким же я тебя помню? <i>Л.С. Гордон</i>	162
Улыбка ходячей энциклопедии. <i>Ю.Е. Гордон</i>	163
Мои встречи с Н.Н. Семёновым. <i>Д.А. Гордон</i>	165
Встреча с Юрием Любимовым. <i>Д.А. Гордон</i>	169
Школа. <i>Э.С. Медведев</i>	171
С первого по третий, 1959–1962. <i>В.В. Прут</i>	174
У него каждый раз было что-то новое. <i>Э.И. Раиба</i>	177
Джон был особенный. <i>В.С. Лехциер</i>	178
Потрясающий подарок от дорогого Жени. <i>В.И. Гомон</i>	180
Наш друг. <i>А.А. Карнаух, Г.Е. Карнаух</i>	185
Большое путешествие. Каким мы помним Женю.	
<i>О.В. Копелевич, И.Д. Михайлов</i>	188
Как муравьи друг с другом общаются. <i>В. Никитина</i>	198
Очень цельный человек. <i>Л.А. Тугушева</i>	200
В жизни пятерок недостаточно. <i>Е.Я. Федотова</i>	201

РАЗНОЕ

Из совместного воспоминания Е.Б. Гордона и В.Е. Фортова для сборника, посвящённого памяти Виктора Львовича Тальрозе.	204
Из другого воспоминания Евгения Борисовича о В.Л. Тальрозе.	207
Памяти В.Е. Фортова. <i>Д.А. Гордон</i>	210
Евгений Борисович об Академии наук.	212
К 50-летию А.Ф. Додонова. <i>Е.Б. Гордон</i>	214
Ф.И. Дубовицкий и его роль в нашей жизни. <i>Д.А. Гордон</i>	216
Наши друзья. <i>Д.А. Гордон</i>	218



Женя любил шутки, розыгрыши. Д.А. Гордон.	228
Из воспоминаний А.В. Леонтьевой.	230
«Вы, конечно, красивый очень». М. Жукова.	231
Поздравления с юбилеями	232
Реакция коллег, друзей, родных и близких на печальное известие	236

СЕМЬЯ

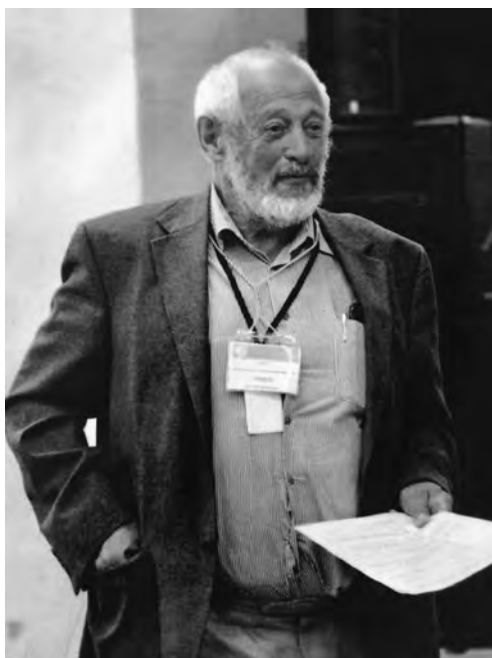
Предки	242
Фотографии	250

НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ

Избранные статьи Е.Б. Гордона.	290
а) Конденсация атомов в сверхтекучем гелии	293
б) Измерение скоростей химических реакций в водородном лазере	300
с) Максимальная температура, достижимая в химических реакциях	319
d) Химическая лампа Гордона	327
е) Химические лазеры	344
f) Фотоассоциация атомов Хе и Cl в газовой фазе	347
g) Утилизация UF_6	347
h) Физическая лампа Гордона	367
i) Нанопроволоки и нанокластеры в сверхтекучем гелии	414
j) Нанокатализ	470
k) Криокристаллы в космосе.	501
Список публикаций Е.Б. Гордона	502
International virtual symposium in memory of E.B. Gordon, September 8–9, 2020	520
Краткие сведения об авторах	523



Предисловие



Предлагаемая вниманию читателя книга содержит воспоминания о Евгении Борисовиче Гордоне (1940–2019) – учёном, чья многолетняя научная деятельность была посвящена решению широкого круга задач во многих областях молекулярной и химической физики, физики низких температур и лазерной химии. Евгений Борисович был не только неординарным учёным, но и ярким, блестящим человеком. Острый, живой ум, моментальная реакция, чувство юмора, готовность к розыгрышам, шуткам, остроумному словцу делали его центром притяжения в любых компаниях.

О Евгении Борисовиче вспоминают коллеги и ученики, родные и близкие, друзья и сокурсники. В этих вос-

поминаниях отражены разные периоды его жизни, иногда полные драматизма. Евгений Борисович прожил яркую, продолжительную и, в общем, счастливую жизнь, как научную, так и личную.

Редколлегия глубоко признательна всем авторам, которые поделились своими воспоминаниями, и тем, кто предоставил фотографии из личных архивов. Выражаем благодарность сотрудникам библиотеки Ногинского научного центра РАН и библиотеки Института химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН за помощь в подборе литературы; нашу искреннюю признательность редакциям журналов «Физика низких температур» и «EPL (Europhysics Letters)» за разрешение включить опубликованные в них статьи Е.Б. Гордона. Мы также глубоко благодарны издательству IOP publishing (The Institute of Physics, UK) за разрешение использовать статью в *Laser Physics Letters*, издательству Elsevier за статью в *Chemical Physics* и издательству Springer за открытый доступ к публикациям.

Переводы английских текстов выполнены составителем. Примечания сделаны редактором, если не указано иное.



Введение



Э.Е. Сон

Краткий обзор научной деятельности Евгения Борисовича Гордона

Начало научной деятельности Евгения Борисовича Гордона связано с тем, что впервые и довольно неожиданно прибор квантовой электроники – водородный мазер был применён для изучения химических реакций. Это позволило создать совершенно новый метод исследования с принципиально новыми возможностями. В работах Евгения Борисовича этот метод был широко развит в различных вариантах, с его помощью было детально исследовано большое число реакций и, что очень важно, измерены их константы скорости. Следует выделить реакцию $H + H_2 \rightarrow H_2 + H$, которая носит модельный характер, может быть полностью рассчитана теоретически, но ранее не могла быть детально изучена экспериментально, что впервые удалось Евгению Борисовичу. При этом было обнаружено, что обмен атомами водорода можно рассматривать как обмен ядерными спинами. Новым методом впервые удалось осуществить и прямое наблюдение промежуточного комплекса в реакциях присоединения к молекулам атома водорода [1, 2]. Когда Евгений Борисович занялся лазерной химией, им также были созданы новые и эффективные экспериментальные методы, среди которых весьма оригинальным представляется метод исследования химических реакций путём введения контролируемых добавок в активную среду газовых лазеров.

При изучении обмена между атомами и молекулами галогенов открыты новые закономерности химических реакций. Так, обнаружено сохранение спин-орбитального состояния атома галогена в реакции обмена. Это по существу новый и неожиданный закон сохранения, очень важный для химической физики. Далее, установлено, что в таких реакциях передача энергии возбуждения атома носит преимущественно резонансный характер. Оказалось также, что парамагнетизм молекул, сталкивающихся с атомами галогенов, очень мало влияет на скорость их спин-орбитальной релаксации. Эти и другие полученные Евгением Борисовичем с сотрудниками результаты позволили предложить и обосновать применение нового класса очень перспективных хемолазерных реакций.

Большой интерес представляет обнаружение неизвестного ранее явления – неравновесного заселения подуровней сверхтонкой структуры атомов галогенов, образующихся при фотодиссоциации молекул. Это позволило объяснить непонятные ранее характеристики фотодиссоциативных лазеров.

К важным результатам также относится установление механизма работы лазера на окислении сероуглерода и выяснение роли в нём медленной разветвлённой цепной химической реакции. Показана возможность создания фотодиссоциативного фторного лазера [3].



Большое внимание в лаборатории квантовых систем, возглавляемой Е.Б. Гордоном, отводилось изучению кинетики и спектроскопии эксимерных молекул. Эксимерные молекулы, имеющие основное слабосвязанное состояние, как известно, находят применение в мощных лазерах ультрафиолетового диапазона. Также с участием эксимерных молекул можно наблюдать интересный элементарный процесс – фотоассоциацию, когда из, по сути дела, свободных сталкивающихся атомов за счёт поглощения фотона образуется молекула с химической связью, хотя и в возбуждённом состоянии. Созданная в лаборатории экспериментальная установка позволила с высокой точностью получать спектры индуцированной лазером эмиссии эксимерных молекул, что эквивалентно спектрам поглощения, тогда как более ранние исследования ограничивались спектрами излучения. В ходе проведённого изучения молекул XeCl и затем XeF были экспериментально получены спектры индуцированной лазером эмиссии этих молекул в УФ диапазоне, а также проведены строгие расчёты этих спектров на основе известных потенциальных кривых. Было продемонстрировано хорошее согласие спектров, полученных экспериментально и расчётным путём. Рассчитанные спектры позволили определить вклад свободносвязанных переходов или фотоассоциации и впервые оценить сечение этого процесса [4].

В конце 50-х годов возник большой интерес к исследованию замороженных высокоактивных радикалов, которые могли быть использованы как топливо в реактивных двигателях. В 1974 г. Евгений Борисович с сотрудниками создал новую эффективную методику получения стабилизированных атомов путём введения атомного пучка в сверхтекучий гелий. Здесь пригодился опыт и мастерство Евгения Борисовича работать с атомными пучками. Была достигнута рекордная концентрация стабилизированных атомов азота. Созданная им методика до сих пор широко используется при решении многих задач низкотемпературной химии и физики [5]. Туннельная химическая реакция – между атомом и молекулой изотопов водорода – была также экспериментально впервые обнаружена в его работе [6].

Круг научных интересов Евгения Борисовича был чрезвычайно широк. Достаточно отметить, что температурный интервал его исследований лежит в пределах от ≈ 2 К до ≈ 6300 К [7]. В 2002 г. Гордоном Е.Б. был предложен оригинальный метод химической конверсии отработанного гексафторида урана в нелетучие продукты (эти работы включены в перечень особо важных работ Росатома) [8]. Им был также предложен и экспериментально обоснован метод прямого преобразования лавины горячих электронов в разряде через твёрдый ксенон. В 2007 г. Евгением Борисовичем совместно с Юичи Окудой в Токийском технологическом институте было обнаружено образование длинных наноразмерных структур при введении пучка атомов водорода в сверхтекучий гелий. Е.Б. Гордон предложил модель их образования путём захвата вводимых частиц вихрями в сверхтекучем гелии [9]. Естественно



было предположить, что если вводить в сверхтекучий гелий атомы металлов, то будут образовываться нанопроволоки. В 2009 г. совместно с Антуаном Вайсом в Фрайбурге (Швейцария) были получены тонкие золотые проволочки, чья длина значительно превышала диаметр (5–8 нм) [10]. С тех пор группа Евгения Борисовича в ИПХФ РАН в Черноголовке исследовала механизмы образования и свойства наноразмерных проволок из Cu, Ag, Au, Nb, Re, W, Mo (всего более 30 металлов и сплавов), включая их сверхпроводимость [11, 12].

Евгений Борисович предложил использовать получаемые его методом наноразмерные сферы и нанопроволоки в качестве катализаторов химических реакций. Совместно с сотрудниками МГУ были сделаны работы по их практическому применению в реакциях окисления [13]. Был испытан ряд образцов разных металлов, проведено сравнение их каталитической способности с другими видами наноразмерных материалов, и эти сверхнизкие количества нанопроволок (около 1 микрограмма или меньше) по своей эффективности не уступали или даже превосходили известные катализаторы. На конференции по криокристаллам, состоявшейся в августе 2018 г. в Польше, большой интерес вызвал доклад Евгения Борисовича, в котором он рассматривал возможности применения его метода по конденсации гостевых частиц в квантовых вихрях сверхтекучего гелия, к космическим исследованиям [14].

Литература¹⁾

1. E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, A.N. Ponomarev, V.L. Talroze and S.G. Khidirov, Measurement of cross-sections of spin exchange of H-atoms ($F = 1$, $M_f = 0$) on paramagnetic O_2 , NO, and NO_2 molecules in temperature interval 310–390 K. *JETP Lett.*, 1973, **17**, 395–397.
2. E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, E.S. Medvedev, A.N. Ponomarev and V.L. Talroze, Investigation of chemical reactions $H+H_2$ and $H+D_2$ by a hydrogen maser. *Chemical Physics.*, 1975, **8**, 147–157. doi: 10.1016/0301-0104(75)80101-7.
3. E.B. Gordon, V.I. Matyushenko and V.D. Sizov, Chemical H_2/F_2 -laser pumped by excimer laser emission – calculation and comparison with the experiment. *Khimicheskaya Fizika*, 1986, **5**, 196–201.
4. E.B. Gordon, V.G. Egorov, S.E. Nalivaiko, V.S. Pavlenko and O.S. Rzhevsky, The theoretical and experimental distinguishing of photoassociation into the $XeCl(B)$ state. *Chemical Physics Letters*, 1995, **242**, 75–82. doi: 10.1016/0009-2614(95)00721-f.
5. E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin and O.F. Pugachev, Stabilization of nitrogen atoms in superfluid helium. *JETP Lett.*, 1974, **19**, 63–65.
6. E.B. Gordon, A.A. Pelmenev, O.F. Pugachev and V.V. Khmelenko, Hydrogen and deuterium atoms, stabilized by condensation of an atomic beam in superfluid helium. *JETP Lett.*, 1983, **37**, 282–285.

1) Здесь и далее: полные тексты некоторых статей можно найти в главе «научное наследие».



7. E.B. Gordon, M.S. Drozdov, S.I. Svetlichnyi, Y.B. Shekk, V.M. Vasilev and V.L. Talroze, Maximum temperatures reached in chemical reactions. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 1980, **16**, 189–195. doi: 10.1007/bf00740200.
8. E.B. Gordon, V.A. Dubovitskii, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov and Y.A. Kolesnikov, Uranium hexafluoride reduction with hydrogen atoms. *Kinetics and Catalysis*, 2006, **47**, 148–156. doi: 10.1134/s0023158406010204.
9. E.B. Gordon and Y. Okuda, Catalysis of impurities coalescence by quantized vortices in superfluid helium with nanofilament formation. *Low Temperature Physics*, 2009, **35**, 209–213. doi: 10.1063/1.3081156.
10. P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Grobety, C. Neururer, E.B. Gordon and A. Weis, Nanowire formation by gold nano-fragment coalescence on quantized vortices in He II. *EPL (Europhysics Letters)*, 2010, **90**, 34002. doi: 10.1209[0295-5075/90/34002[.
11. E.B. Gordon, The influence of superfluidity on impurities condensation in liquid helium. *Low Temperature Physics*, 2012, **38**, 1043–1048. doi: 10.1063/1.4766584.
12. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, M.I. Kulish, V.I. Matyushenko and M.E. Stepanov, Coagulation of Metals in Superfluid and Normal Liquid Helium. *Journal of Physical Chemistry A*, 2017, **121**, 9185–9190. doi: 10.1021/acs.jpca.7b08645.
13. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, T.N. Rostovshchikova, S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva and E.V. Golubina, Application of Au-Cu nanowires fabricated by laser ablation in superfluid helium as catalysts for CO oxidation. *Gold Bulletin*, 2015, **48**, 119–125. doi: 10.1007/s13404-015-0168-y.
14. E.B. Gordon, *Cryocrystals in the space: Low temperature evolution of interstellar dust*, in 12th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals. August 26–31, 2018: Wrocław, Poland.



Выдвижение в члены-корреспонденты Российской академии наук¹⁾

Выписка из протокола №7 заседания Учёного совета
Института Проблем химической физики РАН от 6 сентября 2013 г.

Гордон Е.Б. – всемирно известный специалист в области химии и химической физики, его индекс Хирша равен 18, а полное количество ссылок 1033 (Web of Science). Он является автором более 200 статей и 14 изобретений. В 1968 г. Гордон Е.Б. впервые в мире использовал квантовый генератор (водородный мазер) для изучения химических реакций и задолго до фемтосекундных лазеров измерил время жизни промежуточного комплекса (10^{-11} с) в обратимых химических реакциях. Ему первому удалось ввести реакционноспособные атомы внутрь сверхтекучего гелия. Им первым было выдвинуто правило сохранения спин-орбитального состояния атома галогена в его обменных реакциях с молекулами интергалогенов. Туннельная химическая реакция – между атомом и молекулой изотопов водорода – была также экспериментально впервые обнаружена в его работе. Под руководством Гордона Е.Б. был создан целый ряд новых лазеров, в том числе химических, изучены кинетика и механизм ряда важных химических реакций и элементарных процессов. В 2002 г. Гордоном Е.Б. был предложен оригинальный метод химической конверсии отработанного гексафторида урана в нелетучие продукты (эти работы включены в перечень особо важных работ Росатома). Им был также предложен и экспериментально обоснован метод прямого преобразования лавины горячих электронов в разряде через твёрдый ксенон. В последние годы Гордоном Е.Б. было обнаружено новое явление – катализ квантовыми вихрями коагуляции взвешенных в сверхтекучем гелии примесей. На этом принципе им создан универсальный метод получения нанопроволок, были выращены уникальные по своему качеству нанопроволоки из многих металлов и исследованы их свойства.

Гордона Е.Б., как учёного, отличает уникальное сочетание хорошей теоретической подготовки, умения проведения широкого спектра экспериментальных исследований и большого опыта работы собственными руками. Он глубоко знает особенности работы в западных научных центрах и международное научное сообщество.

1) Евгений Борисович не был избран в состав Российской академии наук. Ещё один выпускник МФТИ, мой сокурсник Владилен Степанович Летохов (1939–2009), не был избран в члены Академии. Между тем по данным Web of Science Летохов был самым цитируемым российским учёным в 1973–1988 гг., а в 1997 г. он не попал в число лауреатов Нобелевской премии за лазерное охлаждение атомов, хотя именно он и его сотрудники впервые разработали теорию и выполнили эксперимент (см. Физик В.С. Летохов – жизнь в науке. М: Физматлит, 2012. *Прим. ред.*).



Гордон Е.Б. проводит активную научно-организационную работу. Он является членом Учёного совета ИПХФ РАН, членом двух диссертационных советов и Экспертного совета ВАК по физике, входит в оргкомитеты Международных конференций «Криокристаллы и квантовые кристаллы» и «Низкотемпературная химия», является членом панели экспертов Национальных научных фондов NSF (США) и CSFGACR (Чехия). Под его руководством защищено более 20 диссертаций, а с 1987 г. он является профессором МФТИ.



Достижения Е.Б. Гордона в авторском изложении

(презентация 2016 года)

I. Первым в мире применил квантовые генераторы в исследованиях химических реакций (водородный мазер, с 1965 г.).

Идея – метить атом водорода его сверхтонким состоянием, не играющим никакой роли в химическом связывании, и наблюдать за ним в процессе реакции.

Результаты:

1) Обнаружил промежуточные комплексы в химических реакциях и измерил их времена жизни ($\approx 10^{-11}$ сек) – за много лет до Зевейла¹⁾ [1];

2) Изучил модельную реакцию $H + H_2 \rightarrow H_2 + H$ и её изотопные аналоги, исследовал влияние на её скорость колебательного возбуждения (основа лазерной химии);

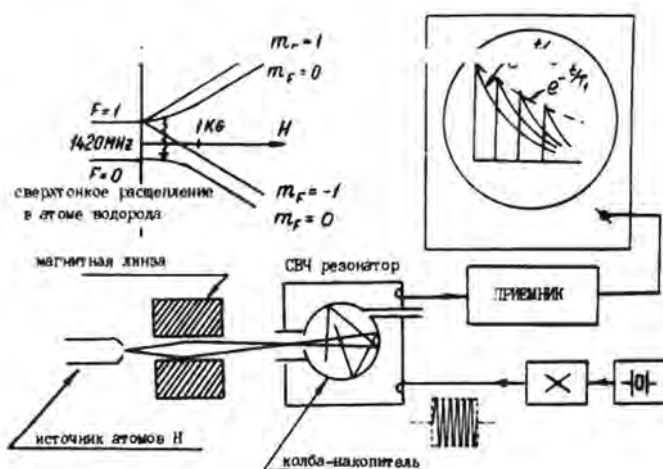
3) Измерил точные значения констант скорости многих реакций атомов водорода.

Объяснения на слайдах:

Водородный мазер - релаксационный метод

90°-ный импульс, $T_1^{-1} = k_{\text{хим}} n$; T_1/T_2 – характеристика процесса

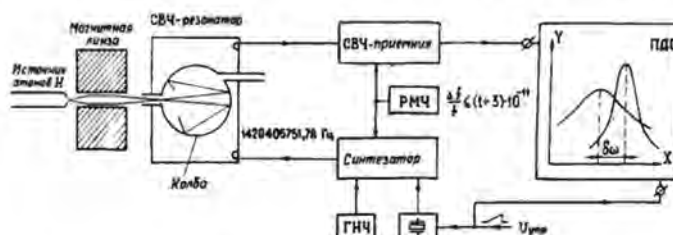
Реакции в газе или на поверхности



1) А.Н. Zewail (1946–2016), Нобелевский лауреат 1999 г. за работы по фемтохимии.

Водородный мазер - частотный метод

Измеряются сдвиг и уширение очень узкой мазерной линии



Возможность измерения времени жизни промежуточного комплекса в обратимых реакциях атома Н

Частота СТ перехода в свободном атоме – 1.42 ГГц, а в химически связанном состоянии раз в 20 ниже, поэтому за время пребывания атома в составе промежуточного комплекса возникает задержка фазы на $\approx \omega t$. Эффект «химических» столкновений суммируется, приводя аномально большому отрицательному сдвигу частоты.

Главные результаты

о работе [1]: Е.Б.Гордон и др., *Chem.Phys.* 35, p. 79 (1978)

The direct observation of such long-lived complexes by spectroscopic means certainly represents an important challenge related to the topic of this paper. It is a problem that has been addressed in an ingenious fashion by Gordon and co-workers¹⁰ for H-atom complexes (section II.B).

Emission from Molecules and Reaction Intermediates in the Process of Falling Apart

H.-J. Foth, J. C. Polanyi,* and H. H. Telle

Department of Chemistry, University of Toronto, Toronto, Canada M5S 1A1 (Received: September 2, 1982)

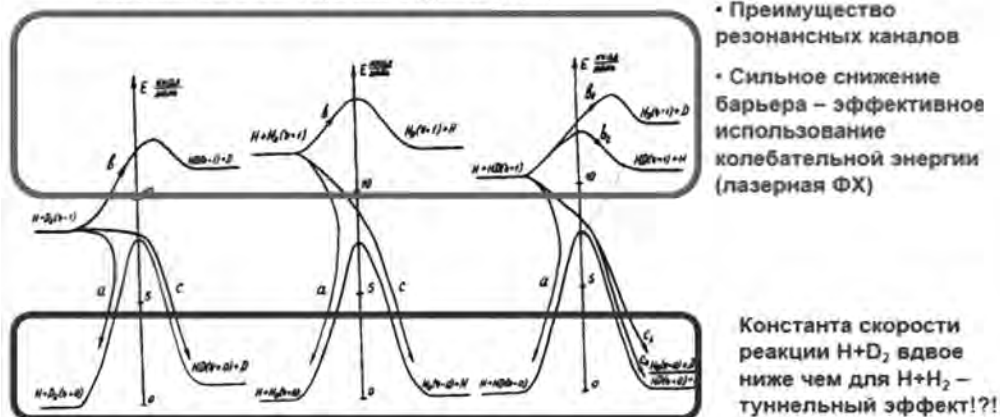
Джон Чарльз Поляни – Нобелевская премия по химии 1986 года «за внесенный вклад в развитие исследований динамики элементарных химических процессов», иностранный член ОХНМ РАН



Главные результаты

Измерение констант скоростей реакций обмена между атомом и молекулой изотопов водорода (в основном и колебательно-возбужденном состояниях)

[2] Е.Б.Гордон, Б.И.Иванов, А.П.Перминов, В.Е.Балалаев, А.Н.Пономарёв, В.В.Филатов. *Chem. Phys. Lett.* 58, p. 425 (1978)



[3] Е.Б.Гордон, Б.И.Иванов, А.П.Перминов, Э.С.Медведев, А.Н.Пономарёв, В.Л.Тальрозе. *Chemical Physics* 8 (1,2) p.147 (1975)

II. Первым в мире ввёл химически активные атомы внутрь сверхтекучего гелия (с 1974 г.).

Идея – получить High Energy Dense Material и уникальные химические соединения.

Результаты:

1) Получил рекордно большие концентрации стабилизированных атомов;

2) Наблюдал тепловой взрыв при нагреве конденсата в момент перехода жидкого гелия из сверхтекучего в нормальное состояние;

3) Впервые наблюдал туннельное протекание химической реакции (на примере реакции между атомом и молекулой изотопов водорода) – чувствительность реакции к колебательному кванту молекулы-продукта.

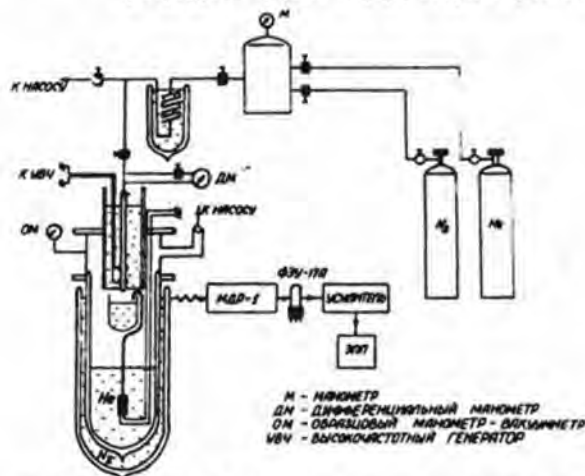
В 1983 г. – сразу три аналогичных работы – наша первая!!!

Объяснения на слайдах:



Б. Для отдела В.Л. Тальрозе – Накопление Свободных и Конденсированных Радикалов и Ионов

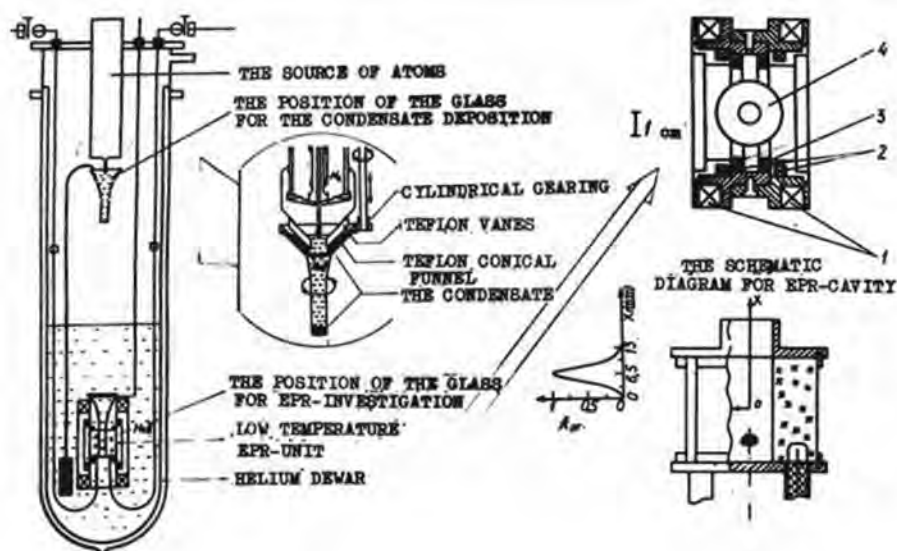
Идея – откачать пары жидкого гелия до нескольких мбар ($T=1.5\text{K}$) и ввести атомы из разрядной трубки внутрь сверхтекучего гелия.



Содержащая атомы узкая струя, упирающаяся в поверхность сверхтекучего гелия (лунка)

[4] Е.Б.Гордон, Л.П.Межов-Деглин, О.Ф.Пугачёв. Письма в ЖЭТФ, 19 (2) с.103 (1974)

Метод Электронного Парамагнитного Резонанса внутри сверхтекучего гелия (1981 г.) Для изучения туннельных химических реакций



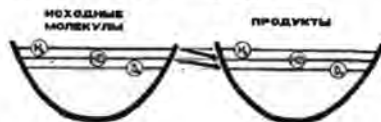
Главные результаты

Первое обнаружение туннельного протекания химической реакции

РЕАКЦИИ ОБМЕНА В СИСТЕМЕ



1. $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$
2. $\text{H} + \text{D}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{D}$
3. $\text{H} + \text{HD} \rightarrow \text{HD} + \text{H}$
4. $\text{H} + \text{HD} \rightarrow \text{H}_2 + \text{D}$
5. $\text{D} + \text{D}_2 \rightarrow \text{D}_2 + \text{D}$
6. $\text{D} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{H}$
7. $\text{D} + \text{HD} \rightarrow \text{D}_2 + \text{H}$
8. $\text{D} + \text{HD} \rightarrow \text{HD} + \text{D}$



В отличие от надбарьерной, туннельная реакция должна быть крайне чувствительна к энергии нулевых колебаний молекулы-продукта.

Все изотопные реакции идут по одной и той же поверхности потенциальной энергии.

Если обменная реакция - симметрична или приводит к образованию более тяжелой молекулы (и, соответственно, более легкого атома), то она - происходит; в противном случае - нет.

При очень низких температурах в H/D смеси атомы D должны превращаться в атомы H !!!!

[5] Е.Б. Гордон, А.А.Пельменев, О.Ф.Пугачев, В.В.Хмеленко. Письма в ЖЭТФ 37(5) с.237 (1983)

• Через два месяца - похожие выводы в экспериментах по радиационному облучению кристаллов водорода – независимо, но позже

H. Tsuruta, T. Miyazaki, K. Fueki, and N. Azuma. J. Phys. Chem., 87, p. (1983)

• В конце года - пленки водорода - тот же вывод - зависимо и позже

А.В. Ивлиев, А.С. Исковских, И.И. Лукашевич, В.В. Складчиков, В.В. Сураев, В.В. Филиппов, Н.И. Филиппов, В.А. Швецов. Письма в ЖЭТФ 38(7) с.317 (1983)

Приоритет нашей работы и обсуждение ее значения – подробно в лекции Д.М. Ли на Симпозиуме Нобелевских лауреатов, Стокгольм 2002

Physica Scripta T102 p.118 (2002); PRL 89 p. 175301 (2002)



III. Создал ряд химических и газовых лазеров, основанных на новых принципах.

1) Импульсный химический H_2/F_2 лазер на 8 кДж; в 1972 г. – самый мощный в мире.

2) Первый $\text{H}_2 + \text{ClF}$ – химический лазер, одновременная генерация на HF и HCl , самый мощный HCl -лазер (1997 г.).

3) Первый и единственный химический лазер на разветвлённо-цепной реакции $\text{CS}_2 + \text{O}_2$ (1980 г.).

4) Фотодиссоциативные и химические лазеры на переходах тонкой структуры атомов галогенов: иода, брома и хлора (1982 г.; на атомах Cl генерация получена впервые).

5) Холодные атомные электроразрядные лазеры на наноклстерах металлов (золото, медь, марганец, 1979 г.) – обычно работают при температурах выше 1000°C .

IV. Поставил и решил вопрос о максимальных температурах, достижимых в газовых химических реакциях.

1) Ответ: 6300 К, продуктами должны быть только CO и N_2 (1980 г.);

2) На реакции C_2N_2 с O_2 , где может быть достигнута температура 5600 К, создана химическая лампа¹⁾, накачивающая многие твердотельные лазеры.

3) Задолго до «сверхадиабатичности» Г.Б. Манелиса предложена и реализована рекуперация для повышения адиабатической температуры сгорания продуктов – предварительный нагрев ~ 200 К даёт прибавку ~ 300 К в конечной температуре.

Объяснения на слайде:

1) См. статью Б.М. Смирнова «Процессы в лампе Гордона».



Д. О максимальной температуре, достижимой в химических реакциях,

[8] Е.Б.Гордон, М.С.Дроздов, С.И.Светличный, В.Л.Тальрозе, Ю.Б.Шекк. Физика горения и взрыва. 16 (2), с. 66 (1980)

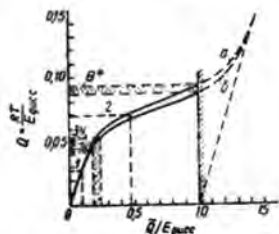
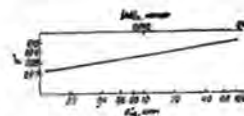


Рис. 2. Зависимость T^* от $[AB]_0$ (или начального давления негорючего продукта AB P_{AB}^0), рассчитанная по формулам (5) и (6) при $K_0^* = 2 \cdot 10^4$ моль/л ($V = \text{см}^3$)



Возможно решение в общем виде – безразмерная температура от безразмерного теплового эффекта реакции.

Наивысшая температура в замкнутом объеме = 6300 К (продукты сгорания CO и N₂).

В реакции C₂N₂ с O₂ может быть достигнута температура 5600 К (+ рекуперация).

В развитие этих работ были созданы высокоэффективные лазеры с накачкой излучением взрыва смесей дициана с кислородом, т.н. химико-физические лазеры (1980).

V. Предложен промышленный метод переработки отработанного UF₆ в нелетучие продукты (необходимая производительность 1 тонна в час).

Идея:

1) Осуществить последовательную «обдирку» гексафторида урана атомами водорода.

2) В качестве химического генератора атомов водорода использовать уже созданную в СССР установку Непрерывного Химического Лазера (КБ «Энергомаш»).

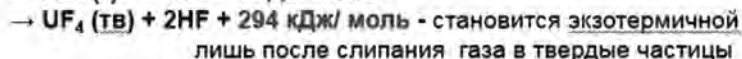
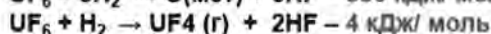
3) Держать с помощью инертного газа температуру ниже 1400 К для того, чтобы происходила конденсация тетрафторида урана в твердые частицы.

Объяснения на слайдах:

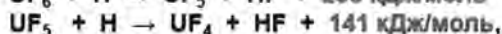
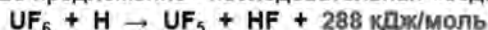


Г. Безводная переработка отработанного UF_6 в нелетучие продукты (необходимая производительность 1 тонна в час)

Гексафторид - очень прочная молекула, поэтому предлагали
Сжигание в водороде



Наше предложение - последовательная «обдирка» UF_6 атомами Н



атомы, получают в химическом генераторе атомного водорода, каким является Непрерывный Химический Лазер (НПО «Энергия»)

Е.Б. Гордон, Ю.А. Колесников, А.Г.Чернов. Патент РФ на изобретение № 2204529 от 20.05.2003.

[7] Е.Б. Гордон, В.А. Дубовицкий, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, Ю.А. Колесников. Кинетика и катализ, т. 47(1), с. 151 (2006)

Схема реактора восстановления UF_6 атомами Н (аналог НХЛ)



ТРИНИТИ, НПО «Энергия», ВНИИХТ и НПО «Астрофизика» разработали совместный проект для создания опытно-конструкторской установки на Ангарском заводе по переработке. Осенью 2016 г. проект будет рассмотрен в Совете по инновациям Росатома с целью открытия финансирования¹⁾.

1) Как позже рассказал мне Евгений Борисович, проект не был поддержан – была куплена французская технология за 20 млн долл. Однако её применение требовало дополнительной утилизации промежуточного продукта, технология которой во Франции хорошо отработана, а у нас нет. На момент нашей беседы Евгений Борисович по просьбе «Росатома» занимался расчётами для решения этой проблемы (примеч. ред.).

VI. Обнаружено явление катализа процесса коагуляции примесей в сверхтекучем гелии квантованными вихрями (с 2009 г.) – ультрабыстрого процесса, связанного с концентрированием любых наночастиц в сердцевине квазиодномерных вихрей, продуктом которого являются ультратонкие нити.

Результаты:

1) Предложен и реализован универсальный метод синтеза тонких нанопроволок при лазерной абляции погруженных в сверхтекучий гелий металлических мишеней;

2) Выращены и исследованы нанопроволоки из более чем 30 металлов и сплавов;

3) Выявлены и частично реализованы перспективы использования нанопроволок в химии, физике и нанoeлектронике.

В. Последние работы (2009–2016).

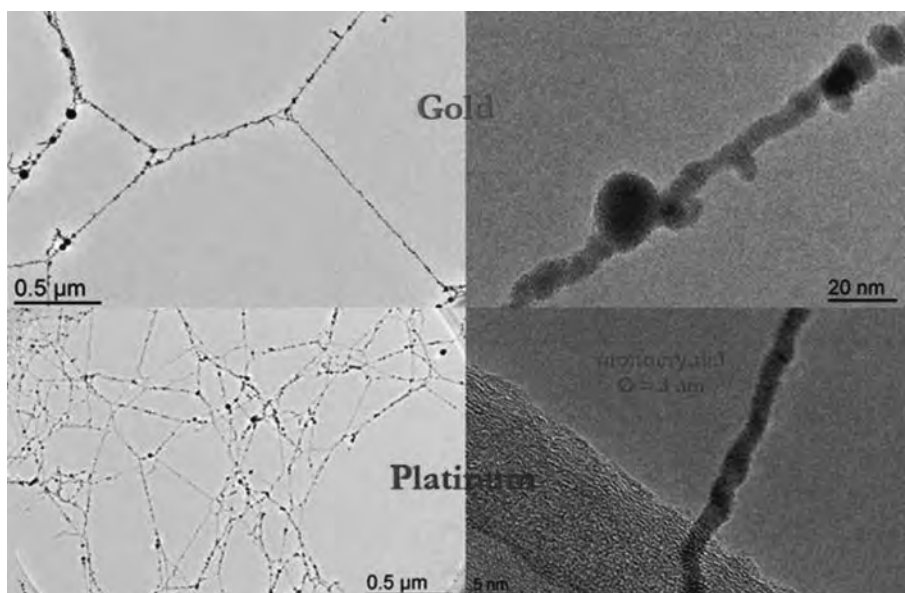
Катализ процесса коагуляции примесей в сверхтекучем гелии квантованными вихрями

Эффект: обнаружен сверхбыстрый процесс коагуляции любых введенных в сверхтекучий гелий частиц, основанный на их концентрировании в 1D-квантованных вихрях (которые играют роль катализатора).

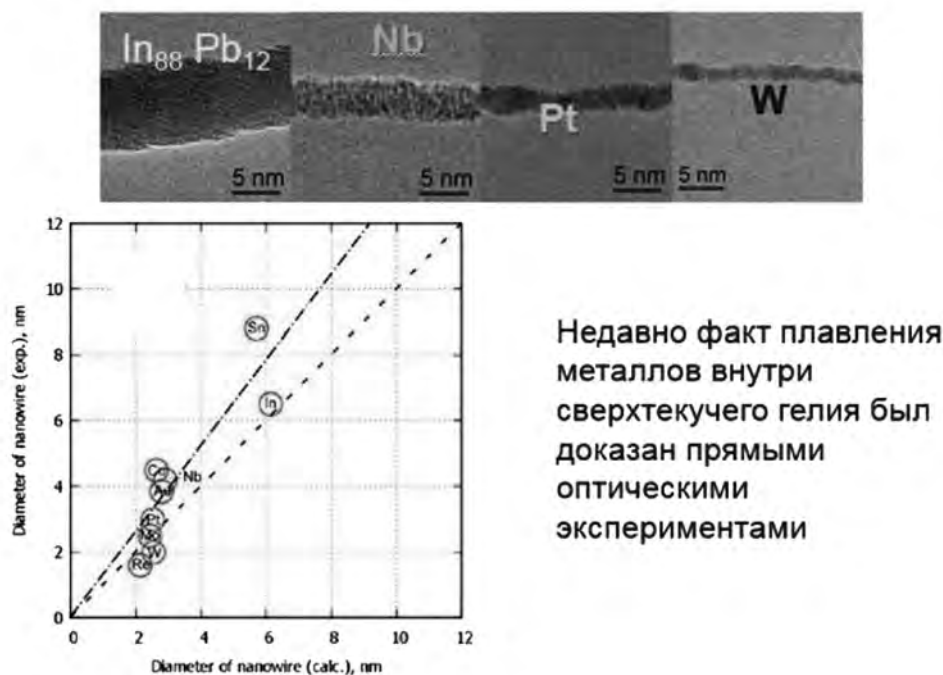
Идея: использовать это явление для создания универсального метода производства высококачественных ультратонких нанопроволок для нужд физики, химии и нанотехнологии.

1. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, and I.I. Khodos, Phys. Chem. Chem. Phys. 16, 25229 (2014).

Типичные структура и морфология нанопроволок, образующихся при абляции металлов в сверхтекучем гелии:



Сравнение диаметров экспериментально полученных нанопроволок с предсказаниями модели, основанной на плавлении (!!!) нанокластеров металлов при их коагуляции внутри сверхтекучего гелия:



Перспективы

Нанокатализ – нанопаутины из Au, Pt, Pd и Re успешно использованы в качестве катализаторов;

– управление каталитической активностью электрическим напряжением (идут работы).

Квантовые приборы – кубиты, СКВИДы, явление квантового проскальзывания фазы в ниобиевых нанопроволоках уже обнаружено [...].

Фабрика нанопроводников – получены, исследованы и переданы в научные группы нанопроволоки из более чем 30 металлов (на заказ).



Eugene Borisovich Gordon (1940–2019)

Eugene Gordon, an internationally known low temperature chemist and physicist, died on January 15, 2019 following complications after a heart attack. He was the head of the Quantum Systems Laboratory in the Institute of Energetic Problems of Chemical Physics of RAS (Russian Academy of Sciences) from 1977 till 2002. From 2002 until 2019, he was a principal scientist in the Institute of Problems of Chemical Physics of RAS. He was also full professor in the Moscow Institute for Physics and Technology.

Born in Kiev on September 8, 1940, he moved to Moscow in 1959 to study at the Moscow Institute for Physics and Technology where he graduated in 1965. In 1969, Gordon obtained his Ph.D. under V.L. Tal'roze in the world famous RAS Institute of Chemical Physics, which at the time was directed by the 1956 Noble Prize Winner in Chemistry Academician N.N. Semyonov.

In his Ph.D. research, he developed a new method to measure the rates of the chemical reactions by observing the relaxation times of the hyperfine levels of H atoms in a hydrogen maser [1]. His results provided the first evidence for a short living intermediate complex. Then followed many laser related chemical reaction studies. In 1974 he published a ground breaking paper with L.P. Mezhov-Deglin and O.F. Pugachev [2] on the stabilization of free radicals in superfluid helium, which laid the foundation for much of his research in the following years up to the present. Previously there had been great interest in stabilizing at low temperatures highly reactive radicals as a rocket fuel. In their 1974 article Gordon et al. were the first to stabilize an N atom radical in superfluid helium and achieve much higher concentrations than in the earlier work. Later they discovered that atoms and molecules injected into superfluid helium form a unique soft gel-like material. Subsequent studies concentrated on analyzing the luminescence and structure of helium stabilized gel. Presently this is still an active area of research carried out in Turku, Finland; College Station, Texas (David Lee's Lab) and in Chernogolovka, Russia.

In the following years, he brought this new method to many low temperature laboratories at Princeton, Oak Ridge, Leiden, and to Riken, Kyoto, and Tokyo in Japan. In 2010 in one of these visits at the Laboratory of Anton Weis in Fribourg, Switzerland, the formation of long-thin high aspect ratio 5–8 nanometer metal wires were discovered to be self-organized on quantum vortices inside superfluid helium. Since then his group has explored the creation mechanisms and the properties of nanometer wires of more than 14 metals and alloys. His unique apparatus enabled his group to also measure for the first time the superconductivity of free-standing nanometer wires. In recent years he opened up yet another new



fascinating research area: the catalysis of oxidation reactions by prefabricated nanometer spheres and nanowires.

Eugene Gordon was an insightful scientist and a skilled experimentalist who generously shared his extensive experience in low temperature chemistry with other colleagues, such as our own group in Göttingen. He is missed not only by his wife Dilya Gordon and his two sons, but also by the low temperature community. We have lost a loyal colleague and an inspiring scientist.

Göttingen, Germany, 5.02.2019

References (*added by Editor*)

1. E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, E.S. Medvedev, A.N. Ponomarev, V.L. Talroze, Investigation of chemical reactions $H+H_2$ and $H+D_2$ by a hydrogen maser, *Chemical Physics* 8 (1975) 147–157. doi: 10.1016/0301-0104(75)80101-7.
2. E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin, O.F. Pugachev, Stabilization of nitrogen atoms in superfluid helium, *Jetp Letters* 19 (1974) 63–65.

Ян Питер Тоеннис

(перевод Д.А. Гордон)

Евгений Борисович Гордон (1940–2019)

Евгений Гордон, всемирно известный учёный в области химии и физики низких температур, скончался 15 января 2019 г. вследствие осложнений после инфаркта. Он возглавлял лабораторию квантовых систем в Институте энергетических проблем химической физики РАН (Российской академии наук) с 1977¹⁾ по 2002 г., с 2002 по 2019 г. был главным научным сотрудником Института проблем химической физики РАН, а также был профессором Московского физико-технического института.

Евгений родился 8 сентября 1940 года в г. Киеве. В 1959 г. он переехал в Москву для учёбы в Московском физико-техническом институте, который окончил в 1965 г. В 1969 г. под руководством В.Л. Тальрозе защитил кандидатскую диссертацию. Работа была сделана во всемирно известном Институте химической физики АН СССР, директором которого в то время был Нобелевский лауреат 1956 г. по химии академик Н.Н. Семёнов.

В кандидатской диссертации Евгений Борисович разработал новый метод измерения скорости химической реакции, основанный на наблюдении

1) С 1977 по 1987 лаборатория входила в отел В.Л. Тальрозе в Отделении Института химической физики АН СССР, в 1987 г. отдел выделился в самостоятельный институт.



времен релаксации сверхтонких уровней атомов Н в водородном лазере. Полученные им результаты были первым в мире доказательством существования короткоживущих (10^{-11} сек) промежуточных комплексов. После этих работ последовали многочисленные исследования химических реакций, имеющих отношение к лазерам.

В 1974 г. совместно с Л.П. Межовым-Деглиным и О.Ф. Пугачёвым была опубликована ошеломляющая по результатам работа по стабилизации свободных радикалов в сверхтекучем гелии, которая послужила основой для его исследований в последующие годы и по настоящее время. Раньше был большой интерес к стабилизации при низких температурах высокореактивных радикалов для использования в качестве ракетного топлива. В работе 1974 г. Гордон и др. были первыми, кто стабилизировал радикалы атомов Н в сверхтекучем гелии и достиг концентраций, много выше достигнутых в предыдущих работах. Позже они обнаружили, что молекулы и атомы, введенные в сверхтекучий гелий, образуют уникальный мягкий, гель-образный материал.

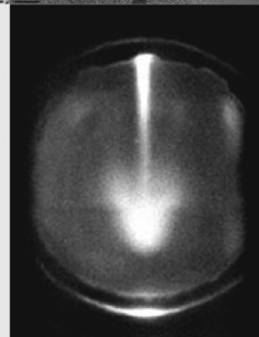
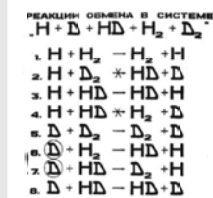
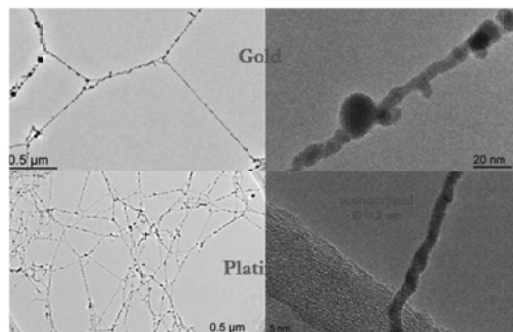
Следующие работы были посвящены анализу люминесценции и структуры гелей, стабилизированных гелием. Этими исследованиями до сих пор активно занимаются в Турку (Финляндия), College Station, Техас (лаб. Нобелевского лауреата Д. Ли) и в Черноголовке (Россия). В последующие годы он внедрил этот новый метод во многих лабораториях мира, занимающихся низкотемпературными исследованиями (Принстон, Оэк Ридж, Лейден; RIKEN, Киото и Токио в Японии). В 2009 году в один из визитов в лабораторию Антуана Вайса в швейцарском Фрайбурге было открыто образование длинных, диаметром 5–8 нм, металлических проволочек, самоорганизующихся в квантовых вихрях в сверхтекучем гелии. С тех пор его группа в Черноголовке исследовала механизмы образования и свойства нанопроволок из более чем 14 металлов и сплавов (в действительности более 30, *примеч. ред.*). Его уникальная установка позволила его группе впервые померять сверхпроводимость свободных нанопроволочек. В последние годы он открыл новую сферу деятельности: катализ реакций окисления полученными его методом наноразмерными сферами и нанопроволоками.

Евгений Гордон был проницательным учёным и искусным экспериментатором, который щедро делился своим богатым опытом в исследованиях низкотемпературной химии с коллегами, в частности с нашей группой в Гёттингене. Его будет не хватать не только его жене Диле, двум его сыновьям, но и всему низкотемпературному сообществу. Мы потеряли не только доброжелательного коллегу, но и вдохновенного учёного.

Гёттинген, Германия, 5.02.2019



Ученый



*В.Е. Фортков***Воспоминания о Жене**

Мне приятно вспоминать и писать о Евгении Борисовиче Гордоне, Жене, и как об учёном, и как о друге, и, наконец, потому, что мы оба – выпускники Физтеха.

Женя старше меня на 6 лет. Из-за потери двух лет после окончания школы (его не брали в Киевский университет) жизнь в науке у него началась не на 6, а на 4 года раньше моей. Когда я пришёл работать в отдел экстремального состояния вещества в Черноголовском филиале Института химической физики АН СССР, его имя было уже на слуху. О нём говорили, как о молодом, талантливом учёном. Кандидатская диссертация Жени была посвящена исследованию элементарных процессов в химических реакциях с применением радиоспектроскопического прибора – квантового генератора на сверхтонком переходе атома водорода (мазера). Аналогов этой работы в мире не было. Были получены очень красивые результаты, важные для исследователей кинетики и механизма химических реакций.

Женя работал в отделе свободных радикалов, который возглавлял известный учёный и крупный организатор, декан факультета молекулярной и химической физики, на котором учился Женя, Виктор Львович Тальрозе. Отдел свободных радикалов в ИХФ АН СССР возник в результате большого интереса, возникшего в мире в конце 50-х годов к исследованию замороженных высокоактивных радикалов, которые могли быть использованы, как топливо в реактивных двигателях. В 1974 году Женя сделал новаторскую работу по стабилизации атомов азота в сверхтекучем гелии. Были достигнуты гораздо более высокие концентрации стабилизированных атомов по сравнению с полученными ранее. Эта методика, связанная с введением пучка инородных частиц (а в работе с атомными пучками Женя был мастером) в сверхтекучий гелий, применяется широко и лежит в основе многих современных исследований по низкотемпературной химии и физике.

Вскоре Тальрозе привлёк его к решению проблемы создания химических лазеров. Эксперименты, связанные с этими исследованиями, проводились в нашем корпусе, который принадлежал отделу экстремальных состояний вещества. В создании установки Женя сам принимал участие, двухлетняя работа слесарем до поступления на Физтех помогала ему в работе с металлом.

Было известно, что Женя – блестящий экспериментатор. Но при ближайшем знакомстве выяснялось, что он очень хорошо подкован и теоретически. Круг его научных интересов был чрезвычайно широк. Его широчайшая эрудиция, глубокие знания, интуиция большого учёного выделяли его, он пользовался большим авторитетом как у нас, так и за рубежом. Было у него ещё одно незаурядное качество – делать быстрые, безошибочные, прикидочные



оценки. Его мнение дорогого стоило и не раз помогало мне в оценке собственных и чужих результатов. Не раз я его просил посмотреть, оценить новые результаты, сходить на чей-нибудь доклад и поделиться своим впечатлением. Он, при всей своей занятости, никогда не отказывал, даже если что-нибудь конкретное не так его интересовало, а интересовало его многое.

Он был открыт обучению и не только в физике, но и в других областях науки, блестяще знал химию, которая часто не так интересна физтехам. При всей своей улыбочности и доброжелательности был очень требовательным к себе и другим в вопросах, касающихся научных результатов. Зная Женю как первоклассного специалиста, принципиального и порядочного человека, я неоднократно рекомендовал его в экспертные советы разных научных фондов и в экспертный совет ВАКа. Он был членом разных экспертных советов, председателем ГЭК, уделял внимание педагогической деятельности. Огорчённый ухудшением качества образования, на экзаменах, тем не менее, старался помочь студентам не банальным выставлением незаслуженно повышенной оценки, а пробуя понять, умеет ли студент мыслить, способен ли к обучению, и если да, то поддержать его.

В 1987 году отдел В.Л. Тальрозе выделился в самостоятельный институт, директором которого стал Виктор Львович. После ухода В.Л. Тальрозе с поста директора Женя решил вернуться в Институт химической физики, в наш отдел, где он продолжил свои низкотемпературные исследования. К этому времени относится открытие им метода получения нитевидных наноструктур в вихрях сверхтекучего гелия. Эта работа нашла широчайший отклик в мировом научном сообществе. Хотя тематика нашего отдела отличалась от тематики его исследований, перечисленные выше качества: широчайшая эрудиция, незаурядный интеллект, глубокие знания и богатый опыт делали его желанным слушателем, экспертом работ, докладываемых на наших семинарах и конкурсах.

Уход Жени – это большая потеря не только для российской, но и мировой науки. Для меня его потеря – это не только потеря классного учёного, но и друга. Он был не только незаурядным учёным, но и ярким, интересным человеком. Широко образованный, с молниеносной реакцией, всегда готовый к шутке, розыгрышу, острому словцу, знавший массу интересных баек и историй. С ним всегда было интересно! Память о таких людях не уходит!



Б.М. Смирнов

Процессы в лампе Гордона

Данная заметка посвящена лампе Гордона [1, 2], прибору, который преобразует электрическую энергию в жёсткое ультрафиолетовое излучение с эффективностью преобразования около 20%. Это свойство делает прибор перспективным для разных приложений, включая медицинские, несмотря на обилие экономичных источников света, вошедших в нашу жизнь в последние десятилетия. Основным элементом данного прибора является твёрдый ксенон, через который пропускается электрический ток. Поскольку работа данного прибора основана на прохождении электрического тока через твёрдый ксенон, далее рассмотрим процессы в конденсированном ксеноне, составляющие основу прибора.

Казалось бы, система атомов ксенона достаточно простая, поскольку атомы обладают замкнутой электронной оболочкой и при взаимодействии сохраняют свою индивидуальность. Это означает, что потенциал взаимодействия двух атомов относительно мал, а распределения электронов в системах взаимодействующих и свободных атомов близки. Тем не менее, характер взаимодействия электронов с атомами инертных газов, в том числе ксенона, имеет свою специфику, и на некоторых особенностях этого взаимодействия далее остановимся.

На рис.1 представлена зависимость подвижности электрона в газообразном ксеноне в зависимости от напряжённости электрического поля. Как видно, эта зависимость немонотонная, что связано с отрицательным значением длины рассеяния электрона на атоме ксенона. Зависимость дрейфовой скорости электрона в газообразном ксеноне от приведённой напряжённости электрического поля, представленная на рис.2, также специфична. Как видно, в широкой области напряжённостей электрического поля дрейфовая скорость электрона почти не изменяется.

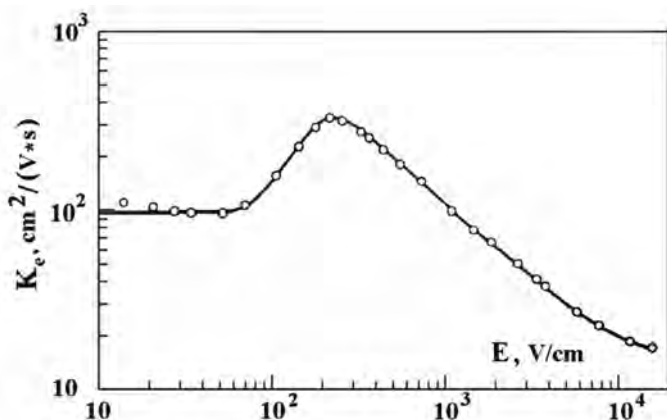


Рис.1. Подвижность электронов в разреженном ксеноне при температуре 328 K и плотности атомов ксенона $N = 3 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ [3]



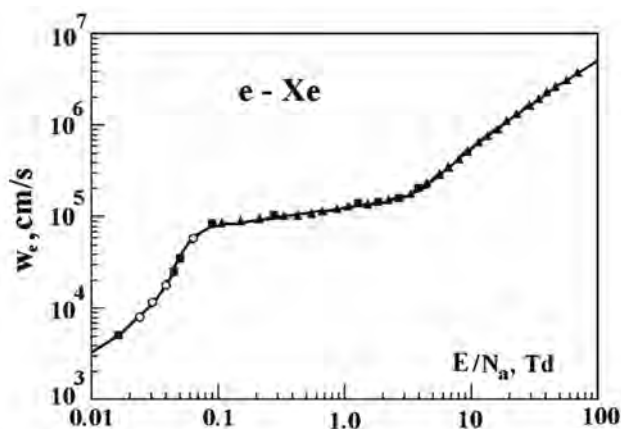


Рис.2. Дрейфовая скорость электрона в газообразном ксеноне [3–5]

Заполнение электронной оболочки в атоме ксенона определяет поведение электронов в системе атомов ксенона. В этом случае электрон не может проникнуть внутрь атома и в системе атомов ксенона электрон может находиться только в областях между атомами. Тем не менее, в плотном ксеноне зависимость подвижности электрона от плотности атомов ксенона носит резонансный характер, как это представлено на рис.3. Отметим, что такая зависимость свидетельствует о существовании автораспадного состояния электрона с окружающими атомами.

Высокая подвижность электрона поддерживается и в конденсированном инертном газе. В частности, подвижность медленного электрона в твёрдом ксеноне составляет $6000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ [7]. Рассматривая избыточные электроны в твёрдом ксеноне с позиций теории твёрдого тела, можно собрать избыточные электроны в новой энергетической полосе. Ясно, что эта полоса заполнена в малой степени. Тогда прохождение электрического тока через твёрдый ксенон будет определяться избыточными электронами

Можно ожидать, что такая система обладает проводящими свойствами. Действительно, сравним приведённую выше подвижность электронов в

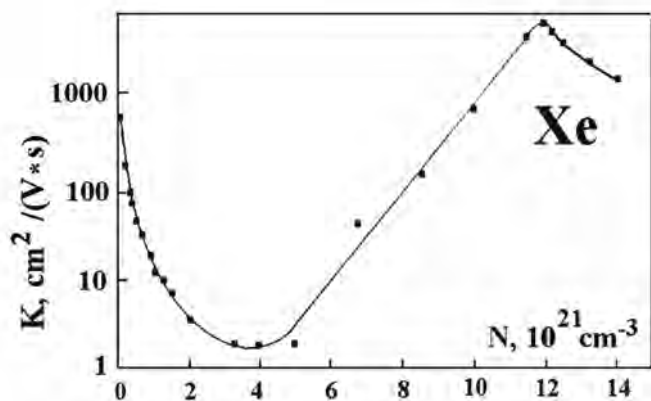


Рис.3. Зависимость подвижности электрона от плотности атомов в ксеноне [6]



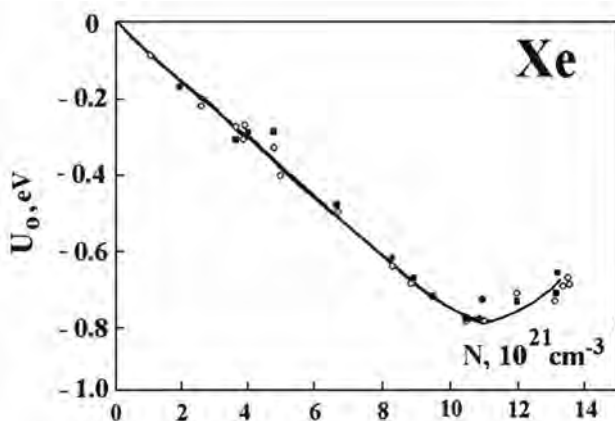
твёрдом ксеноне с её значениями в металлах. Эта величина имеет следующие значения для твёрдых металлов в единицах $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$: 58 для калия, 34 для меди, 53 для серебра и 38 для цезия. Как видно, твёрдый ксенон можно использовать в качестве проводящего элемента, как и металлы.

Отметим важную особенность дрейфа электронов в плотном или конденсированном инертном газе по сравнению с разреженным газом. В газе при высоких электрических полях происходит ионизация атомов, поскольку основную часть времени электроны не взаимодействуют с атомами и набирают достаточную энергию для ионизации. В конденсированном инертном газе это не происходит, поскольку электроны непрерывно взаимодействуют с атомами и тратят полученную от поля энергию на возбуждение атомов. По мере роста плотности атомов возбуждённые уровни энергии уширяются и смещаются, превращаясь в экситоны. Далее, часть этих возбуждений может распасться с излучением ультрафиолетовых фотонов. Тем самым, дрейф электронов в электрическом поле ведёт к преобразованию электрической энергии в энергию излучения. При этом существенно, что в результате взаимодействия с окружающими атомами в конденсированном инертном газе избыточный электрон втягивается внутрь него. Рисунок 4 даёт зависимость соответствующего потенциала от плотности атомов инертных газов в конденсированной системе.

На основе совокупности представленных фактов, относящихся к поведению электрона в конденсированном ксеноне, на который действует внешнее электрическое поле, может быть построена схема лампы Гордона, источника ультрафиолетового излучения, представленная на рис.5. В этой схеме электроны генерируются на фотокатоде и частично в газовом разряде. Кроме того, рис.6 даёт спектр излучения лампы Гордона.

Таким образом, проведённый анализ позволяет понять особенности дрейфа электронов в твёрдом ксеноне во внешнем электрическом поле, которые составляют основу лампы Гордона – источника ультрафиолетового излучения. Излучение, генерируемое этим прибором, может быть использовано для дезинфекции воздуха и медицинского оборудования, а также для об-

Рис.4. Электрический потенциал для избыточного электрона, находящегося внутри плотного ксенона, по отношению к вакууму [6]



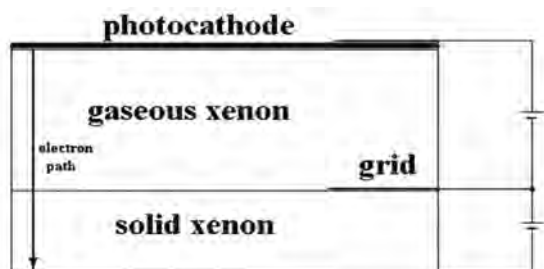


Рис.5. Схема лампы Гордона – преобразователя электрической энергии, передаваемой электронам, которые движутся в твёрдом ксеноне, в энергию ультрафиолетового излучения [1, 2]

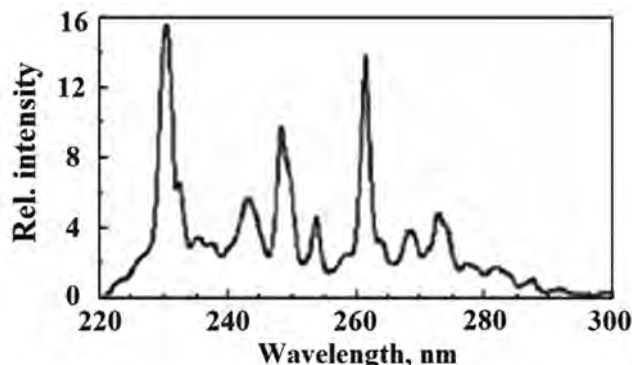


Рис.6. Относительная спектральная интенсивность излучения лампы Гордона [8]

работки ран и в других случаях. Хотя лампа Гордона характеризуется высокой эффективностью для трансформации электрической энергии в энергию ультрафиолетового излучения (до 20% [1, 2]), для поддержания ксенона в твёрдом состоянии необходимо поддерживать низкую температуру, что требует дополнительных энергетических затрат. Кроме того, в связи с выделением энергии при прохождении электрического тока наиболее подходящим режимом работы этой лампы является импульсный режим. Тем не менее, данный прибор является перспективным.

Литература

1. E.B. Gordon, G. Frossati, A. Usenko. *JETP* **96**, 846 (2003).
2. A. Usenko, G. Frossati, E.B. Gordon. *Phys. Rev. Lett.* **90**, 153201 (2003).
3. S.S.S. Huang, G.R. Freeman. *J. Chem. Phys.* **68**, 1355 (1978).
4. M. Susuki *et. al.* *J. Phys.* **25D**, 50 (1992).
5. J.L. Pack, R.E. Voshall, A.V. Phelps. *Phys. Rev.* **127**, 2084 (1962).
6. R. Redinger, U. Asaf, I.T. Steinberg. *Chem. Phys. Lett.* **90**, 287 (1982).
7. F.M. Jacobsen, N. Gee, G.R. Freeman. *Phys. Rev.* **34A**, 2329 (1986).
8. E.B. Gordon *et al.* *Fizika Nizrikh Temperatur* **34**, 1209 (2008).



А.В. Карабулин, М.И. Кулиш, **Метод Гордона для генерации**
В.И. Матюшенко, Б.М. Смирнов, **нитевидных наноструктур**
Э.Е. Сон, А.Г. Храпак

Проанализирован метод Гордона для генерации металлических нитевидных наноструктур в сверхтекучем гелии в результате лазерного испарения металлической поверхности, которая граничит со сверхтекучим гелием. Рассмотрена кластерная стадия этого процесса, когда пучок испаренных атомов металла превращается в газ металлических кластеров, так что последующая релаксация испаренного металла происходит в результате излучения металлических кластеров. Экспериментально эти процессы сравниваются в случае, когда пучок испаренных атомов вольфрама направляется в сверхтекучий гелий, в вакуум и в гелий при нормальных условиях. Поскольку процесс релаксации на этой стадии происходит при температуре в области нахождения кластеров, составляющей несколько тысяч градусов, излучательный механизм охлаждения кластеров имеет одинаковый характер в рассматриваемых случаях, однако, в случае сверхтекучего и нормального гелия заметный вклад в скорость охлаждения вносит тепловой перенос в гелий. Как следует из эксперимента, на следующей стадии релаксации испаренного металла в сверхтекучем гелии содержащая металл область разбивается на много малых областей, ограниченных отдельными вихрями. Каждый вихрь захватывает большое число кластеров, которые сваливаются на ось этого вихря и там объединяются. В результате образуются металлические нанонити, длина которых примерно на два порядка величины превышает их радиус. Эти нанонити являются специальным физическим объектом, имеющим как фундаментальное, так и прикладное значение.

1. Введение

Сверхтекучий гелий представляет собой деликатный физический объект со специфическими свойствами. Как было показано Ландау [1, 2, 3], в сверхтекучем гелии возможны два типа возбуждений, фононы и ротоны (или вихри), так что наличие этих типов возбуждений определяет сверхтекучесть гелия и приводит к целому ряду специфических свойств [4, 5, 6, 7, 8]. Одно из этих свойств – введенные в объем сверхтекучего гелия частицы (электроны, ионы, атомы, молекулы или кластеры) за счёт силы Бернулли притягиваются к вихрям [7, 9, 10].

Это свойство сверхтекучего гелия известно с середины прошлого века. Е.Б. Гордон с сотрудниками [11, 12, 13] предложили удобный метод введения вещества в сверхтекучий гелий путем испарения твердотельной мишени под действием лазерного импульса. Поскольку сверхтекучий гелий прозрачен для излучения, взаимодействие лазерного пучка с поверхностью проис-



ходит также, как и в вакууме [14]. В результате этого взаимодействия поверхность нагревается и испаряется. При этом существенно, что наносекундные длительности лазерного импульса включают во взаимодействие слой поверхности порядка нанометра. Поэтому метод Гордона с использованием наносекундного лазерного импульса позволяет наиболее эффективно использовать его для испарения поверхности, а не для её нагревания.

Испарённый материал мишени быстро конденсируется, причем выделяемая при этом энергия уносится сверхтекучим гелием, поскольку он обладает высокой теплопроводностью, которая выше теплопроводности металлов при комнатной температуре. При этом, согласно первым экспериментам, конденсированное вещество может быть в двух формах – в виде отдельных наночастиц сферической формы или нанопроволок диаметром порядка нанометра и длиной в сотни нанометров в зависимости от материала поверхности и условий эксперимента.

Таким образом, метод Гордона позволяет получить металлические нанонити, находящиеся на оси квантовых вихрей в сверхтекучем гелии. При нагревании гелий испаряется, что приводит к освобождению нанонитей, и они объединяются в наноструктуры либо в виде сетки или паутины, либо в виде пучка нанонитей. Некоторое понимание характера протекающих при этом процессов следует из анализа теплового излучения, которое сопровождает превращение атомного пучка в кластеры и далее в нанонити [15, 16, 17]. Последняя структура является предметом исследования данной работы.

2. Излучение испаренного металла на кластерной стадии

Облучение металлической поверхности сфокусированным лазерным пучком ведет к разным режимам процессов, протекающих при испарении этой поверхности. Испарение поверхности сопровождается образованием пучка атомов, так что из полумаксвелловской функции распределения атомов, отрывающихся от поверхности, формируется пучок атомов, т.е. коллектив атомов с максвелловским распределением по скоростям и определенной направленной скоростью. Связь между этими параметрами и параметрами испарения атомов следует из законов сохранения [18, 19, 20]. При определенных условиях последующее развитие этой системы в вакууме или буферном газе приводит к образованию наноструктур [21, 22, 23, 24].

Такой режим развития системы требует определенных условий. Длительность лазерного импульса должна быть ограничена, поскольку наряду с атомами при воздействии лазерного импульса на металлическую мишень образуется небольшое число электронов. Тогда последующее взаимодействие лазерного импульса с плазмой приводит к ее размножению, так что поглощенная энергия тратится не на испарение атомов, а на ионизацию, что заканчивается лазерным пробоем [25]. Кроме того, увеличение длительности импульса ведет к уменьшению эффективности испарения, поскольку вводимая



энергия тратится в большей степени на нагревание образца [26]. Оптимальная длительность импульса при размере облучаемой области порядка 100 мкм составляет порядка 1 нс, что выполняется при формировании нитевидных наноструктур методом Гордона [27, 28, 29, 30, 31].

Расширение пучка атомов при его распространении по мере удаления от поверхности сопровождается уменьшением температуры атомов, что ведет к конденсации атомов и образованию кластеров. В результате возникает эффективный канал охлаждения испаренного металла за счет излучения кластеров. В случаях, когда испарение металлической поверхности производится в сверхтекучем или нормальном гелии, наряду с расширением пучка и образованием кластеров охлаждение происходит в результате теплопроводности окружающего газа, если же лазерная абляция осуществляется в вакууме, последний канал охлаждения отсутствует. При этом отметим, что в области конденсации температура гелия достаточно велика, так что сверхтекучие свойства у гелия отсутствуют. Казалось бы тогда охлаждение пучка металлических атомов и далее пучка кластеров в сверхтекучем и нормальном гелии происходит одинаково. Однако, это справедливо лишь при качественном рассмотрении процессов, поскольку как свойства металла отличаются при комнатной и низкой температуре, так и действие окружающего газа на расширение пучка атомов и кластеров отличается при сильно различных температурах окружающего газа.

Далее проанализируем характер теплового излучения кластеров в процессе остывания испаренного металла. При этом сосредоточимся на случае, когда испаренным металлом является вольфрам, а излучение образующихся кластеров вольфрама происходит в вакууме или в гелии. При этом отметим, что рассматриваемый процесс излучения кластеров вольфрама имеет самостоятельное значение и используется в кластерных источниках света [32]. Действительно, рассматриваемый процесс образования кластеров отвечает непрерывному спектру, так что интенсивность излучения характеризуется температурой, отвечающих степеням свободы кластера, которые ответственны за это излучение. Очевидно, эта температура более или менее соответствует температуре газа, в котором находятся кластеры. Сравнивая кластерные источники света с лампами накаливания, где излучение создается находящимися в вакууме вольфрамовыми нитями, можно утверждать, что температура излучения в лампах накаливания ниже температуры плавления вольфрама. В случае кластерных источников света плавление кластеров не нарушает стабильность излучаемой системы, и поэтому эффективность кластерных источников света в несколько раз превышает эффективность ламп накаливания [32], в основе излучения которых лежит тот же принцип, что и в кластерных источниках света.

Далее мы сосредоточимся на излучении кластеров вольфрама как на физическом процессе, который ответственен за релаксацию горячих кластеров.



Этот процесс изучался отдельно в работах [33, 34], и далее будут использованы результаты этих исследований. В указанных работах введенный в вакуум кластер вольфрама нагревался лазерным пучком и далее измерялся спектр излучения этого кластера и его изменение со временем. Поскольку сигнал от отдельного кластера слабый, эта процедура повторялась много раз, что позволяло накапливать суммарный сигнал. Характерный результат такого измерения представлен на рис.1. При этом отметим, что характерное время релаксации кластера составляет порядка десятков микросекунд, что значительно меньше времени нагревания кластера. Поэтому процесс релаксации кластера может быть отделен от процесса его нагревания.

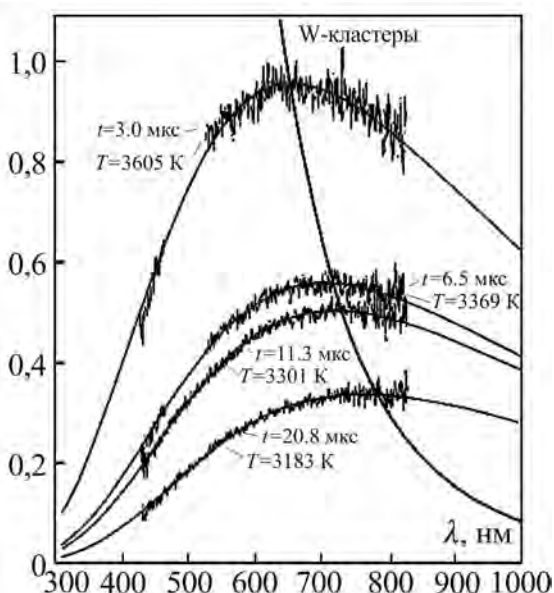


Рис.1. Спектр излучения кластеров вольфрама, возбуждаемых лазерным пучком, через указанное время после возбуждения [34].

Проведенная через максимумы этих спектров кривая характеризует относительное изменение интенсивности излучения кластеров со временем

Далее мы проанализируем характер релаксации горячего кластера за счет его излучения. Этот процесс одинаков при разных условиях релаксации испаренного металла. В качестве параметра этого процесса мы выберем сечение поглощения фотона данной частоты кластером σ_{abs} , который в силу закона Кирхгоффа можно использовать для обратного процесса – излучения кластера. Рассматривая кластер радиуса r как макроскопическую частицу, в случае, когда этот радиус мал по сравнению с длиной волны излучения λ имеем [35]

$$\sigma_{abs} \sim r^2 \cdot \frac{r}{\lambda}. \quad (2.1)$$

С другой стороны, рассматривая кластер как систему n связанных атомов, имеем [36]

$$\sigma_{abs} \sim n, \quad (2.2)$$

причем число атомов в кластере n и его радиус r связаны между собой через радиус Вигнера-Зейтса r_w [37, 38] посредством соотношения



$$n = \left(\frac{r}{r_W} \right). \quad (2.3)$$

Это соотношение справедливо, если радиус взаимодействия атомов мал по сравнению с радиусом кластера, так что прибавление новых атомов к кластеру в процессе его роста не изменяет плотность атомов в кластере. В случае вольфрама $r_W = 156 \text{ \AA}$ [36].

Проанализируем уравнение теплового баланса кластера, остывающего в результате его излучения. Это позволит связать скорость релаксации с сечением поглощения кластера σ_{abs} . Уравнение теплового баланса для кластера, который остывает в результате излучения, имеет вид

$$C_p \frac{dT}{dt} = - \int \hbar \omega i_\omega \sigma_{abs}(\omega) d\omega, \quad (2.4)$$

где C_p – теплоемкость кластера, i_ω – равновесный поток энергии, связанный с тепловым излучением, величина которого дается формулой [39, 40]

$$i_\omega = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^2 c^2} \cdot \left[\exp\left(\frac{\hbar \omega}{T}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (2.5)$$

Отсюда получим уравнение в виде

$$C_p \frac{dT}{dt} = -\kappa n \cdot \gamma T^5, \quad (2.6)$$

где $\kappa = \sigma_{abs}(\omega) \lambda / n$, λ – длина волны излучения, и $\gamma = 3,0 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/см}^3 \text{ К}^5$. Согласно результатам обработки указанных выше экспериментов [33, 34] имеем [41, 42]

$$\kappa = (5.0 \pm 0.7) \cdot 10^{-22} \text{ см}^3 \quad (2.7)$$

в области длин волн $\lambda = (0.8-0.9) \text{ мкм}$. Удобно использовать приближение Дюлонга-Пти [43], которое в рассматриваемых единицах имеет вид $C_p = 3n$. С учетом этого соотношения из решения уравнения (2.6) получим

$$t_2 - t_1 = \frac{3}{4\kappa\gamma} \cdot \left(\frac{1}{T_2^4} - \frac{1}{T_1^4} \right), \quad (2.8)$$

где t_1 и t_2 – соответствующие моменты времени, в которые температура кластера принимает значения соответственно T_1 и T_2 .

Представленный выше анализ основан на многократном спектроскопическом исследовании отдельного горячего кластера вольфрама в вакууме через определенное время после его возбуждения [33, 34]. В процессе излучения кластера его температура падает, и анализ данных эксперимента позво-



ляет определить скорость этого процесса. При испарении металла в сверхтекучем гелии в рассматриваемом методе Гордона генерации нанонитей этот процесс происходит на первых стадиях релаксации испаренного вольфрама, и он был исследован экспериментально [15, 16, 17] в рамках стандартных спектроскопических измерений [44, 45]. Для этой цели вольфрам испарялся в сверхтекучий гелий под действием на его поверхность импульсного неодимового Nd:LSB лазера со следующими характеристиками: $\lambda = 1.064$ мкм, $E = 0.1$ мДж, $T = 0.4$ нс. Фокусировка производилась линзой с фокусным расстоянием $f = 280$ мм. Излучение лазера вводилось в криостат через сапфировое окно перпендикулярно к поверхности испаряемого металла.

Исследуемое излучение, возникающее в процессе релаксации испаренного вольфрама, регистрировалось через второе оптическое окно, расположенное перпендикулярно первому. Регистрация излучения проводилась фотоумножителем с внутренним управляемым затвором (модель H11526-01-NN фирмы Hamamatsu), для обработки сигналов с ФЭУ использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS 7054. Для предохранения ФЭУ от действия рассеянного лазерного излучения открывающий сигнал на его затвор подавался с задержкой $\delta t = 280$ нс по отношению к лазерному импульсу. Для улучшения соотношения сигнал-шум запись на осциллографе проводилась в режиме усреднения по 128 импульсам. Осциллограф, лазер и фоточувствительный модуль управлялись генератором, который запускал схему регистрации с частотой 50 Гц. Использование набора из семи узкополосных (~ 10 нм) интерференционных светофильтров от 400 до 700 нм с шагом 50 нм (фирма Thorlabs) и эталонного источника сравнения (лампа накаливания SLS201L (Thorlabs) с заданной цветовой температурой $T = 2796$ К позволило провести количественные оценки температуры исследуемых процессов.

Отметим, что в рассматриваемом случае излучения малых по сравнению с длиной волны частиц мощность (или интенсивность) излучения изменяется с температурой T как $\sim T^5$ согласно формуле (2.6), что отличается от закона Стефана-Больцмана для излучения макроскопических частиц, где зависимость интенсивности излучения от температуры имеет вид $\sim T^4$. Соответственно, длина волны излучения $\lambda_{\max}$, при которой наблюдается максимум для парциального потока излучения (2.5) в случае макроскопических частиц в соответствии с законом Вина дается соотношением [46, 47]

$$\lambda_{\max} \cdot T = 0.29 \text{ см} \cdot \text{К}. \quad (2.9)$$

В случае излучения частиц, малых по сравнению с длиной волны, вместо закона Вина имеем следующую зависимость интенсивности излучения от температуры

$$\lambda_{\max} \cdot T = 0.24 \text{ см} \cdot \text{К}. \quad (2.10)$$



Это обстоятельство учитывается при обработке экспериментальных результатов, полученных на основе стандартных спектроскопических измерений [44, 45]. При этом отметим, что согласно проведенному анализу характер изменения времени релаксации от текущей температуры кластера не зависит от размера кластера. Кроме того, время остывания существенно увеличивается по мере уменьшения температуры кластера. Ниже мы используем эти результаты для анализа характера релаксации испаренного вольфрама при разных условиях.

3. Образование кластеров при лазерном испарении металла

Выше при анализе излучения испаренного вольфрама под действием лазерного пучка мы предполагали, что релаксация происходит в результате излучения металлических кластеров, которые быстро образуются при распространении пучка испаренных атомов. Теперь мы рассмотрим характер роста кластеров. В этом отношении вольфрам является удобной модельной системой, поскольку энергия связи атомов в нем максимальна для металлов. Поэтому кластеризация происходит при более высоких температурах, чем для других металлов, а интенсивность процесса излучения кластеров тем выше, чем выше температура, т.е. в вольфраме эти процессы гораздо эффективнее. Рассмотрим общий характер образования и роста кластеров при облучении поверхности металла лазерным лучом [48], который по своей природе аналогичен процессу кластеризации при прохождении газа или пара через сопло [49].

В этом случае пучок испаренных атомов, возникших под действием лазерного луча, распространяется в окружающее пространство и расширяется по мере удаления от поверхности. В силу адиабатического закона для пучка атомов его расширение сопровождается уменьшением температуры, так что при определенной температуре происходит конденсация испаренного металла и рост образованных кластеров. Оставив в стороне различные механизмы и режимы нуклеации, каждый из которых для конденсации атомного пара может быть проанализирован на уровне формул (например, [20]), мы представим более простой анализ. Именно, считая, что в рассмотренной области параметров давление насыщенного пара p_{sat} как функция температуры T аппроксимируется зависимостью

$$P_{sat} = p_0 \exp(-\epsilon / T), \quad (3.1)$$

с параметрами этой формулы [36, 50] $p_0 = 2.7 \cdot 10^7$ атм, $\epsilon_b = 8.59$ эВ, определим температуру, при которой давление насыщенного пара соответствует давлению свободных атомов вольфрама. Она соответствует температуре $T = 5830$ К при давлении атомного пара $p = 1$ атм (температура кипения вольфрама) и температуре $T = 6700$ К при давлении $p = 10$ атм. Поскольку далее мы имеем дело с температурами испаренного вольфрама



ниже 5000 К, можно ожидать, что основная часть испаренного металла при этих температурах превращается в кластеры. Грубая оценка на основе [20] показывает, что время превращения атомного пара в кластеры при этих условиях не превышает 1 мкс.

Эта оценка относится к превращению атомного пара в газ кластеров и основана на предположении, что процесс образования кластеров происходит в сильно пересыщенном паре, т.е. термодинамическое равновесие для испаренного металла отвечает нахождению атомов металла в связанном состоянии. Кроме того, предполагается, что выделяемая энергия при прилипании атомов к кластеру не влияет на процесс образования кластеров, т.е. выделяемая в этом процессе энергия быстро уносится за пределы системы. На самом деле этот процесс затягивается, и именно время уноса энергии за пределы испаренного металла является временем ее релаксации. Считая, что это время связано с излучением кластеров, определим его на основе уравнения (2.6) с использованием параметра (2.7) для интенсивности излучения.

В рассматриваемом режиме в соответствии с формулой (2.6) время τ , за которое энергия, выделяемая в результате образования связанного состояния атомов, излучается кластерами, составляет

$$\tau = \frac{3\varepsilon_b}{\kappa\gamma T^5}. \quad (3.2)$$

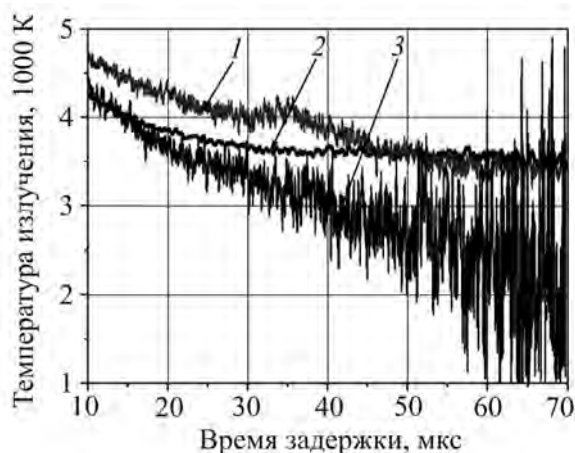
Используя ранее приведенные значения параметров, входящих в эту формулу, получим время релаксации $\tau \approx 9$ мкс, если процесс протекает при температуре кластеров $T = 5000$ К, а также $\tau \approx 30$ мкс для $T = 4500$ К, и $\tau \approx 100$ мкс, если $T = 4000$ К. Эти величины определяют область исследуемых времен релаксации.

Отметим, что в случае излучения кластеров удельная мощность γT^5 является аналогом формулы Стефана-Больцмана для излучения макроскопической поверхности, а параметр κ является аналогом сечения поглощения макроскопической частицы. При этом мы переносим данные рис. 1, относящиеся к длинам волн $\lambda = 0.8\text{--}0.9$ мкм, в область спектра видимого излучения, что ведет к дополнительной погрешности.

На рис. 2 приведена излучательная температура испаренного вольфрама в трех рассматриваемых средах. Как видно, на стадии испарения поверхности вольфрама лазерным пучком начальная температура излучения примерно одинакова, если процесс происходит в вакууме и в гелии при нормальных условиях, поскольку начальная температура поверхности в этих случаях одинакова. В случае, когда процесс испарения происходит в сверхтекучем гелии, температура нагревания испаренного металла выше, поскольку испарение поверхности вольфрама происходит при температуре, меньшей на два порядка, чем в двух предыдущих случаях. Далее, остывание в вакууме проис-



Рис.2. Температура излучения испаренного металла в процессе его релаксации в сверхтекучем гелии (1), в вакууме при комнатной температуре стенок (2) и в гелии при нормальных условиях (3)

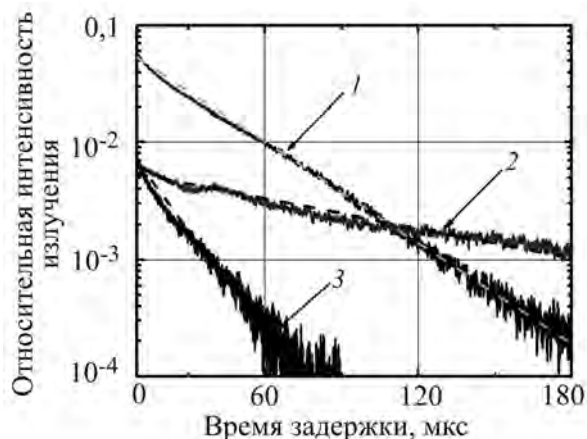


ходит медленнее, чем в других случаях, поскольку излучение кластеров является единственным каналом отвода энергии.

На рис.3 дается изменение интенсивности излучения I испаренного вольфрама в трех рассматриваемых средах. Отметим, что интенсивность излучения кластеров изменяется с температурой кластера T как $I \sim T^5$ в соответствии с формулой (2.8), если коэффициент серости кластера не зависит от температуры.

Отсюда следует, что изменение интенсивности излучения на порядок величины соответствует уменьшению температуры примерно на 60%, изменение интенсивности излучения на два порядка величины отвечает уменьшению температуры в 2.5 раза. Если начальная температура равна 5000 К, это отвечает конечной температуре соответственно 3200 К и 2000 К в этих случаях.

Рис.3. Изменение интенсивности излучения во времени в результате излучения кластеров вольфрама, образованных при испарении поверхности вольфрама лазерным импульсом. Релаксация кластеров происходит в сверхтекучем гелии (1), в вакууме при комнатной температуре стенок (2) и в гелии при нормальных условиях (3)



4. Конечная стадия релаксации кластеров при лазерном испарении металла

Одним из интересных свойств сверхтекучего гелия с точки зрения рассматриваемых процессов является захват примесных атомов и ионов вихрями сверхтекучей жидкости [9, 5, 7, 10]. Это свойство относится к холодным атомам, не нарушающим сверхтекучее свойство гелия. Для сохранения сверхтекучих свойств гелия при введении в него горячих атомов необходимо быстрое охлаждение области, где находятся эти атомы, что обеспечивается большой теплопроводностью сверхтекучего гелия. В результате получаем, что горячая область гелия, где находятся горячие атомы, окружена сверхтекучей областью. Атомы гелия свободно проникают в горячую область, т.е. на первой стадии процесса в горячей области находится смесь металлических атомов и атомов гелия. При этом на первой стадии процесса характерная энергия испаренных атомов металла на три порядка величины превышает предельную тепловую энергию атомов гелия, при которой сохраняются его сверхтекучие свойства.

В силу высокой (бесконечной в предельном случае) теплопроводности сверхтекучего гелия энергия, введенная в гелий за счет испаренного металла, выводится из нее на стенки в результате высокой теплопроводности сверхтекучего гелия. Этот процесс продолжается в процессе превращения металлических атомов в кластеры, поскольку энергия, выделяемая при образовании связанного состояния металлических атомов, переходит в тепло. В соответствии с общими принципами конденсации пересыщенного металлического пара на первой стадии этого процесса атомы превращаются в кластеры, и далее жидкие кластеры растут в результате коагуляции. Последний процесс подобен слиянию двух атомов при их контакте. При этом скорость процесса резко падает по мере роста кластеров, и время формирования кластеров оценивается порядка 1 мкс при размере кластеров порядка 1 нм.

Характер последующей эволюции рассматриваемой системы можно представить, исходя из конечных продуктов процесса релаксации испаренного вольфрама в нормальном и сверхтекучем гелии, которые представлены на рис.4. Отсюда следует, что в случае, когда испаренный металл находится в сверхтекучем гелии, на определенной стадии процесса нанометровые металлические кластеры за счет силы Бернулли притягиваются к вихрям. Поскольку отдельный вихрь характеризуется цилиндрической симметрией, кластеры собираются на его оси и объединяются в нить в соответствии со схемой, описанной в [27]. Поскольку в результате превращения кластеров в нить площадь поверхности металлической структуры сокращается почти вдвое, это ведет к выделению энергии, но гораздо меньшей, чем при образовании кластеров. Эта энергия уносится за счет высокой теплопроводности сверхтекучего гелия.



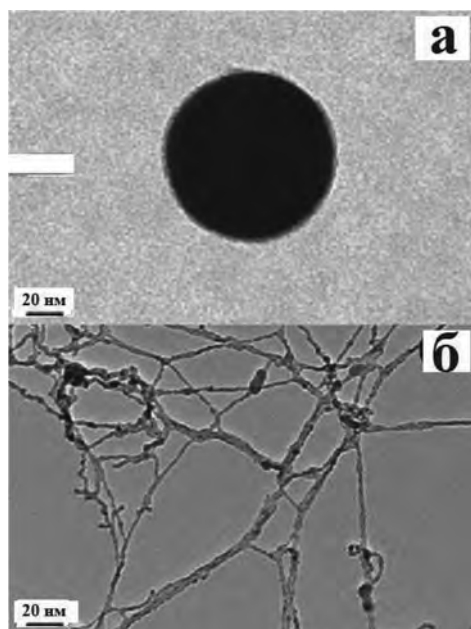


Рис.4. Структура продуктов испарения вольфрама при облучении его поверхности лазерным импульсом в гелии при нормальных условиях (а) и в сверхтекучем гелии (б)

Таким образом, вихрь, представляющий собой канал с металлическими кластерами, в конечном итоге создает анизотропную металлическую структуру в виде нити. В случае объединения кластеров в буферном газе на этой стадии образуется изотропная в среднем фрактальная структура – фрактальные агрегаты [51]. При последующей эволюции из них могут быть образованы соответствующие разреженные металлические структуры, элементом которых являются связанные между собой металлические нанокластеры [52]. Однако, металлические структуры, состоящие из нанонитей, можно получить только на основе метода Гордона.

5. Заключение

В данной работе проанализирована связанная с излучением релаксация паров вольфрама, образованных при испарении поверхности этого металла под

действием наносекундного лазерного импульса. Этот процесс релаксации связан с излучением кластеров вольфрама и изучается для трех сред, в которые впрыскивается испаренный вольфрам в виде атомного пучка, именно, для сверхтекучего гелия, вакуума и нормального гелия. Поскольку рассматриваемый процесс релаксации испаренного вольфрама происходит при высоких температурах, можно ожидать, что он протекает более или менее одинаково в этих средах с поправкой на условия (температуру и давление), при которых находится испаряемый вольфрам. Релаксация испаренного вольфрама на этой стадии процесса заканчивается образованием кластеров нанометровых размеров. При этом остывание кластеров в вакууме происходит только за счет излучения, а в сверхтекучем и нормальном гелии также и в результате теплопроводности атомов гелия, находящихся в области испаренного металла, и за счет теплопереноса в окружающей среде.

Однако, как следует из эксперимента, на следующей стадии релаксации, когда испаренный металл приходит в равновесие с окружающей средой, характер процесса разный в рассматриваемых средах. Особенно своеобразно этот процесс протекает в сверхтекучем гелии, где охлажденные кластеры вольфрама за счет гидродинамических сил притягиваются вихрями и концентрируются в ограниченной цилиндрической области на оси вихрей, где



происходит их объединение в нанонити. В результате метод Гордона позволяет получить новый физический объект – нанометровые нити диаметром в несколько нанометров и длиной в сотни нанометров. Такой сценарий невозможно построить из общих соображений – он следует из анализа эксперимента. Это подчеркивает ценность метода Гордона.

Литература

1. Л.Д. Ландау. ЖЭТФ 11, 592(1941).
2. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. *Статистическая физика*. т.2. (Москва, Наука, 1978).
3. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. *Гидродинамика*. (Москва, Наука, 1988) [англ. версия *Fluid Mechanics*. (Oxford, Butterworth, 2000)].
4. Р. Фейнман. *Статистическая механика*. (Москва, Мир, 1978).
5. R.J. Donnelly. *Quantized Vortices in Helium II*. (Cambr.Univ.Press, Cambridge, 1991).
6. R.J. Donnelly, C.F.Barenghi. *J. Phys. Chem. Ref. Data* **27**, 1254(1998).
7. J.P. Toennies, A.F.Vilesov. *Angew. Chem. Int. Ed.* **43**, 2622(2004).
8. A.G. Khrapak, S.Ya.Bronin. *Письма ЖЭТФ* **105**, 759(2017) [*JETP Lett.* 105, 797(2017)].
9. G.A. Williams, R.E.Packard. *Phys. Rev. Lett.* **33**, 280(1974).
10. N.G. Berloff, P.H.Roberts. *Phys. Rev.* **B 63**, 024510(2000).
11. Е.Б. Гордон и др. *Физ. Низк. Темп.* **36**, 740 (2010).
12. Е.Б. Гордон и др. *ЖЭТФ* **139**, 1209 (2011).
13. Е.В. Gordon e.a. *Chem. Phys. Lett.* **519–520**, 64(2012).
14. С.И. Анисимов, Я.А.Имас, Г.С.Романов, Ю.В.Ходыко *Действие излучения большой мощности на металлы*. (Москва, Наука, 1970).
15. Е.В. Gordon e.a. *J. Chem. Phys.* **121A**, 9185(2017).
16. Е.В. Gordon e.a. *Low Temp. Phys.* **43**, 1086(2017).
17. Е.В. Gordon e.a. *JQSRT* **222–223**, 180(2019).
18. С.Я. Бронин, В.П.Полищук. *ТВТ* **22**, 550(1984).
19. М.В. Брыкин, В.С.Воробьев, Б.П.Шелюхаев. *ТВТ* **25**, 468(1987).
20. В.М. Smirnov. *Nanoclusters and Microparticles in Gases and Vapors*. (Berlin, De Gruyter, 2012).
21. А.А. Лушников, А.В.Пахомов, Г.А.Черняева. *Докл. АН СССР* **292**, 86(1987).
22. А.А. Lushnikov, A.E.Negin, A.V.Pakhomov *Chem. Phys. Lett.* **175**, 138(1990).
23. А.А. Lushnikov e.a. *Sov. Phys. Uspekhi* **34**, 160(1991).
24. В.М. Smirnov. *Phys. Usp.* **34**, 711(1991).
25. В.С. Воробьев. *УФН* **163**, 51(1993); [*Phys. Usp.* 36 1129 (1993)].
26. В.М. Smirnov. *JETP* **123**, 709(2016).
27. Е.В. Gordon, R.Nishida, R.Nomura, Y.Okuda. *Письма ЖЭТФ* **85** 710(2007) [*JETP Lett.* **85** 581(2007)].
28. Е.В. Gordon, Y.Okuda. *Low Temp. Phys.* **35**, 209(2009).
29. Е.В. Gordon e.a. *J. Phys. Chem. Lett.* **5**, 1072(2014).
30. Е.Б. Гордон и др. *Химия Выс. Энерг.* **50**, 305(2016).
31. Е.Б. Гордон и др. *Теор. Эксп. Химия* **52**, 75(2016).
32. В. Weber, R. Scholl. *J. Appl. Phys.* **74**, 607(1993).
33. U. Frenzel, U.Kalmbach, D.Kreisle, E.Recknzel. *Surf. Rev. Lett.* **3**, 505(1996).
34. U. Frenzel, U.Hammer, H.Westje, D.Kreisle. *Zs. Phys.* **40D**, 108(1997).



35. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. (Москва, Наука, 1984)
36. В.М. Smirnov. *Clusters and Small Particles in Gases and Plasmas*. (New York, Springer, 1999).
37. E.P. Wigner, F.Seits. *Phys. Rev.* **46**, 509(1934).
38. E.P. Wigner. *Phys. Rev.* **46**, 1002(1934).
39. F. Reif. *Statistical and Thermal Physics*. (Boston, McGraw Hill, 1965).
40. Л.Д. Ландау, Е.М.Лифшиц. *Статистическая физика. т.1*. (Москва, Наука, 1976) [англ.версия : L.D. Landau, E.M.Lifshitz. *Statistical Physics, vol.1*. (Oxford, Pergamon Press, 1980)].
41. В.М. Smirnov, Н. Weidele. *JETP Lett.* **69**, 490(1999).
42. В.М. Smirnov, Н. Weidele. *JETP* **89**, 1030(1999).
43. А.Т. Petit, Р.Л. Dulong. *Annal. Chim. Phys.* **10**, 395(1819) (in French).
44. В.Н. Очкин. *Спектроскопия низкотемпературной плазмы*. (Москва, Физматлит, 2006).
45. V.N. Ochkin. *Spectroscopy of Low Temperature Plasma*. (Wiley, Weinheim, 2009).
46. W. Wien. *Wied. Ann. Phys. Chem.* **58**, 662(1896).
47. <https://en.wikipedia.org/wiki/Wien's-displacement-law>.
48. R. Smalley. *Laser Chem.* **2**, 167(1983).
49. O.F. Hagena. *Zs.Phys.* **4D**, 291(1987); **17D**, 157(1990); **20**, 425(1991).
50. *Handbook of Chemistry and Physics*, edition 86, ed.D.R.Lide (London, CRC Press, 2003–2004).
51. S.R. Forrest, T.A.Witten. *J. Phys.* **A12**, L109(1979).
52. Б.М. Смирнов. *УФН* **187**, 1329(2017).

Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»
Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка
Филиал Института энергетических проблем
химической физики РАН, Черноголовка
Объединенный институт высоких температур РАН

Теплофизика высоких
температур, Т. **59**, №2, 2021



Tomonari Wakabayashi

**Visit to Kyoto:
Experiments with solid helium**

Eugene Gordon in my memory

One day my supervisor, Prof. Tadamasa Shida, in the molecular spectroscopy laboratory in Kyoto University told me «*Friend* will come to stay in Kyoto» for a sabbatical. I got a bit strange feeling at the moment for I noticed that he seemed to stress the first word, pronouncing it like «Yu-ji-in», which I mistook literally meant as a *friend* in our language. Eugene was actually his old friend for years since they had met occasionally in the series of conferences on matrix isolation spectroscopy held in the U.S. and other places in Europe. After all the details arranged with great assistance of Prof. Takamasa Momose, Eugene arrived at our laboratory and stayed in Kyoto for a period of July 2002 – May 2003.

Eugene and I shared the office room of Prof. Momose and got closer to each other with conversations during the daytime. I noticed him soon a frank senior researcher, experienced widely in low temperature physics, engaged thoroughly in physical aspects of superfluid helium as well as some exotic phenomena of rare gas solids in particular. I was deeply impressed by a picture, which he showed me and explained for some details, of a bulk lamp of solid xenon brightly shining in purple due to a discharge current put through it for ionization to make it into solid plasma. As an experimentalist born in nature, he discussed every detail of the designs, materials, conditions, and mechanisms of the equipment and enjoyed them all.

Since our research activity of the laboratory in Kyoto was focused on the chemical and physical properties of quantum solids, i.e. the cryogenic parahydrogen solid or solid $p\text{H}_2$, it was natural to extend our target to another quantum solid of solid helium for which the visit was fully welcomed for a wonderful start of collaborations with the eminent experimental physicist. Eugene and Takamasa lead a project of constructing a new cryostat for solid helium experiments, where the liquid helium was pressurized up to *c.a.* 80 bar to be solidified at low temperature. According to the possible demands posed by Eugene, Takamasa negotiated the demands with traders and manufacturers then ordered necessary parts for the new cryostat. Eugene worked in our laboratory room for assembling all of them into a single working machine. Struggling with usual problems such as leaks, he looked always optimistic and tough like a vital young boy. After finishing the construction, the project using the solid-helium cryostat was succeeded by graduate students for fulfilling their dissertations. Eugene, as a frank, friendly man to everyone, young and old, acquainted students in the laboratory with enjoyable talks, including funny stories which cultivated the views of domestic students attended.



Some months later, Diliara joined Eugene for the stay together in Kyoto. For this, or by another reason, a guest room was rented and they settled there for the rest period of the stay. It was located just behind Shogoin Temple to the south of the university campus and connected to the faculty building by a fifteen-minute walk through flat narrow paths of an old residential area. As is usual in the downtown of the old city of Kyoto, having been developed for more than 1200 years in a small basin as small as the size of several kilometers across at most, it is difficult to find a place of enough space for living purposes at a reasonable price. It was a family room with two beds in a guest house which was open for students and researchers from abroad who came for studying and working in the universities within the city. This must have been one of the most unimaginable situations to live in such a narrow room for a couple of months as judged from their standards in Chernogolovka. It could be at least a small comfort for them, which I hope, to look out a fine grass garden from a big window of the room facing a sunny side toward the south.

Mr. and Mrs. Gordon kindly invited me once to the guest house together with my family. I walked there with my wife and kids for we lived in one of the old accommodations for the university stuffs which was also small and narrow but conveniently locating at the close vicinity to the university and even closer to the guest house. My son was five years old and my daughter was three. It is always true that small children are the best ambassadors for getting over the borders in different cultures, nationalities, and languages. Eugene was playing with my son with paper swords mimicking an ancient soldier or a Samurai. He might be recalling his memories playing with his own sons, who had already been grown to become fine adults to left their hometown for studying and working. It was a fine day of moderate climate to enjoy meals and conversations as remained in our good memories. As I heard from Prof. Shida later on, Diliara was so active during her stay in Kyoto to hold cultural classes for the audience of Japanese ladies where she talked about Pushkin and Russian cultures with great passion. Kyoto is a good old town with full of cultures, still accepting others for its advancements towards the future. The Gordons hopefully had enjoyed the days in Kyoto.

In July 2013, I met them again at University of Jyväskylä, Finland, upon the CPLT meeting, Chemistry and Physics at Low Temperatures, organized by Mika Pettersson. In the following year, I visited Russia for the first time for attending CPLT 2014 in Suzdal, a beautiful medieval Russian town *c.a.* 200 km to the east of Moscow, organized by Vladimir I. Feldman and Tatyana I. Shabatina, where Eugene and Diliara also attended. It was a fantastic meeting by the people and the place where I could make new friendships with researchers from Russia, Eastern and Western Europe, and the United States. For my eyes, Eugene in his home country looked healthier even with dignity than I had known him in Kyoto. He delivered a lecture on laser ablated metallic nanowires and microspheres grown in superfluid vortices. I thought that it was again his taste, *i.e.* a bold combination of experiments with low temperature and intense laser pulses. When I was relieved after



finishing my oral lecture on spectroscopy of linear polyene molecules and bismuth clusters, Diliara and Eugene in the audience gave me precious words of admirations and celebrations. It was the most delightful moment for me to thank them all for their encouragements and supports from the bottom of my heart. In the evening, waiting for the conference dinner in comfortable atmosphere, people were relaxed and talking outside freely where I had a chance to take a photograph of my dear neighbors.

Kindai University



Томонари Вакабаяши
(перевод Д.А. Гордон)

Визит в Киото: эксперименты с твёрдым гелием

Евгений Гордон в моей памяти

Однажды мой руководитель в лаборатории молекулярной спектроскопии в университете Киото профессор Тадамаса Шида сказал мне: «Друг придет в Киото на саббатикал (sabbatical)¹⁾ для совместной работы». В тот момент у меня возникло немного странное чувство, потому что я заметил, что он, кажется, подчёркивал первое слово, произнося его как «Ю-джи-ин», что я принял буквально за слово «друг» на нашем языке. Евгений, действительно, был его старым другом в течение многих лет, так как они время от времени встречались во время конференций по спектроскопии матричной изоляции, проводимых в США и Европе. После того, как при большом содействии профессора Такамасы Момозе все детали были согласованы, Евгений прибыл в нашу лабораторию и пробыл в Киото с июля 2002 года по май 2003 года.

Мы с Евгением делили кабинет профессора Момозе и стали ближе, общаясь друг с другом в течение дня. Вскоре я понял, что он настоящий исследователь, имеющий большой опыт работы в области физики низких температур, глубоко понимающий физические аспекты сверхтекучего гелия, а также некоторые экзотические явления в конденсированных инертных газах. Я был глубоко впечатлён картиной, которую он показал мне и объяснил в деталях – объёмная лампа из твёрдого ксенона, ярко светящаяся пурпурным светом благодаря пропускаемому через неё разрядному току, который ионизирует твёрдое тело и создаёт в нём плазму. Как прирождённый экспериментатор, он детально обсуждал конструкцию установки, материалы, условия и принципы работы оборудования и получал от этого огромное удовольствие.

Поскольку исследования в нашей лаборатории в Киото фокусировались на химических и физических свойствах квантовых твёрдых тел, конкретно пара-водорода, или $p\text{H}_2$, при низких температурах, было совершенно естественно распространить их на ещё один такой объект – твёрдый гелий. Именно это и было целью данного визита, который положил начало замечательному сотрудничеству с выдающимся физиком-экспериментатором.

Евгений и Такамаса возглавляли проект по созданию нового криостата для экспериментов с твёрдым гелием, в который жидкий гелий нагнетается до примерно 80 бар для затвердевания при низкой температуре. Требования, выдвинутые Евгением, Такамаса согласовывал с поставщиками и производи-

1) Регулярный (раз в несколько лет) длительный (до года) оплачиваемый отпуск университетского профессора для работы по приглашению в другом научном учреждении в своей стране или за рубежом.



телями, после чего заказывал необходимые детали для нового криостата. Евгений собирал всё в одну рабочую установку в нашей лабораторной комнате. Борясь с обычными проблемами, такими как утечки, он всегда выглядел оптимистично и настойчиво, как жизнерадостный юноша. После того, как установка была собрана, к исследованиям с использованием криостата для работы с твёрдым гелием были привлечены аспиранты для выполнения исследований по темам своих диссертаций. Евгений – открытый, дружелюбный со всеми, от мала до велика, человек – беседовал со студентами, рассказывал забавные истории, которые расширяли их кругозор¹⁾.

Несколько месяцев спустя к Евгению приехала его жена Диляра. По этой или по другой причине была снята комната в доме для гостей, в котором они поселились на оставшийся период пребывания. Дом располагался сразу за храмом Сёгоин к югу от университетского городка. От него до здания факультета нужно было пройти минут пятнадцать по пологим узким улочкам старого жилого района. Обычно в центре старого города Киото, который более 1200 лет строился в небольшой долине, окружённой горами, размером не более нескольких километров в поперечнике, трудно найти просторное жильё по разумной цене. Их жильё представляло собой маленькую двухместную комнату в гостевом доме, который был открыт для студентов и исследователей со всего мира, приезжавших поработать в разных университетах Киото²⁾ [3]. Это должно быть было трудно для супружеской пары прожить несколько месяцев в таких стеснённых обстоятельствах, невообразимых по меркам их жилищных условий в Черноголовке. Но я надеюсь, что для них было некоторым утешением то, что они могли любоваться прекрасным садом из большого окна комнаты, выходящей на южную солнечную сторону.

Однажды мистер и миссис Гордон любезно пригласили меня вместе с моей семьёй в гости. Я шёл туда с женой и детьми, потому что мы жили в одном из старых жилых помещений для сотрудников университета, которое было также маленьким и узким, но удобно расположено в непосредственной близости от университета и даже ближе к гостевому дому. Моему сыну было пять лет, а дочери – три. Неизменно верно, что маленькие дети – лучшие посланники для преодоления границ разных культур, национальностей и языков. Евгений играл с моим сыном бумажными мечами, имитируя древнего солдата или самурая. Возможно, он при этом вспоминал, как играл со своими сыновьями, которые уже выросли и стали взрослыми, чтобы покинуть свой родной город для учёбы и работы. Это был прекрасный день с хорошей пого-

1) Японцы придают большое значение преодолению барьера между своей и другими культурами. Это является одной из главных целей постоянно функционирующего фонда JSPS (Japan Society for the Promotion of Science), поддерживающего приглашения иностранных учёных для кратковременной, до нескольких месяцев, совместной работы в Японии.

2) Я жил в такой комнате в Саппоро в 2002 г. Это не более 15 кв.м., включая санузел и плиту (*примеч. ред.*).



дой, чтобы насладиться едой и разговорами, обо всем этом у нас сохранились приятные воспоминания. Как я слышал позже от профессора Шида, Дилиара была настолько активна во время своего пребывания в Киото, что проводила встречи с японскими женщинами, на которых с большим энтузиазмом рассказывала о Пушкине и русской культуре. Киото – очень интересный старый город с богатой древней культурой, но и впитывающей другие культуры ради собственного прогресса в будущем. Надеюсь, что чете Гордонов понравилось их пребывание в Киото.

В июле 2013 г. я встретил их вновь в финском городе Ювяскюля на конференции по химии и физике низких температур, организованной Микой Петтерсеном. На следующий 2014 год я впервые посетил Россию для участия в работе той же конференции, организованной Владимиром Фельдманом и Татьяной Шабатиной. Конференция проходила в Суздале, красивом средневековом городе, расположенном примерно в 200 км восточнее Москвы. На этой конференции были и Диля с Евгением. Это была фантастическая встреча с удивительными людьми в удивительном месте, где у меня завязались новые знакомства с учёными из России, Восточной и Западной Европы, Америки. Евгения я нашёл на его родной земле более здоровым и респектабельным, чем в дни нашего знакомства в Киото. Он сделал доклад о металлических на-



Chemistry and Physics at Low Temperatures, CPLT 2014, August 28, 2014, Suzdal, Russia.

Left to right, Eugene B. Gordon, Diliara Gordon, and Markku Räsänen (Helsinki).

Mika Pettersson (Jyväskylä) in the far left and students behind.

Конференция «Химия и физика низких температур», 28 августа 2014 г., Суздаль, Россия.

Слева направо: Евгений и Дилиара Гордон, Марку Расенен (Хельсинки).

На заднем плане крайний слева Мика Петерсон (Ювяскюля) со студентами.



нопроволоках и микросферах, образующихся при захвате квантовыми вихрями введённых в сверхтекучий гелий примесных атомов, полученных лазерной абляцией. Я подумал – это его почерк – смелая комбинация экспериментов при низких температурах с интенсивными лазерными импульсами. После моего устного доклада по спектроскопии линейных полиеновых молекул и кластеров, в кулуарах, Диляра и Евгений высказали мне слова одобрения и поздравили. Для меня было большой радостью поблагодарить их от всей души за поддержку. Вечером, ожидая начало банкета в комфортной обстановке, люди стояли и свободно разговаривали в дружеской атмосфере. Я улучил момент и сделал снимок моих дорогих соседей.



*А.И. Никитин***Водородный мазер, химические лазеры,
UF₆, Бакуриани и шаровая молния**

Как-то противоестественно писать о Жене в прошедшем времени: казалось, что при его любви к жизни он будет рядом всегда. Но случилось непоправимое. Яркая звезда, которая была рядом с нами, ушла в бесконечность. И остались лишь воспоминания о вспышках этой звезды.

Судьба свела нас в далёких 60-х годах XX-го века, и было четыре периода, когда мы занимались одной тематикой. А родство душ, дружба семьями продолжались все эти годы. Лёгкость нашего общения в какой-то степени может показаться странной, так как в подходе к науке у меня и у Жени были разные принципы, определяемые, вероятно, складом характера. Я был «авантюристом», брался за решение задачи, обладая минимальным научным «багажом», и «раскручивал» идею, делая ошибки и постепенно развивая мои дилетантские представления о задаче. Женя, напротив, прежде чем начать решение задачи, узнавал всё сделанное до него в этой области как посредством изучения литературы, так и посредством личного общения. Это у него хорошо получалось. Думаю, что допустимы оба подхода, главное, чтобы в конце был результат.

Ну, а теперь, по существу. Наши жизненные пути пересеклись в 1964 г. в ФИАНе, Физическом институте им. П. Н. Лебедева Академии наук СССР. В 1961 г. вышло постановление Правительства СССР о работе по созданию в стране квантового генератора (мазера) на атомах водорода. Этот генератор был изобретён и создан в США и был интересен тем, что мог служить как очень точные часы. В этой работе планировалось участие нескольких институтов Академии наук СССР, в том числе, кроме ФИАНа, Института химической физики¹⁾. Атом водорода может находиться в двух энергетических состояниях (на уровнях «сверхтонкой» структуры), отличающихся взаимной ориентацией магнитных моментов электрона и протона. При переходе атома из одного состояния в другое излучается (или поглощается) электромагнитная волна с длиной 21 см. Пропустив пучок атомов водорода через неоднородное магнитное поле, из него можно удалить атомы с низкой энергией. Направив пучок в резонатор, настроенный на длину волны 21 см, можно вызвать переход атома между уровнями сверхтонкой структуры и получить излучение на этой длине волны. Время взаимодействия атома с электромагнитным полем резонатора можно значительно увеличить, если направить пучок атомов внутрь колбы со стенками, покрытыми слоем фторопласта. При столкновении атома с такой стенкой его квантовое состояние не меняется, и он может

1) Ныне ИХФ им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук.



«жить» в колбе около секунды. Время «жизни» атома может сократиться, если он вступит в реакцию с молекулами, специально добавленными в колбу.

Идея об использовании водородного лазера как детектора химической реакции атомов водорода возникла у сотрудников ИХФ Виктора Львовича Тальрозе и Ардальона Николаевича Пономарёва. Они договорились с ФИАНом, что после завершения работы по исследованию лазера он будет передан в ИХФ. В 1964 г., когда основная работа была сделана и был собран материал для моей кандидатской диссертации, от ФИАНовского начальства поступил приказ срочно освободить комнату от установок. Перед этим для приёмки лазера для ИХФ в ФИАН был послан Женя, для которого создание установки на его основе планировалось как дипломная работа. В ФИАНе было сделано два лазера. Причиной этого была необходимость проверки различных вариантов получения атомов водорода (в тлеющем или высокочастотном разряде), различных конструкций отклоняющих магнитов, различных конфигураций вакуумных систем. Наиболее удачные варианты разных частей оказались «перемешанными» между двумя установками. Мы с Женей решили собрать из двух установок самую оптимальную. На это (и на проверку работы собранной системы) ушло около месяца – в ежедневных пререканиях с начальством. После этого я видел наше общее «детище» в Черноголовке, которое Женя довёл до совершенства.

Причиной «избавления» ФИАНа от тематики водородного лазера (который до сих пор используется в качестве очень точных часов) было переключение на исследования оптических квантовых генераторов – лазеров. И здесь опять судьбы ФИАНа и ИХФ (и наши судьбы) пересеклись. Среди потенциально перспективных высокоэнергетичных лазеров на первый план выдвинулись химические лазеры. В типичных лазерах активная среда (кристаллы, стёкла, газы) возбуждается с помощью источников электрического тока, который, в принципе, добывается с помощью химии – горения угля и газа. В химических лазерах можно обойтись без «посредника»: можно напрямую преобразовывать энергию химической реакции в излучение.

В ФИАНе решили начать с воспроизведения работ канадских учёных по химическим лазерам на реакции хлора с водородом. Реакция инициировалась посредством образования атомов хлора при фотолизе молекул хлора. Я занялся исследованием реакции хлора с йодистым водородом. При фотолизе смеси газов я наблюдал излучение хлористого водорода, но условий лазерной генерации не достиг. Всё резко изменилось 22 сентября 1967 г. В этот день Игорь Ильич Собельман, посетивший конференцию по молекулярной спектроскопии в Испании, сообщил мне, что учёные из ФРГ при фотолизе смеси шестифтористого урана с водородом получили генерацию на молекулах фтористого водорода. Я понял, что двигаюсь не туда, и моя стеклянная установка не годится для работы с фтором.



Я поехал к моим друзьям в Черногоровку и узнал, что группа Германа Константиновича Васильева активно работает над созданием химического лазера на цепной реакции фтора с водородом. Были заимствованы черногоровские технологии работы с фтором (металлические вентили, трубки, разьёмы), и в ФИАНе началась работа по лазерам на фтористом водороде. По аналогии с лазером на хлористом водороде предпочтение было отдано инициированию реакции импульсом ультрафиолетового излучения.

Первый успех пришёл к нашим черногоровским «конкурентам». Благодаря мастерству Олега Батовского им удалось инициировать реакцию электрическим разрядом и получить генерацию на молекулах фтористого водорода. Вскоре мы воспроизвели это в ФИАНе. При анализе спектра генерации выяснилось, что наблюдаются линии излучения фтористого водорода, отсутствующие в таблицах. К счастью, спектр двухатомной молекулы поддаётся расчёту. Я сел за арифмометр «Феликс» и нашёл, что причиной появления новых линий было возбуждение молекул фтористого водорода в реакции атомов водорода с молекулами фтора, то есть реакция была цепной.

Окрылённые общим успехом, в 1969 г. мы провели в МГУ первый (и единственный) международный симпозиум по химическим лазерам. Но это было лишь началом пути. Наши лазеры работали при низких давлениях реагентов и излучали мало энергии. Было решено сделать в ФИАНе совместными усилиями двух институтов установку с объёмом рабочей смеси около 20 л, в которой химическая реакция инициировалась светом взрывающейся проволоочки. Для работы на установке из Черногоровки был прислан Герман Васильев. К сожалению, месяц упорной работы ничего не дал: смесь исходных реагентов успевала прореагировать во время напуска (сказалось изменение «масштаба» реактора).

Командировка Васильева окончилась. Он уехал, и мы остались одни с неработающей установкой. Решили отказаться от получения генерации на фтористом водороде. Мы заменили водород дейтерием, добавили в смесь диоксид углерода и гелий – и вдруг оказалось, что эта смесь не успевает самовольно прореагировать до момента инициирования реакции. Получили мощную генерацию на молекулах CO_2 в диапазоне 10,6 мкм.

ФИАНовское начальство почему-то решило «засекретить» этот успех от наших «конкурентов» в ИХФ. Эта секретность соблюдалась в течение месяца вплоть до «торжественного» сообщения об этом Николая Геннадьевича Басова на рабочем совещании в Черногоровке. Технологически конструкция ФИАНовского лазера была несовершенной: для вывода излучения требовались окна из хлористого натрия большого размера (пропускающие излучение 10 микрон). Эта задача была остроумно решена в Черногоровке: оказалось, что от окон можно отказаться, если заменить их затворами, которые открываются лишь на короткое время инициирования реакции.



Работа по исследованию химических лазеров безоконного типа была поручена лаборатории Евгения Гордона. Для этого ему был предоставлен отдельный корпус («купол»). Женя выполнил эту работу с большим изяществом, а потом разработал и испытал много других типов химических лазеров. Но мечта о создании крупномасштабного химического лазера на реакции фтора с водородом всё ещё оставалась неосуществлённой. В эту работу много сил вложил Женин и мой друг Юра Москвин. К сожалению, законы природы и изменения, произошедшие в стране, не позволили довести эту работу до конца.

В 1974 г. благодаря помощи Жени и Виктора Львовича мне удалось перевестись на работу в ИХФ. Вести в Москве работу по химическим лазерам на должном уровне было уже проблематично, и встал вопрос о выборе новой тематики. К счастью, в это время по инициативе Владилена Степановича Летохова из Института спектроскопии АН СССР начались работы по лазерному разделению изотопов. Было открыто явление многофотонной диссоциации многоатомных молекул инфракрасным излучением лазеров, позволяющее в смеси различных молекул активировать (возбуждать, диссоциировать) лишь молекулы одного сорта. Нашей задачей был подбор реагента, способного связать возбуждённую молекулу или её фрагмент. В этой работе участвовало много институтов – Институт спектроскопии, ФИАН, Институт общей физики, Физико-химический институт им. Л.Я. Карпова, Институт стабильных изотопов Грузии, Институт атомной энергии и его филиал в Троицке, а также ИХФ (мы с Женей).

В течение многих лет (с 1976 по 1985-й год) в Бакуриани проводились Всесоюзные совещания по разделению изотопов, и мы с Женей всегда стремились стать участниками этих совещаний. Более того – нас манили горы и возможность покататься на горных лыжах. Мы оба начали с «нуля», учились кататься самостоятельно (без инструктора), но в конце концов стали ездить на лыжах вполне прилично. Мы ездили туда с жёнами, и однажды случился казус: не хватило места, чтобы каждой семейной паре выделить по комнате. Администрация гостиницы решила «проучить» нас и поместила три семейные пары (третьей парой были Саша Елецкий и Лиза) в одну комнату. Мы приняли это с юмором и назвали нашу комнату «гаремом».

С Бакуриани связана ещё одна линия пересечения тематик моей и Жениной работ. В 1975 г. в ИХФ Борис Михайлович Смирнов делал доклад по шаровой молнии. Он считался автором химической модели шаровой молнии и предлагал в качестве источника её энергии реакцию с участием озона. После доклада я вышел к доске и сказал, что модель Смирнова не может объяснить случай нагрева шаровой молнией воды до кипения в бочонке, который произошёл в 1937 г. в Лондоне. Смирнов усомнился в достоверности этого случая. Я возразил. В результате ситуация стала развиваться по непредсказуемому пути: по-видимому, Тальрозе пригласил Смирнова, имея на это какие-то планы, а я своей бестактностью мог их нарушить. Положение спас Женя. Он взял



слово и сказал, что в «озонной» теории есть недоработки, но их можно устранить, если перейти к другим типам реакций. После этого Женя стал «главным консультантом» Смирнова по теории шаровой молнии. В Бакуриани, когда мы, освободившись от лекций, уезжали кататься, Борис Михайлович записался с Женей в комнату и обсуждал с ним научные проблемы. Я думаю, что в новой модели шаровой молнии, разработанной Смирновым (в виде фрактальной структуры), есть и Женин вклад.

Организатором конференций в Бакуриани в последние годы её работы был сотрудник филиала Института атомной энергии¹⁾ Юра Колесников. В середине 90-х годов он разработал проект установки по превращению газообразного шестифтористого урана UF_6 в твердофазный продукт²⁾. UF_6 используется для разделения изотопов урана в центрифугах. За долгое время накопилось большое количество UF_6 с обеднённым ураном, который хранить бесконечно долго невозможно. Женя нашёл недостатки в проекте, полностью его переработал и предложил некоторым (в том числе и мне) участвовать в его осуществлении. К сожалению, в это время страна была уже не та, что в 60-е годы, никому ничего уже было не нужно, промышленные установки по лазерному разделению изотопов были ликвидированы. Но проблема утилизации газообразного UF_6 осталась, а время упущено. И непонятно, найдётся ли в будущем кто-то уровня Жени, кто сможет грамотно решить эту проблему.

Наше общение не ограничивалось только работой. В те далёкие годы ещё не вошло в моду, как сейчас, проводить отпуск за границей, и мы путешествовали по просторам нашей необъятной страны. Первый наш совместный поход состоялся в 1967 г. Женя и Дия поженились в сентябре 1966 г., можно сказать, что это было их свадебное путешествие. Мы плыли на байдарках по реке Тетерев в Западной Украине. В начале похода на Киевском вокзале при погрузке мы забыли часть вещей на площадке около входа в вокзал. Я вернулся за ними. Вещи пролежали нетронутыми целые сутки (!). Я их случайно нашёл и воссоединился с нашей командой. В середине маршрута Женя отлучился на сутки и привёз нам Киевский торт. Дия почему-то оказалась без паспорта, поэтому охрана не разрешила ей проплыть на байдарке под железнодорожным мостом. Однако отсутствие паспорта не помешало ей выйти перед мостом из байдарки, пересечь железную дорогу пешком и потом снова сесть в байдарку. Выплыли мы в Днепр в зоне будущей Чернобыльской катастрофы и на корабле добрались до Киева. Были на квартире Жениных родителей, они тогда были живы.

Отправив байдарки багажом в Москву, поехали в Молдавию. Разместились в какой-то балке среди виноградников. Женя на равных общался с местными молдавскими мальчишками и нашей дочкой Олей.

1) В Красной Пахре, ныне г. Троицк Московской области.

2) UF_4 .



Вспоминается наш совместный отпуск на реке Бузан в дельте Волги – с нашими подросшими детьми (к сожалению, без Дили, которая осталась дома с маленьким Юликом). Царила полная раскрепощённость, Женя был на равных как с детьми, так и с местными моряками. Последние даже доверили ему вести железный катерок по фарватеру Бузана.

Последний наш совместный байдарочный поход состоялся в 1989 г. с нашими подросшими младшими детьми Верой и Юликом, мы проплыли по реке Белой в Башкирии, смогли даже пробраться в Капову пещеру и увидеть древний рисунок бизона. В результате всего друзьями стали не только мы, взрослые, но и наши дети.

Наши встречи продолжались до последнего года жизни Жени. Женя с Дилей ежегодно ездили на конференцию по проблемам химической физики около Туапсе и после окончания конференции на несколько дней заезжали на нашу «южную дачу» в посёлке Лоо. Здесь они не замыкались в узких стенах дома, а вели яркую «светскую» жизнь. Вечером посещали кафе и ресторанчики, участвовали в конкурсах танцоров и даже однажды выиграли приз за лучшее исполнение танца. Осенью 2018 г. Женя был у нас в последний раз. Прошли дожди, появились грибы. Можно было видеть, с какой радостью Женя нашёл «царский» гриб, который растёт только в субтропиках. Я думаю, что он таким и останется в нашей памяти – получающим радость от любой мелочи жизни.

Москва



Т.В. Губина, С.А. Губин

Нанопроволоки

Мы познакомились с Евгением Борисовичем Гордоном и его очаровательной женой Дилярой на 5-ом всероссийском симпозиуме «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильно неравновесных средах», 2007 г., в Новом Афоне. Они сразу располагали к себе своей доброжелательностью и вниманием к собеседникам, так что хотелось с ними общаться. В это время мы и Евгений Борисович с Дилей имели уже солидный возраст, но это не помешало нам быстро подружиться и весело проводить все свободное время вместе. В 2009 г. мы снова были вместе на 8-ом симпозиуме.

Для того чтобы попасть в Абхазию надо было пересечь границу по реке Псоу, затем пройти паспортный контроль, отстоять под открытым небом и в зной, и в дождь длинную очередь, иногда часа на два и больше. Стояли все – и дети, и старики. Зато потом в Абхазии довольно легко можно было сесть на автобус и часа через два приехать в Новый Афон. Дорога до Нового Афона была в хорошем состоянии. За окном автобуса мелькали курортные места Гагра, Пицунда, красивая природа и горные реки. Эти живописные виды портили обугленные, с выбитыми окнами, полуразрушенные здания санаториев и частных домов, разрушенные во время войны с Грузией 1993 г. Руин было много в местах боев. Это районы Гагры. Сильные разрушения были в Сухуми.

Обстановка в Абхазии в то время оставалась ещё суровой. Несмотря на то, что война с Грузией закончилась более десяти лет назад, преодолеть послевоенную разруху в экономике, здравоохранении, курортном деле не удавалось. Не хватало средств на ремонт и восстановление зданий, дорог. Приезжих было мало и местное население, привыкшее к получению доходов от средств отдыхающих, испытывало экономические трудности. Это было видно и по старым, ещё советским автомобилям, оставшимся в личном пользовании, и по разрушенным и ещё не восстановленным зданиям.

В Новом Афоне разрушений было немного. Но, например, большинство участников симпозиума проживало в здании санатория, частично разрушенного попаданием бомбы. Жили на первых четырёх этажах. Верхние этажи требовали восстановления. На стене этого здания был плакат молодого московского поэта Александра Бордорыма, воевавшего добровольцем и погибшего на войне. Его могила была в парке санатория. На плакате были стихи поэта, передававшие настроение народа во время войны.

«Дух нации должен быть хищен и мудр,
Судьёй беспощадным отрядам!
Он коброю прячет в глазах перламутр.
Он буйвол с недвижимым взглядом.



В краю, где от крови багровы мечи,
Не ищут трусливых решений.
Он ястреб, считающий мирных мужчин
В горячее время сражений.

А счёт его точен, как точен размах
В движении неистребимом.
Чем меньше мужчин, выбирающих страх,
Тем выше полет ястребиный».

Эти стихи тронули сердца всех.

Во времена Советского Союза, этот санаторий был красивейшим и самым большим зданием в Новом Афоне. На его крыше под тентами располагалось кафе, попасть в которое было престижно и не просто. Там готовили прекрасный кофе. Обугленная площадка вместо уютного кафе осталась после войны. Но жизнь продолжалась.

В парке с прудами, лебедями и прекрасной растительностью стояли полуразрушенные статуи пионеров и спортсменов. Евгений Борисович называл эти статуи «сохранившими следы бывшей красоты». Порядок в парке поддерживался, дорожки убирались, кафе работали. Немногочисленные отдыхающие катались на лодках по пруду. Из Сочи приезжали автобусные экскурсии в Ново-Афонский монастырь и пещеру, в которой абхазские музыканты устраивали концерты классической музыки.

Заседания на симпозиуме проходили под руководством Генри Эдгаровича Нормана и начинались в 19 ч. из-за жары. В холле второго этажа, где проходили заседания, не было кондиционеров. Днём можно было ходить на пляж и даже ездить на экскурсии.

Длительность докладов была 40 минут, а время на вопросы не ограничивалось. Поэтому можно было понять смысл любого доклада и подробно обсудить его содержание. Генри Эдгарович и организационный комитет создали на конференции интересную и дружескую обстановку, в которой молодёжь и известные учёные, объединённые общей тематикой и прикладными вопросами, обсуждали и делились своими проблемами, достижениями и трудностями.

Евгений Борисович привлекал внимание глубокими знаниями практически по любому вопросу, обсуждаемому на симпозиуме. Он сразу вникал в суть проблемы и незаметно направлял обсуждение в нужное русло. Евгений Борисович обладал обширными знаниями в области экспериментальной и теоретической физики и химии. Докладчикам он всегда задавал конкретные вопросы, позволяющие посмотреть на проблему с разных сторон. Часто его вопрос сразу позволял понять суть сделанного доклада. После такого вопроса сам докладчик начинал лучше понимать сделанную им работу.



Широчайшая эрудиция и научная интуиция всегда отличали Евгения Борисовича. Склонность к научной работе проявилась у него рано. Он рассказывал, что после окончания седьмого класса ученикам выдали учебники для восьмого класса. Он принёс книги домой и увидел учебник по химии. Он открыл его и начал читать. За несколько дней он прочитал весь учебник и все понял. Когда начались уроки по химии, он слушал и даже поправлял учительницу. Так, впервые, проявилась его склонность к научной работе. В школе, где учился Евгений Борисович, преподавал известный учитель физики Григорий Михайлович Дубовик, заслуженный учитель УССР, который тоже оказал влияние на выбор будущей профессии школьника. Возможно, именно учитель показал школьнику красоту и привлекательность физики. В дальнейшем Евгения Борисовича всегда отличало прекрасное знание физики, которое совершенствовалось и закрепились в МФТИ. Институт он окончил с отличием. Отличное знание физики и химии помогало ему успешно исследовать сложные процессы, всегда выбирая наилучшие экспериментальные подходы.

Удобный график работы конференции оставлял время для отдыха и моря. Евгений Борисович прекрасно плавал и любил море. Он далеко заплывал, благо в Новом Афоне не было буйков, ограничивающих заплывы. Спасателей тоже не было. Пляж был натуральный – галька и море. Народу на пляже было мало. Расстояние между отдыхающими было намного большим, чем требуется сейчас, в период борьбы с Covid-19. Иногда во второй половине дня пляж бывал почти пустым, а море и солнце оставались как всегда желанными.

На пляже, на заседаниях и вечером уже после заседаний мы были вместе. Наш десятилетний внук везде сопровождал нас, а на заседаниях с большой ответственностью контролировал продолжительность докладов. Он очень подружился с Евгением Борисовичем, который придумывал ему разные творческие задания, загадывал загадки и рассказывал интересные истории, учил его правильно плавать кролем.

На наши вечерние заседания собиралось много народу. Вентиляции не было. Было жарко, потно, но интересно. Заседания часто заканчивались в 23 ч., а иногда и позже. Поэтому надо было обязательно пройтись, погулять, остыть от духоты и споров. Иногда мы купались ночью на море, но обычно ходили в парк с прудами и частично разрушенными статуями и доходили до танцевальной площадки. На ней в основном танцевали молодые абхазы – подростки лет по 13–16, которые совсем не умели танцевать даже обычные танцы. Это были те дети войны, которые выросли уже в трудное послевоенное время. Они пытались танцевать под музыку, как-то двигались, но не знали основных движений. Тут Евгений Борисович с Дилей вышли на площадку и стали красиво, легко и профессионально танцевать. Надо было видеть, как молодые люди остановились и внимательно смотрели на этот танец. Окружающие любовались этой слаженной парой.



На следующий вечер, проходя мимо этой танцевальной площадки, мы увидели, что местные подростки танцуют, подражая и повторяя движения танца московского профессора с женой. Эту молодёжь просто некому и некогда было учить танцам.

В это время Евгений Борисович как раз начинал свою новую экспериментальную работу, уже все хорошо обдумав. Однажды, когда мы с Евгением Борисовичем гуляли вдвоём по парку, он стал рассказывать мне о своих будущих исследованиях, которые он планировал начинать. Это был синтез металлических нанопроволочек, основанный на лазерной абляции в жидком сверхкритическом гелии. Он объяснял мне, что нанопроволочки будут возникать в квантовых вихрях и быстро расти, но я не понимал, потому что впервые слышал о квантовых вихрях в жидком гелии. Главное, я понял, что это будет очень интересная работа, в результате которой будет получена методика создания ультратонких металлических нанопроволочек, обладающих неизвестными пока практическими свойствами (сверхпроводимость, катализаторы химических реакций).

Позднее я понял, что исследование синтеза металлических нанопроволочек логически вытекали из предыдущих работ Евгения Борисовича. Все началось после того, как Евгений Борисович с сотрудниками обнаружили образование гелеобразного материала из атомов и молекул, введённых в сверхтекучий гелий. Затем последовало получение наноразмерных цепочек из атомов водорода, введённых в сверхтекучий гелий. Далее Евгений Борисович предложил и создал способ синтеза нанопроволочек из металлов. Была предложена модель их образования путём захвата вводимых частиц вихрями в сверхтекучем гелии.

Евгений Борисович спросил меня о возможности направления студента нашей кафедры «Химической физики» НИЯУ МИФИ для участия в этой работе – синтезе нанопроволочек из металлов с перспективой защиты диплома и поступления в аспирантуру. Такого студента удалось найти. Это был Александр Карабулин, который быстро вошёл в работу, защитил диплом, а потом после аспирантуры и кандидатскую диссертацию. Без сомнения, Евгений Борисович произвёл на Сашу огромное впечатление своей эрудицией и прекрасным знанием физики. Работать под руководством такого замечательного учёного было интересно и почётно. Александр рассказывал мне о работе, возникающих проблемах, грантах, статьях и договорах, которые выполнялись в лаборатории Е.Б. Гордона. Через три года аспирантуры он защитил диссертацию, научным руководителем был Евгений Борисович. Евгений Борисович был замечательным педагогом. Он имел звание профессора и много лет преподавал в МФТИ.

Однажды Евгений Борисович рассказал историю из своего школьного периода жизни, когда он занимался плаванием и они с другом поехали на соревнование в бассейн. Но оказалось, что дату соревнований по плаванию пе-



ренесли. Тогда они решили пойти на олимпиаду по математике в университет. Еле успели к началу, решили все задачи. Потом погуляли, съели мороженое и отправились домой. Через неделю им прислали дипломы победителей олимпиады. Талантливый человек талантлив во всем. Ему было интересно многое. Даже будучи известным учёным, он с таким неподдельным интересом занимался разными вещами, например, строительством, что было просто удивительно, как у него на все хватало времени.

Помню, как мы приезжали к Гордонам в Черногоровку в недавно построенный коттедж. Дом и участок были очень красивы. Евгений Борисович с большим удовольствием все показывал и подробно рассказывал о строительстве и о том, как удобно теперь жить в своём доме. Это было время, когда только что был возведён камин. Евгения Борисовича переполняли знания о работе и конструктивных особенностях камина. Он с таким удовольствием и азартом рассказывал, что даже наш Миша заинтересовался тем, как дым движется и собирается в дымосборнике, и кажется понял конструкцию второго контура, которую придумал и предложил сам Евгений Борисович. Это значительно повысило теплоотдачу камина. Дома десятилетний друг Евгения Борисовича объяснял родителям как надо строить камин и удивлял их глубокими познаниями в этом деле. Здесь, конечно, сказался педагогический талант Евгения Борисовича, потому что заставить сидеть, открыв рот, очень шустрого непоседливого ребёнка рассказом о теплоотдаче камина удавалось не каждому и очень редко. Игры, которые они с Дилей придумывали своим детям, а потом предлагали другим, так захватывали детей, что они просто не замечали течения времени.

Второй раз на конференции в Новом Афоне мы встретились в 2009 году. На этот раз, Евгений Борисович уже сделал доклад с результатами экспериментов, доказывавшими правоту его предположений об образовании металлических нанопроволочек. Помню, что мы вместе ездили на экскурсию на озеро Рица. Длинная красивая дорога, скалы и пропасти, а по возвращении пошли на заседание, где он и сделал доклад. Евгений Борисович показывал фотографии образовавшихся металлических нанопроволочек, сделанные на электронном микроскопе, рассказывал о возможном эффекте сверхпроводимости в подобных материалах.

В этот раз мы часто ездили на серный источник километрах в 7 от Нового Афона. Там все обмазывались грязью, потом смеялись друг над другом, фотографировались и шутили. Трудно вспомнить все шутки и истории, рассказанные там. Их инициатором и застрельщиком был, конечно, Евгений Борисович. Вокруг него всегда было весело и интересно. Затем, смывали грязь, купались в бассейне с минеральной водой и похорошевшие возвращались в гостиницу. Сохранилась фотография Евгения Борисовича вымазанного этой грязью.



В дальнейшем наши встречи проходили эпизодически, от случая к случаю. Всегда, когда я приезжал в ИПХФ РАН, мы встречались в его лаборатории, приходила Дilia и наша встреча заканчивалась у них дома. Даже когда мы приезжали на семинар с соискателями, нас всех всегда приглашали в радушный дом Гордонов, угощали, расспрашивали, рассказывали, шутили и смеялись. Угощения, приготовленные Дилей, всегда были вкусны и изысканны.

Последняя наша встреча была на семинаре в ИПХФ РАН в октябре 2018, где с преддиссертационным докладом выступал наш аспирант. После доклада поехали домой к Гордонам, несмотря на то, что недавно Евгений Борисович болел и, наверное, чувствовал себя не очень хорошо. Дома, мы познакомились с его сыном Сергеем. Было очень сердечно, интересно и весело.

Когда мы узнали в январе о печальном событии, невозможно было поверить, что больше не будет общения с этим талантливым, весёлым, увлечённым человеком, крупным учёным, внёсшим большой вклад в мировую науку.

Мы друзей теряем – это навсегда,
Души улетают прямо в небеса.
Хочется нам верить, что вдали, потом,
Не наступит мрака, будет светлым дом.

Голубое небо, нежный мягкий свет,
И такая лёгкость, будто тела нет,
И летать приятно, и все знать легко,
И узнать все истины только там дано.

Нам не хватает этого талантливого, замечательного человека.



*Т.Н. Ростовщикова***Нанокатализ**

Наше знакомство с Евгением Борисовичем состоялось много лет назад. Его блестящие лекции на конференциях по химии низких температур, школах по химической кинетике и химической физике всегда вызывали огромный интерес и надолго запоминались.

В 2014 г. в рамках проекта РНФ (№14-13-00574) началась наша совместная работа по теме «Получение и исследование нанопроволок из золота, платины, никеля, титана, родия, иридия, осмия и рения с целью выяснения перспектив создания эффективных катализаторов на их основе». Идея этого проекта родилась на Черноморском побережье на Симпозиуме «Современная химическая физика» (Пансионат «Маяк», пос. Шепси). Е.Б. Гордон на протяжении многих лет активно участвовал в работе этой Школы-Конференции-Симпозиума (название и место менялись, но суть оставалась неизменной). За это время мы успели подружиться с Евгением Борисовичем и его очаровательной супругой Дилярой.

В тот год лекция Евгения Борисовича была посвящена его недавнему изобретению и увлечению – новым материалам в виде нанопроволок металлов. Для их получения была разработана специальная технология с использованием сверхтекучего гелия. Это всё выглядело интересно, но казалось маловероятным. Тем не менее, когда после заседаний, уже на пляже Евгений Борисович предложил нам в МГУ испытать каталитические свойства этих самых нанопроволок, я согласилась. Он тут же взялся обдумывать совместный проект, который и был потом поддержан РНФ. В этой работе участвовали ведущие специалисты и преподаватели химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова д.х.н. Е.С. Локтева, кандидаты наук С.А. Николаев, Е.В. Голубина, К.И. Маслаков.

Когда мы получили первые образцы в виде бумажных фильтров, на которых вроде бы ничего и не было, отношение к испытаниям у нашей команды стало довольно скептическим. Только вера Евгения Борисовича убедила нас провести структурные и каталитические исследования. И мы увидели эти проволоочки в электронный микроскоп, а данные рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии окончательно убедили нас в том, что на бумажных фильтрах действительно находятся приготовленные для испытаний нанопроволочки. Причём внутри проволок металл сохранял в значительной степени металлическое состояние и был лишь частично окислен с поверхности, хотя образцы длительное время хранили на воздухе. И каково было наше удивление, когда эти «бумажки» стали катализировать окисление СО, выбранное нами в качестве тестового процесса. Тут пригодился огромный экспериментальный опыт Людмилы Виссарионовны Вороновой, которая прово-



дила эксперименты на каталитической установке. По просьбе Евгения Борисовича мы на всякий случай проверили аналогичный пустой фильтр, но там реакция не прошла.

Мы испытали ряд образцов, приготовленных из разных металлов, в их числе Au, Pt и Pd. Их каталитическую способность сравнили с данными, полученными для других наноразмерных материалов, и обнаружили, что эти сверхнизкие количества нанопроволок (около 1 микрограмма или меньше) по своей эффективности не уступали или даже превосходили известные катализаторы.

Евгений Борисович очень трепетно относился к проведению испытаний, приезжал в МГУ, обсуждал детали эксперимента с Людмилой Виссарионовной, знакомился с устройством нашего реактора и ходом опытов. Его интересовали все мелочи вплоть до того, как фильтр с образцами помещают в реактор. Хотел сам сконструировать специальный реактор для испытаний микроколичеств нанопроволок, но не успел...

По результатам наших работ опубликовано 3 статьи. Когда первую из них по нанопроволокам золота не взяли в престижный журнал «Gold Bull.» (в то время работы по катализу золотом были в центре внимания каталитиков), Евгений Борисович позвонил главному редактору журнала и убедил его в важности наших результатов. После этого нас опубликовали мгновенно. Евгений Борисович всегда был очень убедителен, не соглашаться с ним было весьма трудно. Это был яркий и самобытный человек и учёный.



Н.В. Классен

**Пионерские работы, высочайшая квалификация, широта научной эрудиции, глубокое понимание природы вещей, преданность науке, бойцовский характер, харизматическое обаяние, дружелюбие, отеческое отношение к молодёжи.
О Евгении Борисовиче Гордоне как бы со стороны**

Мне доводится часто читать или слышать об уникальных личностях, но реальные контакты с такими людьми случаются довольно редко. И одно из моих больших везений – в том, что, живя и работая в Черноголовке в течение уже пятидесяти пяти лет, я много раз встречался с Евгением Борисовичем Гордоном – человеком из этой высокой категории.

Я не отношусь ни к близким друзьям, ни к товарищам Евгения Борисовича по работе, хотя познакомились мы с ним более полувека назад. В 1966–68 гг. я как студент-практикант МФТИ готовил студенческий диплом в лаборатории оптики и спектроскопии Института физики твёрдого тела, которая временно (до переезда в 1968 г. в собственный корпус ИФТТ) базировалась на второй площадке Химфизики в корпусе Новой химической кинетики («Шиловский корпус»). В той же лаборатории в те годы работала Диляра Гордон, жена Евгения Борисовича, к которой он иногда заходил, т.к. работал в Химфизике где-то поблизости. С тех пор мы с ним время от времени встречались – когда случайно, когда обсудить какой-нибудь интересующий обоих научный вопрос. Иногда эти встречи происходили на общечерноголовских научных семинарах, которые в КОНе Химфизики устраивал Николай Николаевич Семенов. Мои встречи с Евгением Борисовичем были и по-человечески приятны (он прямо-таки излучал дружелюбие и обаяние), и весьма полезны для моего научного развития, т.к. он удивительно легко схватывал на лету суть любого вопроса по физике конденсированных сред, которых у меня как начинающего специалиста всегда было много. А сейчас, когда Евгения Борисовича, увы, здесь уже нет, я понимаю, какое это везение – встречаться с такой по-настоящему уникальной личностью.

Постепенное понимание его уникальности началось у меня лет двадцать назад, когда руководство ИФТТ попросило его быть у нас председателем ГЭК – Государственной экзаменационной комиссии по приёму госэкзаменов и дипломных работ у студентов МГУ и Физтеха, которых в те времена у нас было много. Евгений Борисович хорошо подходил к должности председателя ГЭК как маститый учёный (доктор физ.-мат наук, профессор), работавший не в нашем институте (это было обязательным условием). А я к тому времени начал читать лекции студентам как преподаватель кафедры физики твёрдого



тела и поэтому входил в ГЭК. Кроме того, время от времени мои студенты-дипломники представляли на заседаниях ГЭК свои работы. Е.Б. Гордон был председателем ГЭК в ИФТТ довольно много лет, и за это время я у него многому научился по части работы с научной молодёжью. Одно из уникальных его качеств – поразительное сочетание широты научной эрудиции с глубоким и быстрым схватыванием сути всевозможных аспектов физики твёрдого тела и материаловедения. Набор научных направлений Института физики твёрдого тела, по которым представляли свои работы наши дипломники, весьма разнообразен. Но Евгений Борисович на заседаниях ГЭКа по любой работе был не просто «свадебным генералом» (что по минимуму требовалось от председателя ГЭК), но активно и весьма квалифицированно участвовал в обсуждении каждого диплома. Его вопросы и комментарии были и интересны, и полезны и студентам, и их руководителям. При этом всем было видно, что задаются они не с целью подловить дипломника на каком-нибудь промахе, а отчётливее выявить самые интересные достоинства его работы и помочь дальше это развивать.

Один из моих студентов защищал диплом по самоорганизации сверхструктур в водной суспензии металлических наночастиц под облучением лазера небольшой мощности. Евгений Борисович, задав пару уточняющих вопросов, тут же предложил новую версию наблюдавшегося выстраивания этих частичек в цепочки благодаря локальному свариванию их в точках взаимного контактирования. Раньше нам это в голову не приходило, т. к. для лазерной сварки обычно применяются лазеры гораздо большей мощности. Но уже после защиты, сделав количественные прикидки, мы убедились в проницательной правоте Евгения Борисовича. Дело было в том, что при объединении наночастичек в цепочки в какой-то момент неизбежно должно возникнуть такое сочетание длины волны света и размера этого агломерата, при котором произойдёт резонансное усиление электрического поля на поверхности частичек, достаточное для их сваривания друг с другом даже при небольшой исходной мощности лазера. Такого рода продуктивные вопросы и комментарии Евгений Борисович генерировал непрерывно.

Важно подчеркнуть, что эти интересные и весьма квалифицированные замечания всегда делались с оттенками доброжелательности и дружеского соучастия, а не для формального «надувания щёк» председателем ГЭК. Как ответная реакция – искренняя благодарность и стремление всерьёз над этими советами подумать. Лет десять назад мне пришлось косвенно соприкоснуться с Евгением Борисовичем и как непосредственно научным руководителем студентов. Сейчас хорошие студенты в дефиците во всех черноголовских институтах, и когда я вдруг узнал, что один из наших дипломников собрался переходить для подготовки диплома в Химфизику, то сейчас же пошёл попробовать его отговорить. Мы в ИФТТ стараемся соблюдать принцип свободы выбора студентами и не строим им препятствий в случае желания куда-то пе-



рейти. В этом «дружеском» разговоре со студентом я хотел объяснить ему, почему делать диплом в ИФТТ ему будет лучше. Но в самом начале разговора выяснилось, что переходить он хочет к Гордону. И здесь все мои аргументы потухли, т.к. я уже тогда был убеждён, что найти научного руководителя лучше Евгения Борисовича вряд ли где-нибудь удастся. Здесь и универсальность глубокого понимания сути «природы вещей» (а не отдельно физики или химии), и высочайшая квалификация тонкого экспериментатора, и отличное владение теоретическими методами. Плюс подлинно отеческое отношение к начинающим исследователям.

Аура всепроникающего обаяния, которая непрерывно излучалась от Евгения Борисовича, в сочетании с его тонким юмором и располагающей самоиронией вызывала желание сразу и во всем с ним соглашаться. В этом я ещё раз убедился при нашей случайной встрече года три назад. Дело было вечером в субботу. Я возвращался электричкой из Сергиева Посада, где по субботам занимался физическими экспериментами с учениками физико-математического лицея – той самой школы, где я сам учился шестьдесят лет назад. В Мытищах пересел на электричку, идущую из Москвы в Чкаловскую, чтобы оттуда автобусом доехать до Черноголовки. Вхожу в вагон, сажусь на свободное место и – редчайший случай – вижу напротив прямо перед собой Евгения Борисовича с Дилярой, которые, как оказалось, возвращались из Москвы с какой-то свадьбы. Они на своей машине доехали из Черноголовки до Чкаловской и оставили машину там, а теперь едут назад, чтобы вернуться в Черноголовку. Естественно, я согласился ехать до Черноголовки с ними на машине. Она стояла на дороге от перекрёстка к станции и, чтобы ехать в Черноголовку, надо было развернуться назад. На этой дороге – сплошная осевая и для разворота надо сначала проехать по ней метров пятьсот вперёд за станцию до места разрешённого разворота. А Евгений Борисович делать это не стал и развернулся сразу, пересёкши сплошную черту (субботний вечер, темно, машин мало – почему бы не нарушить). Но – закон подлости – у перекрёстка стоял гаишник, который за такими нарушителями и охотился. Он все видел и нас остановил. Наш водитель-нарушитель вышел и началась его оживлённая дискуссия с автоинспектором. Слов было не разобрать, но говорил в основном Евгений Борисович (причём в присущем ему доброжелательном тоне с лёгким оттенком юмора и уверенности в своей правоте). Минут пять такой беседы – Евгений Борисович возвращается в приподнятом настроении, садится за руль и едем в Черноголовку. О подробностях беседы я его не расспрашивал, но по настроению было видно, что обошлось не только без лишения прав на несколько месяцев, положенного за такое нарушение, но и без «отступных». А уж почему так получилось – загадка. Предполагаю, что секрет в поразительной харизме Евгения Борисовича, вызывающей непреодолимое желание с ним соглашаться. При этом мне вспоминается описанный в литературе случай со знаменитым экстрасенсом Вольфом Мессингом, ко-



торый на спор со Сталиным спокойно вышел из Кремля через несколько постов, показывая часовым вместо пропуска чистую бумажку.

А ещё похоже, что в Евгении Борисовиче присутствовал боевой азарт к преодолению трудностей, настолько его увлекавший, что он сам нередко эти трудности и искал. Это подтверждается, например, рассказами сразу нескольких его друзей о том, с каким удовольствием, будучи на море, нырял он в штормовые волны, когда официально из-за непогоды купание было запрещено.

Видимо, во многом благодаря уникальному сочетанию харизматического обаяния, бойцовского характера в комбинации с дружелюбием, высочайшей квалификацией и преданностью науке Евгений Борисович Гордон стал замечательным примером объединения специалистов разных направлений для продуктивных прорывов сразу в нескольких научных и технологических областях. К примеру, многого стоит осуществлённая им в 1974 г. в сотрудничестве с Л.П. Межовым-Деглиным из ИФТТ пионерская работа, в которой впервые в мире были введены химически активные атомы внутрь сверхтекучего гелия. Были получены рекордно большие концентрации стабилизированных радикалов. Эта методика получила широкое признание и используется во многих исследовательских центрах мира. В 2009 г. Евгением Борисовичем было открыто явление катализа процесса коагуляции примесей в сверхтекучем гелии квантованными вихрями – ультрабыстрого процесса, продуктом которого являются ультратонкие нити. В результате был предложен и реализован универсальный метод синтеза тонких нанопроволок при лазерной абляции погруженных в сверхтекучий гелий металлических мишеней. К этим исследованиям Евгений Борисович подключил И.И. Ходоса – сотрудника черноголовского Института проблем технологии микроэлементов (ИПТМ РАН). В исследовании свойств получаемых нанопроволок участвовали и другие сотрудники ИПТМ. Тесные узы связывали Евгения Борисовича и с Институтом структурной макрокинетики в Черноголовке (ИСМАН).

Традиция активного сотрудничества черноголовских институтов, яркие примеры продуктивности которого в изобилии оставил нам Евгений Борисович Гордон, очень полезна именно сейчас, когда черноголовская наука переживает трудные времена. А сам я, полностью разделяя и перенимая его озабоченность падением притока хороших студентов в Черноголовку, активизировал свои контакты сразу с несколькими ВУЗами по поиску таких студентов и привлечению их в наши институты. Кроме того, старательно развиваю контакты с подмосковными школами по организации там исследовательских проектов старшеклассниками, чтобы из них отбирать перспективную молодёжь для поступления на кафедры Физтеха, МГУ, МИСиС, МГОУ, МГТУ, через которые мы подпитываем Черноголовку студентами. И при этом в моих беседах о научных и технологических достижениях черноголовских институтов непременно фигурирует информация о Евгении Борисовиче.



Д.А. Гордон

Письмо Е.Е. Никитина

От составителя

Это письмо я нашла, разбирая Женины бумаги. Его написал выдающийся учёный Евгений Евгеньевич Никитин. Женя очень уважал его и дружил с ним и с его женой Еленой Дашевской, тоже известным учёным-физиком. Они часто встречались на конференциях.

Я пересеклась с ними обоими только раз, на конференции, которая проходила в Эстонии, на территории санатория Совета министров ЭССР. Я думаю, именно об этой встрече с Женей пишет Никитин в своём письме. Лена Дашевская была женщина очень умная и обладала острым языком. Это от неё я услышала самый изощрённый и тонкий комплимент в свой адрес: «Вы даже не понимаете всю степень своего очарования».

Дорогой Евгений Борисович!

Недавно Русин и я написали в «Химическую физику» обзор «Динамика реакций обмена и отрыва в системах водород-галогено-водород. I. Экспериментальные результаты». К сожалению, в этом обзоре отсутствует раздел о возникновении возбуждённых атомов X^* в реакции отрыва $H + HX \rightarrow H_2 + X$. Наш разговор в Эстонии убедил меня, что это очень интересно, и соответствующие вопросы следовало бы затронуть в обзоре. В отношении экспериментальных результатов у меня есть только №8 «Хим. физ.» за 1986 г. с Вашей статьёй¹⁾ [1]. В связи с этим я хотел бы попросить Вас

1. Снабдить меня соответствующими ссылками, по возможности для всех X (F, Cl, Br, I)

2. Для нас самое лучшее было бы, если бы Вы написали на 2-х страницах краткий обзор по эксперименту. Мы бы просто это включили в наш обзор. Если Вы согласитесь с предложением 2, то о пункте 1 можно забыть.

Всё это надо очень срочно, так как мы стараемся, чтобы этот обзор появился в №4, 1987²⁾ [2], который будет посвящён 85-летию со дня рождения В.Н. Кондратьева. Я знаю, что для написания обзора по специальности размером в 2 стр. нужен всего один вечер. Найдите этот вечер в дни отдыха после 1-го января.

С удовольствием вспоминаем время, проведённое с Вами за границей РСФСР. Наилучшие пожелания от меня и Лены всему семейству.

27.12.1986 Е.Н.

1) Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов. Химический H_2/F_2 -лазер, накачиваемый излучением эксимерного лазера. Расчёт и сравнение с экспериментом. Химическая физика, т.5, №2, с.196–201, 1986.

2) Е.Е. Никитин, Л.Ю. Русин. Динамика реакций обмена и отрыва в системах водород-галогеноводород. Экспериментальные результаты. Химическая физика, т.6, с. 1643–1658, 1987.



Дорогой Евгений Борисович!

Недавно Русин и я написали в "Химическую физику" обзор "Динамика реакций обмена и отрыва в системах водород-галогено-водород". I. Экспериментальные результаты". К сожалению, в этом обзоре отсутствует раздел о возникновении возбужденных атомов X^* в р-ции отрыва $H + HX \rightarrow H_2 + X$. Наш разговор в Эстонии убедил меня, что это очень интересно, и соответствующие ~~вопросы~~ вопросы следовало бы затронуть в обзоре. В отношении экспериментальных результатов у меня есть только №8 "Хим. физ" за 1986г. о Вашей статье. В связи с этим я хотел бы попросить Вас

1. Снабдить меня соответствующими ссылками, по возможности для всех X (F, Cl, Br, I)

2. Для нас самое лучшее было бы, если бы Вы написали на 2-х страницах краткий обзор по эксперименту. Мы бы просто это включили в наш обзор. Если Вы согласитесь с предложением 2, то о пункте 1 можно забыть.

Все это надо очень срочно, так как мы стареем, чтобы этот обзор появился в №4, 1987, который будет посвящен 85-летию со дня рождения В.Н. Кондратьева.

Я знаю, что для написания обзора по специальности размером 2 стр. нужен всего один вечер. Найдите этот вечер в дни отдыха после 1-го января.

С удовольствием вспоминаем время, проведенное в Вами за границей РСФСР.

Наилучшие пожелания от меня и Лени всему семейству

Е.Н.

27.12.86

*И.И. Ходос***Его энтузиазм передавался другим**

Евгений Борисович с первых минут знакомства с ним воспринимался как человек целеустремлённый, энергичный. Его отличали широкая эрудиция и глубокое понимание сути физических процессов. Высокообразованный учёный, глубоко знавший физику, Евгений Борисович умел находить убедительное объяснение исследуемым явлениям, давать количественную оценку полученным экспериментальным результатам. Нельзя не отметить, что его энтузиазм в исследованиях неизменно передавался другим сотрудникам. Человек острого аналитического ума, Евгений Борисович умел связать различные свойства исследуемых объектов в целостную картину.

Мне довелось подключиться к начатым Евгением Борисовичем в последние годы исследованиям, посвящённым получению и свойствам одномерных объектов – нанопроволочек из различных материалов, получаемых методом лазерной абляции в сверхтекучем гелии. Человек уже немолодой, Евгений Борисович был по-юношески увлечён исследованием этих нанообъектов сечением всего лишь несколько нанометров, внося существенный вклад в понимание физики наномира.

Евгений Борисович проявлял живой интерес к различным сторонам жизни, его отличало понимание сути не только исследовавшихся им явлений и объектов физики, но и движущих сил происходящих в обществе событий, мотивов поведения тех или иных людей. В ходе своей научной и педагогической деятельности Евгению Борисовичу как активному человеку довелось контактировать со многими интересными людьми, быть участником различных значимых явлений в научном мире. Его живое изложение, проникновение в суть минувших и настоящих событий делали его очень интересным собеседником.

Безмерно жаль, что такой яркий человек, любивший жизнь, целеустремлённый, полный научных планов, ушёл из жизни.



*Е.А. Кузнецов***Он был классным экспертом
по химической физике**

Уже прошло полтора года, как ушёл Евгений Борисович Гордон. В ближайшее время ему исполнилось бы только 80. Время, к сожалению, бежит быстро. Казалось бы, это было совсем недавно – сразу после длинных новогодних праздников в январе 2019 г. Его уход меня поразил – он для меня был дорог. Он – экспериментатор, а я теоретик, причём в области достаточно далёкой от его научных интересов. Он был для меня одним из «своих» людей в Черногловке, с которым я быстро сошёлся.

В Черногловке в Институте Ландау я появился в 1992 г. Жили мы на 9-м этаже по ул. Первой 2-в. Этот этаж занимали сотрудники Института Ландау. Рядом со мной жил Дюгаев Александр Михайлович. Судя по всему, именно у него на квартире я и познакомился с Евгением Борисовичем – Женей. Хотя должен сказать, что о нем я был наслышан от многих, в частности, от Ильдара Габитова, который долгие годы при Халате¹⁾ служил учёным секретарём Института Ландау и знал многих в Черногловке.

Вначале это было скорее шапочное знакомство. Мы сошлись позднее, в ВАКе, где-то начиная с 2000 г. До этого года я исполнял обязанности председателя секции РФФИ по теоретической физике. Примерно в это время ко мне подошли два уважаемых джентльмена – А.М. Дыхне и В.Е. Фортов. Первый в то время возглавлял физику в РФФИ, а Владимир Евгеньевич был тогда вице-президентом РАН. Вопрос, на который я сразу не отреагировал, звучал примерно так: «Женя, нужно послужить российской науке». Я до этого был председателем секции РФФИ по теоретической физике, честно нёс это ношу в течение девяти лет и как будто служил российской науке. А тут мне предлагают поработать в экспертном совете (ЭС) ВАКа по физике в качестве заместителя председателя – заместителя А.М. Дыхне. Когда предлагают два таких человека, вряд ли имело смысл отказываться – я согласился и в течение почти 14 лет провёл в ВАКе в ранге заместителя вместе с Руденко О.В. (сначала он был заместителем, как и я, а затем после смерти Александра Михайловича стал председателем), с Чукбаром К.В. и Веселаго В.Г.

Хочу сказать, что работа в ЭС в качестве эксперта непростая – нужно в течение заседания (примерно двух часов) ознакомиться с одной, а то и двумя докторскими диссертациями и дать по ним заключение. Это довольно жёсткое требование, в котором проверяются не столько сама диссертация, сколько квалификация эксперта. В этом состоит главная специфика ЭС и его экспертов. Сейчас я не могу сказать, что изменилось в ЭС по физике, особен-

1) Академик Исаак Маркович Халатников (1919–2021), основатель и первый директор Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау.



но на волне Диссернета. Хочу отметить, что за все время моей работы в ЭС по физике у нас не было никаких эксцессов, которые имели место в других экспертных советах, особенно гуманитарных.

Именно там, в ВАКе я понял, чего стоит Евгений Борисович. Он был классным экспертом по химической физике, включая горение и взрыв. Должен сказать, что его заключения были всегда чёткими и ясными. Некоторые диссертации он предлагал отклонить, но это было всегда очень обосновано и по делу. Там, в ВАКе я понял, что Евгений Борисович – замечательный экспериментатор, знающий своё дело и умеющий поставить и сделать что-то своими руками. Это то, чего не хватает теоретикам – они пишут свои крючки, часто бывая далёкими от эксперимента. Последнее, что я от него услышал, уже позднее, по науке, – это было открытие метода получения наночастиц с использованием жидкого гелия – очень красивый и элегантный метод.

После ВАКовских заседаний мы ехали вместе в Черноголовку и в течение всей длинной дороги обсуждали все научные и околонаучные дела. Я понял, что обо всех этих делах мы с ним одинаково понимаем, что происходит, были в этом единомышленны. После моих двух семейных неурядиц я стал меньше ездить в Черноголовку, но даже в те короткие встречи с ним в Черноголовке показали, что он, как и я, одинаково относился к той революции, которая произошла в РАН в 2013 году. Это было разрушение академии и подчинение её бюрократам, слабо разбирающимся в науке.

Удивительно было мне встретить Женю на речке летом в июле в Черноголовке дважды в 2018 и 2017 гг. – это были мои последние встречи с ним. Особенно запомнилась последняя встреча: плыву где-то уже посередине речки и вижу какого-то мужика, ну очень похожего на Женю с его блестящей головой, кричу, а догнать не могу – и только, когда он развернулся, мы «здороваемся». Насколько я его понял, плавание в речке было ему необходимо, чтобы поддерживать свой тонус, и делал он это регулярно, тем более, что жил он на Солнечной поляне, рядом с речкой в своём доме, построенном им самим.

Надо сказать, что Женя был, по-видимому, практически единственным, кто решился из «научников» построить дом (остальные не потянули это сильно дорогое мероприятие). Для него самого это было важно, важно, как для экспериментатора, у которого руки росли, как говорят, из правильного места.

Собирая все в своей памяти о Жене – Евгении Борисовиче Гордоне, знаешь, что ты жил с прекрасным человеком. Хочется написать – долгое время, а на самом деле всего-то каких-то двадцать лет или около того. С человеком, который был для тебя дорог, равно как и для многих, с кем был знаком и дружен Женя, особенно в Черноголовке.



*О.В. Малышкина***Экспертный совет ВАК**

Есть люди, с которыми очень легко общаться, несмотря на разницу в возрасте. При общении с Евгением Борисовичем Гордоном я этой разницы не замечала, несмотря на то, что первую нашу встречу на заседании экспертного совета ВАК по физике он начал с фразы «а я помню Вас совсем маленькой девочкой ...». В моих воспоминаниях о детстве, проведённом в Черноголовке, он не остался. Но когда я передала от него привет моей маме (работавшей в Институте химической физики в Черноголовке в 60-е и начале 70-х годов), она его сразу вспомнила и очень положительно отозвалась и о Евгении, и о его жене Диляре Ахметовне.

Таким образом, считаю, что лично моё знакомство с Евгением Борисовичем произошло зимой 2014 г., когда я вошла в состав Экспертного совета ВАК по физике. Хочется отметить, что Евгений Борисович был высококвалифицированным экспертом по химической физике, включая горение и взрыв, и если попадались спорные диссертации по данной специальности, решающее мнение всегда оставляли за ним. В то же время в экспертном совете все специалисты высокого уровня, поэтому сказать, что Евгений Борисович выделялся своими знаниями, было бы неправильно. Чем он действительно выделялся – это своей жизнерадостностью. Он участвовал не во всех заседаниях, но, когда приходил, у меня всегда создавалось впечатление, что из него исходило сияние, как будто его жизненная энергия не помещалась в нем, его оптимизм повышал настроение.

Наши научные интересы лежали в разных областях физики, и дискутировать, обсуждая конкретные научные вопросы, мне с ним не довелось. Но мне повезло пообщаться с ним в неофициальной обстановке, когда, будучи на научной конференции в Черноголовке, я поехала в Москву на заседание экспертного совета. Возвращались мы вместе с Евгением Борисовичем, он пригласил к себе в гости, не в квартиру, а в собственный дом. Я была приятно удивлена – особенно, когда он, как специалист по теплофизике, начал рассказывать об особенностях конструкции камина, повышающих его КПД.

Очень жалко, что Евгения Борисовича больше нет с нами. Это человек, на которого можно равняться, брать пример. Мне повезло, что я была с ним знакома.



В.К. Энман

И талантливый учёный, и прекрасный механик

Я знаю Евгения Борисовича Гордона с 1965 г. и как раз в это время наша криогенная станция начала производство жидкого гелия и азота, которые были необходимы для проведения низкотемпературных исследований. Наши конструкторы и технологи знали специфику создания криогенной техники и мы начали изготовление криостатов различного назначения.

В 1969 г. была изготовлена низкотемпературная часть криогенного спектрометра ЯМР со сверхпроводящим магнитом – криостат с тёплым отверстием. Для Евгения Борисовича мы выполняли работы по изготовлению и ремонту криостатов, лазерной технике, он был постоянным заказчиком продукции криогенной станции и он хорошо знал наших сотрудников.

Евгений Борисович был очень общительным, доброжелательным человеком. Мне нравилось его простое, товарищеское отношение ко всем, с кем он разговаривает, и не имело значения, кто это: учёный, механик, директор. Я думаю, что такое уважительное отношение к людям появилось и окрепло потому, что он сам после окончания школы работал два года слесарем на заводе, отсюда же у него стремление все делать своими руками – хорошо паял, собирал-разбирал, т.е. он был и талантливым учёным, и прекрасным механиком. Наши сотрудники уважали Евгения Борисовича.

Евгений Борисович понимал, что без хорошего, лёгкого, переносного течеискателя невозможно обслуживать криогенное оборудование института, и в 2009 г. он приобрёл за счёт своих договоров американский течеискатель MS-40, его вес 40 кг, тогда как наш, ещё советский, весил 180 кг. Мы получили возможность искать течи практически в любом месте. Евгений Борисович предложил мне освоить и работать с течеискателем, и установить его в нашем отделе. Этот течеискатель позволил нам быстро произвести установку и монтаж новой американской установки для получения жидкого гелия LHeP-18 в корпусе строения вещества в 2013 г.

Работать с Евгением Борисовичем было большим удовольствием, и память о нем будет всегда со мной.



*В.Б. Ефимов***Он был удивительным
рассказчиком и докладчиком**

С Женей мы познакомились в те стародавние времена, когда я пришёл работать в ИФТТ в качестве стажёра-исследователя после окончания Физтеха. Знакомство это произошло во время ежегодного симпозиума по физике низких температур, который проходил каждый год в феврале месяце в Бакуриани. Об этом симпозиуме в Бакуриани нужно сказать несколько слов. Для физиков, занимающихся проблемами гелия, низких температур, тбилисский Институт физики совместно с Институтом физических проблем устраивал симпозиум. Проживание и заседания проходили в Доме физика, который принадлежал Институту физики, и участники симпозиума жили бесплатно. Про условия жизни в достаточно обшарпанном этом четырёхэтажном доме можно долго рассказывать, но для нас, прошедших школу жизни в общежитии, не это было главным. Длилось это мероприятие две недели. Попастъ на этот симпозиум и особенно выступить на нем было большой удачей и достаточно сложной задачей. Распорядок дня был достаточно льготный, с утра и до обеда – свободное время (которое все проводили на склонах горы Кохты на горных лыжах). После обеда до ужина проходили заседания, на которых и обсуждались все последние работы и проблемы участников. Именно это сочетание возможности покататься на горных лыжах в солнечном Бакуриани с возможностью обсудить научные проблемы привлекало туда физиков. Среди участников неизменно были А.Ф. Андреев, А.А. Абрикосов, Э.Л. Андроникашвили, Ю.А. Осипьян¹⁾. Можно долго перечислять ныне академиков, член-корреспондентов, профессоров, докторов и кандидатов наук, которые прошли школу в Бакуриани. Для всех нас это сродство природы и физики осталось в памяти и как великолепный тренинг.

Именно в мой первый приезд в Бакуриани мне запомнился Женя Гордон. В это время он с Межовым-Деглиным, который был моим научным руководителем, занимались разработкой методики получения примесь-гелиевых гелей, стабилизацией в сверхтекучем гелии возбуждённых молекул и свободных радикалов. Эта методика могла стать весьма перспективной для увеличения эффективности жидкого топлива, но это отдельная история, почему этого не получилось. Доклад Жени с Межовым про их экспериментальные наблюдения был достаточно подробно разобран высоким присутствующим собранием, но запомнился мне Женя шутками и обсуждениями на «вечерних заседаниях». Так с Межовым в буфете они каждый вечер обсуждали сколько

1) Будущие академики Андреев, вице-президент РАН; Абрикосов (1928–2017), нобелевский лауреат 2003 г.; Андроникашвили (1910–1989), директор тбилисского Института физики; Осипьян (1931–2008), директор черноголовского Института физики твёрдого тела РАН



брать бутылок Саперави на ужин – все-таки Грузия всегда славилась винами – «вчера мы брали две и хорошо спали, так что не будем рисковать и возьмём сегодня тоже две». Нужно сказать, что из-за обшарпанности и обветшалости Дома физика в комнатах было достаточно холодно, несмотря на то что батареи были все-таки немного тёплыми.

Потом с Женей мы пересекались много раз и на совместных мероприятиях, и просто по жизни в совместных компаниях. Наши сыновья учились в одном классе – так что это была ещё одна сфера пересечения.

Женя был человек очень подвижный и очень эрудированный. На любой вопрос он или знал ответ, или тут же начинал фонтанировать правдоподобными идеями.

Научная работа... Как-то так получилось, что одно из направлений его деятельности был сверхтекучий гелий. С ребятами его лаборатории мы до сих пор тесно общаемся и, как это ни странно, не толкаемся локтями. Возможно, это было заложено ещё Женей, а доброжелательность была его визитной карточкой.

Одно из плотных общений с Евгением Борисовичем у меня было в 2011 году. Да, такое официальное обращение... Я попросил Женю быть моим оппонентом. Вопросов было много, обсуждений было достаточно. Жене пришлось даже получать разрешение в Экспертном Совете ВАК для того, чтобы быть оппонентом. Не могу не выразить ещё раз свою благодарность и признательность.

Женя был удивительным рассказчиком и докладчиком. Доклады на конференциях были всегда понятными, доходчивыми и интересными. Иногда серьёзные темы перемежались шутками. Так на защите Рустема Любовского Женя начал оппонирование со следующих слов: «Так как в последнее время отрицательные отзывы оппонента, равно как и критические замечания, череваты судебными разбирательствами, то о диссертации и диссертанте я буду говорить только хорошие слова...». Смех в зале, и защита действительно хорошей работы прошла очень успешно.

Таким Женя и останется в нашей памяти весёлым, и оптимистичным, внимательным и доброжелательным...

Июнь 2020 г.



*А.Н. Иванова***Вдохновенность, увлечённость и глубина**

Я познакомилась с Женей Гордоном в семье его друга Гриши Карнауха, с которым они вместе учились на Физтехе. Здесь он был постоянным гостем и душой общества. Мягкий юмор, искренность, доброжелательность, свойственные Жене, всегда привлекали в общении с ним. К сожалению, мне не пришлось с ним поработать. Когда Женя по своим делам бывал в нашем корпусе в институте, он обычно заходил к нам в лабораторию и что-нибудь интересное рассказывал. Помню, как однажды, увлечшись, он прочёл нам целую лекцию о квантовых проволоках, нам, очень далёким по своей деятельности от этой тематики, но все были в восторге от его вдохновенного рассказа. Эта вдохновенность, увлечённость и глубина были во всех его докладах на Учёных советах и конкурсах, которые мне удалось услышать. Всегда хотелось послушать его доклады, в которых, даже для дилетанта, чувствовался масштаб ЛИЧНОСТИ.





Сотрудничество с зарубежными коллегами



*Д.А. Гордон***Германия. Ян Питер Тоеннис**

Горные вершины
Спят во тьме ночной;
Тихие долины
Полны свежей мглой

Gême

Питер Тоеннис... Мне и приятно, и трудно писать о Питере. Приятно потому, что этот маститый учёный, выдающийся человек очень уважал и высоко ценил Женю, как учёного, любил и очень хорошо к нему относился.

И ещё Питер оказался настоящим другом. Когда Жени не стало, Питер написал некролог¹⁾ с обстоятельным описанием Жениных достижений и очень старался, чтобы он был опубликован в иностранных и наших журналах. И, что касается настоящей книги, я ему безмерно благодарна, что, несмотря на большую занятость, он согласился быть одним из её ответственных редакторов.

Труднее писать о нём потому, что с Питером мы встречались, в основном, только на конференциях, поэтому у меня не было возможностей узнать о нем больше, как скажем, в случае Фроссатти, Вайса, Сильверы. Первый раз я увидела Питера в конце девяностых, мы приехали в Гёттинген, где он был директором Института Макса Планка. Я видела его тогда всего один раз на Женином докладе, который он делал в институте Питера. Я уже писала, что я любила бывать на Жениных докладах и старалась их не пропускать. Следующая встреча была в 2008 г. на конференции по криокристаллам и квантовым кристаллам, которая проходила во Вроцлаве. В архиве у Вити Ефимова, постоянного участника конференций по криокристаллам, сохранилась замечательная фотография с постерной сессии, на которой Питер и Женя что-то обсуждают. Эта фотография мне очень нравится, поэтому приведена в книге. На фотографии видно, что на стене висит распятие, надо сказать, что распятия были не только в холлах, но и в каждом номере, конференция проходила в гостинице, построенной специально для служителей церкви. На этой конференции я и познакомилась с Питером. В 2009 году, когда Антуан Вайс и Женя договорились вместе сделать эксперимент по введению пучка атомов золота в сверхтекучий гелий для получения золотых нанопроволок в лаборатории Вайса в Фрайбурге и Питер узнал об этом, он попросил разрешения приехать на пару недель и присутствовать во время экспериментов. Антуан и Сильвия Вайс приглашали нас и Питера к себе домой на ужин, возили в город, где сохранились раскопки цирка времён римских завоевателей.

1) Включён в эту книгу.



Питер был очень впечатлѐн Жениными работами, пропагандировал их сам, когда посещал разные научные сообщества, кроме того приобщил Женю к ещё одной очень известной конференции по низкотемпературным исследованиям. В 2016 году она проходила в Тулузе. Питеру тогда присвоили почётное звание гражданина города Тулузы и вручили медаль в мэрии города. А банкет этой конференции проходил в музее палеонтологии, где рядом с банкетными столами стояла фигура мамонта. Надо сказать, меню банкета и исполнение блюд подтвердили распространѐнное мнение об изысканности французской кухни. На этой конференции я впервые видела, когда Питер приехал с женой Моникой – скромной и симпатичной женщиной.

Запомнилась и конференция по криокристаллам и квантовым кристаллам 2014 г., которая проходила в Алма-Ате, в бывшем санатории ЦК компартии Казахстана. Её организовал с сотрудниками Андрей Дробышев, у которого Женя был оппонентом на защите докторской диссертации. Андрей был профессором в Казахском государственном университете им. Аль Фараби, он и его коллеги были постоянными участниками этих конференций. Оказалось, что санаторий для сотрудников ЦК был очень даже хорош: прекрасные номера, замечательная кухня, бассейн, изумительной красоты территория. Помимо роскошных условий проживания, нас баловали замечательными экскурсиями в дивные горные места с роскошными озёрами, вода в которых цвета изумруда. Конференция проходила в начале сентября, а её конец пришѐлся на Женин день рождения 8 сентября. Все наши друзья собрались у нас в номере, был и Питер, сказал очень хорошие слова в честь Жени.

Последний раз мы виделись с Питером и Моникой на такой же конференции в 2016 г. в Финляндии, но и позже мы все время поддерживали с ним отношения: Питер всегда внимательно и с интересом следил за Жениными работами. А я приобщила Питера к своему увлечению творчеством Александра Сергеевича Пушкина. Во время одной из встреч я рассказала ему о Пушкине, а по приезде домой послала один из лучших (признано критиками) переводов стихотворения «Я вас любил, любовь ещё быть может», сделанный очень талантливым юношей – Женей Гурарием, сыном наших друзей Ларисы Альтшулер (сестра Нади Мацаевой) и Владимира Ильича Гурария (двоюродного брата нашего, черноголовского, Владимира Петровича Гурария; оба брата – чрезвычайно одарѐнные люди, крупные математики и музыкально одарѐнные люди). Этот мальчик получил государственную стипендию для обучения в Принстоне. Когда наш младший сын Юлий приехал работать в Гарвард и попал на вечер африканской культуры, где, конечно, читали «африканского» поэта А.С. Пушкина, читали как раз этот перевод. Женечка и Юлик, познакомившись у нас в Черноголовке, когда Женечка с родителями приезжал к родственникам, нашим друзьям Володе и Наде Мацаевым, потом долго хранили эту дружбу. Женечка и музыкально невероятно одарѐнный че-



ловек. Вот Женин перевод стихотворения А.С. Пушкина «Я Вас любил...». Он мне очень нравится.

I loved you; and I probably still do,
And for a while the feeling may remain
But let my love no longer trouble you:
I do not wish to cause you any pain.

I loved you; and the hopelessness I knew
The jealousy, the shyness-though in vain.
Made up a love so tender and so true,
As may God grant you to be loved again.

Питеру, как человеку науки, я, конечно, послала и «О сколько нам открытий чудных готовит просвещенья дух». Это стихотворение переводила уже я, следуя подстрочнику. Питеру понравилось, он заинтересовался и, как человек, для которого английский, как и немецкий, является родным, хотел сделать более адекватный перевод. Но, видимо, руки не дошли, он до сих пор очень много работает.

Родители Питера уехали из Германии в Америку ещё до войны. Он родился в Филадельфии, штат Пенсильвания, кончил Амхертский колледж, штат Массачусетс, дальнейшее образование получил в университете Брауна, Провиденс, штат Род-Айленд, где и получил PhD. После этого он поехал в Германию, вначале работал в Боннском университете, а с 1969 по 2002 год был директором Института Макса-Планка для Стремунгсфоршунга (исследования потоков – *нем.*), ныне Институт по динамике и самоорганизации. Он до сих пор очень активно работает, недавно вышла его книга G. Benedek and J. Peter Toennies. *Atomic Scale Dynamics at Surfaces. Theory and Experimental Studies with Helium Atom Scattering.* Springer, Heidelberg, 2018.

Хочу пожелать ему и его жене Монике здоровья и долгих лет жизни. Он написал, что карантин в связи с COVID19 они переносят нормально, гуляя и работая в своём саду. Он, как когда-то поддерживал Женю, поддерживает сейчас и меня. Спасибо ему большое!



Д.А. Гордон

Швейцария. Антуан Вайс и Сильвия

Но вот Леман раскинулся кристальный,
И горы, звезды, синий свод над ним –
Все отразилось в глубине зеркальной,
Куда глядит, любуясь, пилигрим.

Байрон

Я не помню, когда и где Женья познакомился с профессором Антуаном Вайсом (Antoine Weis). Я первый раз его увидела весной 1997 г. Он тогда работал в Бонне. Это был мой первый приезд в капиталистическую страну, до этого я была в горнолыжных поездках в Болгарию и Чехословакию. К сожалению, в Праге мы были в ненастную погоду, в феврале, и всю красоту этого красивейшего города Европы не удалось осознать полностью.

Архитектура западных европейских городов меня совершенно ошеломила, и у меня, насмотревшейся этой красоты, сложилось некое романтическое отношение к средневековью, когда и были построены эти города. Я была потрясена, как они в средневековье умели строить, какой вкус был, какого развития достигло искусство, какие храмы, замки, какие картины, книги. И появилось у меня ощущение позитивной, жизнеутверждающей, направленной на созидание мощи того времени. По-моему, средневековье – это ЮНОСТЬ западного европейства. Сам Бонн не представился мне каким-то интересным городом; он, как и Вашингтон, состоит из нескольких небольших поселений. Зато совершенно потряс находящийся неподалёку замок, расположенный на холме, – и все это вдоль могучего Рейна. А имя этому замку Кёнигсвинтер. В следующие приезды в Германию мы побывали в удивительных замках, расположенных вдоль Рейна. Запомнилась мне и поездка вдоль реки Мозель. Там обилие знаменитого средневекового «фахверка». Несколько потрясающих замков разных эпох находится в этой красивейшей части Германии.

Кроме красот вокруг меня поразила и квартира Вайсов. Антуан женат на совершенно замечательной женщине по имени Сильвия. Она родом из Швейцарии, сам Антуан из Люксембурга. Сильвия по специальности лингвист, основной язык японский. Так вот, четырёхкомнатная квартира была устроена так, что одна из комнат была полностью в японском стиле. Надо сказать, что не только Сильвия является поклонницей востока, но и сам Антуан. Они обязательно на рождественские каникулы уезжали куда-нибудь на восток. Тун (так Антуана зовут в ближнем окружении) коллекционирует восточные кувшины. Один из друзей работает директором института Гёте в Дамаске, и Вайсы частенько его навещают, – тоже хорошее место для нахождения интересных восточных кувшинов. Антуан часто говорил: «Я бы хотел, чтобы меня после смерти кремировали, а прах развеяли где-нибудь на восто-



ке». Я думаю, Сильвии он сказал, где точно. Мы очень подружились с ними. В один из наших приездов в Лейден они приехали к нам из Бонна на машине. В тот раз нам сняли интересную квартиру, состоявшую из комнаты с антресолями над ней и кухни-студии. Антресоли не имели никакого ограждения, только узенькая лестница посередине комнаты вела к ним. Кто бывал в Голландии, знает, что такое голландские лестницы между этажами, – узкие, крутые, очень неудобные, – а эта была ещё и лёгкая (как бы переносная), в общем, эфемерная. Там, на антресолях, и провели они ночь, мы старше их, и предлагать поменяться местами было неловко. Утра они ждали с нетерпением, боялись спускаться ночью по этой лесенке.

Антуан – большой гурман и сам умеет и любит готовить. Долго допытывался, как мне удалось так вкусно приготовить обычную курицу. А весь секрет состоял в том, что я на минуточку забыла о ней и весь бульон выпарился. Получилось, действительно, очень вкусно.

Когда мы были в Бонне, мы в выходные дни уехали как-то в Саарбрюкен, где жил и живёт один из Жениных киевских друзей, который в годы перестройки уехал с семьёй из Киева в Германию. А на вечер по нашему возвращению из Саарбрюкена мы были приглашены к Вайсам в гости. Тут я должна сказать, что в Германии я была поражена тем, что у них поезда часто выбиваются из расписания и хвалёного немецкого порядка никак не наблюдалось. В результате мы прибыли с большим опозданием и, когда мы созванивались, Тун сокрушался, что он готовит баранину, и это очень плохо, что ей придётся постоять.

Где-то в 2000-х они переехали в Швейцарию, в Фрибург. Он получил лабораторию в Фрибургском университете. В 2007 году Женя с Окудой сделали работу, в которой наблюдали образование длинных нитей, состоящих из атомов водорода, введённых в сверхтекучий гелий. Женя предложил модель образования этих нитей путём захвата примесных атомов квантовыми вихрями. Стало понятно, что таким методом можно попытаться выращивать нанопроволоки из разных металлов, вводя в сверхтекучий гелий атомы металлов. В 2009 г. Вайс и Женя договорились, что Женя приедет к нему в лабораторию сделать этот эксперимент, было решено вводить атомы золота. Так они первые сделали золотую нанопроволоку путём введения пучка атомов золота в сверхтекучий гелий. У Вайса тогда работал приятный и способный молодой человек Пётр Морошкин из Петербурга, который активно участвовал в эксперименте. Наверное, эта работа вошла в его докторскую (к Вайсу он приехал, уже имея кандидатскую степень). В Швейцарии, как и в Германии, есть не только кандидатская степень, но, как и в России, и докторская, называется «хабилитация». Вернувшись в Черногоровку, Женя с ребятами из своей группы наладил методику получения нанопроволок из разных металлов и сплавов у себя в группе. Судьбой было отпущено ровно десять лет. Ещё при его жизни было испытано более 30 металлов и сплавов. Эти работы наш-



ли широкий отклик в научном мире, и другие авторы воспоминаний, наверняка, напишут об этом.

Что сказать о Швейцарии? Эта страна сильно отличается не только от Голландии, которая практически вся плоская, но даже от Германии. Это потрясающе красивая страна! В первую очередь, конечно, благодаря горам, – как известно, «лучше гор могут быть только горы», – но и не только. Ухоженные луга и пастбища, добротные дома и хозяйства. А города той же средневековой архитектуры и красоты, как и в соседних Франции, Германии. Фрибург один из них. Это небольшой, но очень красивый город. Совершенно восхитительный город Берн. Возили нас Тун с Сильвией и на знаменитую фабрику, где готовят известный сыр «Грюэр». Это очень интересный процесс – процесс изготовления хорошего сыра. А после экскурсии, конечно, была дегустация и угостили нас знаменитым швейцарским «фондю». Тун показал нам, как получается вкусно, если вначале хлеб или картошку обмакнуть в белом вине, а потом в горячем расплавленном сыре. Вкусно, нет слов! Но Женя быстро предложил попробовать макать в водку (наверное, вспомнил знаменитую тюрю). Тоже хорошо пошло, Туну понравилось.

В один из выходных дней во время пребывания в Швейцарии мы поехали посмотреть город Берн. Это потрясающе красивый город! Хотели пойти в музей Эйнштейна, но прибыв на место, увидели, что билеты стоят очень дорого. И Женя отказался идти. Я предложила компромиссный вариант: «Иди ты, а я пока погуляю». Мне было обидно, что Женя, который по словам В.Л. Тальрозе был прирождённым физиком, не побывает в музее Эйнштейна, физика №1. Но Женя отшутился: «Эйнштейн, узнав цену входного билета, поступил бы точно так же».

В один из выходных дней к нам приехал Юлик. У него была конференция в Вене, и он заехал к нам по дороге на 2–3 дня. Мы арендовали машину, вместо заказанной Хонды нам дали Мерседес и мы отправились в путешествие. Вначале в Шильонский замок, потом в Веве и Монтрё, – сказочной красоты места. Наверное, быть узником, даже в замке, мало приятно, а вот жизнь Чаплина в Веве и Набокова в Монтрё, я думаю, была замечательной. Во всяком случае, красота их окружала неопишуемая.

Тун недавно вышел на пенсию и оставил работу в университете, хотя, по нашим меркам, ещё достаточно молод и мог бы поработать. Он увлёкся последние годы фотографированием птиц. И теперь они ездят не просто в восточные страны, как это было раньше, а туда, где могут увидеть птичьи эксклюзивы. Недавно были в каких-то латиноамериканских джунглях. Жизнь в зарубежных командировках, особенно для меня, поскольку я не работала, сильно зависела и от того, какие люди приглашали Женю, и от их внимания к нам. Тун и Сильвия, безусловно, из тех людей, которые делали приятной нашу жизнь во время пребывания в их стране, согревая её своим теплом и вниманием.



Д.А. Гордон

Голландия. Джорджио Фроссати и Яссу

Голландия есть плоская страна,
переходящая в конечном счёте в море,
которое и есть, в конечном счёте,
Голландия.

Иосиф Бродский

Я уже писала, что Женя очень серьёзно относился к конференциям, и было несколько конференций, которые он обязательно посещал. К ним относилась конференция по криокристаллам и квантовым кристаллам. На одной из этих конференций, проходившей в Польше, Женя познакомился с известным специалистом в области низкотемпературной физики профессором Джорджио Фроссати, который работал в лаборатории, основанной Нобелевским лауреатом Камерлинг-Оннесом в Лейденском университете. Фроссати заинтересовался исследованиями Жени и пригласил его поработать к себе в лабораторию. Женя согласился на годовой контракт с условием, что этот год будет распределён на четыре года по три месяца в году – месяц весной (апрель) и два в конце года (ноябрь-декабрь).



Лейденский университет, лаборатория Камерлинг-Оннеса

Первый раз мы приехали в Лейден в конце 1998 г. Я была перед этим (в 1997 г.) две недели в Бонне, Женя тогда посещал лабораторию профессора Антуана Вайса, так что некоторое представление о красавице Европе у меня уже было. Но сразу на два месяца я попала впервые.

Голландия меня приятно впечатлила прежде всего необычайной толерантностью своих граждан. Это очень доброжелательная, абсолютно лишённая всякого снобизма, очень терпимая публика. Страна, в которой каждый гражданин, и молодой, и не очень, свободно владеет английским¹⁾. Сочетание всего перечисленного делает пребывание иностранца в этой стране абсолютно комфортным. А настоящее потрясение вызвала архитектура города. Лейден по-

1) Как рассказали нам, студентам МФТИ, голландские студенты, приехавшие в 1957 г. в Москву на Всемирный фестиваль молодёжи, у них в школе английский, немецкий и французский языки – обязательные предметы. Издающийся в Голландии известный журнал *Physics Letters* печатает статьи на всех трёх языках (*примеч. ред.*).



явился на страницах летописей в 922 г. как владение епископа Утрехтского, в XII веке был построен замок, вокруг которого появилась бойкая торговля. Была развита текстильная промышленность, а в 1581 г. в Лейдене развернули свою деятельность известные на всю Европу печатники Эльзевиры. За храбрость, проявленную жителями в войне за независимость с испанцами, Вильгельм Оранский разрешил им выбрать между освобождением от налогов или строительством университета. Лейденцы выбрали университет. Он был построен в 1575 г., в его вестибюле стоят приборы, на которых работали Зееман, Камерлинг-Оннес, а на доске, где оставляли и оставляют свои автографы именитые посетители (как у Любимова на Таганке) можно найти автограф Эйнштейна. Кстати, там оставил свой автограф и наш соотечественник академик Исаак Маркович Халатников, который организовал и в течение многих лет возглавлял Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау в Черноголовке.

Фроссати и его жена Яссу родом из бразильского Сан-Пауло. Их родители, его из Италии, её из Японии, переехали туда до войны. Джорджио и Яссу вместе учились в университете в Сан-Пауло. Он защитил там диссертацию, затем поехал поработать во Францию и через 10 лет был приглашён в лабораторию Камерлинг-Оннеса в Лейденском университете. Высокий, стройный итальянец-красавец, он в тот период увлекался идеей, за решение которой обязательно была бы Нобелевская. Задача была связана с гравитационными волнами. По лаборатории были разложены сияющие боками отшлифованные медные шары. Их чистила и шлифовала до блеска энергичная аспирантка по имени Арлетта, в связи с чем Женя немедленно перефразировал известное выражение «Орлята учатся летать» в «Арлетта учится летать». Проблема, над которой решили вместе поработать Женя и Фроссати, явилась темой диссертации Алексея Усенко, который приехал к Фроссати в аспирантуру после окончания Харьковского университета. Алёша, по словам Жени, был способный парень, но увлечённости наукой в нем не ощущалось, после окончания аспирантуры ушёл работать в банк, так и не защитив диссертацию, хотя работа была готова. Более того, Фроссати попросил Женю приехать специально на пару недель за тем, чтобы помочь написать и завершить диссертацию, что и было сделано. Но Алёша и готовую диссертацию не стал защищать...

Фроссати очень уважал Женю, высоко ценил его экспериментальное мастерство, широкую эрудицию, знания и, конечно, незаурядные работоспособность и ответственность. Всегда лично следил, чтобы нам сняли хорошее жилье, заботился о нашем комфортном пребывании. Они с Яссу даже давали нам её машину. Мы не так часто ею пользовались, но, тем не менее, случалось. В выходные дни мы ездили на берег моря. У голландцев приняты прогулки вдоль моря, несмотря на сильные ветры. Народ они крепкий, здоровый, закалённый. Абсолютно все, несмотря на пасмурное небо, имеют загорелые лица, потому что пользуются ультрафиолетовой лампой для загара.



Один раз мы взяли с собой в апреле нашего старшего внука Лёву, ему тогда было 6 лет. Фроссати снял нам дом на берегу моря, в 11 км от университета. Несмотря на то, что можно было пользоваться машиной Яссу, Женя частенько ездил туда и обратно на велосипеде. Так уставал, что однажды вечером прилёг к внуку и на просьбу рассказать сказку, начал её, как обычно, словами: «Жили-были», а через минуту продолжил, засыпая: «... кашалот нырнул, заснул и опоздал на работу». Внук, несмотря на то, что не знал ни слова ни по-английски, ни по-голландски, прекрасно общался с соседскими детьми, среди которых выделялась восьмилетняя, здоровая, розовощёкая, красивая девочка по имени Роша. Она оказывала ему особое внимание, он у нас всегда был красавчиком. Когда мы в следующий приезд заехали к ним с подарками, она зарделась. Было впечатление, что мы чуть ли не сваты.

Гуляя по Лейдену, любуясь красотами средневековой архитектуры, мы порадовались очень симпатичной находке лейденцев: помещать на глухих стенах зданий стихи или цитаты великих поэтов, писателей, мыслителей на языке оригинала. Мы нашли стихи пяти русских поэтов, но, к моему изумлению и огорчению, среди них не было Пушкина. Особенно это было обидно потому, что Пушкин занимает особое место в моей жизни. В юности я, как и все советские школьники, знала его произведения, включённые в школьную программу. Они мне нравились, но не больше. И никакой особой зависимости от него у меня тогда не было. Понимание значимости поэта пришло позже, к счастью, не в таком уж преклонном возрасте. Я считала и считаю, что в мировой культуре Пушкин равнозначен таким фигурам, как Данте, Шекспир, Гёте. Я не искусствовед и не могу провести сравнительного анализа их творчества, я могу судить только по силе влияния их творчества.

В Лейдене работает много приглашённых учёных, которые нередко приезжают с семьями и детьми. К чести Лейденского университета, они замечательно наладили работу международного центра, который помогает семьям адаптироваться к жизни в чужой стране (многие приезжают на несколько лет). Работали кружки по изучению языков, устраивались всевозможные встречи, экскурсии и т.д. По вторникам были встречи, на которых кто-нибудь выступал с докладом или с каким-нибудь сообщением. В работе центра принимали активнейшее участие жены учёных Лейденского университета, многие из них были иностранками. Среди людей, с которыми мы познакомились, были люди и образованные, и не очень. Образованные, узнав, что мы из России, говорили: «О, у вас, русских, великая литература – Достоевский, Чехов, Толстой». И никогда – Пушкин. Мне стало очень обидно, и я решила на одной из встреч во вторник рассказать им о том, кто такой Пушкин. Я начала свой рассказ с того, что я очень обескуражена тем, что не нашла Пушкина на стенах Лейдена, хотя и Данте, и Шекспир, и Гёте здесь присутствуют, а он равнозначен им. Какая-то язвительная дама тут же спросила: «Это Ваше мнение?» Да, тогда для меня это было моё мнение.



Позже я нашла работы пушкинистов, в которых он сравнивается с этими китами. Но наибольшее впечатление на меня произвела лекция сотрудника Пушкинского дома (на канале «Культура»). Когда они помогали устраивать выставку автографов в музее автографов в Швейцарии, курировавший выставку директор этого музея, человек, весьма сведущий в своей профессии, увидев рабочие тетради Пушкина, сказал: «Раньше я считал, что мировая культура держится на трёх китах: Данте, Шекспире и Гёте. Теперь я уверен, что на четырёх». И добавил Пушкина... .

В тот вечер я рассказала не только о творчестве Александра Сергеевича, но и о его трагической судьбе. Мне приятно было, что я вызвала интерес у публики. Одна из слушательниц в следующий мой приезд сказала, что она, будучи в отпуске у себя в Испании, прочла рекомендованный мной набоковский перевод Евгения Онегина. Организаторы лекции просили меня повторить её в очередной приезд.

Кроме Лейдена мы старались по выходным дням побывать и в других городах: Амстердаме, Дельфте. Ну и, конечно, посетить потрясающие музеи. Известно, что Голландия – родина многих великих художников. Гениальный Рембрандт родился в Лейдене, великий Вермеер в Дельфте. И мой самый любимый художник Ван-Гог тоже голландец.

Голландия мне дорога ещё и тем, что там я встретила мою очень близкую и любимую подругу Пенни Мак Гахан. Её муж после окончания Принстонского университета работал в одной из американских национальных лабораторий, через какое-то время ему было предложено поехать работать в Европу, в НАТО. Перед Голландией они десять лет прожили в Бельгии. Пенни была необыкновенной – очень умная, с необычайно остро развитым чувством юмора, доброжелательная и демократичная. Её предки прибыли в Америку из Германии, а вот прабабушка её мужа, Питера, была русская, происходила из дворянской семьи из Тулы, она была журналисткой. Прадед Питера, Алоиз Мак Гахан, приехал в Россию из Америки, как корреспондент какой-то газеты, участвовал в военных экспедициях генерала Скобелева. Недавно Питер с детьми проехал по местам, где бывал его прадед Алоиз с армией Скобелева, прислал мне фотографии с Шипки. Так вот, Алоиз женился на русской журналистке, и она поехала с ним в Америку в качестве корреспондента русской газеты. Приезжала в Россию в начале двадцатого века, встречалась с Толстым, кажется, по просьбе молокан. Питер вышел на пенсию в 63 года и не захотел оставаться в Европе, хотя Пенни предпочла бы остаться. Они вернулись в Америку где-то в 2008–2009 гг., поселились в Вашингтоне. В каждый наш приезд в Америку они обязательно нас навещали. К сожалению, Пенни тоже покинула этот мир, она была ровесницей Жени и ушла из жизни на год раньше него.

Джорджио с Яссу живут по-прежнему в Лейдене, Джорджио оставил университет, основал свою компанию по производству криостатов. Уверена, он делает классные криостаты! Иногда мы обмениваемся поздравлениями.



*Д.А. Гордон***Польша. Анджей Ежовски и его команда**

Зашёл ты нечаянно, ненароком –
Ты никаким ведь не связан сроком,
Побудь же со мною теперь подольше.
Помнишь, мы были с тобою в Польше?

Анна Ахматова

Среди конференций, посещение которых было для Жени обязательным, была конференция по криокристаллам и квантовым кристаллам.

Эта конференция имеет долгую историю. Первый семинар по криокристаллам и квантовым кристаллам организовали в 1979 г. украинские учёные В.Г. Манжелий (Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина АН УССР, г. Харьков) и А.Ф. Прихотько (Институт физики АН УССР, Киев) в г. Вильянди (Эстония). Следующие семинары прошли в Харькове, Донецке, Одессе. Со времени проведения её в 1995 г. в Казахстане конференция получила международный статус. Она проходит раз в два года. После получения международного статуса она проходила 11 раз в разных странах, пять из 11 были проведены в Польше (1997, 2000, 2004, 2008, 2018).

Я первый раз попала на неё в 2008 г., она проходила в красивом городе Вроцлаве. Жили мы в гостинице для священнослужителей. Там останавливался соотечественник поляков папа Иоанн Павел II, человек выдающийся и достойный. Таким соотечественником можно гордиться. Рядом находится костёл, в котором работал Николай Коперник. Организовывал конференции, проходившие в Польше, Анджей Ежовски (Andrzej Jezowski) со своими сотрудниками, среди которых выделялся деликатностью Пётр. На конференции, естественно, было много харьковчан из ФТИНТа, включая очаровательную дочку основателя этих конференций В.Г. Манжелия Лену. Я со многими из них близко подружилась, Женья с ними был давно знаком. Много я слышала от нашего киевского друга Димы Лехциера о его друге Юре Фреймане. С ним я познакомилась на этих конференциях, с Мишей Стржемечным была знакома раньше. Он приезжал к нам в Черноголовку. Кроме нас в Черноголовке жили их с Юрой Фрейманом близкие друзья Валерий Шикин и его жена, красавица Ниночка Гордон. А вот с их симпатичными жёнами я познакомилась на этих конференциях. Жена Миши Стржемечного Раечка стала мне очень близким человеком. Красивая, умная, доброжелательная, и хотя мы редко общаемся, я знаю, что Раечка всегда рядом со мной. Неизменным украшением этих конференций является Лидочка Якуб. Они с мужем, известным физиком-теоретиком Е. Якубом, организовывали эту же конференцию у себя в Одессе, она тоже прошла замечательно. Анджей хорошо знает русский и хорошо знаком с харьковчанами, потому что проходил аспирантуру во ФТИНТе. Теперь он дирек-



тор Вроцлавского института низкотемпературных и структурных исследований им. В. Тшебятковского Польской академии наук.

Я с Анджеем уже была знакома. Мы познакомились в Японии во время нашего пребывания в Киото. Анджей приехал с женой, по-видимому, на конференцию, потому что они были недолго. Мы их водили по достопримечательным местам, потом пошли в индийский ресторан, где заказали куриные ножки, которые я лично не смогла взять в рот по причине такого количества перца, что рот пылал. Потом мы пошли съесть мороженого и выпить кофе. Женя с Изей (так звали жену Анджея) вопрошали периодически: «Где же налёды?» Налёды по-польски – это мороженое. Женя неплохо знал польский и в молодости частенько переводил мне детективы. По-видимому, пожар после цыплят пылал у них внутри, его нужно было погасить. Были мы с Женей и на последней конференции по криокристаллам и квантовым кристаллам в августе 2018 г. Женя делал доклад, в котором рассматривал возможности применения его метода по конденсации примесных частиц в квантовых вихрях сверхтекучего гелия к космическим исследованиям. На сей раз конференция состоялась в очень красивом дворцовом ансамбле *Wojanów* около г. Еленя-Гура, который расположен в 110 км от Вроцлава. Замок окружают красивые пейзажи Национального парка Карконоше. Сотрудники Анджея, среди которых было много симпатичных молодых людей и девушек, делали все, чтобы участникам конференции было интересно. Были экскурсии, концерты. Словом, была та чудесная атмосфера, которая так украшает конференции, не говоря уже о том, что было живое волнующее общение друг с другом, которое мы теперь, после карантина и изоляции в связи с пандемией Covid-19, так ценим.

Спасибо Анджею и его сотрудникам за то удовольствие, которое неизменно получали участники организованных ими конференций.



*Д.А. Гордон***Америка**

Вы, люди грядущих столетий, которые услышат меня!
И вы, кто б вы ни были и где бы ни жили, кого я не назвал!
Привет вам! Привет и любовь от меня и Америки!
Каждый из нас неминуем, каждый из нас безграничен –
каждый из нас обладает правом на эту землю,
Каждый из нас несёт в себе вечные цели земли,
Каждый из нас в равной мере божественен.

Уолт Уитмен

Первый раз в Америку я попала в 2004 г. Мы приехали в Калифорнию, Женя получил приглашение посетить лабораторию профессора Ары Апкарьяна. Имя Ары известно многим в Черноголовке по нескольким причинам. В разные годы у него работали на позиции постдока Илья Гольдшлегер и Саша Бендерский, дети наших черноголовских учёных, оба выпускники Физтеха. Многие встречались с Арой на конференциях. Я пересекалась с ним на конференциях по химии низких температур в Черноголовке и Ереване и на конференции по криокристаллам и квантовым кристаллам в Одессе. В момент нашего визита на позиции постдока у него был как раз Илья Гольдшлегер и в качестве приглашённого исследователя наш японский друг Така Кумада, который считает себя Жениным учеником, и читатель может найти в этой книге его воспоминания о совместной с Женей работе в Японии. Эти воспоминания меня глубоко тронули. Я потрясена его умением понимать суть и умение быть благодарным.

Университетский городок в Ирвайне, где Ара работает, произвёл на меня, как и все американские университетские городки, очень приятное впечатление. Надо отметить, что пришельцы на американскую землю из Старого Света принесли с собой не только мысль захватить новые земли и разбогатеть, но и мысль продвижения на новой земле идей просвещения, установления протестантизма, который призывал людей к жизни по евангелическим заветам. На корабле «Мэй флауз», который отчалил из Лейдена в 1625 году в Америку, были, в основном, протестанты, спасавшиеся от преследования католиками. Меня поразило, что уже через шесть лет после прибытия в Америку, т.е. в 1631 г., эти люди построили колледж, из которого потом вырос Гарвард.

Следующей для Жениного визита была лаборатория Андрея Вилесова, с которым Женя был хорошо знаком по России и по Германии. Женя был оппонентом кандидатской диссертации Андрея в России. После защиты Андрей работал в Германии в Институте Макса Планка в Гёттингене, где сделал докторскую диссертацию в лаборатории Питера Тоенниса. После защиты Андрей получил позицию в университете города Бохума, но, поработав очень недолго, переехал в Америку, получив профессорскую позицию в университе-



те Южной Калифорнии в Лос Анжелесе. Последний раз с Андреем и его семьёй мы виделись на конференции по квантовым кластерам, которая проходила в австрийских Альпах.

В эту же поездку мы навестили наших киевских друзей, которые первыми эмигрировали в Америку в 1970-е годы. С Валериком Фёдоровым Женя был знаком с детства, они жили в одном доме и детство прошло в одном дворе. У Валерика очень симпатичная жена Майя и замечательный сын Игорь. Они по приезде в Америку жили в небольшом городке около Лос Анжелеса. Сын закончил обычную «паблик скул» (государственную школу) с такими оценками, что его взяли учиться в один из лучших университетов мира, Стэнфорд, на медицинский факультет. Об этом событии написали в местной газете, и власти устроили по этому поводу праздничное мероприятие. Я, по сути, первый раз познакомилась с ними при этой встрече. Они очень хорошие и я им очень благодарна за гостеприимство и дружбу, которую мы храним до сих пор. Майя стала мне очень дорогим и близким человеком.

В следующий приезд Женя посетил лабораторию Нобелевского лауреата Дэвида Ли, к которому уехал в 2000-е годы работать бывший Женин сотрудник Володя Хмеленко. Они продолжают исследования, используя методику, разработанную Женей с сотрудниками. Об этой методике и последовавших во многих научных центрах мира исследованиях, где она используется, подробно написал Питер Тоэнниес в некрологе, написанном им сразу после Жениного ухода. Женя не раз подчёркивал, что успеху в разработке этой методики сильно способствовало его умение и опыт работы с атомными пучками.

В Америке Женя обязательно посещал лабораторию известнейшего специалиста в области исследований по металлическому водороду Гарвардского профессора Айка Сильверы. С Айком мы пересекались несколько раз и на конференциях по криокристаллам и квантовым кристаллам. У Айка очень симпатичная жена, китайка Лили, очень живая и активная женщина, имеющая свой магазин и риэлторское дело. У них громадный дом в одном из престижнейших районов под Бостоном, Лексингтоне. Никто из четверых детей не пошёл в науку.

Айк родился в еврейской семье эмигрантов из Сирии. В семье, в том числе и он, прекрасно говорили на арабском языке. Айк как-то нанял такси, водитель был араб, у него в салоне сидел другой араб. Они моментально вычислили (видимо, врождённые антисемиты), что Айк еврей, и выдали что-то нелицеприятное в его адрес на своём языке, который Айк прекрасно понимал. Выходя из машины, Айк попрощался с ними на чистейшем арабском. В один из приездов к Айку выяснилось, что аспирантом у него на данный момент является молодой человек из России по имени Вася (фамилию не помню). Миртесен, Вася оказался выпускником Физтеха, а научной базой у него был Институт физики твёрдого тела в Черноголовке, конкретно, лаборатория академика В.Б. Тимофеева.

Были мы с Женей и в университете Эмори города Атланты. Женя посетил лабораторию Майкла Хевена. Помню, ругался, какую нагрузку ему задал



Майкл: кроме 40-минутного доклада, надо было посетить восемь исследовательских групп. Это помимо лаборатории самого Майкла и бесед с ним. Майкл – англичанин, удивительно тактичный и интеллигентный человек. Приезжал в Черноголовку по приглашению Жени, мы принимали его у нас дома. Атланта, – кроме того, что является родиной Скарлетт О’Хары, героини романа «Унесённые ветром», – изумительной красоты город. В Атланте, конечно, есть музей Маргарет Митчелл, написавшей этот роман, захвативший внимание миллионов людей. Какой бы дурью сейчас не занимались граждане в Америке, возбуждённые пандемией COVID-19 (например, запретом показа фильма «Унесённые ветром» из расовых соображений), а слов из песни не выкинешь. События, описанные в романе, – это история их страны.

Ещё у Жени были совместные проекты и исследования с Алексеем Безрядным, который тоже работал то ли в ИФТТ¹⁾, то ли в ИПТЭМ²⁾ в Черноголовке. Он сейчас «фулл» профессор в Урбане. К нему Женя ездил один, я оставалась с детьми. В 2006 г. переехал из Канады в Бостон наш сын Юлий, получив позицию постдока, а через два года постоянную позицию в астрофизическом центре Гарварда. В тот год была суровая зима. Женя приехал замёрзший, продорогший от холода и ветров чикагских, они с Алексеем были на конференции в Чикаго. Заразился гриппом и нас всех заразил. Болели долго и тяжело.

Во время приездов в Америку нас, когда мы останавливались в доме у сына, приезжали навещать наши дорогие и любимые друзья Дима и Лара Лехциеры, воспоминания которых о Жене читатель встретит в этой книге. Димочка – друг Жени с детских лет. Закончив Харьковский университет и проработав несколько лет в Харьковском ФТИНТе³⁾, он вернулся в Киев к своей замечательной маме. Она у него была не только красавица, но и известный биолог. Жили они в старинном доме по Владимирской улице в четырёхкомнатной квартире с высоченными потолками и кухней метров в двадцать. Вначале она была коммунальной. Дима женился на красавице Ларочке, которая была директором музыкальной школы в Харькове. После рождения двоих деток квартира стала полностью принадлежать им. Они уехали в Америку в девяностые, оставив квартиру и не получив за неё ни копейки. Уехали они вслед за дочерью. Вначале было трудно, никому не достаётся легко переезд в другую страну, с другой культурой, языком, традициями и менталитетом. Это только кажется, что там на людей сыпется манна небесная. Потом у многих все налаживается, а некоторые так и не могут адаптироваться к новым условиям.

В Бостоне и его пригородах живёт много выходцев из Черноголовки. В городе Ньютоне давно поселились дети наших черноголовских учёных – Юлечка Рашба, Серёжа Броуде, Серёжа Кравченко. С Серёжей Броуде и

1) Институт физики твёрдого тела РАН.

2) Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН.

3) Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Верника Национальной академии наук Украины.



Рашба мы встретились в первый же приезд в Бостон. Рашба жили все вместе и старшие, и младшие. Эмик¹⁾, известнейший физик-теоретик из Института теоретической физики им. Л.Д. Ландау в Черноголовке, в 90-е уехал работать в Америку. Вначале он работал в Солт Лейк сити, а потом получил позицию профессора в Гарварде. Много лет они жили вместе с семьёй дочери Юли в Ньютоне. Мы в каждый наш приезд встречались с ними: то они к нам приезжали, то мы к ним. Когда наша невестка Хеля, жена Юлика, узнала, что в её дом приедут наши друзья Рашба, спросила: «Это тот самый Рашба?». Она у нас физик. Женя говорил, что работы Рашба очень востребованы в мире. Последние лет 6 они стали жить отдельно от детей. Мы с Женей всегда навещали их и в новом месте жительства. Эмик поражал нас своим интеллектом, потрясающей памятью, неутомимой энергией. Как вы уже поняли, Женя Гордон был невероятно энергичным и деятельным человеком, но к концу наших встреч даже он уже утомлялся, а Эмик был ещё молодцом.

Эмик с Эрной приехали в Черноголовку из Киева в 1966 г. одновременно с моим руководителем и учителем В.Л. Броуде, только Владимир Львович ехал работать в ИФТТ, а Рашба – в Институте теорфизики. Мы были с Рашба знакомы в Черноголовке, но не были так близки, они заметно старше нас с Женей. Эмик и Эрна из семей известных киевских фамилий. Женина мама часто вспоминала слова своей мамы, Жениной бабушки Берты, когда кто-нибудь заболел: «Сейчас вызовем доктора Рашба и все пройдёт». Эрна из семьи известных адвокатов, репрессированных в 1937-е годы. Я помню хорошо её маму – элегантную, седоволосую даму, которая даже в лютые морозы ходила в шляпке-таблетке, которая прикрывала одну макушку. Она всегда сохраняла гордую осанку. И это после жутких испытаний, пройденных в лагерях.

В последний мой приезд я была у Эмика и Эрны вместе с Толей Рабинкиным. Многие в Черноголовке, наверняка, помнят эту замечательную пару – Толю и Наташу Рабинкиных. Толя работал у Игоря Фомича Щеголева. Надо ли говорить, что это значит? Игорь Фомич был не только выдающимся учёным, но и человеком редкого благородства. К тому же, оба – и Игорь, и Толя, – были альпинистами. Наташа работала в математическом отделе Химфизики. Весёлая, с хорошим чувством юмора, она была яркой, обаятельной женщиной. Наташи, к сожалению, лет шесть уже нет. Их дети добились больших успехов. Галя работала в клинике при Гарварде. У неё двое замечательных детей. Дочь Сара похожа на свою бабушку Наташу. Галин брат Дима работает в исследовательской лаборатории в МИТ (Массачусетский технологический институт). И Толя – молодец! Прекрасно выглядит, активен.

Америка удивительно красивая страна. Люди – доброжелательные, им на самом деле не так много дела и до нас, и до кого-то ещё. Из поразившего нас с Женей в Америке было то, как они относятся к своей истории. Недалеко от Бостона находится город Салем. Большинство людей знает, чем прославился

1) Эммануил Иосифович Рашба.



этот город, – знаменитым судебным процессом, проходившим с февраля 1692 по май 1693 г. По обвинению в колдовстве было повешено 14 женщин и 5 мужчин. Когда мы выходили из музея, мы заметили на стенах стенд, на котором черным по белому были перечислены события, которые имели место в их стране и за которые им стыдно:

1. Салемский процесс, 1692–1693 гг.

2. Ку-клукс-клан – организация американских расистов, возникла после гражданской войны 1861–1865 гг.

3. Маккартизм – политика антикоммунизма, 1940–1957 гг., по фамилии сенатора Джозефа Раймонда Маккарти.

4. Политика по отношению к японцам, проживавшим в Америке, после Пёрл-Харборской бойни. 7 декабря 1941 г. Япония совершила вероломное нападение на Пёрл-Харбор, после чего Америка была вынуждена вступить во Вторую мировую войну.

Это то, что я помню. Там, по-моему, было ещё несколько пунктов. Но это – здорово, когда на государственном уровне говорится о постыдных событиях, имевших место в жизни страны. Говорится это для того, чтобы воспитывать молодёжь, чтобы эти стыдные вещи не повторялись.

Говоря об Америке, не могу не сказать пару слов о потрясающем городе Нью-Йорке. В 2006 г. Женя поехал на конференцию по спектроскопии, которая проходила в Коламбусе. Это очень известная среди спектроскопистов конференция, Женя бывал на ней часто, но мне не довелось побывать ни на одной из них. Зато на неё приезжал ежегодно наш младший сын Юлик со всеми сотрудниками и аспирантами известного спектроскописта профессора Питера Бернарда из Канады, который был руководителем диссертации Юлика. В этот, 2006 год, Юлик ехал туда уже от Гарварда. А я на это время осталась у своего одноклассника Семёна Браиловского и его жены Светочки в Нью-Йорке.

У них была очень хорошая трёхкомнатная квартира, и не могу не сказать несколько слов о том, что я была потрясена, какой уход обеспечило государство за его почти 90-летней мамой. Она была лежащая больная, потерявшая реальное восприятие мира, практически ни на что не реагировала. Правда, я была очень тронута сценой, когда Семён подошёл и погладил её по щеке, и в её глазах мелькнула неимоверная теплота. Единственный сын, которому была отдана тяжёлая, трудовая жизнь. Насколько я знаю, папа Семена погиб на фронте и она одна его подняла. Семен со Светой уехали очень рано на работу. Где-то около 8 утра пришла женщина, сняла трубку, позвонила куда-то и доложила, что пришла на работу. После этого она подняла бабулю, повела в туалет и душ, затем покормила. Завтрак был сбалансирован, я видела сливовый сок (конечно, полезный для лежачего больного) и кашу. Перед моим уходом, в 11 ч., пришла очень стройненькая, тёмненькая, как шоколадка, девушка, обработать бабуле ноги и сделать укол. Я была потрясена этим уходом за лежачей больной, пожилой женщиной, не работавшей на это государство ни од-



ного дня. Семён, правда, сказал, что это приехавшим с ними пожилым родителям достался такой уход, а вот им уже будет тот, который они сами зарабатывают.

Будучи в Нью-Йорке нельзя не сходить на знаменитые мюзиклы на Бродвее. Пока Семён со Светой были на работе, я ходила на дневной спектакль мюзикла «Продюсеры». Днём билеты в два раза дешевле. В один из трёх дней моего пребывания у них Семён взял отпуск и показал мне Нью-Йорк. Я ему очень благодарна.

Надо сказать, в институте у нас была замечательная группа и мы сохранили дружбу и тёплые отношения до сих пор. Наша юность осветилась ещё и тем, что пришлось на годы «оттепели». И ВУЗ наш был замечательный. Сильнейший преподавательский состав: лекции по математике читала О.Н. Цубербиллер, её задачником пользуются физтехи, органическую химию читал академик И.Л. Кнунянц, а строение вещества – знаменитый и опальный Я.К. Сыркин. Будет понятно, какая атмосфера царила в нашем ВУЗе, если скажу, что лет десять назад я, будучи приглашена на празднование 110-летия нашего института, посетила кафедру физхимии, которой заведовал Я.К. Сыркин, и мне показали его личное дело. Так вот, когда в 1950-е годы он отовсюду был изгнан, наш ректор тех лет, П. Зубов, взял его на работу на полную ставку (я видела этот приказ). Вот это был человек, и дух в нашем Институте тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова был соответствующий!

Следующий визит в Нью-Йорк состоялся где-то в 2010–2012 гг. Юлику нужно было получить паспорт в нашем консульстве в Нью-Йорке, а мы ехали из Атланты и решили все вместе провести выходные дни в Нью-Йорке. Юлик очень удачно снял номер в гостинице недалеко от Таймс-сквер. В первый день мы пошли в Метрополитен музей. Он у них роскошный. Наибольшее впечатление произвела на меня картина Брейгеля Старшего «Жатва». Вечером пошли во французский ресторан, где все тоже было замечательное – таких вкусных морских гребешков я не ела даже в Японии. За соседним столиком сидела очень симпатичная пара. Мы познакомились с ними. Мне всегда интересна история семей, интересны судьбы людей. Женщина была очень красивая, типа Роми Шнайдер. Оказалось, её предки – выходцы из Австрии (откуда и Роми, знаменитая киноактриса), его – из Литвы. Она спросила, на каком языке мы говорим, что они прислушиваются к нашей речи и гадают. Эта встреча оставила очень приятное впечатление. Мимолетная, но остающаяся в памяти навсегда. На следующий день мы пошли погулять в знаменитый парк, а потом пошли в музей Гуггенхайма. Ну, а к вечеру, утомлённые, отправились на китайском автобусе за 15 долларов в родной для Юлика Бостон. Дорога занимает чуть больше четырёх часов, за окном мелькают живописные пейзажи.

Хорошая страна Америка! Пусть в ней царят мир и процветание, как и повсюду на нашей прекрасной планете! Климат только в большинстве районов плохой – очень жарко и очень влажно.



Д.А. Гордон

Финляндия. Марку Расенен

Стой твёрдо, народ непреклонный!
Недаром меж скал ты возрос:
Ты мало ли грудью стеснённой
Метелей неистовых снёс!

Валерий Брюсов

В Финляндию я первый раз поехала с Женей в 1996 г. зимой по приглашению профессора Марку Расенена, который работал в университете в Хельсинки. Хельсинки на меня не произвёл никакого особого впечатления. Впечатлили меня оборудование в лаборатории: криостаты, краны, зажимы и прочие инструменты – красивые, сияющие, и идеальный порядок в лаборатории. Понравился дом, в котором жил Расенен с семьёй. Это был дом, построенный ещё до войны. Тогда же я впервые узнала, что электричество у них ночью стоит дешевле и стиральные машины они используют, в основном, в ночное время. Позже, часто бывая в Европе, я обратила внимание на то, что европейцы строго следят за потреблением электричества, газа и расходами на прочие бытовые нужды, но при этом почти каждая европейская семья считает совершенно неукоснительными походы всей семьёй в рестораны, кафе в выходные дни. Для нас, людей с совершенно другим укладом жизни, всё это было в диковинку.

А вот какой город меня восхитил в тот же приезд – это Ювяскюля. Он расположен к северу от Хельсинки. Если в Хельсинки низко висели серые тучи и в воздухе преобладала влага, то в Ювяскюля искрился на солнце снег, была настоящая зима и город выглядел, как в сказке. Удивили меня в тот приезд и женщины, одетые в суконные юбки до пят и прилегающие по талии меховые куртки. С одной из них я столкнулась на входе в магазин, и она мне что-то предлагала, но я ничего не поняла. Когда я спросила Расенена: «Эти женщины одеты в национальный костюм?», он ответил: «Это-цыгане».

Следующие два раза в Финляндии я была на конференциях. Одна из них (в 2013 г.) была в моем любимом Ювяскюля. Это была конференция по химии низких температур. Эти конференции Женя старался не пропускать. Я была на нескольких из них. Конечно, на той, которую проводил Евгений Яковлевич Мисочко в Черногловке, потом в Ереване, Суздале, и на этой, о которой пишу. Я не была участницей, была в отпуске, но заседания я посещала. В то же время, воспользовалась положением отпускницы и примкнула к экскурсии, устраиваемой для сопровождающих лиц. Нас возили в старинную деревянную церковь и на конфетную фабрику. Надо ли говорить, что старинное деревянное зодчество завораживает простотой, красотой, изяществом. Отступая от рассказа о Финляндии к деревянным церквям, хочу сказать пару



слов о впечатлениях о Суздале. Это потрясающе красивый город. Гуляя по нему, я даже задумалась над вопросом: если живёшь в такой красоте, наверное, она как-то должна влиять на тебя. Человек должен становиться тоже красивее. Особенно это должно относиться к таким городам, которые гармонично сливаются с природой. В Суздале тоже есть деревянные церкви. Финские отличаются от суздальских. Суздальские более лёгкие, изящные, кружевные. Финская тяжеловеснее, монументальнее.

Очень понравились хозяева-устроители: не помню имя доброжелательной, ласковой женщины, помогавшей главному организатору Мике Петерсону.

Третий раз я была с Женей в 2016 г. на конференции по криокристаллам и квантовым кристаллам. Её организовывал Сергей Васильев, профессор университета в Турку. Но конференция проходила на какой-то базе отдыха, где было множество полей для гольфа. А ещё там были грибы и ягоды. Андрей Дробышев, профессор из Алма-Атинского университета, со своими ребятами как-то даже пожарил их, договорившись на кухне. Вкусно было очень. Из развлекательных мероприятий запомнилась, конечно, поездка на остров Муми-троллей. Учитывая, что эта чудесная детская повесть была одной из любимых моими сыновьями, я не упустила возможности купить уже сорокалетнему сыну фигурку Муми-тролля.

В этот год через месяц или около этого должна была быть наша золотая свадьба. Банкет на 45 человек был уже заказан (на нашей свадьбе в 1966 г. тоже было 44 человека в ресторане «Будапешт» в Москве), а туфель у нас не было. В каком-то городе по дороге в Хельсинки была пересадка, и там мы с Женей очень быстро приобрели себе свадебные туфли. Женя не любил ходить в магазины. У него всегда была одна фраза: «только быстро».

Что я могу сказать о Финляндии? Хорошая страна Финляндия! Они молодцы. Умеют работать и умеют жить!



*Д.А. Гордон***Япония**

Я соберу и спрячу жемчуг белый,
Что рассыпает шумный водопад:
В минуты грусти
В этом бренном мире
Заменит он потоки светлых слез!

Аривара Нарихива

Весной 1998 г. Женя был приглашён профессором Мичио Таками на три месяца на позицию Emeritus (заслуженного) профессора в международный научный центр RIKEN, расположенный недалеко от Токио. Женя до этого бывал в Японии, участвуя в конференциях, для меня же это была первая поездка.

Япония для нас была недостижимой сказочной страной с богатейшей древней культурой и одновременно ставшая одной из самых развитых и богатых стран капиталистического мира. Японцы своей неимоверной трудоспособностью сумели после второй мировой войны возродить свою страну из пепла. Потерпев поражение во Второй мировой войне, подписав капитуляцию после американской атомной бомбёжки Хиросимы и Нагасаки, они мудро приняли план Маршалла по возрождению страны и своим гигантским трудолюбием не только возродили страну, но и обогнали по уровню развития многие успешные капиталистические государства.

RIKEN оказался громадным научным центром с очень красиво оформленной территорией с прудами и парками, среди которых размещены рабочие корпуса исследовательских лабораторий и комплекс жилых домов для приезжающих сотрудников. Мы прибыли в начале апреля – время, когда начинает цвести сакура. Это одно из самых красивых и приятных событий в жизни японцев. Неимоверной красоты явление, которое стало одним из символов Японии.

Женя, как всегда, работал с утра до ночи. По-моему, Мичио не ожидал от него такой прыти: насколько я поняла, он приглашал почётного профессора для бесед, лекций и обсуждений, а Женя за этот короткий срок собрал гелиевую установку для экспериментов. В конце нашего пребывания впечатлённые японцы вручили ему медаль и присвоили имя почётного профессора RIKEN. Вручая медаль, Мичио сказал: «Этот человек работал, как машина».

А ведь это уже были первые годы, когда Женя начал чувствовать себя не самым лучшим образом. Он очень много курил, причём курили они с нашим другом Володей Мацаевым очень сильные кубинские сигареты Партагас. В начале 2000-х, после первых серьёзных приступов хронического бронхита,



он понял, что курить ему нельзя и, надо отдать ему должное, бросил без всякого медицинского вмешательства, на одной силе воли.

Пока Женя работал, я посещала занятия в международном центре: ходила на курсы японского языка, икебаны, писала заметки в еженедельный журнал и за один из напечатанных рассказов получила приз. Помню мой шеф, академик В.И. Гольданский, будучи у нас в гостях, попросил показать ему этот рассказ. Многим из вас, читателей этой книги, знавших его, известно, что он баловался литературными экзерсисами и печатался в «Литературной газете».

Много внимания нам уделяли Мичио и его жена Йоко, чтобы скрасить наш досуг. Она водила меня на выставку Кацусики Хокусая, которая, к моему изумлению, проходила чуть ли не на двадцатом этаже торгового центра, а не в музее, как у нас принято. Мы, увлечённые в те годы картинами Хокусая, произведениями Рюноске Акутагавы и Кобо Абэ, фильмами Акиты Куросавы, конечно, благоговели перед их культурой. Японцы, с которыми доводилось нам общаться, были приятно удивлены, что мы знаем об их культуре. Сами же они, к моему удивлению, во многом следовали стилю жизни американцев: носили джинсы в дикую жару, очень популярна была игра в бейсбол, богатенькие увлекались игрой в гольф. Йоко принесла мне голливудские фильмы с великой Гретой Гарбо, узнав, что я её очень люблю. Помню, это были фильмы «Анна Каренина» и «Дама с камелиями». Мне показалось, что Грете Гарбо удалась роль Карениной. Она, конечно, великая актриса. Я, в свою очередь, дала Йоко почитать «Великого Гэтсби» на английском, книгу, которую я захватила с собой (я очень люблю Скотта Фицджеральда). Брала она меня и в Токио показать императорский дворец.

В одни из выходных дней они с Мичио повезли нас к морю. Дорога лежала мимо великой Фудзиямы, и я её тогда увидела в первый раз. Наверное, это был май. Фудзияму хорошо видно в зимние месяцы, поэтому в мае хорошенько разглядеть её было трудно, но все равно впечатление было неизгладимое. Если спросить, что же в Японии меня впечатлило больше всего, то я отвечу, – конечно, Фудзияма, хотя впечатляет многое: дети, сакура, бамбук, журавли, храмы, живопись и т.д.

Не зная, что в ближайшем будущем нас ждёт жизнь в Киото в течение десяти месяцев, мы в один из выходных дней поехали в Киото. Как же, будучи в Японии, не посмотреть Киото?! Киото – древняя столица Японии, город с богатейшей историей, расположенный в узкой долине, окружённой горами. Не могу не рассказать, чем оказалась гостиница, в которой мы прожили эти два дня. Заказывали отель по знаменитой книге-путеводителю «Global Planet». Выбирали ближе к центру, потому что считали, что главное – посмотреть императорский дворец.

Приехав на скором поезде, мы стали искать наше заказанное жильё, пытаясь идентифицировать наш «Уно хаус» с приличного вида зданиями. Долго



блуждали и, наконец, оказались у небольшого убогого домика. Наша комната представляла собой конуру, в которой Женя не мог выпрямиться, а кровать была практически на полу. Ходить умываться по утрам надо было на улицу по мосткам, не помню, почему там была вода (возможно, ручеек протекал). Внизу была комната, где была плита, чайник и какая-то посуда. Там вечером собирались обитатели. Среди них был студент-немец, путешествовавший по Японии на велосипеде, супружеская пара научных работников средних лет из Праги и некий профессор из Америки, по виду хиппи. На следующий день, когда мы приехали посмотреть знаменитый сад камней, то увидели его сидящим там и медитирующим. Рядом с этим садом находится и знаменитый «Золотой павильон». Что скажешь, красоты всё неопишущей. Женя, имея по поводу всего своё мнение и, как правило, не следуя общепринятым стандартам, посмеялся над медитирующим профессором и сказал, что этот сад камней на него не произвёл никакого впечатления.

Надо сказать, что не он один воспринимал некоторые японские традиции без пиетета. Когда мы с нашей соседкой из Индии вышли после посещения чайной церемонии, где одним из элементов является запоминание положения чашки, когда ты пьёшь, чтобы помнить, где прикасались губы (оказалось важно при мытье посуды), она сказала, что более ничтожного занятия она не видела. А мне все было интересно.

В RIKENe я с женщинами из международного центра была на выставке каллиграфии. Одна из наших посетительниц занималась каллиграфией, на выставке были и её работы. В квартире, расположенной на первом этаже под нашей, жила чета из Америки, он профессор-биолог из университета в калифорнийском городе Дэвисе, а она, по-моему, нигде не работала, происходила из Филлипин, была красивая и весьма представительная дама. Однажды она меня пригласила в ресторан, разговорились, и вдруг спросила, а какая у вас пенсия. Тогда наша пенсия, научного сотрудника, составляла 70 долларов. Услышав, она стала сползать со стула.

Последним месяцем нашего пребывания в этот первый мой визит в Японию был июнь. Это месяц дождей, причём серьёзных: целый месяц льёт, как из ведра. Женя любил дожди, а я не любительница их. Приятно было обнаружить перед входом в каждый магазин ящик с небольшими отделениями для зонтов, чтобы можно было оставить свой зонт и не ходить с мокрым зонтом по магазину. Я недавно прочитала, что кто-то это воспринял, как заботу о посетителях, оказавшихся без зонтов. Кто-то, видимо, выйдя из магазина, не обнаружил своего зонта.

Судьба так распорядилась, что весной 2002 г. мы вновь оказались в Японии, на сей раз Женя был приглашён профессором Ясуюки Аратоно, учеником профессора Т. Миязаки, в JAERI (Японский институт атомной энергии), расположенный в префектуре Ибараки, также на три месяца, с февраля по май. Это место исторически не представляет особого интереса. Географичес-



ки же оно приятно тем, что небольшой городок Токай, примыкающий к атомному центру, расположен на океане. В этот приезд никаких интересных впечатлений не было, за исключением того, что Аратоно с женой и дочерью брали нас посмотреть, как делаются гончарные изделия, и самим попробовать. Продукт своего творения можно было оставить на обжиг и покраску, готовое изделие присылали по почте. У нас дома хранится тарелочка, сделанная Женей, и розетка, сделанная мной.

Из природных явлений в этот период времени впечатляет цветение сливы. Начинается оно, обычно, в начале марта, на месяц раньше, чем цветение сакуры. Красиво очень! Есть разные сорта – некоторые цветут белым, некоторые с пурпурным отливом! Предлагаю вниманию читателя очень красивую танку об этом чуде природы.

Я не могу найти цветов расцветшей сливы,
Что другу показать хотела я:
Здесь выпал снег –
И я узнать не в силах,
Где сливы тут, где снега белизна?

Ямабэ-но Акахито

По-настоящему яркие впечатления в этом месте мы получили летом этого же года, когда Женя приехал на десять месяцев поработать с профессором Т. Момозе в университете Киото. Поскольку Жене нужно было доделать то, что он начал весной у Аратоно, то довольно скоро после нашего приезда в Киото, на время, пока будут выполняться заказы тех деталей в мастерских, которые Жене были необходимы для создания установки, мы поехали опять к Аратоно. На сей раз произошли какие-то накладки по оплате жилья, и Аратоно-сан со своей мудрой и работающей женой Тошико приняли нас у себя дома.

Обычно современные японские дома по архитектуре мало отличаются от западных, но в доме обязательно есть одна комната, оформленная по японским стандартам. В ней пол покрыт татами, оконная рама поделена на мелкие квадраты, на одной из стен висит какэмоно – свиток с живописью или каллиграфически написанным изречением, девизом или стихотворением, посреди комнаты невысокий стол и вокруг него подушечки для сидения. В небольшом углублении стены находится уголок Будды (не во всех домах, у профессора Таками не было), что-то типа алтаря, где стоит статуя Будды, рядом вазочки с цветами и какие-нибудь продукты (фрукты, конфеты), как на христианских кладбищах в дни «Красной горки» или других особых дней. Нам отвели именно эту комнату, и спали мы на полу прямо рядом с алтарем. Женя любил рассказывать, что на столике рядом с Буддой находились урны с прахом родителей хозяев дома. Я не уверена, что он это не присочинил для большей красочности рассказа. Он любил в своих рассказах подойти к делу художест-



венно, близко к жизни, но с воображением. Так Пастернак говорил о сути художественного произведения.

В этой поездке меня удивила малая продолжительность дня в летнее время года: в июле – начале августа в семь вечера было уже так темно, хоть глаз выколи. Однажды Женя пришёл рано с работы (это значит в 7–8 вечера) и мы пошли на океан, для него вода и плавание значили очень много. Мало того, что ничего не было видно, так ещё спустился туман, и радости от этого посещения океана было мало. Он, конечно, всё равно купался, а мне было не по себе. В выходные дни мы как-то выбрались на океан днём, и берег поразил меня богатством выброшенной фауны. Лежал труп громадной черепахи. В Японии, как и в Америке, не принято купаться в открытом океане, а Женя плавал, и даже я не боялась зайти с ним в воду и немножко поплавать.

В этот же приезд Аратоно возил нас в место, которое является зоной отдыха; там, кстати, были любители покупаться в океане, даже с детьми. Женя любил учить детей плавать. Рядом была семья с маленькой девочкой. Он предложил родителям поучить её, они не возражали, а уж что было совсем удивительно, – девочка охотно пошла с незнакомым дядей. Женю поражало, что японские дети пристально смотрели в глаза западным людям, хотя по японскому этикету люди, общаясь, не должны смотреть в глаза друг другу. Он считал, что детей притягивали светлые глаза. Это место было ещё славно тем, что там находилось имение известного японского художника, оно было расположено на склоне горы. Я думаю, вид из его окон был потрясающим. Когда мы вернулись из этого красивого путешествия, нас ждало печальное событие – сосед Аратоно, дальнобойщик, разбился насмерть. Он гнал фуру с апельсинами, заснул, и так печально все закончилось.

В дни нашей жизни в доме японской семьи, мы ближе узнали уклад жизни японцев, их кухню. Пища очень простая и, по-видимому, полезная для здоровья. Меня поразила традиционная еда (обычно на завтрак) натто, перебродившие соевые бобы. В результате брожения семена покрываются отвратительно густой скользкой субстанцией с неприятным запахом. Это было противно не только кушать, но даже видеть. Я так и не преодолела себя. Основная еда – тофу (блюдо из сои), мисо суп, китайская капуста, лапша из разных злаков, включая рис, и много солений, маринадов. Из напитков популярны традиционное саке (получается путём брожения сусла на основе риса и пропаренного рисового солода), иногда его подогревают, содержание этанола в нем 15%. Я не люблю вкус водки и даже коньяка, хотя эти напитки приятно согревают. Я люблю ликёры, и мне понравился их напиток умаэсю, который японцы готовят уже более тысячи лет из местной сливы умэ.

К дому Аратоно примыкал небольшой участок земли. Земледелием занимался сам Ясуюки. У него в огороде росли арбузы, баклажаны и другие овощи. Занимался он и цветоводством. Перед отъездом в наш весенний приезд



подарил мне потрясающие белые орхидеи, их пропустили в аэропорту, и я привезла эту красоту домой.

Во время нашего пребывания к ним на каникулы приехала дочь-студентка. Она училась в университете в Токио, на лето им дали задание ознакомиться с новеллами американских писателей. А я как раз очень люблю американскую литературу, и мы с ней очень хорошо провели время.

От них же мы узнали, что когда японцы выходят на пенсию, то получают выходное пособие в размере примерно пятилетней заработной платы. Тошико работала в банке и тоже прилично получала, у Аратоно была профессорская зарплата в 5 тысяч долларов. Получалось, что к моменту выхода на пенсию они получают очень приличную сумму. Мужчин в Японии отправляют на пенсию в возрасте 63 лет независимо от званий и положения, будь хоть Нобелевский лауреат. Многие уходят работать в частные университеты, колледжи, а иногда вообще меняют род деятельности. Например, профессор Т. Миязаки купил участок земли в горах и стал выращивать рис. Кстати, другой очень известный профессор нам говорил, что купить участок не просто, он уже много лет стоял в очереди. Аратоно с Тошико ушли на пенсию года через три после нашего пребывания у них. Они уехали на крошечный остров, находящийся под эгидой ЮНЕСКО, где жили родители Тошико, у них был свой бизнес (сувенирный магазин и большой плодовый сад). Наши друзья поехали помогать родителям и заботиться о них. Когда мы приехали в Японию в последний раз, это было в 2007 г., Женя был приглашён профессором И. Окудой в Токийский технологический институт на три зимних месяца, мы были приятно удивлены, получив посылку от Тошико и Ясуюки с изумительно вкусными мандаринами. К тому времени у них на острове уже созрел новый урожай. Эти люди стали нам родными. Много лет мы переписываемся. К ним приехала жить дочь, вышла там замуж, у неё растут замечательные детки.

Вернёмся в Киото. Киото – древний город, с 794 по 1868 гг. был столицей Японии. Сказать, что японские города, как европейские, имеют строгую архитектуру и представляют собой ансамбль, трудно. Но красивая природа, множество храмов и парков делают город привлекательным. Город расположен в небольшой долине, окружённой горами; где бы ты ни жил, оказываешься рядом с одной из гор. Дважды мы с Женей поднимались на знаменитую, самую высокую гору Ниеи. На её вершине находятся несколько храмов, а с другой стороны перевала расположено большое озеро, где Женя, конечно, к изумлению публики, поплавал. Наверху растут громадные сосны, похожие на секвойи, человек рядом с ними выглядит букашкой.

Вначале мы жили в интернациональном кампусе, расположенном у подножия этой горы. В нашем здании жили учёные со всего мира. Со мной быстро подружилась очень общительная маленькая женщина, которая оказалась женой известного американского профессора-математика. Она была родом из Индонезии. Надо сказать, в наши годы женитьба европейских и американ-



ских профессоров на восточных женщинах, главным образом, японках и китайках, было распространённым явлением. Не знаю, как китайки, но японки охотно выходят замуж за западных мужчин. Мы с моей новой знакомой любили ходить в храмы.

Ввиду большого количества иностранцев, работавших в университетах Киото и живших подолгу, иногда с семьями, существуют специальные европейские магазины. Недалеко от кампуса был французский магазин с потрясающими сырами и винами. Женя любил и хорошие вина, и хорошие сыры, особенно Дор-блю, сыр с плесенью.

Через три месяца мы должны были переехать в другое жильё. Это была совсем неудобная, холодная, продуваемая со всех сторон комната. Хочу сказать пару слов о климате в Японии. Ничего более ужасного по климату, чем июль-август в Киото, я не знаю. При жаре в сорок и выше градусов высочайшая влажность, а самое неприятное, что невозможно отдохнуть от этого ночью, потому что ночью температура около 30 градусов. Нас-то спасал кондиционер, а как жили в прежние времена? Я думаю, не зря жилища японцев продувались со всех сторон и не зря жизнь, в основном, проходила на полу, ползая на коленях. В наши дни, конечно, все можно изменить внутри помещения, пользуясь кондиционером и плотно законопатив все щели от продуваний зимой. Зимой не бывает сильных морозов, но достаточно даже нуля, чтобы при высокой влажности, плохом отоплении и при полном продувании со всех сторон, жизнь показалась совсем не комфортной. Наверное, после такого проветривания было, действительно, блаженством оказаться в бочке с такой горячей водой, что можно было и свариться. Так делали японцы в старые времена. Обогреватель в нашей комнате работал на керосине. В общем, месяц-другой, мы натерпелись. За всё время пребывания в Японии, а мы были там несколько раз, и, в основном, благодаря десятимесячному пребыванию в Киото, нам удалось застать все времена года. Мы были только на острове Хонсю. Поэтому климат везде, где мы были, был примерно одинаковый. Очень хорошее время года по климату с начала февраля до начала июня (сезона дождей) и с середины сентября до начала ноября.

Где-то в январе нас переселили в нормальное здание, небольшую, но с нормальными условиями жизни, комнату, которую так живописно описал в своих воспоминаниях профессор Т. Вакабаяши. Наше новое жильё было близко к знаменитому храму Сёгоин. Я помню совершенно грандиозные ворота перед входом в храм и очень красивый парк. Японские парки – это особая культура, как и английские. На территории этого парка располагалось небольшое здание, куда меня водила моя приятельница из Международного центра на церемонию распознавания запахов. Это интересная церемония. Участвовало человек 10. По кругу пускали куски разных сортов дерева и участники должны были запомнить их запахи, а потом устраивался экзамен, соревнование, награды. Она же водила нас в театр Кабуки. В это время к нам



приехал наш старший сын на две недели. Он тоже был с нами в театре. Практически с началом представления на передние ряды прошёл человек, наш сын быстро распознал, что он из Израиля, и в перерыве мы с Женей и глазом не успели моргнуть, как они уже живо беседовали. Мы знали, что Серый учит иврит, но не знали насколько успешно. Было приятно услышать от носителя языка, что он хорошо говорит.

Театр Кабуки – специфический театр, где все роли, включая женские, играют мужчины. Это древний национальный театр со своими традициями. Женя не очень это все воспринимал, не скажу, что и меня очень тронуло, было просто интересно. Говоря о культуре японцев надо помнить, что с IV по VII века к ним все было завезено китайцами, включая и буддизм. Но они умудрились так всё пропустить через свой национальный менталитет, что японская культура, в конце концов, вылилась в нечто самобытное и крайне интересное. И очень приятно, что варварский обычай китайцев уродовать с рождения ноги девочкам, забинтовывая и не давая расти, они не переняли.

Древняя религия японцев – синтоизм, где существуют порядка семи Богов (богатства, плодородия, мудрости и т.д.), основанный на древней истории, преданиях. Буддизм сильно изменил синтоизм, и многие японцы считают себя приверженцами и синтоизма, и буддизма. Я заметила, что японцы нынче – очень толерантный народ, лишены отвратительного фанатизма, который даже благие намерения превращает в нечто неприятное. Они не фанаты веры, когда по ничтожным поводам типа: как креститься (двумя или тремя пальцами), кто главнее – Божья Мать или Сын, готовы убивать, включая детей и стариков. У большинства японцев, когда в семье рождается ребёнок, родители идут в синтоистский храм, когда женятся, во время бракосочетания в первый день одеваются по-европейски (красивые европейские белые платья, фата, костюмы и белая рубашка, и т.д.). На второй день одеваются в национальную одежду – кимоно, национальную обувь – гэта, представляющую собой деревянные сандалии, традиционная сумочка. И всё это стоит очень дорого. Когда кто-то умирает, идут в буддистский храм, просят, чтобы в последующей жизни умерший родился приличным человеком, а не тварью какой-нибудь, хотя тварь может оказаться и в человеческом облики. Приятно, конечно, и то, что нет никаких милитаристских маршей на улице, хотя уличных мероприятий немало. Существует множество местных событий, которые отмечаются с соблюдением традиций. Очень часто это шествия по улицам, где много молодых мужчин, одинаково одетых в традиционные одежды с повязками на лбу, на повязках соответствующие именно данному событию надписи, несут какие-то реликвии на больших, массивных носилках. Напоминает, как в Европе несут статуи девы Марии, Иисуса, местных святых. В сентябре я была на грандиозном представлении – имитации выезда императорского двора.



Японцы много работают. Имея 40 дней оплаченного отпуска, практически никто, так долго и подряд не отдыхает. Все отдыхают в первую неделю мая, называемую «golden week» (золотая неделя). В нее, кроме выходных дней, входят несколько праздничных дней, посвящённых разным событиям. Например, 5 мая – это праздник, посвящённый мальчикам. В этот день все семьи, в которых есть мальчики, вывешивают перед домом «коинобори» – бумажные или тканевые изображения карпов, которые символизируют сыновей, причём, чем старше сын, тем длиннее изображение. Есть несколько легенд о возникновении такой традиции. По одной из них отважный карп преодолел все препятствия во время путешествия к истокам священной реки и превратился в могучего, мудрого дракона. По другой карп помог японской императрице Дзингу, указав верный путь к берегам Кореи во время её завоевательных походов. Кроме этой недели ещё есть трёхдневный праздник поминовения усопших Обон, или Бон. Согласно традиции в это время года души усопших возвращаются к живым и посещают своих родных. Япония становится тихой, поезда пустеют, на кладбищах в этот период года начинают цвести цветы. Нередко этот праздник называют праздником фонарей, потому что с наступлением темноты они вывешиваются родными, чтобы души усопших могли найти дорогу домой. Эти дни не являются красными в календаре, поскольку Обон не является официальным национальным праздником для всех, но большинство компаний дают сотрудникам несколько выходных дней. В первый день праздника принято в местах, где можно, перед домами разжигать небольшие костры, чтобы направлять дух при возвращении домой. Кстати, огни зажигают не только у дверей, но и на склонах гор. Обычно на склонах гор выложен какой-нибудь иероглиф и в эти дни на нем размещают огни. Поскольку мы меняли место жительства в Киото, а он окружён горами, то мы оказывались у подножия разных гор. Помню, что в дни поминовения мы отправились на гору, которая была близко к нашему месту жительства, и видели иероглиф, сделанный на этой горе, весьма близко. В эти дни также принято украшение алтаря покойного маленькими мемориальными табличками, фруктами, цветами и японскими сладостями. В сельской местности, в некоторых регионах готовят лошадей из огурцов и коров из баклажанов с деревянными палками для ног. Символика этого в том, что лошадь поможет духам возвратиться домой на землю, а корова медленно повезёт их обратно в рай, как только фестиваль закончится. Большинство японцев начинают посещать кладбища, чтобы очистить могилы и помолиться. На второй и третий день семьи приглашают буддийского священника в свои дома, чтобы прочесть сутру и совершить поминальную службу. Затем они вместе обедают и, вспоминая старые истории, связанные с их усопшими любимыми. Во многих частях Японии люди также пишут сообщения на бумажных фонарях и сплавляют в реки или море, чтобы увести дух. В последний день опять зажи-



гают костры, чтобы увидеть души в небе и танцуют. Часто это выливается в фестивали.

Третий праздничный период – это Новый год. До 1873 г. японцы отмечали Новый год по китайскому лунному календарю, затем стали отмечать по григорианскому. 31 декабря полностью посвящают основательной уборке всего дома и подготовке к встрече божества года. На входе в чистый, убранный дом ставят специальное новогоднее украшение из сосновых веток, бамбука и некоторых других растений. Украшать дом 31 декабря не принято. Считается, что украшение дома на один день приносит несчастье. В этот день принято есть собу – длинную лапшу из гречневой муки (символизирует длинную жизнь), благодарить богов за уходящий год и просить хорошего здоровья. В новогоднюю ночь по всей Японии раздаётся звук колоколов – в буддийских храмах отбивают 108 ударов. В буддизме считается, что человек одержим заблуждениями (зависть, жадность и т.д.). С каждым ударом колокола он очищается от очередной страсти. Сто семь ударов раздаются до полуночи, а последний, сто восьмой, – уже с наступлением нового года, чтобы предостеречь людей от заблуждений в новом году. После того, как колокола отзвучали, принято идти на обряд первой молитвы в синтоистский или буддийский храм. Ещё одно из новогодних дел – отправка новогодних открыток. С давних времён повелось не спать в новогоднюю ночь, потому что считается, что божество года приходит вместе с восходом солнца. Именно поэтому многие стараются встретить этот первый восход в каком-нибудь живописном месте – на берегу моря или на горе Фудзи. В первые три дня января после Нового года японцы массово отправляются к святыням для первого посещения синтоистского или буддийского храма.

Большинство людей приходит непосредственно в новогоднюю ночь. Мы с Женей тоже отправились в храм 1000 ворот где-то часов в десять вечера 31 декабря 2002 г. Этот храм представляет собой ряды ярко-оранжевых ворот тории, ведущих в святилище Фусими Инари. Инари – синтоистское божество изобилия, риса (и злаковых культур вообще), лис, промышленности, житейского успеха, одно из основных божеств синтоизма. Инари может изображаться в образе мужчины, женщины, либо андрогина (человек, обладающий и мужскими, и женскими чертами) и иногда рассматривается как собирательный образ трёх или пяти отдельных kami. Kami – божества неба и земли, описанные в древних писаниях. Красные ворота тории – это символ синтоистского храма. Их подносят храму богатые люди или большие корпорации. Они представляют собой два столба с двумя перекладинами наверху, створок на этих воротах нет, сделаны из дерева, покрытого ярко оранжевым лаком. Черные цоколи торий опоясаны металлом. На обратной стороне пишется имя дарителя. Проходить под воротами тории по центру не принято, это место отводится богам. На дорожках храмового комплекса расположено множество скульптурных изображений священной лисицы Кицунэ, обязательно разме-



щаемых в святилищах богини Инари. В большинстве случаев у святилищ устанавливается пара статуй Кицунэ, находящихся по бокам храма, на алтаре или перед главным святилищем. Помимо этого над входом в храм помещают горизонтально толстую оберегающую верёвку. Перед входом в святилище посетители проходят ритуал омовения. Подходят к каменному резервуару с проточной водой, зачерпывают ковшиками воду и омывают по очереди руки и ополаскивают рот. Общаются с богами, поджигая пучок палочек с благовониями, взмахом руки тушат и направляют на себя дым от благовоний, чтобы отогнать от себя болячки. Затем бросают монетки в ящик с решетчатым отверстием, подходят к толстой свисающей верёвке, к которой прикреплён бубен, дёргают, чтобы раздался звон и божество, которому посвящено святилище, услышало, что к нему пришли пообщаться, хлопают для большей надёжности два раза в ладоши, два раза кланяются и опять два раза хлопают в ладоши. Вот в течение этих двух хлопков надо успеть изложить свои желания. Мы пошли в храм 1000 ворот по рекомендации. Меня поразило, что при невероятном скоплении народа, был абсолютный порядок, никакой давки. Никаких пьяных и буянящих. Мы в толпе прошли все эти ворота, купили один из атрибутов праздника – оберег для дома, который можно купить только в первые дни января. Он представлял собой богато украшенную стрелу с тупым концом. Есть ещё и другие виды оберегов: полотняные мешочки с молитвами, дощечки с изображением лошадей, раньше, оказывается, лошадей приносили в жертву храму. Несмотря на религиозный подтекст посещения храма, многие современные японцы воспринимают поход в храм, как ещё один повод для весёлого времяпровождения с семьёй или друзьями.

Из личных воспоминаний о трудолюбии японцев и выходных днях у меня есть история, связанная с моей молодой подругой, сотрудницей пятиэтажного торгового центра в Киото для иностранцев. Это роскошный, яркий магазин, где иностранец может приобрести любые сувениры согласно его доходам. Впечатляет, что на этаже, где можно приобрести картины, сидят художники-гравёры, которые работают в стиле эпохи Эдо. Картины-гравюры делаются следующим образом. Художник на тонкой бумаге рисует тушью рисунок, резчик приклеивает бумагу лицевой стороной на доску из вишни, самшита, груши и вырезает из неё области, где бумага была белой. Затем делаются несколько черно-белых оттисков, на которых художник обозначает задуманные цвета. Затем резчик делает необходимое количество, иногда больше 30, печатных форм, каждая из которых соответствует одному цвету или тону. Обговорив с художником цветовую гамму, печатник вручную на влажной рисовой бумаге печатает гравюру. Так работали Хокусай и художники этого периода. То, что использовались чистые, несмешанные краски, позволило в наши дни, используя компьютерные технологии, делать первоклассные копии. Такую копию одной из знаменитых Фудзи Хокусая нам подарили, об этом я расскажу позже. Моя подруга, о которой я пишу, работала в сувенир-



ном отделе широкого профиля. В один из дней моего посещения она сообщила, что вышла замуж. Я поздравила и спросила, куда поедете на honey moon (медовый месяц). Она мне сказала, что никакого медового месяца. Это было в декабре. Вот в январе магазин закроют на два дня, тогда и отпразднуем.

Поразительна, конечно, не только работоспособность, но и японская законопослушность: слово сен-сея (босса) – закон, и если сен-сей отдыхает один день в году, то и ты будешь отдыхать один день. Вот откуда, видно, набегают это пособие в размере зарплаты за 5 лет службы при выходе на пенсию. Удивительно, откуда такая железная вертикаль власти возникает в стране, где детям до пяти лет позволяется абсолютно все. Я думаю, детям разрешается всё для того, чтобы в личности выработать способность к собственному мышлению, а потом уже учат контролировать себя и свои эмоции. Возможно, уважение к сословию самураев, смысл жизни которых был в службе господину, способствовал этому.

Все эти порядки относительно правил и послушания меньше касаются университетских сотрудников. У них, видимо, из-за иностранных приезжих, придерживаются западных мерок, отдыхают с 24 декабря, как в Европейских университетах. Вообще, Christmas – Рождество, отмечаемое 24 декабря всеми христианскими конфессиями, кроме ортодоксов, очень популярно у японцев. Торговые центры украшены по западному образцу. Везде: в торговых центрах, аэропортах, вокзалах, присутственных местах стоят традиционные рождественские цветы. Все, особенно молодёжь, отправляются покупать подарки к Рождеству. Иностранцы, большинство, улетают домой. В Киото же мы застали китайский или восточный Новый год. В тот 2003-й год он приходился на 2-е или 3-е февраля. В одном из парков в центре площадки был сложен грандиозный костёр, состоявший из старых вещей, от которых принято избавляться. Помню, что было много людей вокруг в пожарных костюмах. Это вселяло какое-то спокойствие, потому что костёр был устрашающего размера. Конечно, среди выбрасываемых вещей были вещи в очень хорошем состоянии. Мне всегда жалко, когда уничтожают хорошие вещи, зная, что миллионы людей в мире, включая детей, нуждаются, а в костре полыхали почти новые, роскошные игрушки. Почему так мир устроен? На мой взгляд, основная беда сейчас – перенаселение во многих регионах нашей матушки планеты. И чтобы решить проблему бедности, наверное, надо решить проблему рождаемости в этих районах. Мне сказали друзья, что их коллеги в некоторых странах начали движение за пропаганду этой идеи.

Огромным событием для японцев является цветение сакуры. Это не государственный праздник, но абсолютно все – либо с коллегами по работе, либо семьями, либо с друзьями выезжают компаниями в парки, расстилают на земле огромные полотна плёнки, снимают обувь, забираются на неё и празднуют это чудо природы, выпивая и закусывая. Как правило, цветение сакуры случается в начале апреля и длится 2–3 недели. Это фантастической красоты



явление и погода в апреле очень хорошая. Деревья стоят, как невесты в свадебном одеянии, все в цвету. Как правило, это нежно-розовый цвет. Цветению сакуры посвящены многие поэтические творения. Видно, что эта красота настраивала и на философские размышления о ценностях жизни, её бренности. Мне понравились вот эти хокку и танка.

«Как же это, друзья?
Человек глядит на вишни в цвету,
А на поясе длинный меч!»

Кёрай

Туман весенний, для чего ты скрыл
Те вишни, что окончили цветенье
На склонах гор
Не блеск нам только мил, —
И увяданья миг достоин восхищенья.

Ки-но Цураюки

Именно в дни цветения сакуры приехал нас навестить старший сын. На эти дни выпала еврейская пасха. Я уже написала, что он изучил к тому времени иврит и в Москве принимал участие в работе молодёжного кружка «Гилель», которым руководил известный писатель и переводчик родом из Вильнюса Феликс Дектор. Сын участвовал в постановках пьес, литературных вечерах. У них проходили семинары, на которых бывали известные писатели Асар Эппель и Людмила Улицкая. Однажды они даже оказались с ней за одним столом и провели в этом общении четыре дня. Он сам выяснил, что в Японии есть всего две синагоги: одна в Токио, вторая в Кобэ, который на доступном расстоянии от Киото. Серёжа созвонился с ними, поговорил на иврите и на второй день пасхи мы, я – татарка, сын-полукровка (а настоящий наш иудей на работе, это был рабочий день), отправились в Кобэ. Перед поездкой мы зашли в информационный центр, чтобы нам подсказали, как и где нам садиться, пересаживаться, в Японии очень сложная система пересадок, особенно в метро. Там нас обслужила очаровательная девушка родом из Киева, которая приехала работать по контракту. Вооружённые знаниями, мы легко добрались до Кобэ, там довольно легко нашли синагогу. Это значит, попался прохожий, с которым можно было объясниться по-английски. Как правило, японцы пугаются и застывают, когда с ними заговаривают по-английски. Многие из них хорошо читают, пишут, но стоит заговорить, пугаются. Так было тогда, но сейчас, я надеюсь, в Японии, как и во всем мире, молодёжь прекрасно говорит по-английски. Во всяком случае, при посещении конференций это чувствуется.



Когда мы добрались, то застали большое скопление народа. Оказывается, прибыл корабль с американскими туристами, кроме них были очень красивые ребята из Испании, они замечательно пели. Меня поразила длительность обряда. Раввин долго говорил, а на столе стояли закуски и кушать уже очень хотелось. Но нельзя, пока все церемонии не будут соблюдены. Запомнились мне три встречи. Рядом с нами сидели два относительно молодых японца, когда я их спросила, как они оказались на этой церемонии, один из них сказал, что ему был голос, который направил его к иудаизму. Второй учился в Иерусалимском гуманитарном университете, он говорил не только по-английски, на иврите, но и по-русски, т.к. многие его преподаватели были родом из России. Запомнилась мне и молодая семья с детьми, где мама была японочка, милая девочка в очках, а папа был златокудрый красавец с большими голубыми глазами из Израиля. Я не знаю, как он оказался в Японии, работал он на тот момент садовником, и к ним на праздник приехала его еврейская мама из Израиля. Что мне понравилось на этом празднике – это как красиво пели. Радостные после таких встреч мы отправились домой. По дороге к поезду, а был уже вечер, мы проходили улицу, где, видимо, располагались известные «заведения» (типа тех, что на улице красных фонарей в Амстердаме). Мы увидели, как у входа в один из них выстроились девушки и одна из них ловко ухватила за шиворот проходившего мимо шаткой походкой господина. В поезде я обратила внимание на двух девушек, которые смеялись всю дорогу, толкаясь, подначивая друг друга, в общем, дурачились. Глядя на японских туристов в Европе, я обратила внимание на то, как они вели себя. А вели они себя очень раскованно: веселились от души, жестикулировали, хохотали громко. Никакой, подчёркиваемой многими исследователями, восточной сдержанности я не наблюдала.

Из событий, запомнившихся мне во время пребывания сына, – это его общение с японскими бомжами, которые жили под мостом реки, протекающей через Киото. В Японии у бездомных приличное содержание и имеются специальные дома с, конечно, крошечными, но отдельными комнатами. Но они не хотят там жить, особенно в тёплое время года. Им вольготно жить вдоль реки, построив себе картонные конуры. Поскольку набережная зацементирована и является одновременно местом променада, то, конечно, там есть туалеты, которыми они могут располагать. Помыться можно в речке, на еду деньги есть, кроме того рыбачат. Серый как-то отправился к ним для бесед. Они хорошо провели вместе время, и он вернулся довольный. В Токио целый город бомжей расположен прямо под боком у императорского дворца, там конуры в виде маленьких палаток сделаны из плёнки синего цвета, и поскольку рядом нет ни реки, ни туалетов, вонища стоит изрядная, и я не понимаю, почему власти это позволяют.

Ещё в дни Серёжиного приезда мы посетили район, где находится улица цветов, на которой находятся дома, в которых живут гейши. Институт гейш в



Японии – древний институт. Слово гейша происходит от слияния двух слов. Гэй означает искусство, ся – человек, вместе получается – человек искусства. Первоначально гейшами были мужчины. Возможно, это были актёры театра Кабуки, а также уличные актёры. В середине XVIII века появилась первая женщина, которая умела веселить, петь, танцевать, устраивать массовые игры. Очень быстро женщины заняли ведущую роль в этом деле. Основным достоинством гейш было умение весело и умело поддерживать беседу, шутить, читать стихи, петь, танцевать, играть на инструментах (в основном, на национальном инструменте цитре), аккомпанировать мужскому пению, организовывать групповые игры, устраивать чайные церемонии. Официально секс в программу развлечений гейш не входил, но и запрета на интимные отношения не было. Многие из них имели покровителя и даже рожали от них детей. В Японии и до сих пор не считается позорным иметь ребёнка вне брака. Многие мужчины стремились покровительствовать избранной гейше, считалось, что этот человек состоятелен, имеет вес в обществе, кроме того является тонким ценителем женской красоты и очарования. Содержание гейш стоило очень дорого, вот почему этот институт практически исчез после поражения Японии во Второй мировой войне. Страна обнищала. Сейчас, говорят, их не больше тысячи. Было частым явлением, когда мужчина наряду с официальной семьёй имел гейшу, которой покровительствовал. Это повышало и статус гейши. Заказать такую гейшу на личную встречу, вечеринку, банкет считалось престижным и стоило дороже. Но среди японских мужчин, наверняка, были и такие:

Яшмовых одежд стих лёгкий шорох
О. какой тоскою полон я,
Не сказав любимой, что осталась дома,
Ласкового слова, уходя....

Женщины, которые содержали дома гейш, набирали девочек из деревень, из бедных семей. Родители продавали их. Дальше долго, в течение многих лет, способные девочки обучались прежде всего умению поддерживать разговор непринуждённо, свободно, но уважительно, изучали поэзию, историю. Учили умению следить за событиями сегодняшнего дня, гейша должна была быть в курсе событий её дней, чтобы быть готовой поддержать беседу. Обучали пению, танцу, игре на музыкальных инструментах, искусству аранжировки цветов, выбирать и носить кимоно, вести чайную церемонию. В результате девочки получали приличное образование. Содержательницы домов гейш для экономии делили области обучения, чтобы не набирать полный штат учителей. Жизнь гейш не была легка, как может показаться, иногда за вечер она работала на десяти и более мероприятиях, принося деньги общине. Затраты на гейш тоже были не маленькие. Кимоно из шёлка стоили безумные деньги. Косметика, парикмахеры и прочее стоило тоже очень дорого. Их внешнее оформление было целым искусством, было много символов. Напри-



мер, оформление причёски говорило о многом, прежде всего о статусе гейши, ученица пять раз меняла стиль причёски, пока не достигала самостоятельности. Считается, что оформление причёски и нанесённый косметикой узор на щеё в виде лилии носят эротический элемент. Ученицу первый раз мужскому обществу представляла старшая гейша. От неё во многом зависел успех дебютантки. Она могла шуткой, взглядом подправить неловкости. Выбор клиента, который покупал право первой ночи дебютантки, тоже принадлежал этой же старшей сестре. Стоило это дорого, выбирался богатый почётный господин, постоялец их заведения. Это был единственный случай, когда гейша занималась сексом по принуждению, после этого она былавольна выбирать себе партнёра сама. Часто это не были равные симпатии. Но гейшами становились не для удовольствия, а часто по необходимости. У них не было фамилий, а имена переходили по наследству от старших гейш.

В Киото же в этот 2002-й год мы встретили осень, одно из красивейших времён года в Японии. Как и на нашей родине, и в нашей полосе, осень в Японии прекрасна. Осенние краски буйные, яркие. Множество сортов клёнов, листья которых осенью окрашиваются от почти черных до бордовых, темно-красных, красных, алых, жёлтых. И сами клёны, и их листья бывают самого разного размера. Они являются непрямым элементом украшения парков, сочетаясь с дивной красоты соснами. Неповторимой красоты аллеи парков, вдоль которых высажены деревья под названием гинкго (та самая, которая знакома старшему поколению по названию лекарства «гинкго-билоба»). Они осенью, как наши берёзы, золотого цвета, а лист их по форме напоминает веер. Наверное, созерцание этой красоты настраивает на лирический лад. Множество красивейших хокку и танк посвящены осени. Осень в Японии – время любования луной, хризантемами, красными клёнами.

Взглянул я на луну – и дрогнула душа
И сердце бедное поверить вновь готово
Что осень
Прошлых отдалённых лет
Опять вернулась и – со мною снова.

Или вот:

Как я завидую тебе!
Ты высшей красоты достигнешь
И упадёшь, кленовый лист!

А вот великий Басё:

Повисло на солнце
Облако... Вкось по нему –
Перелётные птицы.



К Киото же относится и воспоминание, связанное с моим решением повторить в их Международном центре доклад об А.С. Пушкине, который до того дважды делала в Лейдене. Пришло много народа, среди которых было много китайцев. Я думаю, что у них Пушкин есть в школьной программе. Доклад был назначен на 11 марта, а 8-го марта в Черноголовке, в нашей квартире умерла моя мама, которую в октябре, когда нас уже не было, перевезла из родительского дома старшая сестра, и они вдвоём с братом, который живёт в Черноголовке, ухаживали за ней. Моё состояние было не из лучших. Женщина, которая устраивала встречу, перед моим выступлением сказала собравшимся, что на днях у Дили умерла мама, все встали и почтили память моей мамы. После доклада ко мне подошло много народа: спрашивали, благодарили. Наконец, подошёл весьма уважаемый пожилой господин, довольно крупный для японца со своей уже немолодой, но красивой и элегантной, похожей на фарфоровую статуэтку, супругой. Они пригласили меня на чай к себе домой.

Он оказался крупным банкиром, по-видимому, был состоятельным человеком. Его дом был большим и просторным. Он и по архитектуре был ближе к восточным замкам, с изогнутыми крышами, в доме была комната, которая была стилизована под японский стиль, как в большинстве современных домов, но в ней было и то, чего нет в современных домах. В ней находился традиционный японский «камин» – в середине комнаты стоял стол, накрытый толстенным стёганным покрывалом, края которого свешивались до пола, под столом было углубление, в котором разжигали костёр или закладывали уже готовые угли. Стол окружён скамьями. Люди садились вокруг стола, протягивали ноги к огню и накрывали их краями этого покрывала, чтобы тепло не уходило. В одной из комнат на столике была собрана коллекция фарфоровых статуэток, привезённых из Европы. К чаю подали традиционные соевые сладости, на мой вкус, отвратительные: сладкие и приторные. Возможно, были и европейские сладости, я уже не помню. Дом окружал довольно большой сад в японском стиле с прудами и мостиками. Все это иметь при страшном дефиците земли, думаю, дорого стоит. На завтра они ждали в гости дочь с внучкой. Дочь жила в Америке и работала доктором в Стэнфорде. Мне было приятно их внимание, и я им в подарок оставила известный портрет молодой Натальи Николаевны Пушкиной работы Брюллова.

В эти же дни нас навещали Саша Белавин с Ирой. Саша – выдающийся физик-теоретик из Института теоретической физики имени Ландау в Черноголовке – приезжал на месяц в Киото для совместной работы. В апреле или мае навещали нас и Саша Шестаков с женой Ниной и детьми Машей и Ваней. Саша работал по приглашению на соседнем острове, Нина с детьми приехала навестить его. Саша работал и работает в ИПХФ РАН в Черноголовке. Они одно время сотрудничали с Женей. Мы им показывали достопримечательности Киото и вместе были в знаменитом храме, который построен на сваях



из деревьев необычайной толщины. Храм расположен на склоне горы, утопает в зелени и гармонично сливается с окружающей природой. Машу и Ваню я потом увидела в передаче Тины Кандилаки «Самый умный». Способные ребята – порадовалась за них и за Сашу с Ниной.

Четвёртый и последний раз мы были в Японии в 2007 г. с января по апрель. Женя был приглашён профессором Юичи Окудой в Токийский технологический институт. Женя улетел 3-го января, а я на пару недель позже. Не помню точно почему: мне кажется, это было связано с тем, что они требовали, чтобы мы в Японию послали оригинал нашего брачного свидетельства, а почта тогда работала, как известно, неважно. Письмо шло очень долго, и в результате все сдвинулось.

Когда я прилетела, Женя уже успел сделать много по работе. Прежде всего он решил помочь вытащить из ямы студента, у которого на носу должна была быть защита диплома, а работы не было. Первое, что он сделал, – почистил установку (сам менял масло в вакуумном насосе, чего, конечно, никогда не делают японские профессора). Вообще у них принято отсылать все механические работы в специальные мастерские, которые могут быть совсем даже не на территории института, или приглашать мастеров к себе. Заняло бы это пару недель, а у парня уже защита должна была быть вот-вот. Кроме грязного масла Женя обнаружил, что гелиевый криостат забит ватой. Буквально через пару недель после моего приезда были получены первые результаты. Именно тогда была сделана работа, когда, вводя пучок атомов водорода в сверхтекучий гелий, они увидели образование длинных нитей. Женя довольно быстро высказал идею, что они образуются в результате захвата атомов водорода вихрями, образующимися в сверхтекучем гелии. Когда он это высказал Окуде, тот ночью прислал Жене письмо с опасениями: разве можно такие революционные мысли высказывать вслух, и прошло довольно долгое время, пока он согласился с этой идеей, и они послали статью в печать. А студент защитился. Его родители приходили благодарить Женю с подарочком в виде маленькой бутылочки, в которой находится несколько тончайших стружек золота. Говорят, это полезно принимать внутрь. Не знаем. У нас она стоит до сих пор на полочке, как сувенир.

С Юичи мы очень подружились. Он любил плавать, его жена имела, по-моему, какой-то разряд по плаванию, и это у них было семейное хобби. Женя любил рассказывать историю, из которой видно, что он не страдал амбициями. А рассказ был такой. Окуда, будучи на конференции по квантовым и криокристаллам в Алма-Ате, когда участников конференции повезли на экскурсию по красивейшим горным маршрутам, увидел, как один из участников конференции прыгнул в горное озеро и очень красиво поплыл. И он тогда решил, что он обязательно пригласит этого человека в Японию. Как вы догадываетесь, этим человеком был Женя. Смешно ведь в это поверить. Окуда, узнав, что в сентябре мы бываем на симпозиумах, которые проходят на



Чёрном море, захотел поехать с нами. Его визит был успешен, но полон приключений, которые его поразили. Начались они в маршрутке по пути от аэропорта в Адлере до железнодорожного вокзала в Сочи. Вначале толпа была, как всегда, чем-то возмущена, все переругивались, потом, возможно, с Жениной подачи или услышав английскую речь, присмирели, а в конце и вовсе сдружились, и пара из Сахалина, которая могла выйти раньше нас на одну остановку, поехала вместе с нами до следующей.

Во время пребывания на конференции тоже случались забавные истории. По утрам, до начала завтрака, ходили купаться. Юичи, привыкший к более тёплому климату, – а в тот год было прохладно в середине сентября, – и не имея никакой жировой прослойки, однажды так замёрз, что у него стали стучать зубы. Тогда Женя обратился к ребятам, у которых всегда «было», и они дали ему маленькую стопочку водочки. Этого для японца было достаточно, он захмелел и согрелся моментально. Но опыта выпить с утра стопку водки, я думаю, у него до этого не было.

Жилье нам сняли рядом с институтом, это был кампус для приезжих, в основном, конечно, иностранцев. Счастье наше состояло в том, что окна выходили на Фудзи. А эта красавица – капризная дама, её бывает хорошо видно только в зимние месяцы, и мы каждое утро любовались ею. Дни стояли ясные, солнечные, и ничто не мешало созерцать её.

Я не помню, чтобы Юичи нас куда-нибудь возил. Мы сами в один из выходных были в Токио, ещё раз посетили императорский дворец, вернее я ещё раз, меня туда возила Йоко в мой первый визит в Японию. А Женя был первый раз. Дворцы и замки в Японии, включая императорские, очень скромные. Но там могут быть и шедевры в виде живописи на стенах, ширмах. А вот что на меня, действительно, произвело большое впечатление, – так это наша поездка в музей скульптуры, который находится под открытым небом на склоне Фудзиямы. Одна дорога стоит внимания – подъезжать, взбираться на специальном маленьком поезде по склону – это уже было очень интересно. Сам музей занимает огромную живописную площадь. Скульптуры размещены прямо под открытым небом. Есть там и те, которые вроде и не должны были бы быть устойчивыми, когда скульптура атлета опирается только на пятку или что-то вроде этого, а вот устойчивы. Мне запомнилась и понравилась скульптура мальчика в военном головном уборе. Называлась она «Внук генерала». Кроме разбросанных по территории отдельных скульптур есть ещё пара зданий, в одном из них собраны работы Пикассо, где много его керамики, есть гобелен его работы, который Жене очень понравился. Такой работоспособности и такому многообразию стилей, форм, как у Пикассо, можно только позавидовать и восхититься. Не могу сказать, что я люблю все, что он сделал, но не признать в нём гения невозможно.

Рядом с нашим кампусом находился живописный парк, в котором мы гуляли по вечерам после того, как Женя возвращался с работы. Однажды мы



обнаружили громадную лягушку. Это была, безусловно, какая-нибудь их королева. Я больше никогда не видела лягушек такого размера. Ещё нас поразила собака, которая сама по себе бегала вокруг пруда, нарежая круги. На шее у неё были медали. Хозяина мы так и не обнаружили. Она была похожа на спортсмена, поддерживающего свою форму.

К этой же поездке относится моё знакомство с творчеством выдающегося японского писателя Юкио Мисимы. До этого я читала великого Рюноске Акутагава, Кобо Абэ, но вот с творчеством Мисимы я не была знакома. Он считается одним из самых ярких представителей японской литературы второй половины XX-го века. Трижды номинировался на Нобелевскую премию. Меня потрясло не только его творчество, но и его трагическая судьба! Родился в 1925 г. в дворянской семье. Родился слабым и болезненным, вырос у бабушки, которая приобщила его к литературе и театру. С 50-х годов занял видное место в японской литературе. В 1951 г. отправился в кругосветное путешествие в качестве специального корреспондента газеты. Из путешествия вынес по его словам, личное переосмысление мироздания, телесности и ощущений. Конечно, это повлияло и на его литературную деятельность. Он увлёкся немецким романтизмом. В результате был написан роман «Золотой храм» – наиболее читаемое произведение японской литературы. Мисима был и драматургом. Создал свой театр, сам ставил свои пьесы и сам играл в них. Многие его пьесы ставили в других театрах, а также в это время начинается его популяризация в Европе и Америке. Где-то с 1960-х годов Мисима стал создавать культ своего тела, сильного и преображённого изнурительными тренировками. Одновременно увлёкся классической японской литературной традицией. К своим занятиям бодибилдингом добавил тренировки по кёндō – фехтованию на бамбуковых мечах. Кёндō ставит задачей формирование полноценной личности и твёрдого характера, закаляя волю и тело фехтовальщика. Участвовал в съёмках для изобиловавшего мазохистскими мотивами альбома.

В это время появляются произведения, воспевающие героическую смерть, начинается воспевание неразрывной связи между эстетической красотой и героическими поступками по убеждению. В нем сильно жил культ японского стиля жизни, кодекса чести самурая Бусидо и романтического отношения к прошлому своей родины. Он тяжело переживал поражение Японии во Второй мировой войне, особенно не мог сжиться с мыслью, что император потерял божественную суть, что Японии запрещено иметь боевую армию и что император теперь не главнокомандующий. По условиям договора Япония могла иметь только армию самообороны. Мисима создаёт собственный военизированный отряд и вступает с ним в войска самообороны. 25 ноября 1970 г. под предлогом официального визита базы сухопутных войск сил самообороны вместе с четырьмя членами своей военизированной группы, среди которых был его ближайший друг, он, взяв в заложники командующе-



го войсками, обратился к солдатам с призывом совершить государственный переворот. Но его не поддержали. Театрализованная попытка переворота не удалась. Он удалился в отдельную комнату, вонзил глубоко нож в живот и сделал харакири. По условиям этого обряда, чтобы облегчить страдания человека, сделавшего харакири (а боли в животе наступают страшные), было принято отсекал ему голову. После нескольких неудачных попыток обезглавить Мисиму его товарищ передал меч другому и сделал себе харакири. В комнате нашли обезглавленные трупы Мисимы и его друга. У самураев, как во многих закрытых мужских обществах, был распространён гомосексуализм. Мисима и в этом не отступил от традиций. Утром перед поездкой на базу Мисима завёз в редакцию последнюю, четвертую часть его тетралогии «Море изобилия», которую он посвятил буддистской концепции круговорота жизни и которую считал главным делом своей жизни. Читая эти строки о нем, у меня возникла ассоциация его действий с действиями А.С. Пушкина перед дуэлью, который сделал много неотложных литературных дел, связанных с журналом, издателями, авторами. И рана у Пушкина тоже оказалась в одном из самых болезненных мест – брюшной полости.

Кроме «Золотого храма» я прочла первые две книги тетралогии. Это потрясающие произведения, особенно «Весенний снег». Меня глубоко тронула драматическая судьба этого безмерно одарённого человека, поэтому простите, если вам покажется, что я излишне многословна здесь или мне не стоило об этом писать.

Не помню, в какой из приездов мы навестили профессора Тетсуо Миязаки, с которым Женя организовывал российско-японские совещания «Влияние квантовых эффектов на химические реакции: химия низких температур» и которого он познакомил с В.И. Гольданским. В книге, посвящённой памяти Виталия Иосифовича, есть воспоминание Миязаки об этом и о том, что имя Гольданского помогло ему получить два государственных гранта на исследования.

Миязаки работал в университете в г. Нагойя. Он показал нам свои комнаты, познакомил с сотрудниками. Меня поразило, что комнаты были обшарпанные, на стеклянной вакуумной установке для приготовления образцов лежал слой пыли (может быть, это была старая установка, которой они уже не пользовались). Линолеум на полах был старый, потрескавшийся. Впрочем, при работе с жидким азотом это неудивительно. Но мне помнится, что и в коридорах была та же картина. Миязаки выделил нам двух девушек для показа достопримечательностей города и сопровождения нас на обед в национальном ресторане. Ресторан был традиционным. На входе вас встречают девушки в национальной одежде, кланяются и проводят в комнату, в которой стоит низкий стол, вокруг него сиденья со спинкой, расположенные прямо на полу. Официантки обслуживают, становясь на колени. Еда состоит, как правило, из множества закусок в крошечных плошках. Основное блюдо тоже подаётся



не в тарелках для второго, а в глубоких пиалах. Обязательно рис в небольших, глубоких пиалах.

Я люблю их рис. Как высокотехнологичная страна, японцы давно придумали электрическую варку специально для риса. В принципе, способ варки не отличается от нашего, только не солят. Рисовые зерна очень высокого качества, и очень вкусный из них получается рис. Наша невестка, персиянка, варит рис совершенно по-другому. Она его варит в большом количестве воды, затем откидывает на дуршлаг и подаёт с маслом, посыпают шафраном. Японский рис вкусный без всякого масла. Из блюд японской кухни я больше всего люблю мисо-суп. Суп с растворенной в нём пастой мисо. В состав супа входит множество второстепенных ингредиентов, их набор зависит от региона и сезона. Весьма вкусное блюдо – жареные угри. Распространены рестораны, где прямо перед вами расположены жаровни, на которых вы сами себе по желанию можете приготовить и креветки, и рыбу, и мясо. В домах тоже распространён этот способ приготовления еды. В центре стола ставится электрическая сковорода, и гости начинают по очереди или сразу закладывать то, что задумано хозяевами: мясо, рыба, туда же молоденькая кукуруза, крошечная морковь, китайская капуста, стручки фасоли и прочее.

Главная достопримечательность в Нагойе – это огромная статуя Будды, вторая по величине, после статуи в Наре. Первоначально Будда в Нагойе находился внутри храма, как в Наре, но храм был разрушен. После разрушения деревянной скульптуры была отлита скульптура из бронзы и покрыта золотом, которое теперь осталось только на ушах. Не могу сказать, что это меня впечатлило. А вот, что меня впечатлило, – это поездка с Миязаки на остров Микимото – потрясающей красоты остров, на котором занимаются производством и добычей жемчуга. Одновременно на нем расположен комплекс развлечений. Самое впечатляющее зрелище – это ныряльщицы за жемчугом. 3–4 женщины в лёгком, белом одеянии, ныряют прямо на ваших глазах за жемчугом. Очень красивая территория парка, показывают ферму, где они выращивают моллюсков, в которых вживляют песчинку – зародыш для будущей красавицы-жемчужины. Тут же расположен музей жемчуга, при котором есть отделы, где демонстрируют, как сортируют жемчуг, как делают украшения. Рядом торговый центр, где можно купить полюбившиеся вам изделия на любой вкус и на любой кошелек.

На следующий день Миязаки собирался навестить своего 90-летнего отца, который жил в доме для ухода за нуждающимися в помощи. Миязаки сказал, что уход очень хороший и он платит за это очень большие деньги. Тетсуо с женой приглашали нас в гости к себе домой. Возможно, он уделял нам так много внимания, помня, что во время его визита в Черноголовку я кормила его ежедневно три раза в день у нас дома. Это было в девяностые годы, когда у нас было туго с продуктами и общепитом. Квартира их представляла собой очень маленькую, тесную двухкомнатную квартиру. Угоще-



ние было традиционным, на столе опять же стоял электрический котелок, в который бросали тонко нарезанную (буквально миллиметровой толщины, супермаркеты забиты этими нарезками) говядину, китайскую капусту, грибочки, и вот вам угощение готово: хотите кушаете, как суп, с бульончиком, хотите, как второе. Его жена, милая женщина, медсестра по образованию, но именно она купила авторскую копию Шагала, которая висела у них на стене и, думаю, стоила недёшево. И узнав, что я очень люблю творчество Хокуса, подарила нам копию одной из его Фудзи очень высокого качества. Их дочь жила в Швеции, была замужем за шведом, работавшим поваром.

Возил нас Миязаки показать и средневековый замок японского феодала, расположенный поблизости от Нагойи. Существует нескольких типов средневековых замков феодалов. Есть замки, расположенные на горе, есть на склоне гор, а есть и на равнине. Большинство расположено на склонах гор, чтобы было легче обороняться и труднее взять. Некоторые феодалы имели по несколько замков. В эпоху междоусобных войн они служили крепостью.

У каждого князя были свои отряды самураев. Самураи появились в XII веке. Вначале их было немного, но постепенно по мере усиления борьбы между князьями они стали очень популярны. Самураи представляли собой военно-феодальный класс мелких дворян и князей в феодальной Японии. Самурай переводится как «служить». Другими словами, самурай – служилый воин. Они были не только рыцарями-солдатами, но были телохранителями своего господина и одновременно прислуживали ему в обыденной жизни. Самураи должны были владеть коротким и длинным мечами, а также длинным луком. Самурайские доспехи изготавливали из множества пластин, плотно пришнурованных друг к другу. Существовал кодекс чести самурая – Бусидо, он был проникнут духом беспрекословного подчинения господину и презрения к смерти. Очень популярна народная легенда под названием «Сорок семь самураев», основанная на реальном событии. История повествует о том, как сорок семь самураев-ронинов (самураи, оставшиеся без господина), подготовили и воплотили в жизнь план отмщения придворному чиновнику за смерть своего господина. Их господин был в 1701 г. приговорён к смертной казни за нападение на придворного чиновника, нанёсшего ему оскорбления. Господин предпочёл добровольно уйти из жизни, сделав себе харакири. Его самураи-ронины убили обидчика, голову поверженного врага отнесли в монастырь на могилу своего господина, исполнив тем самым клятву. Они были приговорены к смертной казни, но все выбрали добровольную смерть, как и их господин, сделав себе харакири (сэппуку). Были похоронены в том же монастыре, где и их господин. Эта история вдохновила на многие произведения живописи, литературы, кино, театра. Воспитание в семье и уроки учителя были фундаментом в воспитании молодёжи сословия самураев, формировавшими идеал воина, основанный на мифических сказаниях, буддийском безразличии к смерти, страху и боли, конфуцианском понятии почита-



ния отца. Воспитывали их как спартанцев. Закаляли, заставляя зимой ходить босиком, для преодоления страха отправляли на кладбища, в районы, которые считались населёнными злыми духами, заставляли смотреть казни и т.д. Особенно популярны были самураи с XVI по XVIII века.

С прекращением междоусобных войн и объединением страны пропала необходимость в большом количестве самураев. Часть самураев превратилась в ронинов, они переходили в число горожан, занимаясь ремеслом, торговлей. Всё больше и больше самураев впадало в зависимость от ростовщиков. Процесс внутреннего распада сословия самураев заметно усилился с середины XVIII века. Развитие производства и усиление городской буржуазии вели к постепенному экономическому вырождению самурайства. Комплекс неполноценности, рождённый их странным положением, находил выражение в обострённой тяге к традиционным духовным ценностям. Повсюду возникали разнообразные школы воинских искусств. С новой силой возник интерес к философии дзэн, чайной церемонии, живописи и гравюре, изящной словесности. К концу XIX века сословие самураев, как и другие феодальные сословия, были упразднены, однако самураи не потеряли своего привилегированного положения. Многие из них стали собственниками земли, стали помещиками. Из их рядов вышло много чиновников, из них в основном состоял офицерский состав армии и флота.

Кодекс Бусидо, прославление самурайской доблести и традиций, культ войны стал частью идеологии милитаристской Японии до начала Второй мировой войны. Во время войны были пилоты-смертники (камикадзе), направлявшие самолёт на цель, были смертники и на лодках. Многие воины не хотели признавать капитуляцию Японии после атомных бомбёжек Хиросимы и Нагасаки, когда американцы поняли, что если они это не сделают, то японцы, показавшие во время войны чрезвычайную жестокость, уничтожат своими мечами и кинжалами не меньше людей. Поэтому американцы были вынуждены пойти на эту жестокую меру. Японцы проявляли чудеса жестокости, но и атомная бомбёжка не отделяла детей, женщин и стариков от воюющих мужчин. И то плохо, и это плохо, но продолжать бессмысленную бойню, затеянную Германией и Японией, было невозможно. Надо отдать должное их императору. Он признал поражение и подписал капитуляцию. Этим он перестал быть божеством в глазах японцев. Многие из командного состава армии покончили с собой, совершив ритуальный обряд самоубийства – харакири, сев лицом к императорскому дворцу, дома их высшего господина, которому служит самурай и для которого честь погибнуть за него в бою и бесчестие проиграть. В течение долгого времени на площадь приходили те, кто решил сделать харакири. Иногда группами, иногда в одиночку, часто с родственниками, которые это видели. Ещё долго после капитуляции нация не могла успокоиться, были попытки государственного переворота, чтобы вернуть императору звание главнокомандующего, а Японии право иметь боевую ар-



мию, а не армию самообороны, как им было позволено по условиям договора. Одну из таких попыток сделал великий писатель Мисима, о котором я написала выше. Термин самурай после ликвидации вооружённых сил Японии в 1947 г. окончательно ушёл в историю. Но что безусловно осталось от них – это сохранившаяся до сих пор любовь к боевым искусствам. В каждом городе, в каждой поездке вы увидите мужчин, одетых в национальную одежду (широкие, складчатые брюки и кимоно), везущих за собой, как игроки в гольф, сумку, в которой, видимо, собраны необходимые принадлежности. Да и зданий с вывеской «Центр боевых искусств» немало. А вот что написал один из самураев перед тем, как покинуть этот мир:

Дослушаю песню
Кукушки
В мире теней.

Вспоминая Японию, я не могу не вспомнить японских детей. Они – очаровательны! Им уделяется много внимания, родители набираются терпения и до 5 лет позволяют им все. Мы приглашали к себе в гости в те годы ещё молодого научного сотрудника, а теперь профессора Т. Вакабаяши. Он приехал на велосипеде, взяв двух своих детей, мальчика лет 5–6 и девочку 2–3 лет. Когда они уходили, мы пошли проводить их и наблюдали такую картину. Между мальчиком и девочкой возникла ссора из-за места на велосипеде, кому сидеть впереди папы, а кому сзади. Он терпеливо ждал, когда они уговорятся. Это длилось очень долго. Я уверена, что ни я, ни Женя не смогли бы проявить такую выдержку. Кроме того, что японские дети прелесть как хороши внешне, их ещё одевают очень красиво. Совершенно очаровательны школьные формы, особенно для начинающих школьников. Круглые элегантные шляпки на головках делают их очень милыми и привлекательными. Как в этих вольнолюбивых детях потом воспитывают беспрекословное подчинение сен-сею (учителю, а потом и боссу) я не знаю, возможно, этому способствовало то, что кодекс Бусидо и самурайство были уважаемы и популярны.

Интересная страна Япония. Несмотря на разницу менталитетов и на то, что порой бывало нелегко, у нас там осталось много друзей, и тем, кто прочитал воспоминания Т. Вакабаяши и Т. Кумады, станет ясно, что и Женя тоже оставил неизгладимый и положительный след в их жизни.



Учитель



Д.А. Гордон

**Поздравление с 60-летием
от лаборатории квантовых систем**

С ЮБИЛЕЕМ!

Дорогой Евгений Борисович!

Мы, Ваши коллеги – сотрудники руководимой Вами лаборатории квантовых систем – сердечно поздравляем Вас с Юбилеем – 60-летием!

Вами пройден большой и славный трудовой путь от ученика заводского слесаря до видного учёного, широко известного в научном мире, профессора, доктора физико-математических наук.

Вы, более 20 лет являясь руководителем нашей лаборатории, много сил и времени уделяли все эти годы воспитанию и профессиональному росту своих сотрудников – 18 диссертаций защищено под Вашим руководством.

Вспоминая сегодня годы совместной работы, мы отдаём должное Вашему высокому творческому потенциалу, широкой эрудиции, большой работоспособности.

60 лет – пора зрелости и расцвета творческих возможностей, и мы желаем Вам исполнения всех Ваших замыслов и надежд.

В этот знаменательный день мы от всей души желаем Вам творческих удач, неиссякаемой энергии, бодрости, отличного здоровья!

Желаем счастья, светлых дней,
Здоровья, что всего ценней,
Дороги жизни подлинней,
И много радостей на ней!!!

08.09.2000 г.

Сотрудники лаборатории



*А.В. Карабулин***В следующий раз получится лучше!
А в седьмой – вообще идеально!**

В 2007 г. я окончил четвёртую кафедру МИФИ, кафедру «Химической физики» (тогда ещё «Быстропротекающих процессов»). Дипломную работу я выполнял во ВНИИПО и, несмотря на отличный коллектив, хорошую зарплату и, что немаловажно, отсрочку от воинского призыва, было件нятно, что никакой научной работы в то время в институте не было. А мне хотелось тогда что-то сделать в науке, хотелось как-то развиваться. Поэтому я решил поступать в аспирантуру. На кафедре к этой затее отнеслись настороженно: диплом я выполнял в другом месте и зарекомендовать себя не мог, успеваемость моя была хоть выше среднего, но не выдающаяся, и к тому же в то время не было гарантированно «диссертательной» темы. Тем не менее мы договорились с Сергеем Александровичем Губиным (заведующим кафедрой), что я буду выполнять расчётную работу по уравнениям состояния. Сергей Александрович выдал мне литературу, с которой мне надо было ознакомиться, и на лето мы разошлись.

В начале сентября Сергей Александрович предложил мне подумать о смене направления в научной деятельности. Дело в том, что летом на конференции Евгений Борисович Гордон рассказал ему о крайне интересной научной идее по выращиванию металлических нанопроволок в квантованных вихрях в сверхтекучем гелии. Рассказал, что под эту идею закупается оборудование, а также что подыскиваются студенты или аспиранты для проведения экспериментальных работ. Сергей Александрович предложил мне съездить в Черногловку, поговорить с Евгением Борисовичем, и, если понравится, перебраться в ИПХФ.

Договорившись о встрече, в один из погожих сентябрьских деньков я приехал в Черногловку. Евгений Борисович встретил меня на автовокзале и отвёз к себе домой, где показал презентацию, вводившую в курс дела. И надо сказать, что это была одна из самых лучших лекций, которые я когда-либо слышал. В этом выступлении сочетались огромное увлечение делом, граничащее с азартом, глубокое понимание подноготной физических процессов, лежащих в основе исследуемых явлений, и, главное, столь редко встречающаяся способность объяснить всё это простым языком, понятным даже аспиранту. Поэтому одним из первых впечатлений о Евгении Борисовиче, неоднократно подтвердившихся позднее, было как о прекрасном докладчике. Понятно, что я, недолго думая, согласился кардинально изменить, как сейчас модно выражаться, «персональную учебную траекторию».



Затем потянулись «серые трудовые будни». На момент моего прихода экспериментальной установки как таковой ещё не было, был куплен гелиевый криостат, низкотемпературная вставка в него, но ни оснастки, ни даже комнаты, в которой его можно было бы поставить ещё не было. Тут я столкнулся с другой ипостасью Евгения Борисовича – талантливого экспериментатора, человека, любящего и умеющего работать руками. Несмотря на солидный статус и уже не самый молодой возраст, Евгений Борисович не чурался никакой работы. Монтаж вакуумной системы, пайка проводов и даже замена масла в вакуумном насосе – во всём этом он принимал самое деятельное участие. Было видно, что такая работа приносит ему удовольствие, притом что к самым рутинным работам Евгений Борисович старался подходить творчески и постоянно искал возможность их рационализировать. И главное, что он никогда не боялся браться за что-то новое, что ещё никогда не делал. При этом не могу сказать, что у него всё получалось сразу и хорошо. Но мелкие неудачи ни на грамм не могли поколебать его уверенности в своих силах¹⁾. Если что-то не клеилось или выходило не совсем хорошо, Евгений Борисович всегда со смехом говорил: «В следующий раз получится лучше! А в седьмой – вообще идеально!»

Не могу сказать, что работалось с ним всегда легко: Гордон всех мерил по своей высочайшей мерке, и мне, как человеку, не наделённому такими талантами, было иногда тяжело поспевать и за ходом его мысли, и даже просто физически работать хотя бы столько же. Вообще Евгений Борисович крайне редко шёл на компромиссы, и если он чувствовал свою правоту, то настаивал на своём до конца.

Таким мне запомнился Евгений Борисович Гордон, как учёный: тонко чувствующим свою науку, при этом безгранично эрудированным в различных, не только смежных, областях, умеющим поставить самый сложный эксперимент, осмыслить полученные данные, как не каждый теоретик сможет, а потом изложить их простым и понятным, если надо, даже школьнику языком.

А как в человеке, мне в нём больше всего запомнился безудержный оптимизм: никогда, даже в сложных жизненных ситуациях, во время болезни или после травмы, Евгений Борисович ни на минуту не поддавался унынию. Я где-то слышал фразу: «Жизнь принадлежит оптимистам, пессимисты – лишь свидетели». Так вот, Евгению Борисовичу Гордону жизнь принадлежала абсолютно по праву.

1) МФТИ воспитывал в студентах «комплекс полноценности». Пройдя тяжелейшие испытания в учёбе (в первом же семестре – 52 аудиторных часа в неделю, 81 интеграл в одном лишь домашнем задании по мат. анализу, со второго курса – работа и учёба в базовом НИИ, 9 экзаменов Ландау для теоретиков, и т.д.), студент обретал чувство уверенности, что всё и всегда у него получится несмотря на любые неудачи.



*Takayuki Kumada***He didn't compromise**

I was 30 and Eugene was 62, when he came to our institute as a visiting researcher. Although his stay was only months, I learned a lot of skills and attitudes from him.

He was like a carpenter who starts to cut woods without drawing diagrams. He had a clear 3D drawing in his brain, but I could not see inside at a glance. I followed him desperately. I borrowed a lot of devices from neighboring researchers on his requests. He fought with mechanics in a machine shop to shorten due dates, but after his fight became bigger, I fought with them instead of him. I brought him to a neighboring DIY shop to get not only screws and nuts but also metal rods and blocks to manufacture components by ourselves. I repeated questions even if he got angry for my misunderstanding of his idea.

He didn't compromise. One day in a midnight, I complained him, «You spend too long time for deburring in a midnight. It never affects specification!» His answer was «Everything should be beautiful!». After our apparatus was developed, he asked me to take a beautiful photo and bring it to the mechanics of the machine shop with our feeling of gratitude. I felt a sharing of a value between professional scientists and mechanics, even after fighting.

He didn't stop. Often, we faced problems of experiments and gave up in midnights. I went to home, slept immediately, and waked up with feeling heavy. But, I actually waked up again when I picked him up in the morning. He always proposed a new idea in the car, and then started a next experiment immediately after we arrived.

Now, I'm 50, closer to his age at that time, and have a young PhD student. Although I'm not as powerful as he, I have followed his style. I don't avoid negotiation and fighting to proceed experiments, while keeping respects. I always find something to do not to stop experiments. I make everything beautifully. I have built several experimental apparatuses last 20 years. All of them work very well. Not a few persons applauded their performances. On each occasion, I say thank you to Eugene.

May the student suffer? I don't care. I have to give these Eugene's messages to him, as I learned 20 years ago.



Такаюки Кумада
(перевод Д.А. Гордон)

Он не шёл на компромисс

Мне было 30, а Евгению 62, когда он приехал в наш институт в качестве приглашённого исследователя. Хотя он пробыл всего несколько месяцев, я научился у него многим навыкам и отношению к делу.

Он был похож на плотника, который начинал вырезать по дереву без рисунка. У него в голове был чёткий трёхмерный рисунок, но я не мог на него взглянуть.

Я едва успевал за ним. По его просьбе я позаимствовал множество устройств у соседей-исследователей. Он боролся с работниками механического отдела, чтобы сократить сроки изготовления, но когда борьба обострилась, в дело вступил я. Я привёл его в ближайший магазин, чтобы он купил не только винты и гайки, но и металлические стержни и блоки, чтобы изготовить детали самим.

Я повторял вопросы, даже если он сердился из-за того, что я неправильно понял его идею.

Он не шёл на компромисс. Однажды в полночь я пожаловался: «Вы тратите слишком много времени на снятие заусенцев. Это же не влияет на технические характеристики!» Он ответил: «Все должно быть красиво!»

После того, как наша установка была готова, он попросил меня сделать красивую фотографию и с выражением благодарности отнести её в магазин механики. Я почувствовал, что профессиональных учёных и механиков объединяют общие ценности даже после боев.

Он не останавливался. Часто мы сталкивались с экспериментальными проблемами и задерживались до полуночи. Я шёл домой, сразу засыпал и просыпался с чувством тяжести. Но на самом деле я по-настоящему просыпался, когда забирал его утром. Уже в машине он излагал новую идею и приступал к следующему эксперименту, как только мы прибывали.

Сейчас мне 50, я примерно в том возрасте, в котором был он тогда, и у меня молодой аспирант. Хотя я не так силен, как он, я следую его стилю. Я не избегаю переговоров и борьбы за проведение экспериментов, но делаю это уважительно. Я всегда нахожу, что делать, чтобы эксперименты не прекращались. Все делаю красиво.

За последние 20 лет я сделал несколько экспериментальных установок. Все они работают очень хорошо, многие восхищались их возможностями. И каждый раз я говорю спасибо Евгению.

Страдает ли студент при такой требовательности? Мне всё равно. Я должен передать ему наставления Евгения, полученные 20 лет назад.



*М.Е. Степанов***Самый удивительный человек**

Эта мысль пришла ко мне с первых минут знакомства, подтверждаясь и усиливаясь многократно практически в каждом разговоре с ним на протяжении времени, которое мне довелось быть рядом: «Кажется, Евгений Борисович – самый удивительный человек из всех когда-либо мною встреченных».

Наверное, в качестве предисловия, следует сказать, что Евгений Борисович Гордон был моим научным руководителем сначала в течение двух лет в магистратуре, а затем ещё полутора лет в аспирантуре, а всё описанное ниже – это небольшой набор связанных с ним воспоминаний вперемешку с моими ещё свежими впечатлениями об этом интересном времени.

Познакомились мы весной 2015 г. на моём государственном экзамене по физике, где Евгений Борисович был в составе экзаменационной комиссии. Все подготовленные мною материалы сразу были отодвинуты им в сторону с предложением, от которого трудно было отказаться, – просто обсудить физику вопроса. Обсуждение, действительно, в итоге имело место, но нужно заметить, что обсуждалась не только и не столько физика и не только непосредственно моего вопроса о неинерциальных системах отсчёта, скромно значившегося в билете, но также и обширный ряд других тем из самых разных областей, которые оказались по пути. В какой-то момент, когда я не смог вспомнить, чьей ещё фамилией кроме Лагранжа именуются уравнения движения в обобщённых координатах, Евгений Борисович занялся пересказом биографии немецко-русского учёного, жившего в XVIII веке и совершившего много открытий в математике. Увы, это не помогло мне вспомнить его имя, но, впрочем, в этом я был не одинок – не вспомнили его в этом контексте также и все другие экзаменующие. Как потом сообщил Евгений Борисович, речь шла об Эйлере. Горизонт знаний о мире, которыми обладал Евгений Борисович, как мне тогда показалось, был практически безграничен. Это был тот самый случай, когда на экзамене ты узнаешь для себя много нового, хотя со своей высоты тебе казалось, что ты вполне готов ко всему.

В последующие три с половиной года, то есть уже тогда, когда Евгений Борисович стал руководить моей научной практикой, мне не раз доводилось убеждаться в этих выводах. Однажды, когда перед нами стояла задача разбить лазерный луч на два отдельных луча для целей эксперимента, я разбирался для этого с двойным лучепреломлением, и меня озаботил такой вопрос: почему нередко наблюдается двойное лучепреломление, но никогда не бывает тройного? Какое-то время я потратил на размышления и поиск ответа в литературе, а не найдя его, обратился за помощью к Евгению Борисовичу. Ответ стоил ему нахмуренных бровей и одной секунды на размышления, и я могу воспроизвести его здесь дословно: «У света есть только два независи-



мых направления поляризации». Для эксперимента же вместо двойного лучепреломления Евгений Борисович предложил тогда использовать линзу, из которой предварительно вырезать небольшую центральную полоску, после чего склеить обратно две части канадским бальзамом, чтобы свет от лазера фокусировался в два пятна вместо одного. До этого дня я никогда не задумывался, что линзу можно разрезать из каких-либо хороших побуждений. Подобные случаи происходили постоянно.

По поводу любой неочевидной физической ситуации у Евгения Борисовича всегда имелось объяснение «на пальцах», исходящее из простых и общих соображений. Так, при обсуждении модели конденсации наночастиц идея о том, что они могут полностью сплавиться, просто столкнувшись друг с другом, абсолютно противоречила житейскому опыту и тяжело воспринималась мною и другими студентами. Но когда мы адресовали этот вопрос Евгению Борисовичу, он просто предложил нам подумать о числе соседей для каждого иона на поверхности частицы, которых, как правило, может становиться только меньше при сокращении её диаметра. В итоге, по мере уменьшения размеров частиц их граничные ионы оказываются в положении, когда они крайне нуждаются в новых энергетических связях, в соседях. Соседями становятся расположенные на такой же поверхности ионы другой наночастицы, после чего выделившейся энергии может оказаться достаточно, чтобы процесс плавления продолжался вглубь частиц, стягивающихся при этом поверхностным натяжением, тогда как итоговая частица, расплавившись полностью, должна была бы при этом стать шарообразной. Такой ответ хорошо иллюстрировался с помощью ладони одной руки и был нам вполне доступен.

Обширные знания Евгения Борисовича распространялись, как мне вскоре предстояло убедиться, не только на теоретические вопросы, но и на многие другие, например, инженерные и экспериментальные. Так, когда у нас увеличилось натекание газа в гелиевый криостат, и мы были вынуждены его разобрать, чтобы найти проблемное место, то, хотя в нашем распоряжении из специальной техники в тот момент были только вакуумный насос и вакуумметр, место протечки мы всё же нашли. Евгений Борисович приложил кусочек смоченной в спирте ткани к обшивке криостата, находящегося под откачкой, и вакуум в криостате вдруг резко показал улучшение. Это улучшение было временным, но нам этого было достаточно. Как оказалось, иногда для обнаружения источника подобной проблемы вовсе не требуется дорогой течеискатель – достаточно иметь лишь немного ткани, этиловый спирт и знание о том, что при откачке спирт замёрзнет и закупорит отверстие. Вообще же, как я позже выяснил, относительно любой инженерной задачи Евгений Борисович всегда знал большое количество тонкостей: не только как, но и из чего получится сделать ту или иную конструкцию; что подойдёт в той или иной ситуации лучше или хуже; какой подход наверняка сработает, а какой сработает некорректно. Чтобы проиллюстрировать эту мысль, думаю, будет



достаточно сказать, что направляющие для низкотемпературной ячейки мы изготавливали из стрел для спортивной стрельбы из лука, потому что они подходили нам по всем параметрам: были прочны, легки в обработке, стойки к низким температурам и, главное, имели крайне низкую теплопроводность.

Однажды я понял, откуда у Евгения Борисовича такой богатый запас знаний – он всегда был готов учиться чему-то новому для себя, в чём-то разбираться. Так, когда мы занялись катализом на наночастицах, он говорил: «Если это сейчас необходимо – значит, буду читать книжки по катализу и разбираться в нём подробнее, а что делать?».

Нужно сказать, что в вопросах организации работы нашей группы Евгений Борисович всегда был последователен: задачи разделялись, ответственность делегировалась, нацеленность была на конкретные результаты. Так, например, когда мы, будучи магистрами, только пришли в группу, мне сразу досталась задача – выяснить, как работает прибор под названием VoxCar Integrator и понять, можно ли с его помощью улучшить соотношение сигнал/шум при повторных измерениях. Должен признать, что задача оказалась мне «на вырост», и я совсем не справился, хотя мне и удалось быстро найти инструкцию к этому прибору. Евгений Борисович никогда не опасался давать нам подобные задачи, что было, на мой взгляд, крайне полезно для обеих сторон. Поэтому, даже в случае неудачи, упрёки были редкостью, скорее же, на лице у Евгения Борисовича можно было вместо этого увидеть улыбку. Вообще же, настолько улыбчивого человека, каким он был, нужно ещё поискать. Это всегда очень располагало.

Но это не единственное, что располагало к нему, поскольку Евгений Борисович всегда имел при себе арсенал историй, задачек, вопросов и гипотетических ситуаций на любую тему. Пожалуй, простому их перечислению (оставляя в стороне многочисленные истории) можно было бы с лёгкостью посвятить отдельную книгу. Примечательно, что будь то разговор о том, для чего поезда откатываются назад перед стартом, или почему хомяки и люди не вырабатывают витамин С, или почему бы не увеличить промежуток между оконными рамами, если у воздуха такой низкий коэффициент теплопроводности, или откуда возникает сила трения качения, или почему прилив бывает не один, а два раза в день и так далее, и так далее... ему всегда в первую очередь было интересно наблюдать, как человек размышляет над решением, и он действительно всегда сначала ждал, а затем и сам участвовал в обсуждении вместо того, чтобы просто сообщать готовый ответ.

Подобное равнодушие к живой мысли повсеместно встречалось в том, за что он брался. Об этом можно судить на основании того, что речь Евгения Борисовича была оригинальной даже в ситуациях, казалось бы, предполагающих шаблонно-строгий стиль изложения. В качестве любопытного тому примера я могу привести здесь выдержку (имена и даты опускаю) из его отзыва на работу одного из студентов: «[Студент] пришёл в нашу группу для



выполнения [такой-то] работы в сентябре [такого-то] года. При этом ему пришлось резко сменить направление своей научной деятельности. В течение двух месяцев были сформулированы и направление, и характер его исследований. Хлеб ему достался не сладкий и без дрожжей. В течение первого года были определённые опасения, связанные с масштабом знаний и умения, которые ему надо было приобрести, учитывая, что основное время у студентов [такого-то курса] было отведено слушанию лекций на темы, далёкие не только от задания, но и от инженерии и эксперимента в целом. К счастью, с осени [такого-то] года ситуация изменилась к лучшему. Очень приятно, что [Студент] в полной мере воспользовался открывшимися возможностями и начал работать. К счастью, он себе не представлял, что ему придётся делать то, чего ещё никто не делал; и в некоторых местах нам с ним приходилось уповать на везение».

Вообще же, вопрос подходов к обучению и к науке в целом был для Евгения Борисовича, как мне кажется, очень важным. Однажды он сказал нам, что в науке всегда есть место для веры, – хотя бы просто потому, что ты должен верить в свой результат для того, чтобы его доказывать. И он верил. И мне кажется, он умел делиться этой научной верой.

Мне запомнились слова Евгения Борисовича об умении правильно слушать любые выступления: очень важно развивать в себе порой граничащий с искусством навык – вычленять, улавливать из сколь угодно длинного рассказа только самую его суть, самую главную идею, уметь отделять её от всех остальных, второстепенных мыслей, деталей и уточнений.

Пожалуй, можно было бы вспомнить что-то необычное из почти любой встречи, любого разговора. Однако если принять во внимание предыдущую мысль и сконцентрироваться на главном, что, как мне кажется, он хотел передать, то я сформулировал бы это главное в виде ещё двух воспоминаний.

Одно из них я бы назвал «Свой дом – своя крепость»: Евгений Борисович говорил, что он тогда только понял, насколько важно иметь свой собственный дом, когда тот появился, и это было крайне значимым для него открытием.

Второе (и последнее) воспоминание касается того, к какому подходу в научной и любой другой деятельности нам всем следует стремиться. Здесь Евгений Борисович советовал действовать в два этапа: сначала сосредоточиться на том, чтобы максимально подробно обдумать вашу проблему или задачу, и на этом шаге вам нужно остановиться до тех пор, пока картина не станет предельно ясна для вас со всех сторон, во всех её подробностях. Далее, если вам удалось этого добиться, можно переходить к формулированию своих мыслей, причём обязательно от начала и до конца своими словами. Евгений Борисович особенно подчёркивал, что никогда не следует прибегать к копированию. Теперь, спустя некоторое время, мне кажется, что в этом и была его отличительная черта: он никогда не пытался чему-либо соответствовать, но всегда пытался во всё вникнуть, и не потому, что так было кому-то



нужно, а потому что это было ему интересно. Когда я размышляю об этом, мне кажется, что в своей работе он как бы выстраивал здание, каждый участок которого был тщательно обдуман и выверен. Он всегда как будто бы знал, что нужно делать дальше: для доказательства ли своей теории или просто в житейских вопросах, каких тоже возникало немало. Его всегда можно было спросить, чаще всего у него был ответ, и ответ этот всегда был оригинален.

Три с половиной года эти пролетели как один день, такого разнообразно-интересного времени я искренне пожелал бы любому молодому человеку, студенту. А такого умудрённого опытом, но с живым умением удивляться, бесконечно широко мыслящего, но всегда простого и прямого в обращении с другими людьми человека рядом, каким был Евгений Борисович, я пожелал бы и любому взрослому. Что же касается меня, я навсегда останусь безмерно благодарен Евгению Борисовичу Гордону за всё то, чему мне уже удалось и чему мне ещё, я надеюсь, удастся у него научиться.



*А.С. Гордиенко***Он был великолепным психологом**

Помню, как после окончания бакалавриата МГТУ им. Баумана поступал на Факультет фундаментальной физико-химической инженерии в МГУ им. Ломоносова. Сидел в конференц-зале главного корпуса Института проблем химической физики, слушал обращения старшего поколения к студентам. Там я и познакомился со своим будущим научным руководителем – Е.Б. Гордоном.

Первое впечатление, которое он на меня произвёл – энергичный и инициативный. Помню, как сейчас: надо было выбрать направление подготовки на ближайшие пару лет. Стоял выбор между отделом горения и взрыва и отделом экстремальных состояний вещества. Евгений Борисович рассказал вкратце, чем его группа занимается, и спросил у меня, куда я хочу пойти. Я ответил, что нужно подумать, на что он незамедлительно сказал: «А, ну хорошо, иди в отдел горения и взрыва, там тебе должно понравиться». Возможно, это был «трюк», но он сработал. Мне, почему-то, тут же захотелось остаться в отделе, в котором работал Евгений Борисович и трудилась его группа. Однако, хочу заметить, если это действительно была уловка, то Евгений Борисович был ещё и великолепным психологом.

Чем больше я работал с Евгением Борисовичем, тем больше понимал, что это удивительный человек! Он всегда был полон энтузиазма, он излучал позитив и доброту. Общение с ним доставляло большое удовольствие, он мог поддержать любые беседы на разные темы, мог часами делиться знаниями и рассказывать интересующую тебя информацию. Он не жалел времени на студентов. Я до этого не встречал профессоров с таким отношением к студентам.

Необходимо также отметить его феноменальную память. Он мог вспоминать и рассказывать в мельчайших подробностях истории из своей молодости. Я уже не говорю о том, что он с лёгкостью хранил в уме очень много справочных величин, которые можно было бы не запоминать, но они всегда были у него в памяти.

Мне всегда казалось, что Евгений Борисович стоит на пороге какого-то открытия. Я очень надеюсь на то, что кто-то из его учеников в обозримом будущем доведёт начатое им до конца, и его открытия найдут признание и применение во всём мире. Я безумно рад и благодарен тому, что учился у Евгения Борисовича на первом и втором курсах магистратуры. Вечная светлая память Евгению Борисовичу Гордону!



*О.С. Ржевский***Мастер элегантных оценок**

Я очень хорошо помню день, когда познакомился с Евгением Борисовичем. Это было в июне 1988 г. Заканчивался мой третий курс на Физтехе, шла экзаменационная сессия, а по окончании третьего курса все студенты сдают госэкзамен по общей физике. По сути, он состоит из двух экзаменов – письменного, где проверяются знания и навыки в решении задач, и устного, который иначе назывался «вопрос по выбору». Никаких билетов, как на обычных устных экзаменах. Студентам предлагалось выбрать любую тему, любой вопрос по теме общей физики, подготовить небольшую презентацию и выступить перед членами экзаменационной комиссии. Разумеется, нужно было быть готовым отвечать на вопросы как по теме своего выступления, так и по другим темам, о которых может пойти речь. Такая вот мини-защита диплома. На экзамене оценивались не только знания, но и умение выступать публично, заинтересовать экзаменаторов своей темой и отвечать на вопросы.

Особым шиком среди нас, студентов-третьекурсников, считалось прийти на госэкзамен не просто с подготовленным вопросом по выбору, но и с живой демонстрацией. Понимая это, я начал готовиться ещё с прошлого лета. Самостоятельно собрал демонстрационную установку (отец очень помог в поиске необходимых деталей и электронных компонентов – во времена Советского Союза не всё можно было просто купить) и незадолго до экзамена подготовил теоретическую часть. Демонстрация получилась очень эффектной, и я точно знал, что ничего подобного ранее никто не показывал, так что в успехе сомнений не было.

Перед экзаменом нам рассказывали, что в экзаменационную комиссию могут входить представители базовых институтов Академии наук, которые, помимо оценки знаний, заинтересованы привлекать способных старшекурсников для прохождения дипломной практики в своих лабораториях. А в перспективе, и продолжать там же свою научную деятельность. Поэтому нам советовали относиться с вниманием и интересом к таким предложениям, ведь они могли определить тему дипломной работы, а может, и сферу интересов будущего учёного.

Когда я вошёл в аудиторию, только один член экзаменационной комиссии не был мне знаком. Мой доклад и демонстрация произвели ожидаемое впечатление, и я получил свою отличную оценку. Однако сразу после экзамена состоялся тот самый разговор, который длился не более 10 минут, но после которого я не сомневался, кто будет моим научным руководителем, и в какой области мне предстоит работать. И ещё не раз убеждался в энтузиазме, которым обладал Евгений Борисович, и в способности зажечь своими идеями и передать это вдохновение другим.



На старших курсах Евгений Борисович читал нам курс лекций, который назывался «Кинетика и энергетика лазеров». Этот курс прямо соответствовал моей специализации, что нельзя было сказать о моих товарищах – студентах из моей группы, но работавших в других лабораториях и по другим темам. Однако все отмечали доступность его курса лекций: он был абсолютно нескучным, в нем была и специальная информация, необходимая, например, мне, и общие знания, и любопытные факты, которых Евгений Борисович знал просто нереальное количество. Таким образом, из всех специальных курсов, которые мы должны были прослушать, это был, пожалуй, самый интересный и увлекательный.

Я начал работать сначала на практике как студент, затем как аспирант и научный сотрудник в Лаборатории квантовых систем под руководством Евгения Борисовича Гордона. В Институте энергетических проблем химической физики это была самая большая лаборатория. Она включала (если не ошибаюсь) 7 научных групп. Я работал в группе Валентина Сергеевича Павленко. Областью наших интересов были спектроскопия и кинетика эксимерных молекул: XeCl , XeF и KrF . Евгений Борисович часто приходил к нам для обсуждения результатов, а нередко и новых идей. Обсуждения проходили за чашкой чая. Запомнилось, и мне очень нравилось, что с Евгением Борисовичем можно было спорить, он не рассматривал своё мнение истиной в последней инстанции и не обижался, если студент, каким я был сначала, не соглашался с мнением профессора. Но свою точку зрения нужно было доказать, а вот это было очень непросто. Ожидать, что Евгений Борисович пропустит ошибку в рассуждениях или в расчётах было просто невозможно. Да это и не имело смысла, ведь правильный результат был нашей общей целью.

Помимо поистине энциклопедических знаний, Евгений Борисович был мастером оценок. Я не видел, чтобы он пользовался, скажем, уравнениями теоретической физики, которые, он, безусловно, знал. Однако общие соображения, умение выделить главное и элегантные оценки по порядку величины просто на листе бумаги приводили к результату, который, хотя и с большей точностью, но достигался длительными расчётами на компьютере, чему ещё предшествовала разработка программы. Это как раз тот пример, когда компьютерные расчёты не ускоряли, а могли даже замедлить получение требуемого результата.

Моя работа в институте Академии наук пришлась на 90-е годы, когда экономическое положение распадающегося Советского Союза, а затем новой России было особенно тяжёлым. Евгений Борисович очень старался, он искал и иногда находил зарубежное финансирование для исследовательских проектов. И сохранял оптимизм в любой ситуации! Будучи ведущим секции на одной из международных научных конференций в Москве, он запретил докладчикам из России произносить популярную в то время фразу «В наше



тяжёлое время...». Однако на зарубежных докладчиков этот запрет не распространялся!

И после ухода из науки и крутой смены профессиональных ориентиров я нечасто, но приезжал в Черноголовку, обязательно бывал в гостях у Евгения Борисовича и Диляры Ахметовны в их очень уютном доме и с удовольствием слушал рассказы Евгения Борисовича о том, что удалось сделать, о новых идеях, и я не сомневался, что неиссякаемые энергия и оптимизм Евгения Борисовича способны преодолеть любые экономические и организационные преграды. Работа в академическом институте пришлась на мои молодые годы. Говорят, в молодости и краски ярче, и ощущение времени другое, но по-прежнему считаю, что в Черноголовке, в Лаборатории квантовых систем под руководством Е.Б. Гордона прошли лучшие годы моей жизни, а эмоции от получения нового результата, от прикосновения к открытию трудно сравнить с чем-либо.





*Воспоминания близких,
друзей и родных*



*Д.А. Гордон***Женя. Наша жизнь с ним**

Женя родился 8 сентября 1940 г. в городе Киеве. Родители жили по адресу ул. Горького, д.9, кв.1. Этот дом, как доходный, построил купец Морозов в 1908 г. В основном, он состоял из четырех- и пятикомнатных квартир с очень высокими потолками. После революции они стали коммунальными. И только двухкомнатная квартира №1 на первом этаже была не коммунальная. Существовала легенда, что архитектор дома построил ее для своей любовницы.

Женин папа, Борис Ефимович Гордон, женившись в 1938 г. на Жениной маме, Эсфирь Асировне Меламед, переехал жить к жене и ее родителям (был «примаком», как говорят в народе). После окончания химфака Киевского университета родители Жени работали – мама в Институте химии, а папа в Институте физики АН УССР. Борис Ефимович был очень способным человеком, защита его кандидатской диссертации была назначена на 28 июня 1941 г., т.е. должна была состояться через неделю после начала войны. Он ушел на фронт в первые же дни войны, вернулся в конце 1945 г. Был артиллеристом, командиром дивизиона полка, позже начальником штаба этого же полка. Ушел лейтенантом, вернулся майором, награжден двумя орденами Отечественной войны, несколькими медалями. У меня хранятся его письма с фронта, знаменитые треугольники с номерами полевой почты. Когда его адъютант навестил маму во время своего отпуска после ранения, он сказал ей: «Мы живы, благодаря уму Бориса Ефимовича». Конечно, это преувеличение. Никто не отменял понятие судьбы и случая, но и доля правды в этом утверждении, безусловно, есть.

Женина мама со своей мамой и почти годовалым Женей эвакуировалась в село Чубарское Талды-Курганского района Алма-Атинской области в Казахстане. Мама работала учительницей в школе. Было трудно двум городским женщинам выжить, было голодно. Женя говорил, что все время хотелось кушать. Мне очень повезло со свекровью, Женина мама была замечательной женщиной. Она была красивой, очень доброй, весёлой, выделялись со своим братом врождённым благородством. Отличалась и тем, что ей была свойственна черта Скарлетт О'Хары – при неприятном известии вначале сильно возбудиться, а потом успокоить себя мыслью: «А, оставлю решение проблемы до утра». По-русски – это «утро вечера мудренее». Она рассказывала, что её гордостью в годы эвакуации было то, что она сумела вырастить громадную тыкву, местные жители, казахские крестьяне, приходили просить у неё семена. Возможно, из-за её обилия в те годы, Женя позже терпеть её не мог.

В мае 1944 г. они вернулись в Киев. Квартира была уже занята каким-то непорядочным человеком. Когда маме, как жене фронтовика, вернули одну комнату, то этот господин приходил с топором воевать против двух женщин с маленьким ребёнком. Мама вначале устроилась работать химиком на хлебозавод, это помогло им как-то выжить. Женю удалось устроить в садик,



куда он ходил с удовольствием, потому что там кормили. В семье вспоминали, как он говорил: «Там дают голландский жир» (имелось в виду сыр). Послевоенное детство Жени, несмотря на наличие неработающей бабушки, прошло вольно, с дворовыми ребятами, дружба с некоторыми из них сохранилась до последних дней его жизни. Он вспоминал, как они цеплялись к трамваям, катались весной во время ледохода на Днепре на льдинах, лазали по деревьям. Врезалось в память, как они ходили на Крещатик смотреть, как вешали немецких преступников. К этому же времени относится воспоминание, как мама отругала его за то, что он грубо себя вёл с пленными немцами, стелившими паркет в квартире, которую им вернули после папиного возвращения с фронта. Это мамино наставление он запомнил на всю жизнь, был поражён, когда наша хорошая знакомая, женщина умная, образованная вдруг заявила, что она не успокоится, пока последний человек, воевавший с её страной, не будет истреблён. Он сказал ей, что так нельзя, и рассказал этот случай из своей жизни. А ведь у Жениной мамы немцы расстреляли отца и свекровь со свёкром.

Борис Ефимович воспитывал Женю в строгости, считал, что детей нельзя баловать. Одинаково одобрял занятия учёбой, спортом, отдыхом. Женю рано отдали в секцию плавания, ходил два раза в день (до школы и после). Сохранил любовь к воде, плаванию до последних месяцев жизни. Учился Женя неровно, не был аккуратным, прилежным отличником. Предметами, которые нравились, мог заниматься упорно и увлечённо. После седьмого класса, летом, сам проштудировал учебник химии за восьмой класс (жертвой пал кухонный пол, прожжённый во время опытов) и был освобождён от неё в течение года. Наверное, о нем можно сказать словами, сказанными о Ф. Тютчеве: «Учился не из прилежания, а удовлетворения естественной потребности в знании».

Поначалу, Женя не дружил с ребятами-отличниками, участниками олимпиад. Первый раз на олимпиаду уже в выпускных классах он попал случайно, пришёл с кем-то и решил сам попробовать. Участие было успешным, дружба с этими ребятами сохранилась до конца его жизни, и я продолжаю эту дружбу. Они все после учёбы – кто в Харькове, кто в Ленинграде – вернулись в Киев, после 90-х уехали кто в США, кто в Германию.

После окончания школы Женя два года не мог поступить в Киевский университет и Киевский политехнический институт (в университет экзамены были раньше на месяц). Эти два года он работал слесарем на киевском заводе «Красный резинщик». Там заведующей аналитической группой химической лаборатории работала после хлебозавода и до пенсии его мама.

В 1959 г. Женя поступил в Московский физико-технический институт (МФТИ) на факультет молекулярной и химической физики, и в 1965 г. закончил его с красным дипломом. Тогда это был не только лучший институт в СССР, но и один из престижнейших институтов в мире¹⁾. Деканом их

1) Сравнение программ МФТИ и Массачусетского технологического института по физике и математике, проведённое в 50-х гг., было в пользу МФТИ.



факультета вначале был выдающийся учёный академик В.В. Воеводский¹⁾, после его отъезда в Новосибирск, стал его ученик, один из ведущих масс-спектрометристов в мире, член-корреспондент АН СССР Виктор Львович Тальрозе.

Виктор Львович, пользуясь правами декана, отбирал к себе в отдел свободных радикалов в Институте химической физики АН СССР самых толковых ребят. Позже многие из них стали крупными учёными. Особенным уважением Жени пользовались А.Ф. Додонов и Ю.Л. Москвин, о последнем говорил: «Юра – гений». После окончания Физтеха Женя поступил в его аспирантуру. Виктор Львович был учеником выдающегося учёного академика В.Н. Кондратьева, основные научные интересы которого лежали в области элементарных процессов. Виктор Львович говорил: «Основа всех химических процессов заключается в природе первичных элементарных актов».

Женя был привлечён к работам по исследованию реакций атомарного водорода с конденсированными ненасыщенными соединениями. Его кандидатская диссертация была посвящена применению радиоспектроскопического прибора – квантового генератора на сверхтонком переходе атома водорода – для изучения механизма элементарных химических реакций. Результатом стал цикл работ, не имеющих аналогов в мире. На защите Виктор Львович, как руководитель, сказал только одну фразу: «Исключительно талантлив и трудоспособен». Именно «трудоспособен», потому что не все трудолюбивые люди способны выдержать чрезмерные нагрузки.

Виктор Львович сам был чрезвычайно трудоспособен. Жениной работоспособности и выносливости можно было только удивляться. Помню, где-то через год после защиты им кандидатской диссертации мы встретились на озере с известным учёным Виктором Адольфовичем Бендерским. Не помню, был ли при этом Женя, я скорее всего гуляла с сыном, которому к тому времени было немногим более года. Историю нашего знакомства и женитьбы я подробно описала в очерке о Н.Н. Семенове, поэтому не буду здесь повторяться. Так вот, Виктор Адольфович сказал: «Твой муж сделал очень хорошую работу. Если продолжать в этом же духе, то лет через пять – это докторская. Создай ему условия и не мешай ему». Надо сказать, что я сразу, как вышла за Женю замуж, поняла, что это увлечённый, целеустремлённый человек с очень сильным характером, которого трудно сдвинуть с его пути. Докторскую диссертацию он защитил не через пять-шесть лет, хотя она у него, безусловно, была к этому времени, а через 12 лет, в 1981 г. Виктор Львович говорил, что неприлично защищаться раньше, чем в сорок лет. Почему я написала «безусловно» была? Потому, что на защите все три оппонен-

1) До него в середине 60-х гг. деканом тогдашнего физико-химического факультета был также выдающийся учёный, участник атомного проекта Давид Альбертович Франк-Каменецкий. Его сын, биофизик Максим Франк-Каменецкий, прославился открытием трёхспиральной ДНК.



та подчеркнули, что каждая из трёх глав диссертации могла бы быть самостоятельной диссертацией. К тому же в неё вошли только открытые работы, а сколько ещё было закрытых. Круг Жениных научных интересов был чрезвычайно широк. Достаточно сказать, что температурный диапазон исследований составлял от очень низких температур (2–4 К) до очень высоких – 6000°С.

Жениной работе был сразу дан приоритет. Когда Виктор Львович привлёк его к лазерным работам, он стал иногда возвращаться и по ночам. В создание лазерной установки были вовлечены рабочие производственных мастерских, незаменимые помощники физика-экспериментатора: токари, слесари, механики, стеклодувы, электрики, специалисты по нанесению гальванических покрытий¹⁾. Женя, который сам работал два года слесарем, понимал в их деле, ценил их мастерство, по характеру был демократичным, поэтому был очень уважаем этими людьми²⁾. Я видела, как они при встречах уважительно и дружески приветствовали его.

Уклад нашей жизни не походил на уклад многих знакомых семей. У нас не было совместных по выходным дням уборок, готовок, походов в магазин и т.д. В выходные дни после тяжёлой недели он упорно и умело направлял наши стопы на отдых на природе. Летом это были походы на речку, зимой на лыжах, весной и осенью гуляние на природе. Очень хорошо все это описал наш старший сын в своих воспоминаниях.

Помню, когда я вышла после декретного отпуска на работу, мы ещё не нашли няню и работали пару недель в смену, как-то пришла с работы и увидела картину: сын спит в кроватке, Женя лежит на тахте и раскладывает пасьянс (он это делал часто, обдумывая свои идеи). А на кухне меня ждала гора грязной посуды в раковине. Наверное, я сделала недовольный вид, потому что он сказал: «Зато я тебе набрал кружку земляники, это очень полезно». Я быстро поняла, что быт будет полностью на мне и как с ним справляться я должна решать сама. Это уже позже с переездом в построенный нами дом в 2006 г. (после сорока лет совместной жизни) наш быт поменялся. Поскольку дом расположен довольно далеко от работы, особенно Жениной, мы всюду должны были добираться на машине, а я машину не вожу, поэтому мы везде были вместе. А до этого по дороге с работы домой я заходила на рынок и покупала продукты. Глядя на объёмы купленного, кто-то как-то сказал: «Как много вы едите». Да, накормить троих мужчин приятно, но и не просто. Моя любимая свекровь говорила: «Я знаю, почему Юлик вырос таким высоким: ты их хорошо кормила». Жене нравилось, как я готовила, когда ему говорили, что он поправился и надо бы похудеть, он любил отвечать: «Диля так вкусно готовит, как тут похудеешь?» Жизнь с бабушкой, наложила, конечно, отпечаток на его приоритеты. Например, мои котлеты он любил, но иногда

1) К сожалению, в настоящее время производственные мастерские в некоторых институтах Академии наук ликвидируются вследствие «оптимизации».

2) См. статью В.К. Энмана.



говорил: «Ах, какие у бабушки были котлеты!» У бабушки же он научился разделять курицу и варить хороший куриный бульон. Это было раз или два за всю нашу жизнь, но он это умел. Ещё умел варить варенье. Один раз, будучи в Киеве, где водится потрясающая вишня под названием «Шпанка», он сварил варенье, и это было самое вкусное вишнёвое варенье, которое я ела в жизни. Я даже послала баночку варенья своим родителям со словами: «Вот какие вишни бывают на Украине!» Женя часто это вспоминал и говорил, какая я вредная – вместо того, чтобы написать: «Вот какое вкусное варенье сварил Женя!», написала: «Вот такая вишня бывает на Украине!» Каюсь, конечно, надо было написать и про Женино мастерство. Использование этого мастерства тоже было раз или два в жизни.

А вот что он делал постоянно последние пять лет жизни – это каждую осень, кроме последней, замачивал антоновку, которая росла у нас в саду. Он единственный в семье очень любил мочёные яблоки. Дело это довольно трудоёмкое и долгое, но получались они у него очень вкусные. Многие наши друзья и мои сотрудники пробовали и все хвалили. Понравились они и Аллочке Шиловой, когда мы пришли к ней в последний год её жизни 6 января, в день рождения Александра Евгеньевича. Шиловы очень любили Женю, а Александр Евгеньевич очень высоко ценил его, как учёного, и всегда поддерживал.

Сам освобождённый от домашних забот, Женя часто не понимал, когда сотрудники не могли что-то сделать по домашним обстоятельствам. Для него дело было прежде всего. Но особенно он рассердился, когда в Японии, работая на установке, которую, к удивлению пригласившего его профессора, он собрал от начала до конца в рекордный срок, работая, по словам этого профессора, как машина, ровно в 12 часов один из японских сотрудников заявил: «Время обедать, я должен идти, иначе у меня давление может подскочить». А они только что залили гелий. Меня там не было, но я представляю Женино лицо (обычно это были грозно сдвинутые брови).

На ноябрьские и майские праздники мы обязательно ездили в Киев к родителям. Женя обожал Киев, Днепр, друзей. Летом, пока дети были ещё маленькие, тоже ехали в Украину. Мама брала путёвки в домики от завода, расположенные в роскошном районе Конча-Заспа под Киевом, где был сосновый бор, протекала река и где теперь расположены элитные особняки и куда доступ простым смертным невозможен. Незабываемы были походы с мамой на Владимирский и Бессарабский рынки. Было замечательно наблюдать, как мама выбирала фрукты, овощи. Особенно запомнилось, как мама выбирала дыни сорта «Колхозница». Она брала, нюхала её, отбирала или клала обратно. Дыни были сладкие, сочные, ароматные. Я в Черноголовке, покупая дыни, пытаюсь делать так же, но куда мне... .

Несколько раз я оставалась одна с детьми и родителями, а Женя ходил в серьёзные походы, организованные Димой Соколовым. Это были походы на Север, например, Териберку, по реке Белой, где водились хариусы и агаты,



иногда с ними ходил наш друг, математик, Володя Гурарий. Несколько раз мы были в байдарочных походах с нашими друзьями Никитиными. Первый раз по реке Тетерев в Украине. Мы с Женей ещё были молодожёнами, а Никитины и их друзья Печеновы были с детьми. Второй раз с Никитиными же мы были в байдарочном походе по реке Белой в Башкирии. В походе по Тетереву они были со своей старшей дочерью Олей, а по Белой с младшей дочерью Верочкой. У наших замечательных друзей Никитиных пятеро детей, крайние – девочки. С Верочкой мы сохранили дружбу на всю нашу жизнь. Женя очень любил Верочку, гордился дружбой с ней и частенько говорил: «Наша молодая подруга Верочка...». Мы в этот поход ходили с нашим младшим сыном Юликом, старший был в армии. Были пару раз на машине на Арабатской стрелке. Зимой катались не только на беговых лыжах в Черноголовке, но и на горных. После защиты Женей докторской диссертации в 1981 г. были с ним на Домбае – единственный раз одни, без детей, пока они не выросли и не поступили в институты. Дети остались дома с родителями.

В свободное время Женя любил играть с детьми в подвижные игры, часто весьма рискованные. Его мама в таких случаях говорила: «Оторви ребёнку руки, ребёнку не нужны руки». Никогда особо не задумывался – опасно или нет, гигиенично или нет. Например, старшему внуку Лёве очень нравилась игра, где он играл роль половой тряпки: он попросту ложился на пол, а дед его со страшной скоростью возил по полу. Но однажды, все-таки, Лёве, видимо, попало от мамы после возвращения домой в Москву, потому что в следующий приезд, тяжело вздохнув, он отказался быть половой тряпкой со словами: «Марина будет ругаться».

Наш средний внук Артин ждал нашего приезда по многим причинам, в том числе, чтобы поиграть с дедушкой в пиратов. Женя брал какую-нибудь трубку, смотрел в неё, как в бинокль, и кричал: «Вижу корабль! Свистать всех наверх! Готовиться к abordажу!» Артин в ответ со всей мочи кричал: «Есть свистать всех наверх!» Тут надо подчеркнуть, что Юлик сумел научить Артика русскому языку, хотя в семье говорят по-английски (жена Юлика, Хеля, персиянка), и старался говорить с ним только по-русски¹⁾. В четыре года Артин знал наизусть почти всю русскую детскую классику. Один раз в неделю, по субботам, он ходил в русскую школу. Как-то его учительница, Наташа из Питера, сказала: «Я знаю не много русских детей, чтобы так знали русскую классику». У Артина очень хорошие слух, чувство ритма. Знает почти все песенки, все мультики. Но недостаток практики сказывается: он строит предложения по правилам английского языка («я буду приехать») или, когда я сказала, что мы с дедушкой уже немолодые, он сказал: «ты не старый», а в другой раз заявил: «ты красивый».

1) «Мой дедушка еврей, бабушка татарка, мама персиянка, в детском садике говорят по-английски, – зачем я учу русский язык?» (семейная байка).



Женя никогда не занимался с детьми планомерно и систематически никакими науками. Исключением был случай, когда старший сын, не поступив на биофак МГУ, подал документы на биофак Московского пединститута им. Ленина. В МГУ не надо было сдавать физику, поэтому он её не готовил, а в пединститут нужно было. В промежутке между вступительными экзаменами (в МГУ экзамены были на месяц раньше) мы поехали в Киев, и там Женя сумел вдолбить Серёже физику так, что экзамен был сдан успешно.

Серёжа не унаследовал тяги к естественным наукам, он сугубо гуманитарный человек, всегда очень хорошо писал и сейчас в фэйсбуке имеет кучу поклонников, которые ждут его писаний. Но особую страсть он питал к животному миру, особенно к птицам. К пяти-шести годам знал на память все тома Акимушкина о животных. Сама оказавшись не в той области занятий, к которым природа меня расположила (я тоже гуманитарий), я всегда была сторонницей того, чтобы человек сумел найти в жизни любимое дело и занимался им профессионально. Не напирала на то, что надо быть отличником по всем предметам, но хотела, чтобы тем, что им нравилось, занимались серьёзно и ответственно. Говаривала: «Можете быть парикмахером или поваром, но надо, чтобы люди хотели у вас постричься или покушать». Смешно сказать, но Серёжа кончил школу с двумя четвёрками и единственной тройкой по физике, остальные пятёрки. Это было неожиданностью даже для меня, потому что я, все-таки, не предполагала, что преподавателям, особенно классному руководителю, настолько безразлично все. А может быть, наоборот, они этим хотели что-то продемонстрировать.

Школьники, увлечённые физикой и математикой, учились в заочных математических или физико-математических школах при МГУ и Физтехе. Серёжа тоже учился в специальной заочной школе при МГУ, только не математической, а биологической. Женя, как любознательный и открытый любому обучению человек, проявлял интерес к вопросам, которые присылали Серёже из этой школы. Помню, его поразило, что у слонов витамин С вырабатывается непостоянно, хотя они съедают громадную массу зелени. Читая воспоминания Жениного последнего аспиранта Максима Степанова, я обнаружила, что это удивление он пронёс через всю свою жизнь и рассказал об этом своим студентам. Серёжа в восьмом классе занял призовое место на Всесоюзной биологической олимпиаде, и в награду за это Женя повёз его в заповедник Аскания-Нова. Они поехали одни, потому что Юлик был ещё маленький. О впечатлениях от этой поездки Серёжа рассказал в своих воспоминаниях.

Мне очень жаль, что Серёжа не стал заниматься зоологией, возможно, именно орнитологией, профессионально. На мой взгляд, по нескольким причинам. Во-первых, поколение Серёжи попало в первые постперестроечные годы, когда занятия наукой не приносили никаких денег. Во-вторых, Серёжу обуревали и до сих пор обуревают и другие страсти, а любовь к животным и зоология остались как увлечения. Когда я рассказала об этом Виктору Льво-



вичу Тальрозе, он заметил: «Знаете, Диля, любовь к природе, животному миру являются неотъемлемой чертой любого образованного человека, но это ещё не значит, что он этим обязательно должен заниматься профессионально». Несколько раз в таких же форс-мажорных обстоятельствах, как это было в Серёжином случае, Женя занимался со старшим внуком математикой во время весенних каникул в восьмом классе и летом во время вступительных экзаменов в колледж после девятого класса. Лёва любит вспоминать шоковое состояние учительницы математики, когда она его вызвала после каникул к доске и он ей все решил.

Женя очень серьёзно относился к конференциям, считал, что научным сотрудникам необходимо их посещать постоянно, чтобы быть в курсе достижений в своей области – людей послушать и себя показать. Было несколько регулярных конференций, которые он никогда не пропускал, в некоторых он был членом оргкомитета. Поскольку он занимался многими проблемами, то и конференций набиралось немало. Правило неукоснительности посещения конференций не было нарушено и в тот 1977 год, когда только что родился второй сын Юлик. Я осталась одна с двумя детьми, младшему было три недели. Зато потом, когда старший сын поступил в институт, Женя стал брать с собой и нас с Юликом (он стал уже по статусу другой, да и времена менялись). Чаще всего мы были на симпозиуме-школе «Современная химическая физика», которая с 1988 г. ежегодно проходила и проходит на базе отдыха МГУ близ Туапсе (с некоторых пор в пансионате «Маяк»). Её бессменными организаторами и руководителями являются академик А.Л. Бучаченко и проф. Б.Р. Шуб. Юлик, посещая их с 1989 по 1992 г., так привык к этим поездкам, что даже в выпускном классе не пропустил, к неудовольствию классного руководителя. Но он понимал ответственность момента: помню, как вся школа решала какую-то задачу, которую ему прислали в задании из физтеховской физ.-мат. школы. Задача была то ли некорректна, то ли просто трудная, не помню уже.

На одну из этих школ Юлик приехал, уже будучи аспирантом, из Канады. Перед этим он был с докладом на конференции в Праге и после неё приехал в Россию. Мы были в Туапсе на школе, он приехал к нам и принял участие в её работе. На конференции в Праге его стендовый доклад занял первое место. Женя любил рассказывать своим студентам, как важно относиться серьёзно к участию в конференциях и представлению на них своих работ, приводя в пример этот случай с Юликом. Дело в том, что в комиссии, которая отобрала Юликину работу, был профессор из Гарварда. Ему через год или два понадобился сотрудник на позицию постдока. Юлик как раз заканчивал аспирантуру и подал документы на эту позицию – и получил её. Возможно то, что Юлик вырос в научной среде, в том числе, посещая с нами научные конференции, сыграло роль, что он остался в науке; многие ребята, его одноклассники и сокурсники, как в России, так и за рубежом, ушли в бизнес.



Одновременно или с небольшим сдвигом в этом же пансионате МГУ проводились конференции «Проблемы физики твёрдого тела и высоких давлений», которую организовывали Институт физики высоких давлений и ФИАН. Она и поныне проводится, её бессменными руководителями были и остаются академик В.В. Бражкин, проф. В.Н. Рыжов и чл.-корр. П.И. Арсеев. Они приглашали Женю сделать доклад, даже если он был участником не их конференции, а симпозиума «Современная химическая физика». Много раз Женя был участником и их конференции, и, хотя я не была её участницей и была на ней в дни отпуска, я не пропускала вместе с Женей ни одного заседания. Кроме того, что эта конференция была очень высокого уровня и на ней было много интересных докладов и выдающихся личностей, мне всегда нравилось бывать с Женей на докладах именно из-за него. Будучи широко образованным человеком, он быстро схватывал суть проблемы и задавал интересные вопросы, отличался невероятной активностью.

Помню, когда он начал заниматься нанопроволоками, мы были на конференции в Сицилии. Там было много представителей компаний и отраслевых институтов. Они были впечатлены Жениной эрудицией и активностью. К этой же конференции относится инцидент, о котором он любил красочно, как он умел, рассказывать. На конференции был с женой и дочерью некий иранский профессор. Их работу докладывала молодая женщина в хиджабе, весьма плотно закутанная в одежды, хотя жара была невероятная. При знакомстве Женя энергично протянул ей руку, а она, хотя и робко, но отпрянула.

Посещение с Женей конференций и докладов было для меня одним из удовольствий, которое доставляли мне Женин незаурядный интеллект, широчайшая эрудиция, живость ума и восприятия, неиссякаемая энергия и любознательность, желание узнать и постичь новое. Он гордился тем, что занимается физикой, и любил говорить: «Физика помогает понять, как устроен мир». Он был абсолютным материалистом, полностью отрицал существование каких-то всевышних сил. Когда я приводила примеры каких-нибудь выдающихся проявлений непонятного с рациональной точки зрения, говорил: «Это случайное совпадение». Удивительно, что Женя в юности мечтал стать моряком. Они со школьным другом Афанасьевым подавали документы в Ленинградскую мореходку, но Женя был отклонён, т.к. у него обнаружили дальтонизм. Виктор Львович Тальрозе, узнав об этом, был изумлён и говорил: «Как это могло быть? Вы же прирождённый физик!».

Его широчайшая эрудиция была следствием того, что он постоянно что-нибудь читал. Из литературы очень любил фантастику. Кумирами были Станислав Лем, Айзек Азимов, Рэй Бредбери. Любил Г.К. Честертона, О'Генри, Эдгара По, Марка Твена. Обожал сцену изобретательности Тома Сойера, связанную с покраской забора. Из поэтов любил Редьярда Киплинга, Роберта Бернса, А. Блока. Преклонялся перед Шекспиром. Был изумлён фавбулой «Венецианского купца».



Женя очень любил танцевать и танцевал очень красиво. Мы танцевали везде, где звучала музыка и была площадка: на вечерах и на банкетах, в ресторанах, у нас в России и за рубежом. Мы ходили даже на городские танцплощадки, например, в городе Лоо, где наши друзья Никитины имеют дом, доставшийся Толе по наследству и перестроенный ими. Мы заезжали к ним на пару-тройку дней после конференции в Туапсе. У Никитиных собиралась большая компания, приезжали и другие друзья, по вечерам устраивались посиделки. Мы с Женей, посидев немного, бежали на танцы. Однажды нам принесли бутылку шампанского. Как выяснилось, её передал местный авторитет, который со своей компанией гулял в этот вечер в этом кафе. Он пригласил нас присесть к ним за стол, и они с Женей вели живую беседу. Эта бутылка шампанского была не единственной, нас отмечали не раз.

Женя был весёлым, энергичным, позитивным человеком, любившим жизнь во всех её проявлениях. Любил и работать, и отдыхать, хорошо и вкусно поесть, выпить и потанцевать. Он казался крепким и здоровым человеком! Несомненно, был человеком с очень сильной волей, сильным духом и очень выносливым. Был ли он полностью здоров? Он унаследовал от мамы склонность к гипертонической болезни, они оба с сорока лет постоянно принимали лекарства от высокого давления. Со стороны папы взял склонность к хроническому бронхиту. Его дядя, брат отца, скончался в 65 лет именно от этой болезни. Как раз в этом возрасте она дала о себе знать и Жене. Он очень серьёзно болел в 2004–2005 гг. Но тогда мы, благодаря Аллочке Разумовой, нашли хорошего доктора, которая подобрала правильное лечение, и в течение 13 лет у него не было ни одного приступа. Он прожил в течение этих лет очень качественную жизнь.

Когда за полгода до ухода из жизни ему стало плохо, я нашла её. Но она уже не работала в клинике и направила нас к знакомой в том же Первом медицинском институте, где она раньше, когда нам помогла, работала. Оказалось, что на сей раз проблема больше с сердцем. Женя мог своей железной волей и выносливостью повлиять на мнение врача о состоянии своего здоровья. Во всяком случае, молодой лечащий врач, заведующий кардиологическим отделением в больнице при Управлении делами президента, куда мы попали, выписывая его и разрешая ему через несколько дней лететь в Прагу на конференцию, на мой немой вопрос «Как?» ответил: «Ему сейчас положительные эмоции важнее, чем беречься. Да и вообще, он не является тяжело больным, как ваши врачи представили!» А на следующий день после выписки Женя, как председатель ГЭК, должен был принимать экзамены, именно поэтому и попросил, видимо, выписать. Люди, которые были с ним в этот день, наверняка, заметили, что он был ещё очень болен. Но в этом был весь Женя – работа для него всегда была важнее всего, ему казалось, он все выдержит. Да и случай-Бог-изобретатель оказался не нашей стороне.

Когда за два месяца до смерти утром был приступ тошноты и боли в животе, а к вечеру появились боли в груди, и я вызвала скорую, то наш «грамот-



ный» фельдшер, посмотрев на кардиограмму, сказал: «Ну, в кардиограмме ничего плохого нет, это у Вас обострение хронического панкреатита». Женя ещё переспросил его: «А что кардиограмма хорошая?» Ответ был: «Ну, бывает и лучше, но ничего страшного нет». Когда через два дня начался озноб и я привезла его в клинику Управления делами президента платным образом, не дожидаясь направлений, то тот же лечащий доктор, который был и летом, взглянув на кардиограмму, снятую нашим фельдшером, вскочил и крикнул в открытую дверь: «Срочно экспресс-анализ крови!» А мне бросил: «У него был инфаркт». На следующий день сделали коронарографию и поставили на один сосуд стент, второй сосуд был чистый, а третий забит. У врача был план на третий попробовать поставить стент где-то месяца через два. Но этих двух месяцев не оказалось. Почти весь последний месяц мы провели в этой великолепно оснащённой клинике, и он чувствовал, что он под наблюдением врачей.

Последние две недели мы с сыном не оставляли его одного, дежурили по очереди по 12 часов. Как-то сказал: «Какая у нас хорошая семья. Мне говорят, что они не видели, чтобы за кем-нибудь так ухаживали». Он не допускал и мысли, что не справится и не поправится. Мне, кажется, после этого инфаркта трудно было что-то сделать, а вот летом, когда мы первый раз попали в эту больницу, нужно было сделать коронарографию и поставить стенты, вряд ли сосуды забились бы меньше, чем за полгода. Вот это могло продлить жизнь. Я это высказала лечащему врачу, он мне ответил, что тогда не было показаний и что сам по себе инфаркт не является показанием. Так, значит, был инфаркт летом, почему же он не был тяжёлым больным? Можно поверить, что судьбы где-то пишутся, плетутся. Женя бы опять сказал, что это совпадения.

Невозможно поверить, понять, принять то, что случилось. Очень трудно с этим жить. И все-таки, я больше жалею тех, кто уходит. Особенно когда уходит человек, который так любил жизнь. Жизнь, какая бы она тяжёлая ни была, прекрасна.

Несмотря на то, что он мог бы ещё пожить, Женя прожил долгую и, мне кажется, счастливую жизнь. Первым его счастьем было то, что маме с бабушкой удалось увезти его в эвакуацию и спасти. Вторая удача – его не взяли в Киевский университет (по этому поводу он говорил: «Еврейское счастье состоит в том, что еврея не берут туда, куда ему не надо»). Он поступил в лучший тогда ВУЗ страны, Физтех, и получил блестящее образование. У него была любимая работа, любимая семья. У нас хорошие дети и внуки, к сожалению, самого младшего внука, второго сына Юлика, он так и не увидел. Про меня он тоже, может, и преувеличенно, говорил: «Диля – моё главное достижение». Конечно, он не был ангелом. Как у всякого живого человека, у него были и недостатки, и в нашей жизни, как в жизни каждой семьи, были моменты недопонимания. Но, оказывается, память человеческая милосердна, и я вспоминаю только все хорошее, что было в нашей жизни. Часто вижу нас танцующими.



Д.А. Гордон

Женя и дом

Говорят, что человек может считать свою жизнь удавшейся, если родит сына, построит дом и посадит дерево. У Жени не один, а два сына, деревьев он посадил тоже немало и построил дом. Я хочу немножко рассказать о строительстве, о Женином отношении к этому и участию.

Мы строили дом в течение тринадцати лет. Участок нам дали в 1993 г., как раз, когда все накопленные до этого сбережения пропали в годы перестройки. Так что строительство началось при нулевых накоплениях и затянулось на столь долгие годы. В основном, строили на деньги, заработанные во время зарубежных поездок. Иногда Женя уставал от долгой стройки и предлагал мне продать то, что сделано. Но я, выросшая в своём доме, не хотела расставаться с начатым делом. Наконец, в какой-то момент Женя понял, что нам ещё долго придётся строить, если не продадим квартиру, в которой жили. Мы нашли покупателей, которые согласны были ждать год и выплачивать некоторую часть стоимости в два приёма до окончательной сделки. К этому моменту нужно было сделать всю внутреннюю отделку в строящемся доме.

Нам очень повезло с мастером, правда, не сразу. Вначале была очень неудачная бригада местных мастеров, любителей выпить, обмануть и криво сделать. Но, после расставания с ними нам очень повезло найти нашего Колю с Украины, молодого ещё человека, но уже непревзойдённого мастера. Я ему очень благодарна и за его золотые руки, и за честную, хорошую работу, на которую до сих пор приятно посмотреть и порадоваться. Повезло нам и с тем, что за эти годы к нам пришли новинки в отделочных работах, с которыми Коля уже был знаком, поработав до нас при отделке богатых домов на нашей «Солнечной поляне». Вот в



этот год отделочных работ Женя очень активно участвовал в их дизайне. Мы решили в некоторые проёмы не ставить двери и эти проёмы из прямоугольных сделали арочными, причём получались нестандартные арки, к которым Коля постепенно привык, т.к. Женя научил его делать нужную кривизну сопряжением дуг окружностей разных радиусов. Коля был смекалочный, радовался обучению и мастерски воплощал задуманное. Когда нужно было красиво оформить закруглённые ступени, Женя и здесь показал ему, какие законы геометрии можно применить, чтобы получить желаемый результат.

Мы купили готовый камин. Коля никогда их не ставил, стал отказываться. Женя разобрал чертежи, объяснил, и, хотя Коля первый раз в жизни это делал, блин получился красавцем, а не комом. Женя разыскал по интернету разные проекты саун, выбрал понравившийся и опять помог Коле воплотить его в жизнь. Когда мы переехали в готовый дом в 2006 году, Женя очень полюбил его. Особенно любил сауну и душ при ней, который принимал каждое утро.

Поскольку я не водила машину, то за многими вещами для дома мы ездили вместе и выбирали вместе. В пошивочных делах (шторы, занавески и т.д.) мне очень помогала Галя Алымова, у которой тоже, как и у Коли, оказались золотые руки. Женя иногда вмешивался в дизайн, мы с Галей не возражали, у него был очень хороший вкус во многом.

Любил летом сидеть на улице в саду, часто при этом работал. Из работ по участку на нем лежала стрижка газона, это довольно большой объем работ, потому что участок у нас не маленький и в основном занят газоном, а по-

скольку дом угловой, то изрядную площадь занимает ещё и газон вдоль улицы и переулка за забором. Женя стриг газон довольно быстро и качественно, – впрочем, он хорошо делал все, за что брался. Очень любил собирать урожай. Он был дальтони-ком, и это мешало ему быстро собирать ягоды, особенно красные. Он часто благодарил меня за то, что я настояла на завершении строительства дома, очень любил его и с удовольствием показывал гостям. Жалко, что не так много удалось пожить, но двенадцать с половиной лет получилось. И сейчас, оставшись одна в нашем доме, я вспоминаю, как мы с Женей его строили, как ему нравилось и жить здесь, и участвовать в благоустройстве.



*С.Е. Гордон***Непростой был человек**

Что вам про папу моего рассказать... Ну это, как говорят, «не тема для разговора во время танцев». Человек непростой был...

И отношения у нас с ним очень непростые были... Сейчас их уже поздно выравнять, да и комментировать ни к чему. Как результат, мы так и не поговорили с ним напоследок... Ни о чём не поговорили. Не от того, что папа такой бесчувственный. И не оттого, что я на него такой злой был. А исключительно из-за того, что он ни на секунду не допускал этого «напоследок». Есть такие люди, которые в принципе не допускают возможность собственного небытия. Он был явно из этой когорты. Его огромный, тренированный, потрясающе дисциплинированный и рациональный мозг не мог объять такое простое и доступное любому погонщику верблюдов понятие как «не быть». Может, оно и к лучшему. К Богу Евгений Борисович при жизни так и не пришёл. Впрочем, воинственным атеистом он тоже не был. Слава Всевышнему, похоронили папу по Закону Моисееву: семь ритуальных дней траура, шиву по нему отсидели исправно. Год читали кадиш и сами, и в синагогах обоих полушарий нашей небольшой планеты заказывали... Барух даян а эмет... и земля пухом...

Жизнь мой родитель прожил многоцветную, яркую, полную творческого благородного труда, разумного и честного восхождения по лестнице учёных степеней, абсолютного и заслуженного семейного счастья, почёта и уважения соратников и коллег по всему миру и вполне ощутимого достатка. На его долю не выпало Страшной Большой Войны, которая поломала жизнь его родителей и уничтожила сам феномен ашкеназского еврейства Восточной Европы. Впрочем, его удивительная, иногда совершенно детская, бережливость, восходила корнями в те далёкие два года эвакуации, когда, увидев, что мама с бабушкой собираются доесть скудный ужин без остатка, он, трёхлетний и вечно голодный, кричал запальчиво: «Оставьте на завтра... оставьте на завтра...», уже явно зная, как завтра захочется есть... особенно с утра...

Не досталось ему и Железного Занавеса, который сделал из его отца, гениального химика, рядового эксперта института судмедэкспертизы города Киева. За кордон батя попал вовремя, уже с нормальными деньгами и совершенно окрепшей психикой, дабы не натворить глупостей. А там и сама Софья Власьевна почил в Бозе, и работа в потрясающей Европе, шокирующей Азии и «Рулевой мира» – Америке стала для него нормой и повседневностью. Радостной и размеренной.

Мой папа в принципе не мыслил себя без моей замечательной мамы, да продлит А Шем её дни на Земле. Они были замечательной парой в горе и в праздновании, в болезни и во здравии, в серебре и в аскезе... особенно же сильно их союз скрепила жизнь вдали от дома. Япония и Мальта, Голландия



и Польша, Австралия и Канада... На атласе не так много мест, где не читал профессор Гордон лекций, не ставил экспериментов, не проводил семинаров. И всюду, где бы ни был мой папа, отдавал он дань своим драгоценным временем и вниманием двум страстям своей долгой и насыщенной жизни... Воде и Лесу... И обе эти страсти он в неизменном виде донёс до нас, своих сыновей...

Выросший в послевоенном Киеве, впитавший в себя дух, динамику и энергетику днепровских волн, заводей, островов и заливов, он не мог не передать нам этого знания и умения. Воды он не боялся абсолютно, хотя не уставал повторять, что вода – стихия... и она намного сильнее всего иного, что есть на Земле. Плавал, как выдра, обожал кататься на волнах, грести на всех видах вёсельных лодок, владел всеми стилями плавания. В зрелом возрасте, освоивший виндсерфинг и водный скутер, он передал нам эту страсть и умение приручить водную гладь. Основные правила поведения на воде, которые он методично и умело вложил в наши юные бесшабашные головы, мы усвоили сами и передали своим детям:

- В воде самое страшное – паника.
- Если устал, а до берега далеко, не части и не торопись, лучше чаще переворачивайся на спину и потихоньку греби, отдыхая.
- Тёплая вода опаснее холодной – она усыпляет бдительность.
- Всегда выдыхай в воду. Правильное дыхание – правильный стиль.
- В лодке никогда не вставай на выпрямленные ноги, передвигайся на полусогнутых.

Помню в детстве совсем, после седьмого класса, поехали с ним вдвоём по Приазовью. Аскания Нова, Геническ, Арабатская стрелка... Хорошая поездка вышла. Насыщенная. Вдвоём мы как-то вполне ладили и практически не ссорились. Так вот, на Арабатской стрелке... Он там мне совершенно с другой стороны открылся. Ловко задружился со всеми соседями. Очаровал автомобильных туристов из внутренней Украины умением собрать продувной очаг из ракушечника и готовить на дровах, а не палить вонючие и неэкономичные бензиновые примуса. А главное, навсегда привил мне любовь к Азовскому морю, мелкому, тёплому и живому, сумасшедшего цвета эйлатского камня, населённому птицами, рыбами и всевозможными рачками-моллюсками. Каждый день плавали мы в море открытое на полтора-два километра... не боялся же он. Я, конечно, ныл, говорил, что боюсь динозавров из одноименного японского фильма, который у нас сдуру показали без возрастных ограничений. Он смеялся... говорил, что на такой глубине, как тут на Стрелке, сядет на мель даже самый маленький динозаврик... Это ощущение единения с водой, природой и беззаботным временем школьных каникул осталось потом очень надолго.

Второй же страстью его был лес. И она, для меня лично, да и для младшего братика, стала куда как более судьбоносной. И этому увлечению мой добрый отец полностью обязан месту проживания. Сейчас в этом загаженном, полузаболоченном краю, с ёлками без коры и иголок, с гнилыми слабыми



берёзами трудно признать наш весёлый зелёный красавец-лес, куда в конце пятидесятых навезли молодых учёных со всей необъятной страны для создания Храма Науки. А тогда они приехали и начали как-то обживаться:). Многие сами были из лесных краёв. Сибиряки, костромичи, белорусы... Кое-кто закрутил романы с местными барышнями, которые знали подмосковные травы, грибы и ягоды. Но папа ни к одной из этих категорий продвиженцев молодой советской науки не относился... Как же понял он, что лес – это не только место отдыха, добрый друг, полный птичьего гомона весной и звериных следов зимой? Кто открыл ему, киевлянину, городскому парню, человеку Большой Воды, что летом и осенью лес – это кладовая и кулинарная лаборатория. Наш щедрый черноголовский лес тогда был полон земляники и малины, черники и ежевики. Грибов было море. Никто не брал тогда никаких рядовок и лесных шампиньонов. Белые, маслята, опята, чернушки, подосиновики и лисички. И вот мой папа, поднаторев в грибном сборе в наших лесах, понял своим блестящим умом аналитика, что лес – он и в Африке лес. И куда бы мы потом не приехали, мы всегда и везде ходили в лес за грибами и ягодами. В горах Джубги мы набирали море кизила на варенье, которое там же и варили и разливали по банкам. В Конче Заспе под Киевом умудрялись находить почти всё то же, что в Подмосковье, минус чернику, плюс красную сладкую и терпкую костянику:). В Крыму мы набирали море губчатых грибов, которые надо было обязательно тестировать кончиком языка с тыльной стороны, дабы не нарваться на горчак:). У нас-то они все одинаковые, видом как самый прекрасный белый гриб, а вот губка розовая и горькая, как острожная доля... в горах Кара- и Аю-Дага горчаки бывают самых неожиданных цветов. Вот откуда он знал это? Загадка... непростой человек был мой родитель... ох, непростой.

А песни... Всюду, и в лесу, и в лодке, и в дороге мы пели. Впрочем, мы с братом своим сыночкам тоже пели много... и сейчас поём. Папа много песен знал. Память очень хорошая была и на музыку, и на слова... Кима пели... Окуджаву... беспризорщину какую-то залихватскую. Да разное.

Нас с папой как-то рано дороги развели... Я обидчивый был...к рефлексии склонный. Он был очень законопослушный и с обострённым чувством порядочности. От многих моих привычек он явно был не в восторге. А у меня ещё и мотивация по жизни сниженная...

В общем, не перенял я от него ни работоспособности, ни умения разобратся с любым техническим устройством, ни склонности к точным наукам... Зато вот Лёвка мой у деда научился машину водить. Из-за руля вообще не вылезает. И хорошо... папа смотрит, наверное, сверху и радуется успехам внука...

Дай Бог, чтоб так и было:). Светлая память! Барух Даян, эмет...



Л.С. Гордон

Каким же я тебя помню?

Этот вопрос я очень много раз задавал себе за последний год. Так каким же я запомнил своего дедушку?

1. Решительный

Коридор, первое, что я помню, это коридор. За окном зима, мы с папой приехали в Черногоровку. Я хотел сразаться на палках, взял одну из старых хоккейных клюшек и надел шлем с защитной маской. И вот ты уже учишь меня играть в хоккей в коридоре. Поняв, быстро поняв, что так дело не движется, мы оказались на улице. В хоккей я играть так и не научился, но та скорость, с которой принимались решения, запомнилась мне навсегда.

2. Умный

Тут, я думаю, писать ничего не нужно, вы и так все знаете, а кто не знает, может загуглить. Одно скажу, что под сомнения ни я, ни кто-либо другой этот пункт никогда не ставил.

3. Веселый

Ты любил посмеяться. Обычно, когда проходит некоторое время после смерти близкого человека, его образ мутнеет. Но я всегда могу вспомнить то, как ты смеялся, так, как будто только что тебя видел. Точно помню мимику, это было заразительно, когда ты смеялся, невозможно было не улыбнуться. Я любил посмеяться вместе, но ещё больше любил, когда у меня получалось тебя рассмешить.

4. Судьбоносный

Да-да, это слово, казалось бы, неправильно применять к человеку, но именно так и было. Мне 25 лет, но в жизни моей было чуть больше переломных моментов, чем у большинства моих сверстников. И на поворотах моей судьбы часто стоял именно ты.



Ю.Е. Гордон

Улыбка ходячей энциклопедии

Вспоминая о папе, нелегко отделить в нем учёного от человека, так как вся его жизнь была посвящена науке и самообразованию. Он всегда был полностью настроен на поглощение информации в любом её виде и объёме. Он читал множество научных книг и статей и не только те, которые непосредственно касались его поля деятельности. А уж если что-то относилось к его интересам или проблемам, то он пропускал через себя просто огромный объем литературы. К сожалению, это всё больше становится редкостью, в погоне за количеством публикаций, многие учёные, как в анекдоте, начинают «читать только свои произведения». Вкупе с любовью к науке, исключительно созидательным и оригинальным мышлением, обладание полной информацией помогало папе постоянно производить революционные работы в нескольких направлениях. Сейчас, возглавляя большой интернациональный проект, посвящённый научной базе данных, я понимаю, что путь к моим успехам в этой области я проложил, наблюдая за своим отцом. Его доскональность и поиск максимума информации выходили за рамки науки: через несколько дней после его смерти, разбирая его книги, мы нашли несколько книг о вождении и ещё несколько об устройстве и самообслуживании легкового автомобиля. Меня это несколько удивило: несмотря на то, что, как и многие учёные, – обладатели Жигулей в Черноголовке, он чинил их сам, он мне не запомнился, как автолюбитель. Просто, чем бы он ни занимался, он это изучал досконально.

Но поглощаемая информация часто выходила за рамки необходимой для работы. Я помню, что в студенческие годы, когда я привозил по выходным книги из общежития, далеко не все из которых были научными, он их «проглатывал» за несколько часов. Ему было не так важно: была ли это «фэнтези», классическая литература или просто выпуск «Спорт Экспресса». Книги мы практически никогда не обсуждали. Он просто складывал информацию в кладезь своей небывалой эрудиции. С развитием интернета мне стало за него страшно – объем доступной информации стал слишком большим для мозга индивидуума и далеко не всегда правдивым. Тем не менее, кажется, что он сумел адаптироваться к этому.

Ещё, что всегда поражало, – это с какой лёгкостью он заводил научные контакты. Его заразительная любовь к науке, эрудиция, доброжелательность, контактность и исключительно располагающая улыбка позволяли ему за одну встречу на конференции закладывать фундамент сотрудничества со многими выдающимися учёными по всему миру. Было необычайно приятно, когда большинство из них приняли участие в мемориальном виртуальном симпозиуме 8-го сентября 2020 года, в день, когда бы ему исполнилось во-



семьдесят лет. Поскольку участники были из Америки, Японии, Европы и России, то многие проснулись ради него в 4 утра или не спали до часу ночи. На конференциях за ним всегда увязывалась молодёжь из разных стран мира, слушавшая с открытыми ртами его идеи или просто замечательные истории. Он был очень хорошим рассказчиком, особенно в небольшом кругу за столом, где он мог создать ощущение личного обращения к каждому участнику. Он таким мне и запомнился больше всего – сидящим за столом и улыбающимся. Эта улыбка поднимает мне настроение, пусть он покоится с миром.



*Д.А. Гордон***Мои встречи с Н.Н. Семёновым**

Бегут, меняясь, наши лета,
Меняя всё, меняя нас.

А.С. Пушкин

15 апреля 1896 года родился выдающийся учёный лауреат Нобелевской премии по химии Николай Николаевич Семёнов, которому я обязана не только за удовольствие работать в Черноголовском отделении созданного им Института химической физики АН СССР, но и за события, произошедшие в моей личной жизни.

В июне 1965 г. я окончила Институт тонкой химической технологии им. Ломоносова. Нас, четырёх девушек и единственного молодого человека Женю Чепайкина из моей группы, распределили в Новосибирский институт катализа. От девушек институт отказался, Женя поехал один, правда через 8 лет вернулся и работает в Черноголовке. Мой учитель, замечательный учёный и не менее замечательный человек, Рафаил Моисеевич Флид, сказал мне, что не беда, что так случилось, он напишет рекомендательное письмо к М.Л. Хидекелю, который работает в Черноголовском филиале московского Института химической физики.

Когда я приехала с этим письмом в Черноголовку, то выяснилось, что Хидекель в заграничной командировке. Меня принял А.Е. Шилов, заведующий отделом, в который входила лаборатория Хидекеля, и после беседы сказал, что если Хидекель меня возьмёт, то он не будет возражать. Выяснилось, что Хидекель не скоро вернётся и я оказалась в подвешенном состоянии. В отделе кадров на мой вопрос, что мне делать, ответили, что вообще-то Ф.И. Дубовицкий, директор филиала, никого не берет на работу, не побеседовав лично, и я могу его прямо сейчас найти на центральной площади около гастронома, он водит там каких-то гостей. Я нашла его и с робостью стала объяснять ситуацию. Фёдор Иванович оказался в курсе дела, потому что я ещё не успела произнести фамилию Хидекеля, как он резко оборвал: «Только не к Хидекелю. Можно в лаборатории Дремина или Баркалова».

Я узнала у друзей, что Дремин занимается взрывами, и стало мне как-то не по себе. Я выбрала лабораторию И.М. Баркалова, она входила в отдел свободных радикалов, возглавляемый В.Л. Тальрозе, который был одновременно деканом на Физтехе (Московский физико-технический институт). Объяснять, что такое Физтех, старшему поколению не нужно, а для тех, кто не знает, можно сказать, что это было одно из лучших высших учебных заведений не только в СССР, но и в мире. В него было невероятно трудно поступить, а учиться, видимо, ещё труднее. Пользуясь своим положением, Виктор Льво-



вич мог отбирать в свой отдел толковых ребят, поэтому отдел был очень сильным, из него потом вышло несколько крупных учёных.

Семинары у нас были общие, и мы, химики, страшно боялись докладывать на них. Поскольку я пришла на работу в сентябре, то сразу попала на первый после отпусков семинар. После выступления докладчика встал молодой человек с копной кудрявых (как у Пушкина) волос и очень острым взглядом больших зелёных глаз. Это был выпускник и аспирант Физтеха Женья Гордон. Судя по реакции зала, его вопрос попал в точку. По-моему, задавая вопрос, он бросил взгляд на меня. Говорил, что до нашего знакомства видел меня ещё раз во время празднования Нового Года (оказалось, что мы праздновали в разных компаниях, но на одном этаже).

Знакомство наше состоялось 17 апреля 1966 г., в день празднования семидесятилетия Н.Н. Семенова в МГУ. После окончания празднования Женья подошёл ко мне и мы вместе пошли к метро. По дороге говорили о чём-то, не помню о чём, но хорошо помню, что при обсуждении какого-то вопроса выдала ему пару нелицеприятных фраз. «Серый Вы, как штаны пожарника!» – сгоряча бросила я. Не знаю, что на меня нашло, в общем-то, это совершенно не свойственно мне – хамить людям (видно, судьба вела). Блестящий юноша опешил и, как потом признался, был очень задет. Ну, а я, как воспитанная девушка, на следующий день стала разыскивать его, чтобы извиниться. После этого мы не виделись. Оказывается, он уехал на майские праздники в Киев, где жили его родители. 5 мая Женья явился с веткой цветущего каштана ко мне в общежитие. Мы стали встречаться, через три недели он сделал мне предложение и в сентябре 1966 г. мы поженились.

И.М. Баркалов привлёк меня к решению задачи, которую сформулировал как раз Семёнов. Речь шла о том, что в системах, где активные группы молекул мономера удобно ориентированы друг относительно друга, энергия, выделенная в первом акте взаимодействия возбуждённой молекулы с соседней, будет передаваться по цепи удобно ориентированных молекул для следующего акта и так далее, то есть реакция полимеризации может пройти безактационно. Это означает, что реакцию можно наблюдать при очень низких температурах. Лаборатория Баркалова стала заниматься радиационной низкотемпературной твёрдофазной полимеризацией.

В сентябре 1966 г. Виталий Иосифович Гольданский, заведующий сектором Института химической физики АН СССР (ныне ИХФ РАН им. Н.Н. Семенова), в Черноголовский филиал которого входила лаборатория Баркалова, позвонил мне и сказал, что в Институт физики твёрдого тела в Черноголовке приехал работать из Киева его друг, доктор физ.-мат. наук, лауреат Ленинской премии Владимир Львович Броуде. У него есть гелиевый криостат, и можно провести исследования при гелиевых температурах. Я согласилась. Владимир Львович оказался необыкновенным человеком, работать с ним было большим удовольствием. Но об этом я как-нибудь напишу отдельно.



Довольно быстро мы получили обнадеживающие результаты, наблюдали реакцию полимеризации при гелиевых температурах, и, хотя к тому моменту у нас не было данных о том, идёт ли она действительно безактивационно, Виталий Иосифович решил, что нужно доложить результаты Семёнову.

Вначале мы с Броуде приехали на квартиру к Гольданскому. Было это где-то в мае-июне 1967 г. Надо сказать, что Виталий Иосифович кроме того, что был известным учёным, был ещё и очень яркой личностью. Он отличался живостью ума, остроумием, молниеносной реакцией, широкой эрудицией. К Семёнову имел отношение не только тем, что работал в его институте, но ещё и был женат на его дочери, Людмиле Николаевне, женщине тоже незаурядной, унаследовавшей породу. За глаза, любя, все её называли Милочка. Открытая, доброжелательная, живая, весёлая и очень непосредственная, я её очень люблю и горжусь дружбой с ней. Ей сейчас 91 год, но она полна той же жизненной силы, тот же молодой, звонкий голос, до недавнего времени со своей 100-летней подругой не пропускали ни одного значимого музыкального события. В те дни, о которых я пишу, когда мы с Броуде прибыли к ним, они только что вернулись из Швеции, где Людмила Николаевна приобрела очень симпатичные чашечки из прозрачного, как стекло, материала. Она с восторгом их нам показала и сказала: «Они не бьются. Их можно ронять. Хотите, покажу?» Виталий Иосифович при всех своих достоинствах был человеком прижимистым и, видимо, при этих Милочкиных словах (понятно, что она не только нам предлагала проверить прочность чашечек) напрягался. И в этот раз он сказал: «Мила, ради Бога, оставь свои шутки». Мы быстро покинули их дом и отправились втроём на квартиру Семёнова, которая находилась во флигеле Института химической физики. Никаких подробностей и особенностей её я не помню, помню огромную собаку. Она никак на нас не отреагировала, мирно лежала у входа, свернувшись калачиком. Мы сели за большой стол, меня посадили рядом с Николаем Николаевичем и попросили рассказать. В молодости мы все уверены в себе, я не возражала. Помню, что Николай Николаевич держал в руках папиросу, коробка спичек лежала рядом на столе, но при мне ни разу не закурил, только всё время просил: «Говорите громче, милочка». Был очень доброжелателен.

Через полтора года состоялась ещё одна моя личная встреча с Семёновым. В июне 1968 г. я родила нашего первого сына. К этому времени Ф.И. Дубовицкий дал нам отдельную квартиру, но телефона пока не было. Я была сумасшедшей мамой, все делала по рекомендации чешского доктора, автора популярной у нас тогда книги по уходу за ребёнком. Как-то моего брата спросили, кто его сестра. Брат попытался описать меня и в ответ услышал: «Так это та женщина, которая гуляет с ребёнком в любую погоду!» Во время одного из гуляний, пока сыночек спал, я решила зайти в здание гостиницы на центральной площади, чтобы позвонить Жене на работу и узнать, когда он придёт на обед. Выйдя из здания, я увидела следующую карти-



ну: какой-то высокий, стройный человек, одетый в длинное чёрное пальто, чёрную шляпу с черным зонтом-тростью стоял и качал мою коляску! Я в ужасе подскочила, не помню, сумела ли толком поблагодарить. Зато помню, как ласково он улыбнулся мне и спросил: «Это Ваш малыш, милочка? Что же Вы его оставили без присмотра?» Это был Семёнов. Я и позже видела его на конференциях, семинарах, но личного общения больше не было.

P.S. Сегодня исполнилось 54 года, как мы с Женей познакомились. Как быстро пролетело время! Мне, конечно, очень повезло в жизни быть больше полувека рядом с человеком незаурядного интеллекта и яркой личностью! Спасибо ему и судьбе!

Черноголовка, 17.04.2020 г.



*Д.А. Гордон***Встреча с Юрием Любимовым**

Евгения Борисовича пригласили поработать в лаборатории Камерлинг-Онесса Лейденского университета. С 1998-го по 2002-й, дважды в год (2 месяца осенью и месяц в апреле) мы ездили в Голландию. Поскольку мой билет оплачивался из семейного бюджета, билеты выбирала я, чтобы вышло подешевле. Как правило, это были рейсы с пересадкой и иногда в не очень удобное время.

И вот как-то раз в начале мая мы возвращались в Москву. Пересадка была в Копенгагене, в довольно ранний час. Аэропорт Копенгагена мне очень понравился своей камерностью и уютом. Пахло кофе, у нас оставалось время до вылета, и мы направились в небольшой зал ожидания. Уже издалека я увидела импозантную фигуру господина, одетого в замшевую куртку. На нем был нарядный шейный платок, седовласая красивая голова откинута, видно, дремал. Я сразу его узнала и сказала Жене: «Это Любимов». Женья засомневался. Любимов сидел в крайнем ряду, лицом к окну, поэтому мы оказались за его спиной. Женья сказал, что пойдёт покурить, а я, наверное, задремала.

Очнулась я от их разговора. Как Женья потом рассказывал, когда он, покулив, возвращался, Любимов помахал ему рукой, приглашая сесть, и сказал: «Да, я действительно Любимов». Позже выяснилось, что он не зря обратился к Жене – у него была проблема, в решении которой он рассчитывал на его помощь. Он недостаточно свободно владел английским, а ему нужно было поговорить со служащей авиакомпании. Женья так описывал их поход: Любимов пытался объяснить девушке, что он со своим театром был на гастролях в Таллинне, а теперь возвращается в Москву. Труппа, в связи с тяжёлым материальным положением, возвращается на поезде, а он просил купить ему билет на самолёт. И вот только сейчас он обнаружил, что билет не бизнес класса, а эконом, – но ему трудно лететь эконом классом. Он хотел бы исправить положение. Девушка, мило улыбаясь, ответила, что она всё поняла и всё легко исправить, только нужно доплатить за бизнес класс. Любимова это не устраивало. Он пытался опять объясниться, но девушка была настойчива. В конце концов, ему надоело. Они вернулись на свои места и принялись беседовать.

Я поздоровалась и стала участвовать в разговоре. Через некоторое время Любимов сказал: «А что это мы сидим спиной, давайте сядем рядом». Разговор продолжился. За давностью лет я не всё помню, но речь шла о сыне Любимова, Пете. «Да, у него всё хорошо. Я вот не знаю языков, а Петя, будучи совсем юным, знает несколько языков и владеет ими свободно». Говорил с любовью и нежностью. Конечно, разговор коснулся и Высоцкого. Он сказал, что считает его крупным поэтом, что Высоцкий был бесконечно талантлив, что очень любил его, спасал, покрывал к неудовольствию многих, звонил Марине, она по-



могала, но была далеко. Зашёл разговор и о разделении театра. Я помню, что меня в те времена очень тронула судьба Филатова. Было ужасно видеть этого красавца в том облике, в каком он появлялся в своей передаче. Я выразила сочувствие и спросила, что случилось. Он сказал, что может быть грех так говорить, но он считает, что это Бог его покарал. На мой взгляд, да – грех, но в то же время, если он это признает, то многое простится ему.

В самолёте рядом с любимовским креслом обнаружилось свободное место (он оказался далеко от нас, ближе к хвосту), и он спросил меня, не буду ли я возражать, если Женя сядет рядом с ним, он хочет поговорить о физике и физиках. Женя потом рассказал, что Ю.П. сообщил ему о своей дружбе с П.Л. Капицей, – Любимова волновали его последние годы. Я помню, Женя говорил, что Капица в то время вынашивал какую-то очень важную идею и очень верил в неё. Гениальный Я.Б. Зельдович сказал, как проверить её экспериментально. Результат оказался отрицательным. Капица трудно это переживал.

Женя рассказал Любимову аналогичный случай, произошедший с литературным героем. Женя хорошо знал польский и в молодые годы в минуты досуга переводил мне польские детективы. Герой одного из них – молодой человек, учившийся в Варшавской консерватории, оказался в Альпах. Он в леднике обнаружил труп немецкого офицера, в сумке которого нашёл нотные записи гениального произведения. Поборовшись со своей совестью, он не устоял и выдал их за свои. Конечно, пришла быстрая и неслыханная слава. Говорили – это новый Моцарт. А дальше? Дальше все ждали продолжения, а его не могло быть. Он не выдержал этого и покончил с собой. Не все выдерживают, когда не могут пойти дальше или хотя бы остаться на уровне полученного значительного результата.

Любимов, в свою очередь, рассказал Жене про свой подход в постановках и в оценке событий. В мире существует несколько страстей: любовь, сострадание, милосердие, ненависть, зависть, ревность, коварство, жадность, ярость, обжорство. Тут он был не оригинален, есть фильм по их числу, не помню, их восемь или девять. Страсти управляют человеческими деяниями. Жизнь и её приключения есть игра и комбинация этих страстей.

На прощание он сказал, что был рад знакомству. Я ему ответила, подражая коту Матроскину: «Юрий Петрович, мы Вас и до встречи любили, а теперь будем в сто раз больше любить!» Дал визитку, но мы ни разу не воспользовались. По возвращении сразу окунулись в обычную жизнь – Женя всегда очень много работал, а на мне, кроме работы, были ещё дом и дети. А вскоре мы и физически далеко оказались. Женю пригласили на год поработать в Японии (Киото). От нашей единственной встречи с выдающимся режиссёром остались очень приятные и добрые воспоминания. Спасибо ему и светлая память!



Э.С. Медведев

Школа

Мы с Женей учились в одной школе¹⁾, он на год младше. Школа сыграла огромную роль в нашем выборе жизненного пути благодаря своим замечательным педагогам, память о которых мы сохранили навсегда. Здесь я хочу воздать им должное. Особую роль, конечно, сыграли учителя физики и математики, но я начну не с них.

Украинский язык и литературу преподавала Нонна Павловна Музыченко, участница партизанского движения. Меня поразила тогда, в 1953 г., когда моя семья переехала в Киев, и продолжает жить во мне по сей день её безмерная любовь к детям, которая ежедневно и ежечасно выражалась в её взглядах и словах независимо от того, хвалила она нас или укоряла. На первом же уроке я в диктанте на полстранички сделал 36 ошибок, и на следующем уроке она влетела в класс, вся взъерошенная, негодующая: «Де цей Ведмедик? Покажте мени його! Звидкиля ты такий явився?? – 3 Читы. – Ах, з Читы! Що ж ты мени ранише не сказав?» Я был потрясён этим ласковым, нежным «Ведмедик». Я стал одним из самых прилежных её учеников – учил правила, читал классическую литературу. И у меня были неплохие отметки, хотя спуска она не давала и по окончании поставила прочерк в аттестате.

Физику преподавал Заслуженный учитель Украинской ССР Григорий Михайлович Дубовик. У него была тетрадка для плохих отметок, и моя первая – тройка! – оказалась там, но было сказано: «Не сомневаюсь, что ты можешь лучше», и это «лучше» уже пошло в классный журнал. Методы Григория Михайловича привлекали внимание своей нестандартностью. Например, я спрашиваю: «Зачем Вы говорите нам, какие задачи будут на контрольной? Ведь я их дома все решу и нет проблем.» Он весело хохочет: «Так ведь это мне и нужно!!» А задач, между прочим, штук 20–30.

В физическом кабинете я мастерил прибор для измерения ускорения свободного падения. На вступительном экзамене в Киевский политехнический институт мне попались низкие температуры – любимейшая тема Григория Михайловича. Мы знали имена будущих Нобелевских лауреатов академиком Льва Давидовича Ландау и Петра Леонидовича Капицы, и, что самое поразительное, тогда ещё не академика Александра Иосифовича Шальникова, моих будущих учителей. Я нарисовал схему турбодетандера Капицы, но экзаменатор сказал, что неправильно, и поставил тройку.

Гордостью Григория Михайловича были успехи учеников на олимпиадах, которые проводились на физфаке университета. Однажды попала такая задача. Под колпак вакуумного насоса ставят стакан воды и быстро отка-

1) Школа №131, г. Киев, на пересечении ул. Саксаганского и Шота Руставели (ныне Мало-Васильковская).



чивают воздух. Сколько воды замёрзнет? При этом экзаменатор забыл дать фактические данные – сколько было воды и при какой температуре. Но у меня это не вызвало никаких затруднений, задача была решена в буквах, что было далеко за пределами стандартов того времени.

Ещё одна особенность воспитательных методов Григория Михайловича – он рассказывал младшим ученикам об успехах старших. Именно так состоялось наше первое, заочное знакомство с Женей, о чём Женя рассказал мне впоследствии. Разумеется, особым почётом пользовались ученики, поступившие в Московский физико-технический институт. Эта пропаганда сыграла немалую роль в выборе института Женей, в котором мы с ним учились, а по окончании и работали в одном институте.

Учителем математики был Андрей Леонидович Зайчук, – высокого роста, с немного нелепыми, неуклюжими движениями, несколько даже карикатурный человек. Говорит ученице на первой парте: «Маша! Представьте себе, подойдёт к Вам молодой человек и спросит теорему Пифагора...» – весь класс падает от хохота: вот эту высокую, стройную красавицу Машу Бродецкую, певицу в оркестре Марка Резницкого, сидящего тут же за соседней партой, спросит про Пифагора?

Войдя в класс, Андрей Леонидович совершает ритуальный обход по рядам. Все тетрадки открыты, и почему-то все робеют, если нет домашнего задания, хотя класс запредельно хулиганистый. Уровень преподавания необычайно высок. Достаточно сказать, что на экзаменах в КПИ и МФТИ никаких затруднений не вызвали неравенства и графики с модулями и обратными тригонометрическими функциями, что в те времена было слабым местом школьных программ.

Многие годы после школы, приезжая к родителям в Киев, я навещал Нонну Павловну и Григория Михайловича.

В 1956 г. выпускник нашей школы гимнаст Юрий Титов стал бронзовым призёром Олимпиады в Мельбурне. В 2011 г. вышли воспоминания «В команде Глушкова» Виктора Васильевича Шкурбы (1935–2011) – советского кибернетика и математика, окончившего нашу школу с золотой медалью в 1952 году, в которых он тоже воздаёт должное нашим общим учителям. <http://ogas.kiev.ua/library/v-komande-glushkova>



Приложение. Рассказ Олега Rogozовского, ученика школы №131

Женя Гордон, который учился в параллельном классе, рассказывал, что на уроке, где изучалась граната РПГ-10 и её замечательное поражающее действие, он попросил наглядно объяснить изложенные тактико-технические данные. Соломон Аронович, который, скорее всего на фронте гранат лично не бросал, удовлетворить любознательного Женю не мог и спросил, что он конкретно имеет в виду. «Ну, например,» – сказал Женя, «если граната конкретно разорвётся на столе в учительской во время педсовета, всех убьёт?»¹⁾ Тут уже Жене пришлось идти за родителями и получать тройку по поведению²⁾ за четверть.

1) Вопрос был с подтекстом: Женя, видимо, хотел отомстить учителю истории Канищеву, который его недолюбливал и в конце концов вклеил ему в аттестат тройку.

2) В современной школе оценка по поведению упразднена, теперь за провинности снижают оценку по предмету.



В.В. Прут

С первого по третий, 1959–1962

1959 год 29 июля, Приёмная комиссия Физтеха¹⁾. Председатель – ректор, легендарный Олег Михайлович Белоцерковский²⁾, там же Д.А. Кузьмичев, деканы факультетов. Мы с Женей Гордоном встретились на этой комиссии, до этого не были знакомы: он киевлянин, я – москвич.

Сдавали экзамены во втором потоке. Каждая группа на приёмных экзаменах состояла из 20 человек³⁾. Мы были в разных группах, но в группе остались одни. Это было немного странно, потому что конкурс в том году был ~ 10 человек⁴⁾. Поэтому комиссия была простой формальностью⁵⁾, которую однако нужно было пройти. Нас приглашала совершенно очаровательная девушка, в которую, как потом выяснилось, была влюблена половина Физтеха. Входили по одному. Какие вопросы нам задавали, было уже неважно, а вспомнить, что именно, совершенно невозможно, прошёл 61 год. Не ожидая официальных результатов экзаменов, нам сказали, чтобы мы отработали 10 дней на хозяйственных работах: погрузка, разгрузка. Это была победа. В школе тогда превалировала точка зрения, что поступить на Физтех невозможно, там только ньютоны, эйнштейны и пр. После комиссии мы вышли из здания в июльский солнечный день. И от радости не могли до конца осознать всей перемены в нашей жизни.

И вот 1 сентября 1959 г. мы с Женей попали в одну группу 941. Начались будни, 48 часов занятий в неделю⁶⁾, учились и в субботу. Учиться было трудно и немного непривычно, было много заданий, которые делали до 1 часа ночи ежедневно⁷⁾. Причём многие предметы можно было сократить без большой потери. Многие не выдерживали этот ритм, из нашей группы 3 человека

1) Физтех – Московский физико-технический институт, физтех – студент Физтеха. Приёмная комиссия собиралась после экзаменов, проводилось собеседование и решался окончательно вопрос о приёме. При этом оценки не имели никакого значения – могли не принять со всеми пятёрками, как и имело место с одним абитуриентом в 1962 г., я тому свидетель. Выпускники Физтеха получали высокую (вторую) форму допуска к секретным работам, поэтому Приёмная комиссия была наделена особыми полномочиями (здесь и ниже примеч. ред.).

2) В 1957 г. был генерал Петров И.П.

3) В моей группе двумя годами ранее было 40, и 28 двоек на первом же экзамене.

4) В 1957 г. поступало 2000 со всего СССР, без двоек сдали 400, приняли 350. Какое расчётливость – отправить восвояси 50 талантливых ребят!

5) Ох, нет, это просто везение, для меня это было тяжелейшее испытание! А.Н. Тулайков устроил мне суровый экзамен, не посмотрев на кипу моих олимпиадных грамот и 5-4-5-4 по математике и физике, тогда как типичные отметки были 4-3-3-3.

6) У нас – 52, в пятницу с 9 до 20:50.

7) А после полуночи оба общежития, А и Б, высыпали на каток, залитый прямо под нашими окнами.



из 17 ушли, не выдержав этой нагрузки¹⁾, хотя все ребята были очень способные. Многие халтурили, списывали. Но что было в Жене, так это чувство собственного достоинства, по которому списать было нарушением принципов его жизни, как бы тяжело это ни было. А в студенческой жизни обмануть невозможно, 6 лет все на равных условиях.

И вот экзамены. Письменные математика и физика. И что-то ещё, но что – вспомнить невозможно и не хочется, потому что в мире для нас были только математика и физика. И это была радость, просто мы ощущали физическую радость от решённых задач, и чем труднее была задача, тем больше радость. Это характерно для настоящих физтехов, таких ребят я встречал много, к сожалению, потом многих перемалывала жизнь²⁾. Сдали мы за физтеховское время около 50 экзаменов, ещё больше зачётов. И что было характерно для Жени, он всегда шёл первым, ничего и никого не боялся. Он был уверен в своих способностях, и это было справедливо. И что интересно, никому и в голову не приходило ставить это под сомнение, такая сила исходила от него. Первый пошёл, второй пошёл ... Женя придавал уверенность, что всё будет хорошо.

На первом курсе у нас была замечательная преподаватель по математике. Она только закончила университет и преподавала впервые. Она тщательно готовилась к занятиям и была очень профессиональной, справедливой и доброй. Но на втором курсе она ушла от нас. Все её очень любили, поэтому мы пошли на кафедру и попросили вернуть её. Как я теперь понимаю, подготовка к занятиям занимает значительно больше времени, чем само занятие. К сожалению, нам отказали. Я привожу этот факт, потому что, к сожалению, далеко не все преподаватели были столь профессиональны. А учиться с Женей мы хотели и, как ни странно, любили. И искали возможность учиться. Ходили к другим преподавателям, на факультативные курсы.

На втором курсе нас послали на картошку. Картошка как картошка. Но чёрт, как справедливо замечено, в деталях. Нашёлся большой знаток и любитель преферанса и покера. В школе мы эти игры не проходили. Естественно, очко. Это для пацанов. И вот аристократические игры. Это значительно сказалось на нашем времяпрепровождении уже во время семестра. Учёба учёбой, но время оставалось и для игр. Поскольку все, в основном, жили на стипендию³⁾,

1) В моей 722 группе из 19 чел. (17 студентов и 2 вольнослушателя, которые, правда, вылетели после первого же семестра) окончили институт только 12.

2) Кое-кто лишился рассудка и даже жизни. К несчастью, никто не следил за здоровьем студентов, хотя и была своя поликлиника и был свой профилакторий на первом этаже корпуса Г – сущий рай, с пуховыми подушками, домашними обедами и полной тишиной.

3) Стипендия была по тем временам очень высокая – от 450 на первом курсе до 600 (750 повышенная) дореформенных рублей на старших курсах. Квалифицированные токари на заводе, где я работал после школы, получали 750, мой наставник 1200. А в других ВУЗах стипендия была 220 р. В аспирантуре я получал 130 уже пореформенных рублей (в 1961 г. рубль был деноминирован в 10 раз), но по окончании, на должности младшего научного сотрудника только 105.



играли в долг¹⁾. Суммы накапливались заметные, но по каким-то правилам (или вообще без правил) обнулялись. Однако в день выдачи стипендии играли за наличные. Женя играл на тройку, хотя математика и физика всегда на пятёрку. Противоречие объяснимо просто. Менталитет игроков совершенно иной, особенно в покер. Лучше всех играл наш коллега из соседней группы, но по окончании Физтеха он не умел даже дифференцировать. В математике и физике должна быть абсолютная правда и честность, а игра – это манипулирование игроками. И вот однажды Женя сыграл в день стипендии и много проиграл, после чего он в своей жизни больше никогда не играл. Как ни странно, это пошло на пользу науке. Интересная наша память, вспоминается такая ерунда, а то, что мы ходили на курс по квантовой теории поля или учили ещё немецкий и французский²⁾, не вспоминается.

Ещё пример того, что Женя должен был быть первым всегда. Семейство Гордонов приехало на мою дачу в 90-е годы в гости. А у меня был хороший дом. В то время Женя медленно возводил свой коттедж, потому что это стоило очень хороших денег для учёного в 90-е. Этаж в год. Женя посмотрел на мой дом и сказал, что он построит лучше. И построил, хотя никакого отношения к строительству, естественно, он никогда не имел. И когда мы приехали к Жене в гости, я был потрясён его домом. Всё было сделано просто талантливо, по высшему разряду, при очень ограниченных ресурсах. Хотя это вполне объяснимо, талант всегда и везде остаётся талантом.

После третьего курса Женя распределился в Черноголовку, я в Курчатовский институт. Видеться мы стали гораздо реже. Как всегда, дни рождения, свадьбы, диссертации и другие события.

Его уход был для меня большой трагедией. Нас связывало больше, чем дружба, какая-то общность менталитетов, он был и остаётся родным человеком.

1) Мы – никогда!

2) Может, это физтеховская традиция? И мы увлекались языками, особенно французским (а некоторые учили все три языка). Отучив один обязательный год в аспирантуре, мы попросили продолжить и ходили к любимой француженке ещё два года.



Э.И. Раиба

У него каждый раз было что-то новое

Мне всегда приятно вспомнить Черноголовку того времени, когда мы туда переехали, Черноголовку 1966-го года. Это был совсем небольшой кампус, улицы в нем считались по пальцам: Первая, Вторая и Третья, и на каждой из них стояло всего несколько невысоких домов. Нас поселили в одной из трёх только что построенных башен, символе будущего города. Соответственно наличной жилплощади, население тоже было небольшим, от трёх до пяти тысяч человек.

Но я не зря употребил слово кампус, которому не знаю русского эквивалента. Черноголовка была примечательна своим населением: практически все жители работали в разных учреждениях Академии наук. Это создавало общий язык общения, и вновь прибывшие легко вписывались в уже существующую среду, так что сейчас часто трудно вспомнить, кто приехал до, а кто после нас.

Вполне естественно, что наиболее тесные связи устанавливались между людьми с близкими научными интересами, но существовал, и это очень важно, значительно более широкий, межинститутский all-Черноголовский круг. К этому кругу и принадлежали, молодые в сравнении с нами, Женя и Диля Гордон. Отношения были искренними и дружественными.

Эти дружественные отношения переросли в близкие позже, уже после нашего переезда в США. Мы жили в Бостоне, я работал в Гарвардском университете, и впоследствии, в возрасте 88, вышел на пенсию. Гордоны приезжали в США регулярно, раз в год, для участия Жени в научных конференциях по различным направлениям его работы. В программу этих поездок неизменно включались семинарские визиты в разные американские университеты. Не забытой оставалась и семья сына Юлия, работающего в Гарварде. Чтобы повидаться с ним и его семьёй, Гордоны приезжали в Бостон. Вошло в традицию, что во время каждого приезда в Бостон Женя и Диля посещали нас, и мы проводили вместе полдня. У Жени всегда было что-нибудь новое, то ли золотые волосы, купающиеся в жидком гелии, то ли что-нибудь другое не менее экзотическое и интересное. Естественно, разговоры начинались с этих новинок, которые Женя рассказывал с большим воодушевлением, а потом переходили на черноголовские события, научные и житейские. Ведь мы прожили в Черноголовке 25 лет, большой кусок жизни! В нашей памяти Женя остаётся таким, каким мы его видели во время нашей последней встречи, вдохновенно, но уже с некоторым напряжением, рассказывающим результаты последних работ своей лаборатории.

В этом году нас посетили Диля и Толя Рабинкин (тоже из первых черноголовцев), старые связи не рвутся.

Бостон, США.

*В.С. Лехциер***Джон был особенный**

Не могу точно вспомнить, когда я познакомился с Женей Гордоном и когда начал называть его Джоном (почему Джон – позже). Мы учились тогда в 131 школе города Киева в параллельных классах, и хоть мы и были в разных классах, я кое-что знал о его проделках, в частности о его химических опытах во время нехимических уроков. Даже тогда, в младших классах, нельзя было не заметить его. Он был особенный. Всегда!

Мы познакомились поближе в 8-м классе, когда я перешёл в 33-ю школу и оказался в одном классе с двоюродным братом Джона – Мариком Меламедом. Марик был физически не очень развит, и Джону часто приходилось ввязываться в драки, защищая Марика. Один эпизод такого характера положил начало нашей дружбе. Джон пришёл в нашу школу и ждал Марика, когда к нему стал приставать с явным намерением затеять драку мой сосед по квартире, некто Юра Н. – человек агрессивный, физически очень сильный и, к тому же, антисемит. Я вмешался и утихомирил забияку – я ведь сосед и почти свой.

Но настоящая дружба у нас началась летом 1958 года, когда мы поступали в МФТИ. Кстати, я поехал в Долгопрудный, где находится МФТИ, благодаря Джону: моя мама встретила маму Джона, и та рассказала моей маме, что Джон в Долгопрудном, дала всю информацию. Так я и поехал.

Ещё один эпизод, в котором фигурирует Эсфирь Асировна, мама Джона. Летом 1966 г. я приехал к Джону в Черноголовку. Джон познакомил меня с Дилечкой. Я был очарован и очень обрадован, когда узнал, что они вскорости поженятся. Так как я должен был ехать из Черноголовки в Киев, Джон поручил мне подготовить родителей, особенно, Эсфирь Асировну, к новости. Приехав в Киев, я с энтузиазмом принялся выполнять поручение. Пришёл к родителям Джона, стал петь дифирамбы Диле, но не учёл, какое воздействие произведёт новость на Эсфирь Асировну. Она была возбуждена и плохо слышала, что я говорил, всё преломлялось как-то в её мозгу. Я сказал, что девушку зовут Диляра, а Эсфирь Асировна услышала, как потом оказалось, её зовут «деляга». Эту комедию Джону пришлось потом распутывать.

В последующие 50 с лишком лет я слышал от Джона много историй, а Джон был замечательный рассказчик, и историй у него был запас неисчерпаемый. Часть рассказов я помню, но это – не мои истории, да и нет у меня способностей передать весь блеск Джоновых рассказов.

Ещё очень интересно было слушать Джона, когда он говорил о науке. Удивительная чёткость и ясность физической картины, установление связи между, казалось бы, совершенно отдалёнными вещами – вот признаки гениальности (а Джон был, по-моему, гениальным физиком).



Я должен рассказать, почему я назвал Женю Гордона Джоном. Когда мы познакомились чуть поближе, а это было в восьмом классе, меня поразило, насколько Женя был похож на молодого Байрона, да и второе имя Байрона – Гордон. Но тут заковыка: Байрон был Джордж Гордон, а мне не нравилось имя Джордж. Джон звучало симпатичнее, к тому же тогда показывали фильм «Джон из Джинки Джаза». Вот так и пошло – Джон. Это имя как-то очень ему подходило, можно сказать, прилипло к нему.

Филадельфия, США



*В.И. Гомон***Потрясающий подарок от дорогого Жени**

Бывают неожиданные ситуации, которых не ждёшь и даже не представляешь, что они вообще возможны. И вдруг они появляются, да ещё с такими невероятными приключениями, планами и идеями, что не верится.

Так случилось со мной, когда мне неожиданно позвонил наш друг Женья Гордон из Москвы, где он заканчивал свою учёбу, и предложил поехать путешествовать по Крыму: в Абрау-Дюрсо, где я никогда ещё не был, а также в заповедные части прекрасного полуострова. Мне необходимо было приобрести соответствующее снаряжение. Мы с Женей встретились в Новороссийске вовремя, без проблем, с большой радостью и дальше двигались уже вместе.

Погода была замечательная. Мы слегка полюбовались морем, немного поплавали, а затем собрали все свои вещи и направились к месту нашего предполагаемого назначения, о котором Женья, естественно, знал много, но мне пока тайну не открывал. Добирались мы долго, но, когда достигли нашего места, сильного впечатления оно на меня не произвело. Стемнело. Нашей главной задачей было срочно поставить палатку, съесть еду, которую мои родители собрали нам в дорогу, и как следует поспать. Видимо, заметив отсутствие моего восторга, Женья сразу подбодрил меня, сказав, что завтра я всё увижу.

Проснувшись, я увидел совсем рядом замечательное море со спокойной водой. Но самой лучшей новостью оказалась доступность относительно чистой пресной воды на нашей стоянке. Её вполне можно было использовать для приготовления пищи. А местные фрукты, вина и другие вкусности существенно разнообразили наш рацион. Поначалу готовил Женья, поскольку у него, как у истинного студента Физтеха, был большой опыт в этом деле. Но постепенно и я улучшил свои поварские навыки.

После завтрака мы решили потихоньку осмотреться вокруг и обнаружили ещё четыре палатки. Мы тут же познакомились с их обитателями, и получили свободу плавать и бродить, сколько угодно, почти не опасаясь вторжения каких-то недоброжелателей в нашу палатку.

И вот мы отправились в Абрау-Дюрсо. Селение находится в 14 км к западу от Новороссийска и в 5 км к северу от побережья моря. Расположено на берегу горного озера Абрау. В озере вода теплая, чистая, но из-за известняка мутноватая.

Как мы узнали, первый урожай винограда в Абрау-Дюрсо был собран в 1877 г. В 1882 г. был выстроен специальный подвал, оборудованный для производства вина. К 1882 году винодел Э.А. Ведел создал марочные столовые вина «Рислинг» и «Каберне Абрау», а в середине 1890 годов окончательно сложились сорта марочных вин Абрау-Дюрсо: «Сотерн», «Лафит», «Бордо», «Бургундское» и т.д.



После нашей первой разведки Абрау-Дюрсо и купания в море мы вернулись в свой «домик» и попробовали пройтись вверх по склону, чтобы посмотреть, что же там есть. С собой мы взяли бадминтон. Когда Женья рекомендовал мне захватить с собой в дорогу два или, в крайнем случае, хотя бы один комплект для игры в бадминтон, я решил, что Женья просто увлёкся новым видом спорта и теперь вознамерился привлечь и меня. И только когда мы посетили наш «Гималай», я понял, что бадминтон нужен нам не просто для спортивных мероприятий, а ещё и для вечерней тайной добычи разнообразного и очень вкусного винограда, который мы съедали теперь ежедневно, к своему удовольствию. Добывать отменные виноградные гроздья можно было только ночью, так как днём сторожа особенно старательно охраняли виноградник. Но нужно прямо сказать, что нам удавалось успешно выполнить нашу скромную задачу, не привлекая внимания охраны. Так замечательно мы провели первую часть своего отпуска, получили огромное удовольствие и сумели серьёзно подготовиться к следующему шагу.

Дальнейший план после Абрау-Дюрсо был составлен Женьей ещё до нашего приезда. Предполагалось, что мы прибудем в Крым на пароходе или катере, и при этом заплатим только за один билет. Женья сообщил о большом опыте в подобной деятельности многих студентов Физтеха. А нашему другу Олегу Рогозовскому удалось даже практически бесплатно проехать из аэропорта г. Киева в Санкт-Петербург. Мы с Женьей легко использовали этот метод, купив один билет. Один из нас официально прошёл в катер, затем передал другому билет в якобы забытой книге, после чего второй из нас спокойно взошёл на трап¹⁾.

Ночь пришлось провести на палубе. Дождя не было, зато задача была выполнена без проблем и с сохранением материальных средств. Когда нам разрешили сойти с парохода, мы собрали свои доспехи и тихонько двинулись на улицу. Мы собирались позавтракать и отправиться в дальний путь, чтобы найти новое место, разместить вещи, выяснить, где можно найти источник воды, а также успеть набрать эту воду до сумерек. Мы долго шли по узкому берегу босиком и к концу дня успели достичь нашей цели практически в нескольких метрах от моря. Впоследствии выяснилось, что это место охраняли солдаты гарнизона.

Оглянувшись, мы заметили ещё две или три группы, которые, как они нам рассказали, уже несколько дней здесь отдыхали. Военные, проверив документы, оставляли их здесь ночевать и отдыхать. От новых знакомых мы узнали, куда пойти и что посмотреть интересного.

Впечатлений нам хватало! Мы плавали ночью в море по лунной дорожке. Но на меня произвело особенно сильное впечатление, когда однажды мы с

1) Студенты-безбилетники были тогда типичным явлением. На лесосплав на Ангору мы ехали втроём на 2 билета, а мой брат-турист без гроша в кармане летел с Памира в Киев без билета – пришёл прямо на лётное поле, и сердобольные бортпроводницы впустили, да ещё и накормили оборванца (*примеч. ред.*).



Женей возвращались после целого дня прогулок к «себе домой». Нам было необходимо набрать воды, причём не только для скромной вечерней пищи, — рано утром мы ждали гостя, Жениного товарища из Физтеха. Возле источника было многолюдно. Мы оказались последними, и нам пришлось долго ждать. Практически каждый из ожидавших сообщал оставшимся в палатках, когда им прийти, потому что в этот день почти все набирали большое количество воды. Но самое малоприятное заключалось в том, что спускаться к палаткам в темноте было сложно и даже опасно, о чём свидетельствовали некоторые памятники погибшим. В последний момент в очереди остались двое относительно молодых ребят и мы. Мы никого и ничего, кроме воды, не ждали. Но один из ожидавших через какое-то время стал беспокоиться в связи с задержкой своих друзей, которые должны были принести, кроме сумок для воды, ещё и фонари. У нас с Женей было только немного спичек, которыми мы могли, при необходимости, очень коротко осветить лишь часть дороги, чтобы сделать несколько мелких шагов, и, честно говоря, помощь нам бы тоже не помешала. Время шло, но, как ни странно, никто не давал о себе знать. Волнующийся парень начинал терять своё хладнокровие. Он попросил спичек, мы отсыпали ему несколько штук и предупредили, что больше дать не сможем. Казалось, что он немного успокоился, но, используя все спички, он начисто утратил самообладание и начал нас обвинять, что мы не желаем никому помочь, что все из-за нас погибнут. Женя с трудом пытался его успокоить, объяснял ему, что нужно потерпеть, и его друзья скоро будут здесь. Я впервые увидел, как молодой парень неожиданно теряет всё своё мужество. А Женя уже несколько раз встречал подобных людей и знал, как непросто их успокоить. Но я могу точно сказать, что своим относительным спокойствием я обязан только Жене, который сам себя вёл абсолютно спокойно и положительно. Он в тот вечер меня многому научил. Наконец, пришли «пропавшие» с фонариками и помогли всем, в том числе нам, доехать до нашего домика. Наутро мы хотели подойти к этому парню и его друзьям, чтобы их успокоить, но их уже не было на стоянке. Не исключаем, что им стало неловко и поэтому они решились быстро уехать. Дай Бог им всего самого доброго!

Наше замечательное лето уже подходило к концу, и мы раздумывали, каким путём лучше возвращаться домой. Учитывая наши скромные оставшиеся средства, мы помнили, что договорились ещё до начала поездки, что каждый из нас берёт не более 50 рублей. И от этого ни в коем случае не уменьшилось, и даже наоборот, ещё более возросло желание так держать и победить. И мы единогласно решили ехать в Киев на товарняке. Теперь предстояло сдать на почту максимум своих вещей, не забыть документы, приблизительно оценить возможные направления наших поездов и оставшиеся средства.

Когда мы собирали вещи, то обнаружили, что у нас обоих пропали ножи и фонари: видимо, во время наших прогулок кто-то вытащил их из наших палаток. Чуть позже я расскажу, что из этого вышло.



Многочисленный опыт студентов, в том числе физтехов, показывает, что машинисты товарняков очень мягко и доброжелательно относились к молодым путешественникам. Наша с Женей поездка подтвердила их доброту. Когда мы подходили к ним и спрашивали, куда едет поезд, они чётко и правдиво отвечали. Однажды мы заскочили в товарняк, считая, что он должен вот-вот тронуться. Неожиданно к нам зашёл машинист. «Куда едете?» – спросил он. Мы честно сообщили, что едем в Киев, Машинист улыбнулся и сказал, чтобы мы быстро пересели, поскольку этот поезд едет в другом направлении и возвратится обратно не ранее чем через два дня. Мы, конечно, были ему очень благодарны. Можно себе представить, как наши родители минимум два дня пытались бы нас разыскивать!

По дороге от Крыма до Киева мы с Женей сменили семь товарных вагонов и один пассажирский поезд. Сначала всё шло прекрасно. Первая поездка закончилась в Мелитополе, где мы с большим удовольствием съели огромный и чрезвычайно вкусный арбуз. Мы были уверены, что этого арбуза нам должно хватить на долгое время. Мы даже рассчитывали, что сможем недалеко от Киева ещё разок перекусить и спокойно доехать домой. Но получилось несколько иначе. Дело в том, что было уже очень темно, а нам приходилось искать себе место в трясущемся и неустойчивом товарняке. В темноте мы теряли друг друга из виду и не могли сразу найтись, а попросить помочь было некого. Один раз мне пришлось передвигаться по наружному краю уже набравшего скорость поезда, чтобы пробраться к Жене, который лежал и слегка посапывал на тормозной площадке. Сначала я на него разозлился, но быстро остыл. Разбудил Женю, и мы радостно обнялись. Оказывается, Женя тоже пытался меня найти, но в этот раз у него не получилось. Мы задремали вместе, рассчитывая, что скоро пересядем на другой поезд и доедем непосредственно до Киева. Когда начало всходить Солнце и мы посмотрели на себя, то поняли, что первое, что мы должны сделать, чтобы не испугать местных жителей – это хоть немного умыться. А затем неплохо было бы немного поесть и попытаться купить билеты до Киева. Мы даже не могли представить, что с нами произойдёт история, о которой стоит коротко рассказать.

Когда стал работать буфет, и мы принялись за свой скромный завтрак, продавщица спросила: «Откуда это вы едете, а?» – «С курорта, тётенька» – ответили мы ей. «А, – сказала она, – это так у вас называется? Это из тюрьмы, да? Ой бедные вы, бедные, за что это вас?» Мы с Женей больше ничего не ответили, и она ушла. Мы поели, оделись и пошли покупать билеты. Но как только мы вышли из буфета, к нам обратились трое людей, похожих на солдат. «Сдать оружие, вещи и пройдёте с нами в милицию!» Делать нечего, пришлось подчиниться. Мы так и не выяснили, находясь в участке, кто нас подставил. Может продавщица, а может кто-то другой. Вот тут-то мы и поблагодарили воров, которые украли у нас ножи и фонари в Крыму! Сотрудники милиции в течение нескольких часов пытались выяснить, кто мы такие,



где учимся или работаем, куда едем, зачем, кто наши родители, и т.д. Здесь Женя продемонстрировал свои замечательные умения в области общения с милицией. Что касается меня, то я вёл себя с ними достаточно скромно, особенно, когда появился начальник. А Женя во многих случаях часто ставил своими познаниями их на место, и это меня подбадривало.

Здесь было бы справедливо рассказать, хотя бы коротко, об одном нашем спасителе. Речь идёт о Женином отце – Борисе Ефимовиче Гордоне. Все Женины друзья были хорошо с ним знакомы. Он, как и Женина мама, Эсфирь Асировна Меламед, всегда интересовался нашими делами, нашими проблемами и радовался нашим успехам. Борис Ефимович был известным химиком и работал в Киевском институте судебной экспертизы. Я уверен, что Женя не собирался звонить ему и сообщать о нашей ситуации, поскольку это был не его принцип. Но милиционеры сами попытались проверить нас и позвонили нашим родителям. Вот так Борис Ефимович получил о нас сведения. Впоследствии мы узнали, что группа «наших милиционеров», оказывается, участвовала в очень важном мероприятии по поимке бандитов, сбежавших из какой-то тюрьмы. В это время, по нашим данным, примерно через полчаса, должен был появиться поезд, который ехал в Киев, и Женя сообщил начальнику милиции, что он идёт покупать билеты. «Вы не имеете права нам не разрешить!» Кто-то из милиции пробовал протестовать, тогда я сказал, что остаюсь в милиции, пока Женя не вернётся, и они больше не возражали. Женя уже собирался выйти, как вдруг прозвенел звонок, но мы не знали, кто звонит. Купив билеты, Женя сумел связаться со своим отцом и узнал, что тот уже разговаривал с шефом, и что у нас всё в порядке¹⁾. С билетами в руках мы попрощались с милиционерами, и никто уже нам не возражал. Когда стал подъезжать киевский поезд и мы направились в вагон, неожиданно появился начальник милиции, пожелал нам удачи и как-то снисходительно спросил, нет ли у нас проблем. Тут как раз поезд тронулся. Мы небрежно попрощались с шефом (не самыми ласковыми словами) и спокойно поехали домой. Конечно, мы были очень признательны Жениному отцу – Борису Ефимовичу. Но самое главное, – мы с Женей получили большое удовольствие от такой замечательной поездки с множеством разных приключений, которые трудно себе представить.

Я благодарен моему дорогому другу Жене за то, что он подарил мне такой потрясающий незабываемый подарок. Мы часто с ним вдвоём и с нашими друзьями вспоминали эту удивительную поездку, когда собирались вместе.

Так обидно, жалко и несправедливо, что ты, дорогой Женя, рано от нас ушёл. Вечная тебе ПАМЯТЬ!!!

1) Отец рассказал об этом разговоре. Борис Ефимович? – Да. – У Вас есть сын Евгений Борисович Гордон? – Да. – А где он сейчас? – Где-то на юге путешествует. А что такое? – Здесь на станции такой-то обнаружено двое бродяг. Один из них называет себя Вашим сыном. – А документы у него есть? – Да. – Ну, значит, это он (*примеч. составителя*).



А.А. Карнаух, Г.Е. Карнаух

Наш друг

Вспоминаю, что в первый же год моего пребывания в Черногоровке (вместе с группой практикантов 3-го курса Одесского государственного университета с кафедры горения), на одном из семинаров Л.Н. Стесика я услышала разговор о Гордоне, ещё не зная его ни по имени, ни «в лицо». Но этот разговор был настолько уважительным и восхищённым, как будто речь шла об уже маститом учёном, окружённом соратниками и учениками. Это как-то не вязалось с тем, что Женя и его товарищи трудились тогда всего лишь над своими дипломными работами! Но лет 5 спустя, после знакомства с Гришей в той же Черногоровке, многое прояснилось из его рассказов об их общем с Женей курсе на Физтехе. Например, то, что в Черногоровку попали трое из группы наиболее сильных студентов курса – Женя Гордон, Женя Макаров и Гриша Карнаух. Тогда я поняла, что памятный мне «портрет» Жени, возникший под влиянием «народной молвы», имел фундаментальные основания, подтвердившиеся уже широко известными блестящими итогами начального периода Жениной работы. Многие ревниво мотивировали это просто везением. Как выяснилось совсем недавно, Женя запечатлевал «ревнивцев» в очень симпатичных шаржах. Но что в их пересудах было правдой?

Да, на «исходные позиции» Жени повлияли настоящие личные удачи. Был образец принципов жизни отца-профессора¹⁾, вернувшегося с войны, была учёба на Физтехе у замечательных учителей и был факт, что во времена, когда филиалом Института химической физики АН СССР руководил Ф.И. Дубовицкий, он так благоволил Жене. Но (заодно) для всех (!!) в нём возникла неповторимая атмосфера заинтересованности в развитии пионерских идей химической физики, созревших в недрах школы Н.Н. Семёнова, потребовавшей создания уникальных теоретических и экспериментальных методов исследования. Тогда Филиал и новые физические институты в Черногоровке только расширяли материальную базу – для экспериментов, математического обеспечения теоретических исследований и расчётов, и для привлечения молодых!

Пожалуй, никогда больше не было такого незыблемого ощущения правильно созданной иерархии отношений в академических институтах, наверху которой – работа научных групп, а дирекция и созданные Директором службы обеспечения – в основании.

1) Восхищение личностью ярко проявляется в легендах. Отец Е.Б. был учёным без профессорского звания. И далее, проект дома был взят готовый. Е.Б. активно принимал участие в дизайне и помогал мастеру-золотые руки воплощать это в жизнь. Например, научил его, как сделать арку сопряжением дуг окружностей разных радиусов (примеч. составителя).



В этой чудесной обстановке (более 50 лет назад) Е.Б. Гордон нашёл, по собственному признанию, самое главное своё преимущество, остававшееся с ним до последнего дня его жизни. Это – счастье его семейной жизни с Дилей Гареевой (Гордон), одной из самых замечательных женщин Черноголовки. Красавица и поэт в душе, сама не чуждая писательству, любящая и заботливая жена, мать и бабушка, – она не пропустит новой книжки, выставки, или, как в огонь и воду, бросится спасать или душевно подбадривать заболевшую, или упавшую духом подругу. Е.Б. заметно гордился Дилей – великолепной хозяйкой большого дома, построенного для их растущей семьи. Помнится, что он сам собрал средства для его строительства, поработав с японскими коллегами по их приглашению. Сделал архитектурный проект и планировку помещений, продумал размещение систем отопления, водопровода и прочих коммуникаций. Дом вышел действительно на славу, и Е.Б. по этому поводу не только не стеснялся комплиментов в свой адрес, но искренне радовался им. А доброта, чуткость и искренность Дили на многие годы сделали этот дом настоящим магнитом для друзей, которым «несть числа» в Москве, Черноголовке и в постоянно расширявшейся географии контактов Евгения Борисовича с коллегами-учёными во всём мире.

Конечно, Е.Б. уже тогда приобрёл значительную научную квалификацию и авторитет, но можно было видеть, насколько самостоятельно, вне зависимости от перипетий карьерного роста, он выстраивал свою «линию жизни», где успех в жизни и работе достигался не «правильными» политическими ходами, как водится, а своими руками, талантом и трудом. Особой чертой Е.Б. было редкое в последние времена чувство ответственности за начатое дело – перед семьёй, своими микро- и макро- коллективами, участниками получаемых им грантов и мегагрантов, оргкомитетами конференций, организуемых им или проводимых под его председательством, перед Советом ВАК, экспертом которого он был, и, наконец, перед Наукой в целом! Даже смотрящему на эту работу несколько издалека она представляется как невероятно трудоёмкая и добросовестная! При этом нельзя забывать, что она была реализована в условиях сильных изменений отношений в науке, где реальное снижение значимости сотрудников среднего звена (и их заинтересованности в работе!) автоматически взваливает всю нагрузку с номинальных исполнителей на руководителя!

К чести Е.Б. как руководителя следует отметить ещё одно его редкое качество, пригодившееся в этих условиях – он никогда не роптал перед лицом подобных «реформ» и не тратил драгоценное время на борьбу с ними! Он знал, что всегда сумеет «зажечь» своих сотрудников и даже привлечь новых, но проект будет выполнен! Научная деятельность Е.Б. последнего десятилетия его жизни подтвердила правильность принятой им стратегии и была чрезвычайно плодотворной. Особенно успешной была работа над созданием основ технологии получения нанопроволок металлов, в частности, золота. Она



получила мировое признание со стороны сообщества физиков – как экспериментаторов, так и теоретиков. Все это определённо показывало, что академическая наука России в лице Евгения Борисовича Гордона имеет крупного учёного – организатора высокой пробы. Его усилия в качестве члена Российской Академии Наук могли бы внести реальный вклад в выход многострадальной реформы науки из перманентной пробуксовки!

Евгений Борисович Гордон всю свою без преувеличения героическую жизнь был очень большим человеком в Науке. Он просто не успел стать избранным в Академию! Теперь, с его уходом, мы с горечью понимаем, что заменить его некем – ни как деятеля Науки, ни как нашего дорогого друга!

Черноголовка



О.В. Копелевич, И.Д. Михайлов

Большое путешествие. Каким мы помним Женю

Почему нам хотелось написать воспоминания о Жене? Ответ на этот вопрос прост и понятен: хотелось заново пережить все прекрасные моменты нашей молодости и последующих лет, когда мы радовались общению друг с другом и не думали о том, что это может когда-нибудь закончиться. Эту идею чётко сформулировал главный герой книги Курта Воннегута «Бойня номер пять, или Крестовый поход детей» Билл Пилигрим, который оказался на фантастической планете Тральфамадор: «Самое важное, что я узнал на Тральфамадоре, – это то, что, когда человек умирает, нам это только кажется. Он всё ещё жив в прошлом, так что очень глупо плакать на его похоронах. Все моменты прошлого, настоящего и будущего всегда существовали и всегда будут существовать. Тральфамадорцы (жители планеты) умеют видеть разные моменты совершенно так же, как мы можем видеть всю цепь Скалистых гор. Они видят, насколько все эти моменты постоянны, и могут рассматривать тот момент, который их сейчас интересует. Только у нас, на Земле, существует иллюзия, что моменты идут один за другим, как бусы на нитке, и что, если мгновение прошло, оно прошло бесповоротно». Идея хороша, нам хотелось её осуществить и «прокрутить назад» наши воспоминания, останавливаясь на наиболее запомнившихся из них.

Нас многое связывало с Женей – были периоды, когда мы достаточно долго вообще не расставались друг с другом. Главный из этих периодов – наше «Большое путешествие» по маршруту Москва – Уральск – Чапаево – Гурьев – Астрахань – Дербент – Баку – Тбилиси – Киев – Харьков – Москва. Оно, конечно, заслуживает отдельного описания, а начнём мы с начала сентября 1963 г., когда мы, студенты уже 5-го курса, встретились на Физтехе после летних каникул.

Поездка за грибами (сентябрь 1963 г.)

Честно признаться, выбор этого момента в значительной степени обусловлен тем, что сохранилась прекрасная фотография, а это немаловажный фактор, так как в те времена о цифровых фотографиях и их электронном хранении никто даже и не мечтал. Обычные фотографии делались самими участниками событий, а за несколько десятков прошедших лет их качество существенно ухудшилось. Итак, фото 1.

К тому времени у нас сложилась традиция в начале сентября отмечать сразу четыре достойных события: встречу после летних каникул и три Дня рождения – 5-го Вовы Перминова, 8-го Жени и Игоря Гарзанова. Встал обычный вопрос о финансировании мероприятия. Был грибной сезон, и кто-то





Фото 1. Итоги нашего похода за грибами. Слева направо: Олег Копелевич, Женя, Саша Антонович, Илья Михайлов, (под кепкой) Юра Скурлатов, Валерий Кривнов.

вдруг предложил, а не отправиться ли нам за грибами, их и замариновать можно, и поджарить. Идея понравилась, и буквально через день мы отправились с ночёвкой в Вельяминово, известное грибное место по Павелецкому направлению. Очень душевная и плодотворная получилась поездка; ночевали в стогу, а с рассветом отправились собирать грибы. Когда их много, сбор грибов – одно удовольствие, их в большом количестве находят даже новички. Результат читатель видит на фото, причём в корзинах одни белые, подосиновики и подберёзовики. Уверен, Женин вклад был одним из самых весомых; мы потом не раз вместе ездили за грибами, Женя всегда их хорошо искал и, конечно, стремился быть первым и в грибном промысле.

На привале возник вопрос, а что же мы будем делать с таким количеством грибов? Кто-то предложил плодотворную идею – продадим избыточную часть! Тогда ещё совсем недалеко от вокзала функционировал Павелецкий рынок, там мы и устроили «демпинговую» распродажу. Как помнится, вся операция заняла не больше часа; денег выручили столько, что хватило и на выпивку, и на всякую другую закуску. Не помню, кто готовил, но всё было очень вкусно, праздник удался на славу.

Летний военный лагерь (июнь 1964 г.)

Летом 1964 г. мы должны были завершить нашу подготовку на военной кафедре МФТИ практикой в летнем военном лагере. Физтех тогда ещё не имел собственного лагеря, нас разместили в студенческом военном лагере Московского авиационного института (МАИ) в Яропольце. Это историческое место, которое впервые упоминается ещё в 1135 г. как укреплённый



пункт в Волок-Ламских землях великого князя Киевского Ярополка II Владимировича (1082–1139), сына великого князя Киевского Владимира Мономаха. Здесь, на крутом берегу реки Ламы, Ярополк обустроил укрепленный лагерь, контролирующий важнейший речной путь того времени из Новгородских земель в Московские и Рязанские, который являлся частью периферийных водных путей великого торгового пути из Балтийского моря в Чёрное и Средиземное – «из варяг в греки». Кроме нас в лагере разместились студенты ещё двух институтов – Казанского авиационного института (КАИ) и Днепровского государственного университета (ДГУ). Мы с ними мало общались, но помнится, по крайней мере, один товарищеский футбольный матч провели.

Наше «воинское подразделение» называлось «батарея», численность составляла несколько десятков человек, командовал батареей преподаватель с нашей военной кафедры. Нас разместили в одной большой палатке, двухъярусные койки, вполне удобные; раздали военную форму, кирзовые сапоги с портянками.

От Учебного центра нами командовал старшина, под его руководством мы обучались армейской жизни – маршировать, поворачиваться по команде, носить винтовки, приставлять их к ноге, вскидывать на плечо и т. п. Подавляющее большинство приехавших физтехов ранее не сталкивались с военной службой, поэтому с неким любопытством, хотя и без всякого удовольствия, воспринимали «прелести» армейской жизни, но были среди нас отслужившие срочную службу, они относились к делу вполне серьёзно. Один из них, наш сокурсник, командовал нашим взводом; в отличие от вышестоящего на-



Фото 2. Будущие офицеры, не планирующие продолжения военной карьеры. Слева направо: Женя, Илья Михайлов, Валентин Александров, Олег Копелевич.



чальства, он жил в палатке вместе с нами и всерьёз пытался приучить нас к армейской дисциплине. Конфликты обычно возникали во время отбоя и сразу после. Мятажный дух физтехов проявлял себя прощанием с закончившимся днём дружным скандированием: «Такому-то дню пребывания в лагере Еец! Еец! Еец!» (по смыслу «конец», но более выразительное слово). Несмотря на предупреждения и угрозы начальства, скандирование продолжалось, начальство негодовало. Наш командир взвода пытался призвать нас к порядку, выводил из палатки на построение, раздавал наряды вне очереди. Как начальника его не воспринимали всерьёз (хотя наряды выполняли); можно было услышать такую реакцию: «да пошёл ты..., я с тобой разговаривать больше не буду». Но надо сказать, что наш командир взвода был приличным человеком, и все конфликты оставались внутри, наверх не доносились. Женя, кстати, всегда пытался «гасить» эти конфликты.

А ещё Женя адаптировал для нас известную песню «Шла с учений третья рота» (из кинофильма «Солдат Иван Бровкин»). Начало он изменил лишь слегка, но в конце дописал «жизнеутверждающий» куплет:

В час ночной в своих постелях
Пусть девчата крепко спят, да, крепко спят!
Остроносые изделия в небо серое глядят,
Да, в небо серое глядят!

«Изделием» называлась большая крылатая ракета, устройство которой и работу на ней мы должны были освоить за нашу учебную практику. Конечно, это была не боевая, а учебная ракета, да ещё сильно устаревшая. Запомнилась такая забавная деталь: во время проверок и настроек один из студентов находился в самом низу и каждые несколько минут должен был сообщать «Изделие вертикально! Изделие вертикально!». А Женина песня стала у нас основной строевой песней (была ещё и другая, но совсем неприличная, не для публичного исполнения).



Фото 3. Женя вручает шуточную награду Олегу (какую и за что, теперь уже не вспомнить). Слева – Владимир Перминов



Наше большое путешествие

Маршрут нашего Большого путешествия был представлен выше. Как он возник? Было несколько «опорных» точек, где нам хотелось побывать, и две из них находились на побережье Каспийского моря. Это Дербент, где у Ильи Михайлова жила бабушка и ещё полгорода родственников; Илья гарантировал нам радушный приём. Второй город – Баку, в пригороде которого тогда жил наш однокашник Игорь Гарзанов; он настойчиво приглашал нас навеситить его.

К путешествию готовились, обзавелись картами, прикинули возможный транспорт, оценили финансовые расходы (надо было уложиться в две наши летние стипендии). Выезд из Москвы был назначен ночным поездом Москва – Уральск; в Уральске мы планировали купить лодку и спуститься на ней по реке Урал до Чапаево (бывший Лбищенск, где погиб Чапаев), там продать лодку и «на перекладных» добраться до Гурьева (где нам «пообещали» чёрную икру по 3 руб. за килограмм), затем из Гурьева на пароходе в Астрахань, а из Астрахани поездом в Дербент. Идея передвижения на поездах и пароходе заключалась в том, что берём один билет на троих¹⁾, «обилеченным» был назначен Илья, он должен был везти наши 3 рюкзака.

Отдельно готовились к рыбной ловле, ведь до этого никто из нас рыбаком не был. Почитали литературу, посоветовались с опытными людьми и закупили всевозможные рыбные снасти, некоторым из них потом дивились местные рыбаки (например, «мормышке», рассматривали с удивлением – «ишь ты, мурмышка»).

Сейчас, оглядываясь назад, я с удивлением думаю: а ведь нам практически всё задуманное удалось осуществить – и на первом этапе, и на последующих. Но обо всем по порядку.

Уральск – Чапаево

Переезд Москва-Уральск прошёл без всяких осложнений – Илья вёз три рюкзака, Олег с Женей благополучно проспали на третьих полках. Поезд прибыл в Уральск ранним утром, ещё только начало светать. Вспоминаются первые два четверостишия из военного стихотворения Бориса Слуцкого:

Утро брезжит, а дождик брызжет,
Я лежу на вокзале в углу,
Я ещё молодой и рыжий,
Мне легко на твёрдом полу. Ещё волосы не поседали
И товарищей милых ряды
Не стеснились, не поредели
От победы и от беды.

1) См. ссылку 1 к статье В. Гомона.



Всё было именно так, только, слава Богу, время было мирное, да и никто из нас не был рыжим – все тогда были черноволосые.

У местных ожидающих на вокзале выяснили, где можно купить лодку, и когда настало рабочее время, отправились в посёлок, где находился судоремонтный завод. Местные жители сразу направили нас по нужному адресу (хозяину сын привёз новый лодочный мотор, который хозяин ставит на новую лодку, а старую продаёт). К сожалению, мы не можем в наших воспоминаниях останавливаться на деталях, даже очень интересных, наше повествование заняло бы тогда непропорционально много места. Если коротко, нас встретила совершенно замечательная семья, потрясаяще гостеприимные люди, которых мы потом с благодарностью вспоминали всё наше путешествие, и у нас даже появилась фраза: «такие люди живут только в глубине России». Лодка нам сразу понравилась: большая плоскодонка, очень остойчивая; мы с нашими тремя рюкзаками свободно на ней разместились. Продали её нам очень дёшево (мы переживали по этому поводу, ведь денег у нас было немного, и в наших финансовых планах предельная цена за лодку была 300 р.); с нас взяли 100 р., а запросили ещё дешевле, так что мы дружно воскликнули «а что так мало!». Относительно рыбной ловли, хозяева нас успокоили: «Ребята, как бы вы не ловили, на что вы бы не ловили, но без рыбы не останетесь». Так потом и оказалось. Нас провожала в путь вся семья; уже стемнело, мы их уже не видели, но по ночному Уралу раздавалось с берега «Счастливо!!!», а с лодки в ответ «Спасибо!!!».

Ночевали на острове посреди реки, между Европой и Азией; ведь здесь по Уралу как раз проходит граница – местные жители называют правый берег «уральским», а левый – «бухарским». На следующее утро двинулись в путь – это был сплошной кайф. Женя и Олег гребли поочередно, Илья был штурманом; по течению лодка двигалась быстро. Погода стояла жаркая, но «освежиться» было очень легко – бултых в воду, и на какое-то время проблема решена. К концу дня выбирали подходящее место и останавливались для рыбалки и ночёвки, так чтобы застать вечерний клёв. Слова наших гостеприимных хозяев полностью оправдались; проблема была только с червяками, но рыба клевала даже на «объединенного» червяка, по второму и даже третьему разу, почти на голый крючок. Ставили также и донки, удавалось поймать и судака, и сома. Каждый вечер готовили «тройную» уху (т.е. вначале мелкую рыбёшку для навара, её потом выкидывали, затем среднюю, и наконец, крупную). Все было очень вкусно. Единственное, что отравляло жизнь, – комары, их было несметное количество, и они были непобедимы. Но это была плата за кайф. В Чапаево лодку продали – за ту же сумму, хотя могли бы и дороже (здесь лодки были в дефиците), но что-то не позволило нам превысить цену наших гостеприимных хозяев в Уральске.



Чапаево – Гурьев

Дальше передвигались на попутках. Хотя денег с нас не брали, но найти попутку было непросто (фото 4). Местные водители были чрезвычайно любознательны: разговор обычно начинался с расспросов, кто такие, куда едете и т.д., но часто заканчивался сообщением водителя «нет, машина сегодня никуда не поедет».

В степи нас донимали днём слепни, а вечером и ночью комары; у нас даже возник риторический вопрос, а чем все они питались, когда нас не было. Но обычно к ночи нам всё-таки удавалось добраться до какого-то ночлега – не помнится, чтобы мы хоть раз ночевали в степи.



Фото 4. В казахстанской степи, между Чапаево и Гурьево. В ожидании «попутки».

Гурьев – Астрахань

В Гурьеве первым делом отправились на базар за чёрной икрой. Относительно цены, все оказалось правдой, только 3 р. за кг – это цена в разгар сезона, а к нашему приезду сезон уже закончился, и цена выросла до 5 р. Покупка была обставлена очень таинственно: Олег присмотрел на базаре восточного человека, подошёл к нему и спросил про икру. Тот оглядел нас проницательным взглядом спросил: «Сколько вам надо?» 1 кг – ответил Олег. Восточный человек повёл нас с базара через несколько дворов в какой-то двор, где и осуществилась сделка. Причину низкой цены мы поняли, когда обнаружили на берегу выпотрошенного браконьерами осётра (см. фото 5). Осетров в те времена в Урале было много, поэтому браконьеры мясо (осетрину!) не брали, а забирали только икру. Так было и удобнее, и безопаснее.



После базара отправились в порт, чтобы выяснить относительно парохода до Астрахани, Схема нашего проезда была та же – купили один билет для Ильи с рюкзаками, а Олег с Женей, выждав удобный момент, прошли на пароход налегке. Все осуществилось без проблем (фото 6).

После покупки билета денег у нас осталось совсем немного, но зато была банка чёрной икры. Посоветовавшись, как получить максимальное удовольствие, решили на эти деньги купить пива, а хлеб взять в судовом ресторане. Так и сделали. Пришли в ресторан, чинно сели за столик, заказали 6 бутылок пива, а когда нам их принесли, на глазах у удивлённой публики, достали из-под стола свою походную канистру и стали сливать в неё пиво



Фото 5. Река Урал.
Женя с выпотрошенным осетром.



Фото 6. Уральский этап завершен!
На пароходе Гурьев – Астрахань, без денег, но с чёрной икрой.



(чтобы не платить за бутылки). Можете представить себе, какое удовольствие мы получили, когда расположились на палубе в укромном месте и вкушали бутерброды с чёрной икрой и запивали их свежим пивом. Икра была великолепная и по вкусу никак не уступала той, что тогда продавали в московских магазинах примерно в 20 раз дороже.

Астрахань – Дербент

В Астрахани первым делом отправились за переводом, к счастью, он нас ожидал. Потом на вокзал. Подходящий поезд был Астрахань-Махачкала, к нему прицепляли 1–2 вагона до Дербента. Взяли Илье билет до Дербента, а Женя и Олег как уже опытные безбилетники приготовились к возможным перемещениям внутри поезда. Проводник вагона безбилетников не высаживает, он их просто выгоняет из своего вагона. Высаживают и штрафуют контролёры, а так как на этом маршруте много безбилетников, то и контролёров тоже было много. Всё началось хорошо, мы даже посидели рядом с Ильёй. Но вдруг через наш вагон стали пробегать безбилетники, спасающиеся от ревизоров. Мы с Женей решили спастись от контролёров на крыше, успели вылезти, но к несчастью, поезд уже приближался к станции, где находиться на крыше было нельзя. Стали спускаться с крыши назад в вагон и попали прямо в руки контролёров. Они понимали, что с бедных студентов никаких штрафов не получить, поэтому просто нас высадили на пустынной и безлюдной станции Улан Хол. Посмотрели расписание – следующий поезд через сутки. Присели задумчивые на лавочку, и буквально сразу к нам подходит вооружённый охранник («вохранец»), говорит «Пройдёмте». Приводит к себе в конторку, требует предъявить документы. Предъявляем, смотрит, потом вдруг начинает звонить в районный центр Кизляр. С интересом и удивлением слушаем разговор: «Вот задержал двоих». Его, видимо, спрашивают: «А документы у них есть?». Ответ его нас впечатлил: «Документы есть, но у них ноги такие грязные». Посмотрели на свои ноги – действительно, грязные, и даже очень грязные. Трубку вохранец повесил явно расстроенным; как мы поняли, его обругали и велели нас отпустить. Напутствовал он нас словами: «Только смотрите, не украдите здесь что-нибудь». На наше возмущение, логично ответил: «А что, денег у вас нет, день не поел, два не поел, а на третий украл кошелек у какой-нибудь старушки».

Мы, озадаченные, нашли укромное место и сели размышлять, что же нам делать. Но не проходит и часа появляется «наш вохранец»: видимо, наше присутствие на вверенной ему территории его очень беспокоило. «Ребята, – говорит он нам, – через полчаса отправляется товарняк до Гудермеса, а от него до Махачкалы вам уже совсем недалеко». Мы радостно его поблагодарили и поспешили к товарняку.

На товарном поезде удобное место для поездки – тормозная площадка; на свежем воздухе, и, как правило, никто не беспокоит (хотя на станциях надо



слезать). Без приключений доехали до Гудермеса, а там нам повезло – нас уже «ждал» товарняк до Махачкалы. А в Махачкале приятная неожиданность – мы догнали «дербентский» вагон, в котором ехал наш друг Илья и очень переживал расставание с нами. Пассажиры встретили нас как родных, а проводница – с явными угрызениями совести. Оказывается, это она нас предала контролёрам, и пассажиры её застыдили, что она так нехорошо поступила с бедными студентами. Она не только приняла нас в своём вагоне, но даже спрятала в своём купе от очередных контролёров.

Дербент – Баку

В Дербенте мы остановились у бабушки Ильи. Маленькая худенькая старушка, она отнеслась к нам с такой теплотой и заботой, как будто мы все трое были её внуками. Мы помылись (и ноги стали чистыми), бабушка нас накормила, уложила спать. После долгого перерыва мы спали в цивилизованных условиях! На следующее утро отправились с бабушкой на базар, по-русски она не говорила, но зато на всех восточных языках говорила свободно – подходила к продавцам разной национальности и с каждым из них начинала говорить на его родном языке. Бабушка готовила для нас вкусные кавказские блюда и очень огорчалась, когда мы всё не съедали. Показательно, что до сих пор помнятся два слова, которые наиболее часто мы говорили бабушке: «хос-баши» – спасибо и «веси» – достаточно, хватит.

Из Дербента отправились в Баку, где остановились у Игоря Гарзанова. Он жил в посёлке им. Степана Разина, примерно в 10 км от города. Родители Игоря нас приняли очень гостеприимно, они явно были рады друзьям сына. Игорь познакомил нас со своими друзьями, ходили купаться на берег Каспийского моря – первое купание для каждого из нас в этом море. Пробыли у Игоря два дня и двинулись дальше, время нас уже поджимало.

Завершение Большого путешествия

Самое интересное было уже позади, главные из поставленных целей были достигнуты. Впереди Тбилиси и возвращение домой. Нам, конечно, ещё очень хотелось посетить Ереван, но там железная дорога идёт близко от границы, и без билета проехать вряд ли получилось бы.

До Тбилиси добрались благополучно, хотя и с уже обыденными поездными приключениями. Пробыли в Тбилиси два дня, ночевали в небольшом парке. Посмотрели город, успели почувствовать его колорит. И в путь – Женя в Киев, Илья и Олег в Москву.



*В.А. Никитина***Как муравьи друг с другом общаются**

Мы познакомились с дядей Женей ровно 39 лет назад, летом 1981 г. Это произошло в походе на Бузане. Наверно, нас представили друг другу, мы пожали руки и начали дружить, только я этого не помню, так как мне тогда был всего один годик. Я младшая дочка семейства Никитиных, тех самых, с которыми семья Гордонов ходила в походы и сохранила дружбу на протяжении всей жизни.

Благодаря родителям мне посчастливилось познакомиться и подружиться с такими замечательными людьми, как дядя Женя и тётя Диля. Для меня они всегда были примером семейного счастья: заботливый и любящий дядя Женя и понимающая, готовая поддержать в любой ситуации тётя Диля. И слова дяди Жени, что тётя Диля – его главное достижение в жизни, это не просто слова, а факт. Так оно и было. И счастливые глаза тёти Дили всегда были этому подтверждением.

Пожалуй, первым моим сознательным воспоминанием о семье Гордонов является поход на байдарках по реке Белая в Башкирии. Мне тогда было 9 лет. Из детей были я и Юлик. Мне вспоминается такая история (наверно, это симбиоз моих личных воспоминаний с тем, что мне рассказывали очевидцы, так что не ручаюсь за абсолютную точность воспроизведения). Мы делали остановки в деревнях, чтобы пополнить запасы провизии. Один раз мы разбили лагерь рядом с одной из деревень, в которой не было магазина (я очень отчётливо помню это место стоянки), и наши папы (Толя и Женя) пошли раздобывать еду. Ходили, ходили, а вернулись с пустыми руками. Тогда тётя Диля взяла дело в свои руки. Мы с ней пошли в эту деревню, она стала разговаривать с местными жителями на башкирском языке, они оказались такими дружелюбными и доброжелательными, дали нам много вкусной еды (мне кажется, даже бесплатно). Я помню, что тогда я восхитилась тётей Дилей (и с тех пор не перестаю восхищаться), как ловко она все это провернула. Меня тётя Диля обучила слову «Исанмесыс», которое я говорила всем местным жителям при встрече, чему они очень радовались. Слово это помню до сих пор. К сожалению, про дядю Женю из того похода таких ярких воспоминаний у меня в памяти не сохранилось, видимо, тётя Диля затмила всё!

После этого мы много встречались семьями; то мы к ним в гости ездили, то они к нам приезжали, мы часто пересекались в Лоо. Мне очень нравилось быть в обществе этой чудесной пары, поэтому я всегда старалась приехать в Лоо тогда, когда они туда заезжали после конференции в Туапсе. Благодаря этим довольно частым и наполненным взаимной радостью встречам и сложилась наша дружба с дядей Женей и тётей Дилей.



Когда я думаю о дяде Жене, мне всегда вспоминается тот момент, когда он с хитрым прищуром начинает рассказывать какую-нибудь, на первый взгляд, самую обыкновенную историю, но ты точно знаешь, что в конце будет неожиданная (и, как правило, забавная) развязка или интересный факт. Очень «вкусно» умел дядя Женья рассказывать! Он мог начать фразой «А ты знаешь, как муравьи друг с другом общаются?», остановиться и многозначительно на тебя посмотреть, что становилось абсолютно ясно, что даже если ты что-то и смыслишь в общении муравьёв между собой, какой-то факт от тебя точно ускользнул, и сейчас эта тайна будет открыта. Про муравьёв история была такой. Они незаконно поселились в сауне, построенной дядей Женьей в доме, так что он имел все основания не желать там их процветания. И он решил с ними «поговорить», попросить, так сказать, по-хорошему, покинуть территорию. Насколько я помню, на эти разговоры ушло довольно много времени, он брал одного муравьишку, давал ему понять, что ходить в сауну не нужно, отпускал его, чтобы он донёс полученную информацию до сородичей, повторял более понятно, если тот с первого раза не понимал. И, о чудо! Муравьи ушли, предполагаю даже, что вежливо попрощавшись со своим новым знакомым.

Дядя Женья был очень энергичным человеком: его внутреннего запала и интереса к жизни определённо хватило бы минимум лет на двести, подвело только здоровье. Очень горько расставаться с таким человеком, который так много давал миру и так любил жизнь. Я часто вспоминаю, как они танцевали с тётёй Дилей 4 ноября 2018 года на бриллиантовой свадьбе моих родителей. Это был последний раз, когда я видела дядю Женю живым. Но я чувствую, что он по-прежнему где-то рядом со мной, улыбающийся и готовый открыть очередную тайну.



Л.А. Тугушева

Очень цельный человек

Когда вспоминают, говорят о случаях, высказываниях, каких-то моментах встреч. Джон – очень цельный человек. Невозможно отделить его слова или действия от того образа, который у меня в памяти. Скорее, это чувства, ощущения. Это всегда было чувство радости, полноты общения, взаимопонимания, надёжности. И ещё – неотделимости от тебя. Во всех его рассказах ты была всегда. Перед глазами его взгляд с хитринкой, готовность к шутке, игре, розыгрышу. Было всегда ощущение, что он может решить любую задачу жизни, развеять сомнения, помочь понять и преодолеть трудности; казалось, что ему это всё даётся с лёгкостью. Он всегда с любовью и заботой рассказывал о сыновьях, внуках. Их дела, действия, вообще, жизни его очень занимали, но никогда не было ощущения безысходности, невозможности изменить, исправить что-то, всегда какая-то вера и надёжность. Я никогда не видела внешних проявлений его чувств, но их внутренняя сила и убеждённость не вызывали сомнения. Он – очень обаятельный человек, сила его обаяния притягивала, но никогда не переходила за рамки дружелюбия и симпатии, сочувствия и понимания. Джон всегда естественен, открыт, но его умение держаться не позволяло окружающим преступать границы, им очерченные. Не думаю, что это было сознательно, просто он такой внутри. Для меня это характеристика настоящего, несомненного, неизбывного, поэтому не могу принять прошедшего времени. Понимаю, что все, в конце концов, выходят за двери жизни, но мучительно думать, что любимый друг не позвонит, не расскажет, не спросит, не услышишь его мнение, – невыносимо. Хорошо, что я не видела его безнадежно больным, не прощалась с ним, не видела вашего горя. Для меня – он есть и будет, пока я жива и соображаю. Это бесценно. И ещё благодарна, что встретила такого человека, большая редкость. Ты, Дилечка, счастливица, он был твоим праздником.

Филадельфия, США.



*Е.Я. Федотова***В жизни пятёрок недостаточно**

Мы с Женей троюродные, но так как родство двойное (наши бабушки были родными сёстрами, а дедушки – родными братьями), то получается, что по крови мы двоюродные. Вместе с тем, они жили в Киеве, мы – в Москве, встречались редко, и первый раз я увидела Женю, когда он приехал в Москву поступать на Физтех.

Годы шли, я поступила в Медицинский институт на медико-биологический факультет, а Женя уже учился на каких-то старших курсах Физтеха. Он заезжал к нам в гости и очевидно интересовался медицинскими и биологическими вопросами. Как-то раз я не сумела дать ему удовлетворительный ответ, и он очень серьёзно меня упрекнул: «Ну, что же ты так плохо учишься!». Почему я об этом помню? Казалось бы, ерунда, пустой случай, не стоящий внимания. Однако он, без преувеличения, сдвинул мою жизненную позицию. Я ведь и в школе, и в институте практически ничего не делала. Памяти хватало на то, чтобы сдавать на все пятёрки, просто послушав урок или лекцию. Но тут серьёзность студента вдруг передалась мне, и я поняла, что в жизни пятёрок недостаточно, знания должны быть рабочими. Это был действительно сдвиг в сознании, хотя по-настоящему работать меня научили только на Физтехе, когда я туда перевелась по Жениным следам. Сравнивая разные вузы, скажу, что Физтех даёт поистине уникальное образование, потому что не пичкает информацией, а именно учит работать, и руками, и головой, так что его выпускники могут с большим успехом заниматься практически чем угодно¹⁾.

Был ещё случай, когда буквально одной фразой Женя перевернул мои представления. В то время я писала диплом на Физтехе, а Женя был уже кандидатом наук и заметной персоной в Черноголовке. Конечно, я дала ему почитать – то ли диплом, то ли доклад к защите, теперь не помню. Он прочёл и вернул мне его со словами: «Ничего не понял». От ужаса у меня перехватило дыхание. Если Женя не понял (!) – то кто же поймёт? Он развернул свой тезис: «Ты понимаешь, в комиссии будут сидеть доктора наук, а то и академики. Если они чего-то не поймут, то ведь никогда не подумают, что это по их вине; они обвинят тебя. И снизят тебе оценку. Короче, писать надо попроще, так, чтобы даже академики поняли». Конечно, я все переделала, и когда защищалась, мой доклад Женя одобрил (кажется, он был в комиссии). И в дальнейшем, ориентируясь на «уровень академиков», я стала очень приличным лектором, так что меня понимали и дети в школе, и студенты в институте, и даже простые люди, которым я, будучи лектором общества «Знание», должна была донести учёные истины. На научных конференциях было уже совсем просто.

1) См. примечание к статье А. Карабулина.



Вот так, несмотря на свою троюродность и наши нечастые встречи, Женя сумел судьбоносно повлиять на мою жизнь и научную карьеру. То ли я к нему так серьёзно относилась, то ли он умел убедительно говорить, но только его слова западали мне в душу и производили свою работу. В результате, у меня есть все основания, кроме сестринской любви, чувствовать к Жене огромную благодарность.



Разное



**Из совместного воспоминания
Е.Б. Гордона и В.Е. Фортова
для сборника, посвящённого памяти
Виктора Львовича Тальрозе**

Будучи деканом факультета Молекулярной и химической физики, Виктор Львович считал возможным в качестве платы за свой действительно титанический труд «снять пенки». Многие тогда смотрели на это косо, но теперь, когда для того чтобы взять к себе в команду, требуется просто, чтобы ты был из одного города, а ещё лучше из одной квартиры с руководителем, такой метод подбора кадров считается чуть ли не идеальным. В результате руководимый Виктором Львовичем Отдел свободных радикалов ИХФ был битком набит выпускниками Физтеха с красными дипломами (а их тогда давали по одному на группу). Вряд ли это была лёгкая задача – управлять подобным коллективом – от высокой напряжённости поля индивидуальных сомнений всё время где-нибудь искрило, но потенциал (в том числе и научный) был высок. К тому же у Виктора Львовича было прирождённое умение капитана управлять коллективом. В последние годы, когда он большую часть времени работал (а он работал до последнего дня!) в США, его корабль (а это был уже отдельный Институт энергетических проблем химической физики РАН и руководимая им научная школа) был по-прежнему на плаву. Правда, его метод руководства был столь оригинален, что не имеет смысла описывать его – все равно никто не сможет этим воспользоваться.

Виктор Львович постоянно работал и любую минуту, свободную от размышлений, считал потерянной. И, действительно, в институте, в семье, в командировках, даже в свободные вечера всё было подчинено одной цели, к которой немедленно подключались сотрудники... . И просто окружающие. Вспоминается Евгений Евгеньевич Никитин, блестящий теоретик в области химической кинетики, пытающийся остаться незамеченным и поэтому крадущийся на цыпочках мимо нас, обсуждающих проблемы излучения в химических реакциях, к чёрному ходу в гостинице «Терскол» в 1976 г. во время школы «Газодинамические лазеры».

Но, наверное, было важнее другое. Если представить себе нашу науку – химическую физику – как реку, текущую меж двух берегов – физического и химического, то Виктора Львовича надо считать первым, после Николая Николаевича Семёнова и его учеников-физиков, выходцем с другого берега. За этим скрыто многое. Например, радиационная химия, курс которой Виктор Львович блестяще читал на Физтехе, стала частью химической физики и работает на химическую физику только благодаря ему. Конечно, Виктор Львович не научил нас химии – для этого нужны особого рода способности, но он



научил нас не бояться её, и одного этого было уже достаточно, чтобы иметь при решении физических аспектов химических проблем явное преимущество перед чистыми физиками, впадающими в столбняк уже просто от химических терминов.

В связи с этим вспоминается смешной эпизод. Виктору Львовичу пришло на рецензию из Военно-промышленной комиссии при ЦК КПСС закрытое предложение о специальных применениях химических лазеров, поданное известным учёным-физиком Анатолием Николаевичем Ораевским, к несчастью уже покинувшим нас в 2003 г. В отчёте по проекту многократно упоминались «ЭнгибАторы» химических реакций. В оправдание автор заметил: «Я действительно чувствовал, что в наших дискуссиях Виктор Львович произносил это слово как-то иначе».

Вообще о выступлениях Виктора Львовича на многочисленных закрытых совещаниях следует сказать особо. Многие уже не помнят, как это обычно происходило. Блокноты с текстами и плакаты доставлялись федеральной почтой из организаций и вносились в зал заседаний с другого входа, так что докладчик и его доклад встречались прямо на трибуне под присмотром ответственных лиц. Вообще, Виктор Львович любил плакаты, но в прикладных институтах ими занимались специальные коллективы в КБ, а у нас это пытался сделать Юра Москвин, почерк которого условно считался хорошим... Так что, как правило, Виктор Львович появлялся на трибуне без ничего, на соответствующий вопрос тыкал пальцем в лоб и начинал бодро чертить мелом на доске. Обычно доклад получался очень неплохим и актуальным, и было забавно следить за выражением лиц «соответствующих товарищей», сокрушённо думающих, наверное, о том, как просто людям типа Тальрозе «продать Родину», – его материалы всегда с собой.

Но наиболее активен был Виктор Львович при обсуждении докладов других участников. Его вопросы были остры и актуальны, а характеристики качества работы точны и, что часто ему мешало в карьере, нелицеприятны. К наиболее закрытым выводам работ относились, как правило, характеристики перспективных устройств, приборов, детекторов, и на широких совещаниях о них вообще не сообщалось. Но тут как раз дело обстояло наиболее просто. Все авторы перед лицом начальства старались обещать, как можно больше из физически возможного. Поэтому использование предельных параметров, следующих из законов сохранения энергии и импульса, формулы Планка для чёрного тела, тепловых шумов, дифракционной расходимости, теплотворной способности топлив, энергии химических связей и т.д. позволяло нам прямо на месте получить необходимые оценки. Естественно, Виктор Львович не упускал случая сообщить результаты такого анализа авторам, которые после сверки со своими блокнотами застывали в растерянности. Нам это очень льстило – приходишь налегке и убедительно демонстрируешь, чем специалисты в фундаментальных науках ценны для государства и общества



и почему государство должно их содержать. Но, оказалось, для понимания этой истины тоже требуется определённый уровень и, к сожалению, в политике, которые и решают в современной России вопросы такого типа, если и идут учёные, так, как правило, неудачники.

Не знаю, как это у него получалось, а может, это время такое было, но Виктор Львович всегда был востребован, и даже мы, находящиеся рядом, чувствовали себя необходимыми обществу или, как он любил говорить, «стране». Всё время проходили какие-то совещания, встречи, согласования, раздавались ночные телефонные звонки, в последнюю минуту проводились ключевые эксперименты, результаты которых незамедлительно сообщались в иносказательной форме куда-то наверх. Виктор Львович не любил отпускать нас в поездки на конференции (по России; о заграниче речь не шла) – ему казалось, что при этом работа страдает. А когда мы уезжали в отпуск, то он требовал оставлять подробную схему передвижений на случай, если мы срочно потребуемся «стране». Правда, не было случая, чтобы мы действительно прерывали отпуск.

Мы смотрим на одну из последних фотографий Виктора Львовича во время празднования его 80-летия и вспоминаем первые встречи с ним. Конечно, в наши сорок он казался нам очень пожилым, да, честно сказать, он и не был здоровяком. Но только сейчас мы осознали одну особенность – годы не имели такой власти над ним, как над нами грешными. И на этой фотографии он уже выглядит нашим ровесником, действующим Учёным, несколько минут назад оторвавшимся даже не от письменного стола, а от (как это действительно было) экспериментальной установки, и любопытство – что там будет дальше – застыло в глазах.



Из другого воспоминания Евгения Борисовича о Тальрозе

Я очень обрадовался, когда С.А. Лосев предложил мне прочитать лекцию на школе «Лазерная химия и газодинамические лазеры», которую МГУ проводил в Баксанском ущелье в Азау в апреле 1976 г. Одновременно он передал через меня приглашение прочитать лекцию и В.Л. Тальрозе. Реакция Виктора Львовича была предсказуемой: «В горы на целые две недели – это чистое баловство. И сам не поеду, и Вас не пушу». Сказано это было столь категорично, что я постеснялся объяснить, что уже выкупил путёвку и заказал железнодорожный билет.

Через неделю при следующей встрече Виктор Львович неожиданно попросил меня помочь ему и П.П. Барашеву подготовить лекцию по лазерной химии для очень важного для судеб науки и страны делового совещания, которое планировалось провести силами ведущих учёных в строгой обстановке предгорий Эльбруса и на которое его пригласил академик Р.В. Хохлов. «Это мероприятие относится к числу обязательных», – прокомментировал Виктор Львович. Я, конечно, понимал, что это – совсем другое дело, но совпадение времени и места посеяло у меня определённые сомнения: «Так это же та школа, на которую я Вам передал приглашение, – ответил я после некоторого размышления. «Но как приглашали Вы и КАК приглашал Рем Викторович»... », – нашёлся несколько смущённый Виктор Львович.

Так я впервые попал в командировку вместе с Тальрозе – это и есть тема моих сегодняшних воспоминаний. Я тогда ещё не знал, что идеал командировки для Виктора Львовича – это непрерывная работа в запертом помещении, чтобы поездка в экзотическое место ничем не отличалась для меня от поездки в Москву, в его рабочий кабинет. Но в этот раз всё было не так и по не зависящим от нас причинам.

Жили мы в комплексе Министерства обороны СССР «Терскол» и должны были подчиняться действующему там военному распорядку. В 6 утра «невывключаемый» громкоговоритель будил нас для обязательной получасовой зарядки, а после завтрака до обеда было просто необходимо кататься на горных лыжах. Виктору Львовичу и Евгении Владимировне удалось освободиться от этого со ссылкой на состояние здоровья, но меня освободить не удалось. Поэтому всю первую половину дня я барахтался в снегу, пытаюсь перейти от непрерывного режима падения к импульсно-периодическому, – и это было восхитительно. Но зато после обеда, когда «нормальные» командировочные укладывались на пересып, готовясь к вечерней гулянке (школа начиналась только через несколько дней), меня ожидала в рекреации гостиницы работа над лекцией вместе с Виктором Львовичем, работоспособность которого, как и в обычной ситуации, была фантастическая, при этом она усиливалась прогулками по горам и сытными обедами.



Не буду лицемерить – работалось не без удовольствия, нужно было только ни на секунду не закрывать глаза, в противном случае Виктору Львовичу приходилось меня будить, что он и делал без всякого сожаления. Возникали у нас вопросы и теоретического плана – а тут по коридору безмятежно прогуливался Евгений Евгеньевич Никитин. Через секунду он уже сидел рядом с нами и с радостью, несколько искусственной, помогал нам, а потом вдруг заторопился отлучиться на несколько минут и степенно удалился. И только за поворотом быстро зацокали каблучки – Евгений Евгеньевич не сообразил, что в гостинице тихо по причине «мёртвого часа».

В последующие дни мы продолжали работать и над лекцией (надо сказать, что многие идеи, высказанные в лекции Виктором Львовичем, были в то время пионерскими, но, как многое другое, потом не разрабатывались), а после – над другими темами, и неясная тень крадущегося по коридору в свой номер Никитина меня не отвлекала.

Тогда же я узнал, а потом неоднократно для себя подтвердил, что и повеселиться (в смысле выпить и повеселиться) Виктор Львович – большой мастер. В «Терсколе» это было строжайше запрещено, да и выпивка была в ближайшем магазине фантастически дорогая – только марочный коньяк за 12 р. и шампанское с наценкой за 4 р. Тем не менее в один из вечеров Виктор Львович решил устроить «приём» у себя в номере. На щедрую выпивку с прихваченной из дома закуской были приглашены, мне помнится, из Сибири Ю.Н. Молин и А.И. Бурштейн и из Химфизики – Е.Е. Никитин, В.И. Ошеров, А.П. Генич и я. Дверь в номер Виктор Львович самонадеянно не запер, а поступать так не следовало! Веселье было в разгаре, и все друг другу так нравились, что Евгений Евгеньевич решил запечатлеть компанию с помощью только что привезённого из-за границы и считавшегося тогда большой редкостью полуавтомата со вспышкой. Однако в тесной комнате все не умещались в поле зрения объектива, и поиск удачного ракурса загнал Евгения Евгеньевича на шкаф, где он в неудобной позе, прижавшись к стене, изготовился и нажал на спуск.

А в это самое время (за временем никто не следил, а было уже 10:55, за 5 мин. до отбоя) военный патруль, состоявший из капитана и двух лейтенантов, вычислив нарушителей по светящемуся окну уже регламентировано тёмного здания гостиницы, толкнул подавшуюся дверь – и остолбенел. Особенно, как выяснилось, их поразили «допившийся до кареатидного состояния» Никитин и добродушное хлебосольное предложение Евгении Владимировны зайти и не стесняясь присоединиться к застолью. В последующей злобещей тишине чётко прозвучал приказ капитана: «Завтра все будут отчислены и будут посланы соответствующие письма руководителям организаций, где вы работаете». Осмотревшись, рядовые участники застолья вдруг разразились хохотом и объяснили опешившим офицерам, что всё, что они думают, они могут сообщить устно и немедленно, поскольку руководители всех заин-



тересованных организаций находятся здесь, в номере. Надо отдать должное представителям доблестных Вооружённых сил – редко я видел армию, отступающую столь достойно (теперь понятно, где несли свою опасную службу наиболее здравомыслящие военные). Решение патруля было мгновенным – взгляд на стол (две початые бутылки коньяка и бутылка шампанского) и: «Вам осталось пять минут. Не сомневаюсь, вы справитесь. Всё быстро выпить и к одиннадцати лежать в постелях!» После ухода патруля мы благодарно последовали этому совету, и инцидент был исчерпан.

Вообще-то школа удалась – было много интересных докладов и сообщений, в блеске проявил себя Р.В. Хохлов. Была экскурсия в вольфрамово-молибденовую шахту в Тырнаузе, был шашлык из молодого барашка для лекторов на одной из живописных полян и были горы, которые настолько покорили Виктора Львовича, что он перестал вспоминать те жалкие пупырышки в Граце, пребывание в которых он до этого считал путешествием в горах.

Для части наших сотрудников эти впечатления имели важные последствия – Виктор Львович настолько проникся «горной» лазерной химией, что мы в течение 15 лет имели возможность ежегодно продолжать заниматься ею в горном курорте Бакуриани.



*Д.А. Гордон***Памяти В.Е. Фортова**

Эта книга была уже завершена и сдана в издательство, когда пришла ужасная весть – 29 ноября 2020 г. ушёл из жизни Володя Фортов. Володя был не только физически большим, сильным человеком, он был Человеком с большой буквы! Умный, доброжелательный, демократичный, был начисто лишён высокомерия, отвратительного чванства. Способный, талантливый, получивший блестящее образование в Физико-техническом институте, который был одним из лучших высших учебных заведений не только в СССР, но и в мире, он стал крупным учёным. Он был не только крупным учёным, но и выдающимся организатором науки, государственным человеком! Масштабной, выдающейся личностью! Был смелым, о чём говорят многие его поступки по жизни и, конечно, увлечения экстремальным спортом и участие в полных опасностей и трудностей экспедициях. Умел держать мужскую компанию и умел дружить.

Это был человек, с которым Женю связывали большое доверие и уважение друг к другу, крепкая дружба. Последние 18 лет научной деятельности Жени прошли в отделе В.Е. Фортова в ИПХФ РАН в Черноголовке. Володя очень высоко ценил Женю, как учёного. Когда некий Нобелевский лауреат предложил Фортову вместе номинировать на премию Вольфа некоего учёного, Володя обратился к Жене за консультацией по оценке научного вклада номинанта. Помню, восторженный ответ Нобелевского лауреата на полученную оценку.

Когда Женя тяжело болел после инфаркта, врачи больницы, в которой он лежал, рекомендовали поставить аппарат, нормализующий ритм сердца, но в их больнице такие операции не делали. Женя был в очень тяжёлом состоянии и только теперь он решил обратиться к Володе за помощью. Это были праздничные, новогодние дни, Володя был где-то в отъезде, но нам помогла Светочка, его дочь, которая, как и папа, оказалась отзывчивым и искренним человеком. Она связала нас. Здесь я хочу отметить, что между Светой и папой были очень близкие, нежные, доверительные отношения, что тоже положительно характеризует Володю, как человека, способного на отцовскую любовь, понимание, дружбу и поддержку. Такие отношения дорогого стоят! И, конечно, это обоюдная заслуга!

Женю не удалось спасти. Володя мне написал тогда: «Уходят лучшие». Сегодня я могу сказать то же самое о нём. Он сбежал из больницы, чтобы проводить Женю. При прощании сказал, что ушёл из жизни не только выдающийся учёный, но и его друг.

Я благодарна Володе за умение понимать и ценить уровень и потенциал учёного, за умение поддерживать, за умение дружить. Светлая память Большому и Хорошему Человеку!



Р.С. На днях мне прислали интервью, которое дала дочь Фортова Светлана А. Караулову. Он спросил, как Владимир Евгеньевич реагировал на обиды, поступки, которые были неблагоприятны по отношению к нему. Наверняка, подчеркнул Караулов, они способствовали износу сердца. Светлана ответила, что он никогда не обсуждал это и не проявлял никакой реакции. Я поймала себя на мысли, что в этом они были похожи с Женей. Я много раз слышала, что Женя, – безусловно, ученый академического уровня. На 60-летию Жени в 2000 г. Володя Фортов в своем тосте сказал: «Быть тебе академиком!» Женя 3 раза номинировался на звание чл.-корр. Первый раз это было в 90-х. Сказали, что в первом туре он набрал 44 голоса, а надо было 46. Следующие попытки были в 2013 и в 2016 гг. У него никогда не было продуманной тактики проведения компании по выборам; будучи, вроде, не наивным человеком, полагал, что достаточно сделать хорошую работу и хорошо доложить её на заседании Президиума АН. Он от меня ничего не скрывал, но после первой констатации результатов никогда больше не возвращался к вопросу и не обсуждал, внешне ничего не показывал. Был принципиальным в оценке научных результатов, бывал нетерпим и вспыльчив, но злым или мстительным он не был.



Евгений Борисович об Академии наук

На этой неделе Российская академия наук (РАН) работает особенно интенсивно. Правда, то, чем она занимается, похоже на процедуру самооскопления. На первый взгляд, не происходит ничего необычного – во всех институтах РАН срочно пишутся проекты государственного задания на последующие три года. Кроме срочности в этой работе нет ничего сложного, тем более, что формы, которые необходимо заполнить, по существу, не отличаются от привычных форм заявок на различные гранты.

Однако свои лучшие работы, скажем, поддержанные грантами РНФ, ты включать не имеешь права. Хорошие работы, поддержанные, например, грантами РФФИ и других фондов, программами РАН, договорами различных типов и т.д., тебе включать также запрещено. Поэтому, если ты не особо удачлив, ты можешь включить те работы, которые не «прошли» по соответствующим конкурсам (что делать тем, у кого все работы получили поддержку – непонятно – увольняться или хитрить?). В результате составленные по этим правилам заявки будут рассмотрены соответствующими экспертами и в случае одобрения, ты получишь право на получение установленной для тебя заработной платы. Но, грубо говоря, эти же эксперты (других ведь нет!) уже признали неконкурентоспособность этих работ с теми, которые получили поддержку фондов. Поэтому, в общем, результаты экспертизы РАН должны будут свидетельствовать о низком уровне Академии как научной организации и станут основой для соответствующих выводов.

Людей, которые придумали и поддерживают эту процедуру, можно подозревать в злоумышлении, но отнюдь не в глупости и безрассудности. Попробуем догадаться, в чём тут дело. Прежде всего, только весьма далёкий от РАН человек не знает о дуализме понятия Академии. С одной стороны, это институты (здания, приборы, установки и десятки тысяч специалистов) – это мы. Но есть другая Академия, состоящая из нескольких тысяч человек, к которой и принадлежат основные сторонники реформы. Для этой, второй Академии не требуется никаких государственных заданий, не требуется вообще ходить на работу. Соответствующая зарплата, она называется стипендией и составляет 50 тыс./месяц для члена-корреспондента и 100 тыс./месяц для действительного члена, выплачивается пожизненно. Во-вторых, почти все члены этой Академии являются либо сотруddниками, либо совместителями в университетах. А там государственным заданием, обеспечивающим зарплату для большинства работников, является обучение студентов. Поэтому вся научная работа, включая и поддержанную фондами, рассматривается в качестве достижений ВУЗа. Поэтому университеты будут выглядеть предпочтительнее.



Может быть, в будущем переход фундаментальных научных исследований из Академии наук в университеты и в национальные лаборатории (как в США, например) окажется правильным решением. Жаль только – жить в эту пору прекрасную... .

Опубликовано в Фейсбуке 16 мая 2018 г.



От составителя

Мне хочется привести в этой книге некоторые записи Евгения Борисовича, которые я обнаружила, разбирая его бумаги.

50 лет А.Ф. Додонову, 18 января 1989 г.

Личность нашего дорогого юбиляра была уже достаточно хорошо освещена сверху (Виктором Львовичем Тальрозе и Ардальоном Николаевичем Пономаревым) и снизу (Владиком Зеленовым и Игорем Чернушевичем). Я бы хотел добавить взгляд сбоку и в анфас. Казалось бы, это излишне, поскольку объект (точнее, субъект) имеет фигуру, близкую к сферически симметричной. Однако, это не совсем так, а в счастливые старые времена, о которых я и буду, в основном, говорить, было совсем не так. Придя студентом Физтеха в 1963 г. в 25-ю комнату 2-го корпуса ИХФ, я сразу же столкнулся со стройным худощавым юношей, которого знал лишь как спортивного героя МФТИ. Три года мы провели в тесном контакте – на моем столе стояла кинетическая установка и Александр Фёдорович царственным жестом разделил один из двух своих столов, прижимающих меня к стене, вдоль пополам меловой линией и разрешил пользоваться моей половиной для литературной работы.

По глубине и устойчивости своих привязанностей А.Ф. всегда был однолюбом. Я его застал в период между второй и третьей любовью. Первая любовь, любовь к масс-спектрометрии, уже прочно угнездилась в его сердце, вторая – к трёхмерному уравнению диффузии с потоковым и химическим членами – была в самом разгаре, а время третьей любви – к присутствующей здесь Тамаре Фёдоровне – ещё не пришло. Кроме естественного почтения к старшекурснику, а потом аспиранту, я помню чувство глубокой зависти. У меня стеклянная установка, к тому же, сделанная не мной; у Саши – громадный металлический сложный само (вместе с Севой Струниным) дельный прибор плюс сверкающие многочисленными радиолампами электронные блоки. При этом у Саши каждый день что-нибудь ломалось, и он изошрял своё экспериментальное мастерство нахождением и устранением неполадок, а у меня самописец изо дня в день уныло чертил экспоненциально спадающие кривые.

Конечно, у нас находилось время для бесед и по научным, и по житейским проблемам. Но основные уроки Саша давал своим личным примером, некоторые из них я до сих пор помню.

УРОК ТРУДОЛЮБИЯ – это когда я случайно узнал, что Додонов часто сутками не уходит из института, «кимаря» по ночам на диванчике. УРОК ПРЯМОДУШИЯ... .



... Здесь Женин текст прерывается (утеряна страница), поэтому узнать, какой пример прямодушия Саши он хотел привести, трудно. Но я могу привести два примера – один, рассказанный Женей. Когда они были на конференции, проходившей в Мукачево, симпатичные девушки из Львовского университета, помогавшие в устройстве конференции, пожаловались, что они почти не спали, потому что кто-то всю ночь стучался к ним в дверь. Саша удивлённо заявил: «Странно, а к нам никто не стучался». А о втором рассказала мне Люда Михайлова. Как-то она собралась в Москву, зашла в автобус и услышала радостное и прозвучавшее на весь автобус приветствие: «Люда, ты чего так нарядилась?» И новая страница.

Однажды, после конкурса работ, в автобусе, идущем в Черноголовку, нам удалось убедить А.Ф. в том, что он неправильно поставил балл одной из работ – и потом всю дорогу пришлось удерживать его от попыток выскочить из автобуса, вернуться в Химфизику и постараться исправить оценку.

Из сказанного на сегодняшнем заседании Учёного совета, наверное, всем ясно, что такие люди, как А.Ф., рождаются не чаще, чем два раза в столетие. Поэтому я предпринял попытку поискать аналог А.Ф., родившийся приблизительно за 50 лет до него. Найти труда не представляло – это Федя Астон. Вот что пишет о нем его сын Дж. Дж. Томпсон: «У Астона было две любви – диффузия и масс-спектрометрия». Третьей не было, поскольку Тамары Фёдоровны (жена Додонова) рождаются реже, чем раз в 50 лет. Во все предыдущие рождения А.Ф., по моему мнению, рождался Ходжой Насреддином. Неправильное впечатление – не он подшучивал, а подшучивали над ним, поэтому и запомнился.

Наша научная история расцвечена многочисленными забавными ситуациями (англичанка, пьянка в Долгопрудном, Алма-Ата, Мукачево – стучали, разница в часах и т.д.).

Об этих случаях Женя, видимо, собирался рассказать при выступлении. Женя очень любил Сашу, высоко ценил его профессиональные и человеческие качества.



*Д.А. Гордон***Ф.И. Дубовицкий и его роль в нашей жизни**

В очерке о моих встречах с Н.Н. Семёновым я написала, какую роль сыграл Фёдор Иванович Дубовицкий в моей судьбе. Яехала в Черноголовку после окончания Московского института тонкой химической технологии к М.Л. Хидекелю с рекомендательным письмом моего учителя Р.М. Флида. Но мне сказали в отделе кадров, что директор Филиала института химической физики АН СССР никого не берет на работу, не поговорив лично. Фёдор Иванович сказал, что в лабораторию М.Л. Хидекеля не получится, чтобы я выбирала между лабораториями А.Н. Дремина и И.М. Баркалова. Я выбрала лабораторию Баркалова, которая входила в отдел свободных радикалов. Заведующим отделом был Виктор Львович Тальрозе, а Женя был аспирантом Физтеха, прикрепленным к отделу Тальрозе, и Тальрозе был его научным руководителем.

Скоро мы с Женей поженились. С Женей к моменту нашей свадьбы Фёдор Иванович тоже был знаком. Свадьба была 3 сентября, а две Женины аспирантские работы на ежегодном институтском конкурсе работ, который проводился весной или летом перед отпусками, заняли два первых места. После свадьбы мы жили то в моём общежитии, то в Женином. Женя очень не любил кого-либо просить, но, по-видимому, испытывал большое унижение, живя в девичьем общежитии, поэтому в один прекрасный день мы отправились ловить Фёдора Ивановича на дорожке, по которой он по утрам ходил на работу. Женя изложил просьбу, а Фёдор Иванович ему серьёзно: «А чего же ты так? Прежде, чем жениться, человек строит дом, заводит хозяйство, покупает корову». На этой ноте мы расстались, и как-то нам не показалась наша встреча обнадеживающей. Выяснилось, что на следующий день Фёдор Иванович уехал в отпуск и Женя отправился к замдиректора по организационным вопросам В.М. Исакову. А Исаков ему говорит: «Что ты ходишь? Фёдор Иванович распорядился выделить тебе отдельную однокомнатную квартиру в доме, который скоро сдаётся». Разговор был, я думаю, в октябре. А ключи мы получили в феврале-марте.

Женя несколько лет был доверенным лицом Фёдора Ивановича. Его удивило, что на просьбу дать ему биографию Фёдора Ивановича для ознакомления перед представлением его где-нибудь, секретарша Фёдора Ивановича спрашивала: «А Вам какую и для чего? У него три варианта биографии». Ещё Женя любил вспоминать, как Фёдор Иванович применил к нему свой излюбленный приём прикидываться, что он не знаком с очень хорошо знакомым ему человеком. Женя перед этим наблюдал, как Фёдор Иванович в Москве на каком-то собрании довёл таким образом до белого каления академика Н.С. Ениколопова. А с Женей дело было так. Женя входил в спортсовет, и они собрались в конце декабря в спорткомплексе, который надо было прини-



мать. Женя выступил по обсуждаемому вопросу. По-видимому, Фёдор Иванович был не согласен или субординация не была соблюдена, но дальше Ф.И. на Женю не реагировал и делал вид, что не знает его. Вечером этого дня в нашем отделе был Новогодний вечер, я болела и не смогла пойти. Женя рассказывал, что Фёдор Иванович пришёл на вечер. Приехали Тальрозе, гости из московской части отдела и института. Женя был организатором развлекательной программы, был какой-то вопросник, и он решил отыграться. Вызвал Фёдора Ивановича и начал докапываться. Фёдор Иванович стал отбиваться: «Жень, ну что ты в самом деле...» А Женя ему: «Фёдор Иванович, Вы же не знаете меня!». На что Фёдор Иванович сказал: «Жень, да брось ты, это же политика!»

Фёдор Иванович был настоящим директором, фактически непререкаемым главой и хозяином города. Каждый житель Черногловки старшего поколения знает его роль в создании и благоустройстве города. Он заботился обо всем и обо всех. В его поздние годы, когда я его встречала, он меня спрашивал: «За что ты меня всегда благодаришь?» А я отвечала: «За Черногловку!». Многие дети сотрудников вспоминают встречи с ним. Наш Серёжа тоже помнит, как Женя, гуляя с ним на озере, что-то требовал и довёл до слёз. Навстречу шёл Фёдор Иванович, прижал Серёжу к себе и утешил: «Не плачь, я его накажу». Всегда с Женей помнили и вспоминали Фёдора Ивановича с благодарностью!



*Д.А. Гордон***Наши друзья**

Не могу не рассказать в этой книге о наших с Женей друзьях. Нам, появившимся в Черноголовке в середине семидесятых, очень повезло: здесь оказалась очень высокая концентрация выдающихся умов. Особенно этому способствовало создание в Черноголовке в 1964 г. Института теоретической физики имени Л.Д. Ландау, организатором и первым директором которого в течение многих лет был академик Исаак Маркович Халатников, ученик Ландау. Нам с Женей выпало с некоторыми из сотрудников института сразу познакомиться и подружиться.

Осенью 1966 г., вскоре после нашей свадьбы, мне позвонил В.И. Гольданский, наш заведующий отделом, в который входила лаборатория И.М. Баркалова, где я работала, и спросил не хочу ли я поработать с его другом Владимиром Львовичем Броуде, который переехал из Киева в Черноголовку по приглашению Юрия Андреевича Осипьяна работать в Институте физики твёрдого тела. Он сказал, что у Владимира Львовича есть гелиевый криостат, а нам как раз для наших исследований нужны были гелиевые температуры.

Когда я пришла в комнату, где временно находилась лаборатория Владимира Львовича, навстречу мне поднялся человек с копной рыжих, седеющих, вьющихся волос с очень живыми, выразительными глазами. Мы поговорили о предстоящей работе, в конце встречи он спросил: «А Вы случайно Бориса Ефимовича Гордона не знаете?» Мой ответ был: «Случайно знаю, он мой свёкор». Оказывается, когда Владимир Львович после окончания Московского института химического машиностроения приехал по распределению в Киевский институт физики, он начал работать с Жениным папой. На поминках в день похорон Владимира Львовича, его вдова Елена Фёдоровна Шека говорила, что научный путь Владимира Львовича начинался с работ под руководством Бориса Ефимовича Гордона, и, разбирая стол Владимира Львовича, она нашла их первые статьи. И добавила, что это направление исследований до сих пор востребовано и популярно. Работать с Владимиром Львовичем было очень интересно. Он был необыкновенным человеком: умным, доброжелательным, очень обаятельным. К сожалению, очень рано ушёл из жизни. Когда мы с Владимиром Львовичем собирались обсудить полученные результаты, он всегда говорил: «Кстати, Диляра, пригласите Женю, мне нравится, как он мыслит». Во время обсуждения он иногда обращался к Жене со словами: «Как это у вас, химиков, принято?». Женя после обсуждения, когда мы оставались вдвоём, комментировал: «Ха! Как там у вас, химиков? А как у вас, химического машиностроения?». Я думаю, Владимир Львович так говорил, имея в виду, что мы работаем в Химфизике. Женю—физтеховца, конечно, задевало такое обращение.



Кроме Броуде мне в его лаборатории посчастливилось познакомиться с совершенно неординарной женщиной – Минной Элиашберг. Ни до, ни после нашего знакомства с ней я не встречала более одарённой и талантливой женщины. Кроме того, что была уже кандидатом физико-математических наук в свои молодые годы, она была необыкновенно музыкальна, хорошо рисовала, была блестяще образована, очень умна, к тому же с острым языком, на который лучше было не попадаться. А мужем её был выдающийся физик-теоретик из института теоретической физики Сима¹⁾ Элиашберг. Ныне Сима академик, лауреат премии им. Бардина. У них в доме я первый раз увидела Л.П. Горькова, про которого говорят, что он должен был бы быть в компании Нобелевских лауреатов В.Л. Гинзбурга, А.А. Абрикосова и Э. Леггетта. Но премию дают только троим. Минна и Сима переехали в Черногловку из Ленинграда. Сима, кроме того, что умён и талантлив, ещё и очень интеллигентен. В их доме на первом этаже была какая-то служба, к которой у нас с Женей были претензии. Я пришла и вначале пыталась объяснить суть дела. Не находя понимания, перешла на повышенные тона. Вдруг вижу, Сима с Минной выглядывают из своей квартиры, услышав мой голос. Мне стало стыдно, мне и сейчас как-то стыдно это вспоминать. В общем, это люди, которые определяли моё мировосприятие. Сима, правда, недавно в ответ на моё поздравление с юбилеем и признание, что я благодарна судьбе за то, что она подарила нам с Женей знакомство с ним, ответил: «А я скажу тебе, что ты человек, определяющий своё окружение».

Сима с Минной расстались, Сима женился на Лиде Петровой. Лидия Ивановна – открытый, позитивный и доброжелательный человек, талантливый музыкант и педагог – всю свою жизнь прослужила черногловским детям, работая вначале заместителем директора, а потом и директором музыкальной школы. Оказывается, Лидия Ивановна отбирала детей в музыкальный класс в общеобразовательной начальной школе, в котором учился наш старший сын. Когда что-то в классе было не так, он говорил: «Эх, зря я ей спел песенку про даманчика».

Когда я только приехала в Черногловку, я жила в доме №2 по улице Первой, в котором под общежитие была дана на временное пользование неплохая трёхкомнатная квартира. В самой большой комнате жили я и Вера Кутузова, работавшая в нашей лаборатории лаборанткой, на короткое время к нам подселили Таню Иванову, жену Толи Иванова, которого взял с собой из Ленинграда Э. Надгорный работать по приглашению Ю.А. Осипьяна в Институте физики твёрдого тела. Им, как семейным, очень скоро дали квартиру.

Как-то к нам пришли наша комендант В. Сураева и невысокий человек с очень приятным улыбочивым и доброжелательным лицом. Это оказался Володя Гурарий, он переезжал из Харькова в Черногловку с женой Люсей и

1) Герасим Матвеевич Элиашберг (1930–2021; здесь и ниже *примеч. ред.*).



дочерью Кариной. Позже Вова и Люся станут нашими ближайшими друзьями. Довольно скоро после получения нами с Женей отдельной квартиры раздался звонок в дверь, на пороге стоял большой красивый человек с выдающимся лбом. Это оказался Володя Мацаев, гениальный математик, потрясающая личность. Ему нас рекомендовал наш киевский друг Дима Лехциер, который после окончания Харьковского университета работал в харьковском ФТИНТе¹⁾ у известного теоретика Валечки²⁾ Песчанского, друга наших теоретиков из института Ландау. Володе Мацаеву одновременно с В. Гурарием и В. Мильманом предложили переехать из Харькова в Черногоровку работать в математическом отделе Химфизики. Математический отдел в институте был очень сильным. Гурарий и Мильман уже имели семьи, а Мац ещё не был женат. Вскоре Володя привёл к нам Надю, будущую жену. Володя и Надя стали нашими самыми близкими друзьями. Володя в 2013 г. покинул этот мир, а с Надей мы и сейчас дружим. Надя мне сразу после Жениного ухода из жизни позвонила из Израиля и сказала: «Я хочу, чтобы ты приехала ко мне». Она и сейчас в разговоре может сказать: «Что-то делаю, кроме преподавания по скайпу, например, окна помыла в твоей комнате». Мы всегда поддерживали друг друга, проводили все праздники, дни рождения вместе, и, что самое важное, – Мац очень доверял Жене и поверял ему свои мысли, советовался с ним. Иногда они приходили к нам с приехавшими к ним друзьями. Так мы познакомились с известными математиками Володиём Лином и Димой Гориным. После застолья они вместе с Женей начинали писать пулю, играли на спички. Однажды Мацаевы пришли с Воронелями. Воронель – известный физик-теоретик, а его жена – та самая Нинэль Воронель, которая сделала стихотворное изложение «Трёх поросят». Пластинка с музыкальным спектаклем на это творение была любимой пластинкой наших детей. Мы и сейчас любим иногда повторять:

Но был разгадан волчий план:

Топилась печь у малышей и т.д... .

Помню, что Нинэль пришла с вязанием, живо следила за разговором и вставляла свои реплики, не отрываясь от своего дела. Володя Лин, по-моему, оставался в Черногоровке в квартире Родиных с их собакой, громадной овчаркой, пока они были в отпуске. С Родиными мы тоже дружили. Юра Родин – известный математик, был приглашён заведовать математическим отделом в ИФТТ АН СССР из Одессы. Они с Леной, его очаровательной женой, были очень славные ребята. Поскольку наш старший сын собирался поступать на биофак МГУ, куда надо было сдавать математику, мы попросили Юру заниматься с ним математикой. Серёжа обожал Юру и до сих пор лю-

1) Физико-технический институт низких температур имени Б.И. Веркина.

2) Валентин Григорьевич.



бит, жестикулируя указательным пальцем, имитировать Юру: «Ты понимаешь, Серёжка, это грубейшая ошибка!». Я счастлива, что не только мы имели удовольствие общаться с такими выдающимися людьми, но и наши дети. Когда Мац уезжал в 1990 г. в Израиль, его проводы состоялись в нашей квартире. К сожалению, с 90-х годов начали уезжать наши черноголовские и киевские друзья: кто в Израиль, кто в Германию, кто в Америку, а кто и в Австралию. С Мацем нам дважды посчастливилось встретиться в Израиле. Очень я рада и тому, что наш сын Серёжа виделся с Мацем незадолго до его смерти. Они очень хорошо пообщались и я счастлива, что Серёжа был уже взрослым и мог оценить масштаб этой гигантской личности.

Одним из первых в нашу однокомнатную квартиру в пору нашей юности стал приходить Марик (Эмиль Самуилович) Медведев. Марик – киевлянин, выпускник Физтеха. Он старше Жени и поступил на Физтех раньше. Марик – замечательный! Кроме того, что талантлив и очень хороший физик-теоретик, он ещё и замечательный человек. Открытый, доброжелательный и прямодушный. Они этим схожи с Сашей Додоновым. Марик женился на год позже нас. На вопрос, как невеста, ответил: «Крепенькая, как орешек». Лена – красавица, умница, москвичка. Я безмерно благодарна ему за то, что согласился быть ответственным редактором этой книги. Это очень нелёгкий труд. Марик оказался замечательным редактором. Очень ответственный, скрупулёзный, требовательный. Как раз эти качества и нужны редактору!

В лаборатории В.Л. Броуде работали ещё две замечательные женщины, с которыми я подружилась – это Таня Тратас¹⁾ и Света Покровская. С Таней мы очень дружили в молодые годы. Таня – отзывчивый и тёплый человек, часто помогала мне, когда я нуждалась в поддержке. Её муж Володя Петин, как и она сама, физтеховец, работал, как и Женя, в отделе Виктора Львовича Тальрозе. Потом перешёл со своей лабораторией в Институт физики твёрдого тела, позже организовал свой институт. Муж Светы Покровской – выдающийся физик-теоретик из института Ландау Валерий Покровский. Человек очень тонкой организации, он некоторое время одновременно учился и на физфаке, и в консерватории. Они со Светой являют собой пример очень гармоничной пары. Их преданные, нежные отношения обращают на себя внимание. С ними у нас сложились очень тесные, дружеские отношения, которые и сейчас крепки. Каждый год, приезжая на конференции, посвящённые памяти Ландау, они приходили к нам в гости с Ларкиными²⁾ и Гантмахерами³⁾.

1) Её брат Юра Тратас принимал у меня зачёт по радиофизике. Когда я нарисовал нелепую характеристику пентода, он в смущении позвал завкафедрой. Тот взял мою зачётку и, увидев там отл. по основным предметам, сказал: «Ставь ему отл., эти теоретики всё равно в радиофизике ничего не понимают!».

2) Академик Анатолий Иванович Ларкин.

3) Академик Всеволод Феликсович Гантмахер.



Толя Ларкин сидел у нас в квартире рядом со мной за две недели до его ухода из жизни. После встречи мы с Покровскими провожали их до их коттеджа. Назавтра они улетали в Америку. Толя всегда был немногословен, сдержан даже во время наших домашних встреч. И как же я была удивлена, обнаружив в воспоминаниях И.М. Халатникова следующие строки: «Сознаюсь, что у меня была репутация любителя и автора розыгрышей. Иногда и я становился их объектом. Так как заседания происходили в местном клубе, в котором проводились и другие «культурные» мероприятия, однажды я обнаружил объявление на украинском языке о моей публичной лекции на тему: «Чы був початок та чы будэ кінець свиту? (Было ли начало и будет ли конец света?). Это была безобидная шутка Толи Ларкина, намекавшая на мои работы с Евгением Лившицем о космологических особенностях. Говорили, что на эту объявленную лекцию пришли любопытные граждане и среди них оказался даже один священник». После этого и я вспомнила необычное проявление Толи: к сожалению, я не была на этом вечере, но говорят, что на празднование наступающего Нового Года в нашем отделе Толя пришёл в «весьма оригинальном костюме». Его очаровательная жена Таня работала со мной в одном отделе в течение многих лет, нашу дружбу мы сохранили и по сей день. Таня мне рассказала, как было дело. Она была культоргом и участвовала в организации этого вечера. Среди организаторов был и наш весельчак и балагур И.М. Баркалов. Он предложил сделать костюмированный бал. Бал удался, многие пришли в костюмах. Атовмян был в костюме «короля», никто не узнал в ярко окрашенной блондинке на высоких каблуках-платформах брюнетку небольшого роста Иду Ким. Игорь нарядил в подаренный ему друзьями-узбеками халат Диму Кирюхина. При организации всего этого Игорь запальчиво бросил: «А Ларкину слабо прийти в костюме?». Таня пришла домой и рассказала об этом Толе, на что Толя ответил: «Ну почему же слабо?» И они с Таней придумали, что он придёт в костюме футболиста (Толя был огромный, крепкий). Таня ушла пораньше, чтобы помочь накрывать столы и встречать гостей. И вот, когда все сели и приступили к началу торжества, внезапно появился Толя – абсолютно голый, в одних узеньких плавках. Все обомлели! Хохотали до упаду, особенно этот костюм-розыгрыш понравился нашему дорогому Виталию Иосифовичу Гольданскому, который сам обожал шутки и розыгрыши. Единственный кто переживал, а не веселился, была Таня. Особенно она переживала, когда он приглашал её танцевать, потому что он был босой, а пол кафельный и мороз на улице в тот год был очень сильный. За столом Толе давала «поносить» свою красивую, роскошную шаль «цыганки» Верочка Мунихес. Толя при этом сидел с обычным для него спокойным, невозмутимым видом.

Не помню, кто меня познакомил буквально в первые годы нашей жизни в Черноголовке с Ингой Мицевой. Инга – красавица, спортсменка, хохотушка, по образованию биолог, работала в лаборатории Яковлева у нас в Химфизи-



ке. Её муж Володя Кравченко, профессор, физик-теоретик, работал в ИФТТ. Инга оказалась талантливой писательницей. Наверняка многие были на презентациях её книг. Много сил она отдала реставрации Макаровской¹⁾ церкви и организации благотворительной организации «Милосердие – радость». На несколько месяцев раньше меня она родила второго сына Гешу, а я родила нашего первого сына Серёжу. Когда Серёже было месяца три, он заболел с очень высокой температурой. Я была в ужасе, позвонила Инге, она сказала: «Не плачь, сейчас я попрошу прийти к вам Лену Гантмахер, она педиатр». Действительно, очень скоро пришла молодая, серьёзная и доброжелательная женщина. Она посмотрела, успокоила, что это простое переохлаждение, назначила лечение. Чувствовались в этой женщине, несмотря на молодость, мудрость и уверенность, которые вызывали к ней доверие и уважение. Так что с Леной мы познакомились раньше, чем с её мужем Севой Гантмахером, известным учёным, впоследствии академиком. С Леной мы и сейчас дружим. Она сохранила все свои черты уважаемой и достойной личности. Её расположение и поддержка очень мне помогают. Севин отец Феликс Рувимович Гантмахер был популярнейшей личностью на Физтехе, – очень крупный учёный с мировым именем, автор классической монографии «Теория матриц», профессор Физтеха. Он был легендарным лектором²⁾. Студенты боялись идти к нему сдавать экзамен, тем, кто у него получал пятёрки, он дарил свою книгу с автографом. Как написал в своих воспоминаниях В. Прут, Женя никогда не боялся и шёл первым на экзаменах. И в этот раз он пошёл к самому Гантмахеру, целый день завоёвывал свою пятёрку, в результате опоздал на самолёт в Киев.

С Володей Кравченко связана история появления нашего младшего сына Юлика. Часов в 10 вечера 13 января 1977 года, т.е. в Старый Новый Год, у меня начались предродовые схватки и я позвонила нашему другу Володе Мацаеву. Володя Мацаев был не только гениальным математиком, он серьёзно увлекался медициной. Обладая могучим, незаурядным интеллектом, приобрёл обширные знания в медицине и фармакологии. Читая зарубежные журналы, знал новейшие достижения, блестяще знал фармакологию и новейшие лекарственные препараты. Был потрясающим диагностом. Единственное, что настораживало – это то, что он был максималистом и назначал сразу серьёзное лечение, хотя в некоторых случаях можно было бы облегчить состояние пациента менее жёсткими способами. Особенно это важно было в детских случаях. Но при серьёзной ситуации, когда речь шла о жизни и смерти, Володя был незаменим. Я несколько своим знакомым рекомендовала его и знаю, что в случае сына моих сотрудников Оли и Василия Ивановича Пономарёвых он сыграл очень серьёзную роль. Сумел убедить врачей в клинике применить лекарство, которое спасло юношу.

1) Деревня Макарово близ Черноголовки.

2) Незадолго до своей смерти, будучи уже тяжело больным, он читал лекции, сидя на стуле на сцене Актового зала, который, как всегда, был полон.



Володя прибежал и сказал: «Собирайся, надо ехать». Имея не очень положительный опыт рождения первого сына в Глуховском родильном доме (в Черноголовке своего роддома не было и тогда, нет его и сейчас), я решила, что надо ехать в Москву и желательно в МОНИИАГ (Московский областной научно-исследовательский институт акушерства и гинекологии). Мы стали искать, кто сможет повезти. Человеком, который отозвался на нашу просьбу, был Володя Кравченко. Прибывший после моего звонка Мац хлопнулся на пол всей своей могучей фигурой и стал надевать мне на ноги валенки. Пришёл Лёня Межов (Л.П. Межов-Деглин), с которым Женя в те годы сотрудничал и мы дружили семьями. Жена Межова Оля была коренной москвичкой, имела квартиру в самом центре Москвы в Потаповском переулке. МОНИИАГ не так далеко расположен от их квартиры, и мы решили, что, если в МОНИИАГе будут спрашивать, почему привезли к ним, скажем, что я приехала к Межовым и вот начались схватки, к тому же я из Московской области. Но никто ничего не спросил, меня сразу взяли. По дороге случилась история, которая теперь по прошествии многих лет кажется весёлой, а в тот момент совсем была невесёлой. Недалеко от больницы МИД кончился бензин и машина остановилась на подъёме. На наше счастье шла шумная компания, отмечавшая Старый Новый Год, они нам помогли. Мы добрались до места, откуда можно было пойти в гаражи больницы МИД и попросить бензин. Так и сделали.

Я всю дорогу помнила рассказы, что вторые роды стремительные, и боялась, что вот-вот рожу прямо в машине. Но рассказы явно были не про меня. Я ещё 2 дня промаялась в МОНИИАГе до появления Юлика на свет. Юлик появился в 2.10 ночи 16-го января. Родился чудный, живой, хорошенький мальчик. Когда мне его показали, он показался мне светленьким, а когда принесли кормить, то я долго приглядывалась, потому что не такой уж он был и светленький. И все-таки до 5–6 лет он был больше блондином: необыкновенно хорошеньким, со светлыми кудрями и зелёными глазами мальчиком. Весёлый, живой, улыбчивый и невероятно дружелюбный, был всегда любимцем всех. К годам шести-семи волосы потемнели. Помню, как та же Инга, придя в приёмную к секретарю директора Химфизики, увидела Юлика, сидящего в приёмной и ожидающего меня, и не узнала его. Потом спросила меня: «А кто тебя ждал?», говорю: «Юлик». «Он же был блондин!». Жена Л. Межова Ольга Николаевна Меньчукова, очень талантливая художница (в Москве была мультипликатором), работала в нашей музыкально-образовательной школе, вела несколько кружков. Юлик ходил к ней учиться рисовать и лепить, у нас хранятся несколько его лепных работ, сделанных под её наблюдением. Они очень выразительные. Сделали они и замечательную куклу сову. О ней старший брат Юлика Серёжа написал такие строчки в посвящениях, написанных им к одному из новогодних праздников:



Была им сделана сова
Матерчатая голова.

Сова получилась очень удачной, Юлик её очень любил и очень расстроился, что её нельзя было взять домой, эту куклу неоднократно использовали в постановках кукольного театра, руководимого Олей. Кроме работы с детьми Оля не переставала рисовать. Она нарисовала мой акварельный портрет, он мне очень нравится. Нравится мне и портрет Инги Мицовой, нарисованный примерно в то же время. Наверное, участие и помощь Юлику в подготовке постановок в кукольном театре помогли мне, когда в один из приездов к Юлику мы с Женей были приглашены в школу монтессори, в которой учился старший сын Юлика, наш средний внук Артин. В этой школе было традицией приглашать бабушек, дедушек детей, учеников этой школы, рассказать что-нибудь из жизни страны, откуда они приехали. В классе были дети разных национальностей и из разных стран: испанцы, немцы, англичане, китайцы, японцы. Я решила, что мы им покажем «Курочку рябу». Артик очень любил все русские народные сказки, мультики, песенки. Мы привозили ему кукол – действующих лиц этих сказок. Были куклы и для «Курочки рябы».

Не помню, в каком году по дороге на школу-симпозиум, проходившую в пансионате МГУ «Буревестник», нашими соседями по купе оказались Боря (Борис Давидович) Сумм с женой Леной. Боря был редким человеком. Он был потрясающе красивым внешне, был талантливым учёным, педагогом и невероятным другом. Боря заведовал кафедрой коллоидной химии в МГУ после своего учителя П.А. Ребиндера. Умел как никто дружить. Мог позволить и сказать: «Дилечка, я просто узнать, как вы и услышать голос», и положить трубку. Они жили в доме рядом с Литературным институтом, расположенным на Тверском бульваре. Бывать в этом районе всегда приятно, а у них в гостях особенно. Боря с Леной несколько раз приезжали к нам в Черноголовку кататься на лыжах. Женя с ним был знаком и раньше по работе в РФФИ. Боря был скромным и сдержанным человеком, зато Лена фонтанировала шутками, остротами, много декламировала не только чужие стихи, но и сама сочиняла. К сожалению, Боря рано ушёл из жизни и нам недолго пришлось наслаждаться их дружбой. Лена уехала к дочерям в Америку.

В последние годы мы тесно подружились с Борей¹⁾ Смирновым и его женой Женей. С Борей я впервые увиделась, по-видимому, в 2002 г., он из Германии, где был в командировке, приехал к нам в Лейден. Позже они стали с Женей сотрудничать. Смирновы купили роскошный деревянный дом в Павловском Посаде, построенный в конце XIX-го века. Этот дом имел клеть со старинной утварью (горшки, прялки, ухваты). Это всё досталось нам, поскольку хозяев они не интересовали. К дому примыкает большой участок.

1) Борис Михайлович.



Жена Бори оказалась очень искусной садовницей-огородницей. Мы навещали их хотя бы раз в год, летом или осенью. Женя Гордон с Борей садились обсуждать свои научные дела, мы с Женей Смирновой готовили стол, Гордон позволял себе одну рюмочку спиртного, будучи за рулём. Потом Смирнова начинала делиться своими роскошными саженцами. В их районе растут потрясающие дубы. У Гордона была к ним особая симпатия. Может быть, дуб, описанный Л.Н. Толстым, на него так подействовал, но он очень хотел посадить дуб на нашем участке. Когда ему говорили, что дуб очень медленно растёт, он отвечал: «Когда лет через 100 мы с Дилей выйдем на улицу пить чай, мы поставим стол и самовар под этот дуб». Мы взяли у Смирновых маленький отросточек, помню, уже была поздняя осень, и, чтобы он не замёрз, я накрыла его ведром. Было это лет десять назад. Сейчас – это уже довольно большое дерево, хотя, наверное, по меркам дубового возраста он ещё младенец.

Боря много лет был заместителем главного редактора журнала «Успехи физических наук» Нобелевского лауреата Виталия Лазаревича Гинзбурга. Недавно мы с Борей говорили о некоторых людях, с которыми ему пришлось общаться, будучи на этом посту. Вспомнил Якова Борисовича Зельдовича. Боря сказал, что его дочь до сих пор вспоминает, как Зельдович ей говорил, если он звонил и не заставал Борю дома: «Скажи папе, что звонил Яша». А Яша – это ведь был почти Бог. Наверняка, заслужил не одну Нобелевскую, но, как говорил В.Л. Гинзбург, чтобы получить Нобелевскую, надо долго жить. Боря мне постоянно звонит и поддерживает меня.

Когда наш отдел получил свой корпус и наша лаборатория переехала в него из корпуса Тальрозе, на нашем втором этаже поселились сотрудники отдела Александра Евгеньевича Шилова Аня Шойхет и Миша Тетельбойм. Муж Ани, Гриша Карнаух, учился с Женей на одном факультете, на одном курсе в параллельной группе. Гриша и Аня – удивительные люди, невероятно доброжелательные и отзывчивые. Свет и тепло, исходящие от них, притягивает людей разных поколений, сословий, национальностей. У них мы постоянно встречались с Авигеей Николаевной Ивановой, женщиной талантливой и удивительной. О ней можно писать много, я приведу только слова В.И. Мацаева : «Авигея – хороший математик». Получить такую оценку от Маца – дорогого стоит. У Карнаухова же мы познакомились с Юрой и Фаиной Злобинскими. Юра был талантливый химик-технолог, Фаина – пользующийся большим спросом логопед. Постоянными гостями Карнаухова являются Альбина Провоторова и Таня Ларкина. Гриша работал у Бориса Никитовича Провоторова. Вдова Провоторова Альбина Иванова все годы после ухода Бориса Никитовича чувствует себя защищённой заботой Гриши и Ани. Гриша – известный человек в Черногловке. Он не только талантливый физик-теоретик, но и общественный деятель. Гриша много десятилетий ведёт клуб классической музыки в Доме учёных, кроме того он выдающийся шашист. Весь



игровой сезон в любую погоду на общественном транспорте с двумя пересадками он ездит в г. Электросталь играть в шашки. Проводит турниры с детьми и много чего ещё.

Не могу не рассказать о наших кавказских друзьях, семье Лауры и Мовсеса Керопянов. Бывая почти каждый год на школах, которые проходили на базе отдыха МГУ близ Туапсе, мы очень подружились с этой замечательной семьёй. Лаура и Мовсес вместе с отцом Лауры Фердинандом, основали ресторан «Кавказская кухня». Они начинали с маленькой территории, тогда ещё был жив папа Лауры, а дети Лауры и Мовсеса помогали семейному бизнесу. Дочь Светочка, красавица с роскошной косой, помогала обслуживать, а сын Вова в лохматой белой папаше и мягких кожаных сапожках, совсем ещё мальчик, исполнял кавказские танцы. Теперь они отстроили шикарное двухэтажное здание, они пользуются колоссальным спросом, потому что у них очень вкусно и по разумным ценам, чисто, красиво. Лаура оказалась незаурядным организатором. Множество блюд, хорошо приготовленных, все свежее, честное и хорошее обслуживание, гостеприимство хозяев, доступные цены – всё это выделяет их. Лаура со Светочкой приезжали на нашу золотую свадьбу, Мовсес оставался на хозяйстве. Светочка, после окончания Ереванского медицинского института, теперь врач в Питере. Уверена, будет хорошим врачом. Мовсес в советские времена работал прорабом на стройке в Спитаке. Во время землетрясения 1988 г. потерял семью, жену и двоих детей.

В других своих воспоминаниях я уже говорила о наших киевских и московских друзьях, с которыми нас свела жизнь. Многих, наверное, я не упомянула. За долгую жизнь у нас образовалось много друзей по всему миру. Пусть меня простят те, о ком я здесь не рассказала, я благодарна всем, кто с нами дружил, кто просто хорошо относился. Вы все помогали нам с Женей жить, а теперь помогаете мне и детям.

Я также благодарна моим коллегам. Я больше полувека проработала с замечательными людьми из лабораторий И.М. Баркалова и А.И. Михайлова. В нашем коллективе всегда царила атмосфера дружбы, взаимопонимания и поддержки. Много лет я делю комнату с замечательной Светочкой Кузиной. Света – очень демократичный, доброжелательный, образованный, любящий и знающий русскую литературу человек. У нас с ней один кумир – А.С. Пушкин. Света сама сочиняет, и обладает несчастным даром запоминать стихи и свободно цитировать. Это, действительно, дар. Им обладает и наш старший сын Сергей. Знает на память всего Галича. Может цитировать громадными кусками классиков, как стихи, так и прозу.

Спасибо Учителям Жени и тем, кто верил в него и поддерживал, и, конечно, всем сотрудникам Жени, помогавшим ему делать его науку. Здесь я не могу не отметить особо Олега Ржевского. Это удивительно тонкий, интеллигентный и очень воспитанный человек. Он приезжал к Жене в больницу в последние его дни поддержать нас.



Д.А. Гордон

Женя любил шутки, розыгрыши

Женя был весёлый, остроумный, с хорошим чувством юмора, притягивал к себе людей, всегда был центром компании. Вокруг него всегда было весело и интересно. Любил шутки, анекдоты, весёлые истории. Любил, особенно в молодые годы, прикинуться, что не понимает о чём речь. Собственная мама часто говорила: «Женя, скажи честно, я не понимаю, ты шутишь или это правда». В последние годы на хамское обслуживание реагировал так: «Простите, у меня Альцгеймер, я Вас не понял, объясните, пожалуйста, поподробнее».

Любил розыгрыши, тут первое апреля было самым удобным случаем. Мог позвонить кому-нибудь из сотрудников отдела и поговорить, представившись Виктором Львовичем Тальрозе, который был вначале заведующим отделом, а потом и директором основанного им института ИНЭПХФ РАН, ныне Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе Российской академии наук. В конце признавался, что разыграл. В основном, на удочку попадался доверчивый Саша Додонов. Одним из розыгрышей был звонок Толе Никитину, другу, замечательному человеку, сотруднику московской части института В.Л. Тальрозе. Романтик-идеалист он был народным депутатом. Будучи в Москве и желая пообедать с ним, Женя позвонил ему и спросил: «Как Вы думаете, каждый советский человек имеет право на обед?». Дальше пошёл разговор, в котором Толя мялся, не знал что сказать, чтобы и волки были сыты, и овцы целы. Наконец, какая-то сотрудница стала кричать: «Толя, не слушай его, это Женька».

Читатель найдёт в книге фотографию, где мы с ним изображаем скульптуру «Рабочий и колхозница» Веры Мухиной. Идея, конечно, Женина. Вот что его натолкнуло на это? Снята фотография в знаменитой крепости, самой мощной крепости обеих Америк, и находится она в столице Пуэрто-Рико Сан-Хуане. Она построена в 1508 г. В 1595 г. её безуспешно пытался взять знаменитый английский пират Френсис Дрейк. «Рабочий и колхозница» – замечательная скульптура В.И. Мухиной по замыслу архитектора Бориса Иофана – является эталоном социалистического реализма. Была сделана для участия во всемирной выставке в Париже в 1937 г. Стояла на здании высотой в 34 м. Я думаю, Женю вдохновила на эту идею монументальность обоих творений – громадной и мощной крепости и громадной эпохальной скульптуры.

Любил играть с детьми. Все дети родственников, друзей, знакомых вспоминают, как было весело с Женей играть.

Было несколько крылатых фраз. Он любил, чтобы я была рядом, это касалось и телевизора. Но здесь наши вкусы, кроме очень хороших фильмов, не очень совпадали. Он любил боевики, особенно с Арнольдом Шварценегером и Брюсом Уиллисом, а я люблю передачи канала «Культура». И хотя нагруз-



ки на меня были большие, но ради опер, которые транслировались с престижных мировых сцен, начинавшихся в полночь и заканчивавшихся под утро, я готова была пожертвовать отдыхом. Женя это не одобрял. У нас несколько телевизоров, можно было бы разделиться, но, во-первых, просмотры всё-таки чаще случаются во время еды, значит на кухне, а во-вторых, желательно, чтобы я была рядом. Поэтому, входя на кухню, где я уже хлопотала и был включён канал «Культура», говорил: «Когда я слышу слово культура, я хватаюсь за пистолет». Он, конечно, знал, кому принадлежит эта фраза, но учитывая, что он принадлежит к народу, который больше всего пострадал от этого монстра, то можно простить ему.

Но игру «Что, Где, Когда?» мы не пропускали. Я очень люблю эту игру и, хотя она начиналась практически в полночь, я её дожидалась, а Женя ставил будильник и обязательно вставал. Они со старшим сыном Серёжей отвечали на многие вопросы, на какие-то и мне удавалось.

Иногда, зайдя вечером в спальню и увидев меня с томиком Пушкина мог сказать: «Опять изменяешь мне с Пушкиным». Летом, когда была хорошая погода, садился в саду за стол или на крылечке и что-то делал по работе, а я использовала каждую минуту, чтобы что-то сделать в саду. Поработав, он звал меня посидеть рядом, а я не в ту же минуту могла оставить начатое дело. Тогда он говорил: «Не идёшь? Потом будешь плакать». Оказался, как всегда, прав.

Одной из последних шуток была та, что связана с его не поступлением в течение двух лет в Киевский университет и Политехнический институт. Звучала она так: «Еврейское счастье состоит в том, что еврея не берут туда, куда ему не надо». В конце концов он поступил в самый престижный ВУЗ страны – Московский физико-технический институт, где получил блестящее образование, и куда ему, действительно, было надо.



Из воспоминаний А.В. Леонтьевой

Женю хорошо помню. Последняя, 4-ая Донецкая конференция по квантовым кристаллам и криокристаллам была в 1993 г., Жене как раз исполнилось 53 года. И на прощальном нашем вечере моя лаборатория посвятила ему целую сценку:

«Жил да был Е-Бе-Гордон.
Смолоду был страстен он
И к соседкам то и дело
Совершал набеги смело... .

И когда поднаторел и устал от энтих дел...
Тут соседки беспокоить стали нашего ЕБе-
Как не снилося тебе... .
Вот одна из них-девица-Шамаханская царица...

и т.д.

А в качестве шамаханской царицы выступала моя аспирантка – красотка Ларочка Степанчук, голая, в купальнике и вся в бусах и блёстках (сняли со всех участниц). Слева и справа её сопровождали два телохранителя (быть евнухами они отказались) – тоже голые с саблями на боку, в шароварах (сабли пилили весь день), текст читала сама, восточную музыку исполняли приглашённые музыканты.

Было настолько комично, что нас премировали огромным пирогом с яблоками, на другой день пирог (50 на 25 см) был выставлен как угощение всем на прощанье... .



От составителя

Это стихотворение написано Мариной Жуковой, которая с мужем была на конференции, организованной профессором Генри Норманом в Новом Афоне. Мне она тоже посвятила стихотворение. Преувеличено, конечно, и о Жене, и обо мне. Тем не менее, спасибо за внимание и любовь, за замечательное время, проведённое вместе в этом прелестном уголке нашей планеты.

Посвящается Евгению Борисовичу

Вы, конечно, красивый очень,
И, конечно ж, об этом знаете
О числе влюблённых в Вас женщин,
Думаю, по-до-зре-ва-ете.

Это редкое сочетание:
Красоты, добра и ума,
И, не встретив Вас здесь, на взморье,
Не поверила бы сама.

И как будто из древней жизни
Это точно-без всякой прикраски
Мир вокруг голубее стал сразу
Словно раньше, из детской сказки.

Я желаю Вам...
Нет, ничего не желаю.
Это – глупо, когда всё имеется.
Было б больше таких
Просто рядом,
Остаётся на это надеяться.

С уважением,
Ваша Марина, 2 августа 2005 г.



Поздравления

Поздравление с 50-летним юбилеем от коллектива Филиала Института энергетических проблем химической физики

Дорогой, Евгений Борисович!

Институт энергетических проблем химической физики горячо поздравляет Вас со знаменательной датой, которую Вы встречаете в расцвете творческой активности и завидного физического здоровья.

Ваша высокая требовательность к себе и коллегам, удачно сочетающаяся с доброжелательностью и незлобивостью, высокое трудолюбие и организованность, являются примером для всех нас, особенно в трудные и смутные времена, которые мы все переживаем сегодня.

Нет таких новых научных идей, проблем и веяний, которые бы прошли мимо Вашего пытливого и взыскательного ума, о которых у Вас не было бы своего собственного, причём оригинального мнения. Мы всегда завидовали и будем завидовать Вашему умению оригинально и неожиданно подойти к решаемой проблеме и решать её с таким напором и глубиной, что идущим после Вас ничего не оставалось другого, как её изучать по Вашим публикациям.

Мы уверены, что нас ожидают ещё долгие годы совместной радостной творческой работы, и мы хотим пожелать, чтобы они были такими же и для Вас.

Крепкого здоровья и новых творческих успехов.

Коллектив ФИНЭПХФ



Поздравление с 60-летним юбилеем от Черноголовки

Дорогой Евгений Борисович!

В Ваши юбилейные дни происходит странное слияние образов. Когда в телевизоре видишь Алфёрова, думаешь о Гордоне, и, наоборот, встретишь Гордона, непременно задаёшь ему вопрос об Алфёрове...

Время, однако, непонятное, то тут, то там, иконы замироточили.

Женя после окончания школы работал в Киеве на заводе и был предельно счастлив тем, что после пяти часов – за проходную и все заботы вон из головы... А потом Физтех, комсомольская деятельность, наука. **Виктор Львович** (Тальрозе – *ред.*) всегда благоволил к Гордону. И нередко, слегка пыжась, пытался объявить народу нечто важное о нём, подчёркивая его талантливость. «Мне как декану хотелось бы научиться угадывать, получится ли из того или иного студента Гордон или нет». А в другой раз заявил: «Главное свойство Гордона – щедрость». Избранность Евгения Борисовича признавал и Виктор Адольфович (Бендерский – *ред.*) в 60-х годах. По его мнению, в нашем отделе, кроме него, достойным интеллектом обладали: Гольдаша (Виталий Иосифович Гольданский (1923–2001) – *ред.*), Франкев (Евгений Леонидович Франкевич (1930–2006) – *ред.*) и Гордоша.

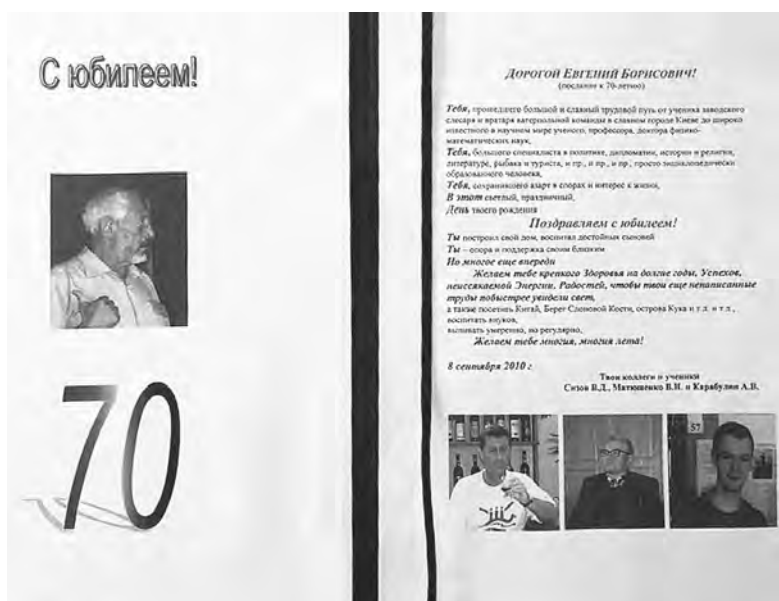
Высокий уровень интеллектуального развития позволил Евгению Борисовичу решить не только широкий круг чисто научных задач, но и дать расширенное и уточнённое определение коммунизма: «Коммунизм – это от каждого по способности и каждому по потребности, но только в порядке о-о-очень большой очереди». Щедрость Евгения Борисовича подтверждена также проявленной им поддержкой в РФФИ проекта Б.А. Мамырина и бескорыстным служением развитию науки в Голландии.

Виктор Львович и Ардальон Николаевич (Пономарёв – *ред.*) несомненно сыграли важную роль в становлении Е.Б. Гордона как учёного и руководителя, но не самую главную. Только **Диляра Ахметовна**, прозревая будущее, не позволяет ему расслабляться в созерцании элементарных процессов. Значительную часть своей недюжинной энергии Е.Б. Гордон расходует на проблемы макромира. Почти что готов коттедж, примитивная советская сантехника заменена французской, возникла идея зеркального потолка и приобретения японского туалетного оборудования с компьютерным управлением, а также велосипедов. Одним словом – процесс пошёл: одна перспектива рождает пять новых.

Поздравляем Евгения Борисовича, достигшего расцвета творческих сил по всем направлениям, желаем ему доброго здоровья, успехов и всего того, что только пожелает его богатая фантазия, а также благополучия и процветания детям, здоровья Диляре Ахметовне и дальнейшего совершенства в искусстве управления Евгением Борисовичем.

Черноголовка, 8 сентября 2000 г.





Поздравление с 70-летним юбилеем

Дорогой Евгений Борисович!

Тебя, прошедшего большой и славный трудовой путь от ученика заводского слесаря и вратаря ватерпольной команды в славном городе Киеве до широко известного в научном мире учёного – профессора, доктора физико-математических наук,

Тебя, большого специалиста в политике, дипломатии, истории и религии, литературе, рыбака и туриста, и пр., просто энциклопедически образованного человека,

Тебя, сохранившего азарт в спорах и интерес к жизни,

В этот светлый и праздничный,

День твоего рождения

Поздравляем с Юбилеем!

Ты – построил свой дом, воспитал достойных сыновей

Ты – опора и поддержка своим близким

Но многое ещё впереди

Желаем тебе крепкого Здоровья на долгие годы, Успехов, неиссякаемой Энергии, Радостей, чтобы твои ещё ненаписанные труды побыстрее увидели свет,

А также посетить Китай, берег Слоновой Кости, острова Кука и т.д., и т.д.,
Воспитать внуков, выпивать умеренно, но регулярно,

Желаем тебе многия, многия лета!

8 сентября 2010 г.

Твои коллеги-ученики

Сизов В.Д., Матюшенко В.И., Карабулин А.В.



Поздравления от Альбины Провоторовой

Все мы знаем Евгения Борисовича прежде всего, как ТАЛАНТЛИВОГО УЧЕНОГО, положившего много сил служению науке.

Но ему хватает энергии и на то, чтобы быть ОБРАЗЦОВЫМ ХОЗЯИНОМ. В условиях нашей непростой действительности ему удалось построить, лично вникая во все строительные детали, чудесный дом для любимой жены и всей своей семьи.

А те, кому довелось одновременно с ним побывать на море, знают, что он ещё и НЕПРЕВЗОЙДЁННЫЙ ПЛОВЕЦ!

А ещё он БЛЕСТЯЩИЙ ШИРОКО ЭРУДИРОВАННЫЙ и ОСТРОУМНЫЙ РАССКАЗЧИК и просто очень хороший человек.

Учитывая все перечисленные достоинства юбиляра, позвольте вручить ему медаль, которую лично для него изготовил завод «Кристалл».

8 сентября 2010г.

Дорогие Дилечка и Женя!

Горячо поздравляю вас с великим семейным праздником – 50-летием совместной жизни! Такое торжество выпадает далеко не каждой паре. Признаюсь, за мою долгую жизнь я не встретила такой гармоничной пары. Вы просто созданы друг для друга. Вы – единое целое! Пользуюсь случаем признаться вам в любви и восхищении. Будьте здоровы и счастливы ещё долгие годы на радость вашим детям и внукам, а также любящим вас родным, близким и друзьям. Дорогие ЗОЛОТЫЕ ЮБИЛЯРЫ! Всего вам самого доброго!

3 сентября 2016г.



Реакция коллег, друзей, родных и близких на печальное известие

Первые отклики друзей и коллег на весть о внезапной кончине Евгения Борисовича в январе 2019 г. (The first reaction of friends and colleagues on the sad news about Eugene's passaway in January 2019)

«Е.Б. Гордон оставил необыкновенно яркий след в российской и мировой науке, был учёным широчайшей эрудиции, непререкаемым авторитетом. Его уход – пока неосознанная в полной мере потеря для Института, Черноголовки и всего научного сообщества». Сотрудники, коллеги, друзья.

«Он был лучшим из нас». Олег Рогозовский, один из киевских друзей, дружба с которыми длилась с юношества, Германия.

«Женя был гениальный физик с удивительной способностью связывать отдалённые, на первый взгляд не связанные вещи и понятия. Его изобретательность поражала. Но главное всё-таки – это его личность, Все, кто общался с ним (я не знаю исключений), попадали под обаяние его личности». Вадим Лехциер, киевский друг, США.

«Мы были первыми детьми, что дружили с первого сознательного возраста (4-х или 5-ти лет). Мы рано приехали из эвакуации, сразу, как освободили Киев». Валерий Фёдоров, киевский друг, США.

«Замечательный человек, замечательный и верный друг». Ира и Вадим Гомоны, киевские друзья, Германия.

«Его улыбка навсегда с нами...» Проф. Ю. Фрейман, Харьков, Украина.

«Eugene Gordon was an insightful scientist who generously shared his extensive experience in low temperature chemistry with other colleagues, such as our group in Göttingen». Prof. Peter Toennies, Germany. [«Евгений Гордон был проныцательным учёным и искусным экспериментатором, который щедро делился своим богатым опытом в исследованиях низкотемпературной химии с коллегами, в частности с нашей группой в Гёттингене. Его не хватает не только его жене Диле, двум его сыновьям, но и всему низкотемпературному сообществу. Мы потеряли не только лояльного коллегу, но и вдохновенного учёного». Проф. Питер Тоеннис, Германия, бывший директор института Макса Планка в Гёттингене].

«A critical mind with a very broad knowledge of physics and physical chemistry. At all times it has been a great intellectual – and often quite challenging – pleasure to discuss scientific (and worldly) matters with him. He was full of innovative ideas and very quick in estimating the pros and cons of a novel idea, clearly distin-



guishing the feasible from the unfeasible. His memory will persist through his many original publications and the know-how that his former colleagues and students have carried to the outside world». Prof. Antoine Weis, Switzerland. [«Критический ум с очень широкими познаниями в физике и физической химии. Обсуждать с ним научные (и общие) вопросы было во все времена большим интеллектуальным удовольствием, часто требующим напряжения ума. Он был полон новаторских идей и очень быстро оценивал плюсы и минусы новой идеи, чётко отделяя выполнимое от невыполнимого. Память о нем сохранится благодаря его многочисленным оригинальным публикациям и ноу-хау, которые его бывшие коллеги и ученики продолжают». Проф. Антуан Вайс, Швейцария].

«He was a wonderful, energetic man and a good friend. Not many people of his nature and brilliance». Prof. Isaak Silvera, Harvard, USA [«Он был замечательным, энергичным человеком и хорошим другом. Не много людей такой породы и такого блеска». Проф. Исаак Сильвера, Гарвард, США].

«Eugene was a great scientist and a great personality. I have very warm memories of both of you». Mika Pettersson, Finland [«Евгений был выдающимся учёным и выдающейся личностью. У меня самые тёплые воспоминания о вас обоих». Мика Петерсон, Финляндия].

«Eugene Gordon, a prominent scientist, both a chemist and a physicist. We met with him every year when he came to the US, and I highly enjoyed discussing with him his current research: each year there was something new and always exciting». Prof. E. Rashba, Harvard, USA [«Евгений Гордон был выдающимся учёным, как химиком, так и физиком. Мы встречались с ним каждый год, когда он приезжал в США, и мне очень нравилось обсуждать с ним его текущие исследования: каждый год было что-то новое и всегда захватывающее». Проф. Э. Рашба, Гарвард, США].

«He was so active, so full of ideas and plans – full of life!» Erna Rashba, USA [«Он был таким активным, полным идей и планов – полным жизни!». Эрна Рашба, США].

«Е. Гордон представлял собой редкий тип химика, прекрасно знающего физику (а может, наоборот). У него сохранился неподдельный интерес к новому в науке. От занятия наукой Евгений Борисович получал, по-моему, огромное наслаждение. На протяжении многих последних лет он был лектором (замечательным, с горящими глазами) на нашей ежегодной конференции “Проблема физики конденсированных сред и высоких давлений.” Е. Гордон был человеком огромной эрудиции и прекрасным рассказчиком. Отдельно хочется сказать о характере и чувстве юмора Евгения Борисовича – вокруг него всегда было весело и интересно». Академик В.В. Бражкин, Институт высоких давлений РАН.



«Женя всегда был человеком, которого я любил и которым восхищался». Проф. В.Н. Рыжов, Институт высоких давлений РАН.

«Неимоверной изобретательности учёный, весёлый и добрый человек». Чл.-корр. Национальной академии наук Украины М. Стржемечный, Харьков, Украина.

«He was such a remarkable person. So intelligent, warm and gracious. From the first time we met I marveled at his ability to generate creative new ideas and ways of seeing things anew». Prof. Michael Heaven, USA [«Он был таким замечательным человеком. Такой умный, тёплый и добрый. С первой встречи я поразился его способности генерировать новые творческие идеи и видеть вещи по-новому». Проф. Майкл Хевен, США].

«Женя был не только яркий учёный, он личность, таких редко встречаешь в жизни. Мы его любили, он в наших сердцах будет всегда». Лидия и Евгений Якуб, Одесса, Украина.

«Дядя Женя – замечательный. Мы очень любим вашу семью. А Вы с дядей Женей для меня пример идеальной, любящей друг друга пары. Душой и сердцем с Вами, ваша Света Керопян». С.-Петербург.

«Евгений Борисович был настолько замечательным, светлым человеком. Я безумно благодарна судьбе, что мне выпала возможность его узнать. Нам будет очень его не хватать». Наташа Рубцова, Москва.

«Это был выдающийся человек. А вы были такой светлой парой, что мы все всегда вами любовались». Таня Ростовщикова, д.х.н., МГУ.

«Он был большим учёным, обладал способностью генерировать неожиданные идеи и доводил их до реализации. И ещё он был замечательный человек, располагающий к доброму общению». Юрий Дмитриев, С.-Петербург, Физтех

«I had an image of a sturdy man for him and thought him to live much longer. Though we often meet at some conferences, I remember the tour to Tuapse with you very vividly.» Prof. Yuchi Okuda, Japan [«Он представлялся мне крепким, здоровым человеком, и я думал, что он проживёт гораздо дольше. Хотя мы часто встречались на разных конференциях, но поездка с вами в Туапсе запомнилась мне наиболее ярко». Проф. Юичи Окуда, Япония].

«I spent a couple of months with Eugene and Diliara in Kyoto on his sabbatical. Now I remember his wonderful personality with an image of him pressurizing liquid helium into solids. We learned a lot from him!» Tomonari Wakabayashi, Japan [«Я провёл пару месяцев с Евгением и Дилиарой в Киото во время его приезда для сотрудничества. Теперь, вспоминая эту замечательную личность, я представляю его превращающим жидкий гелий в твёрдый. Мы многому у него научились!» Томонари Вакабаяши, Япония].



«I have known Eugene Gordon for many years. He impressed me, once a young scientist, by his vast knowledge and experience in the field». Yuriy Dmitriev, St. Petersburg, Russia [«Я знаю Евгения Гордона много лет. Он порастил меня, когда я был ещё молодым учёным, своими обширными знаниями и опытом». Юрий Дмитриев, С.-Петербург, Россия].

«He was a very active member of the low-temperature community for several decades, extremely productive scientist and an outstanding personality. Many of you collaborated with him and enjoyed communication with Eugene for years». Prof. V. Fel'dman, Moscow state university [«Он был очень активным членом низкотемпературного сообщества в течение нескольких десятилетий, чрезвычайно продуктивный учёный и выдающаяся личность. Многие из вас сотрудничали с ним и получали удовольствие от общения с Евгением в течение многих лет». Проф. В. Фельдман, МГУ им. Ломоносова].

«We know Eugene Gordon for many years and he was really in the center of our community. Very active, very impressive, many new ideas, very good scientist and friend». Prof. T. Shabatina, Moscow state university [«Мы знаем Евгения Гордона много лет, и он был действительно в центре нашего сообщества. Очень активный, производящий очень сильное впечатление, много новых идей, очень хороший учёный и друг». Проф. Т. Шабатина, МГУ им. Ломоносова].

«Eugene Gordon was quite a special person and scientist». Prof. V. Ara Apkaryan, USA [«Евгений Гордон был особенной личностью и учёным». Проф. Ара Апкарьян, США].

«Для меня и нас всех Евгений Борисович – и учитель, и друг, был и будет». Евгений Маркин, Канада.

«Мы всегда любили Евгения Борисовича и как учёного, и как интересного собеседника, и просто человека!» Игорь и Лена Чернушевичи, Канада

«Eugene Gordon was not only eminent scientist, He was also person of vivid, fascinating personality. His very way of life, joy of it, always hearty smile, warm approach to people who He meet, made Him exceptional, remarkable individual. He was easy in engaging in close relationships, either on scientific matters or live experiences – of which He had plenty – swiftly linking the latter with contemporary events. Those were the qualities that made E.B. Gordon good spirit of all organized Cryocrystals and Quantum Crystals Conferences, always most expected, colorful personality». Prof. Andrzej Jezowski, Wroslaw, Poland [«Евгений Гордон был не только выдающимся учёным, но и живой, яркой личностью. Сам образ его жизни, радость, которую он получал от жизни, всегда сердечная улыбка, тёплый подход к людям, которых Он встречал, делали Его исключительным, замечательным человеком. Он легко вступал в доверительные отношения как по научным, так и общим вопросам, в которых у него был боль-



шой жизненный опыт, быстро связывая прошлое с современными событиями. Это были качества, которые делали Е.Б. Гордона человеком, который задавал дух на всех организованных нами конференциях по криокристаллам и квантовым кристаллам. Он был всегда самой ожидаемой, самой яркой личностью». Проф. Анджей Ежовски, Вроцлав, Польша].

«Eugene was a wonderful person. Seeing you both seemed a strong reason to be optimistic about the future of Russia and the world. He seemed to me a brilliant person that saw science and the world very clearly. His loss is a cruel event for us all. It makes me very sad». Peter MacGahan, USA [«Евгений был замечательным человеком. Встречи с вами обоими вселяли оптимизм в отношении будущего России и мира. Он казался мне блестящим человеком, который очень ясно видел науку и мир. Его потеря – жестокое событие для всех нас. Мне очень грустно». Питер Мак Гахан, США].

«Это очень большая потеря для всех, кто знал Евгения Борисовича и работал с ним. Он был прекрасным учёным, очень сильной личностью. Лично я многому научился у него и считаю себя его учеником». В. Хмеленко, College Station, USA.

«Женя для нас всегда был человек необыкновенного оптимизма, доброжелательного отношения к окружающим. Мы все знаем и высоко оцениваем его выдающиеся научные достижения. Его работы являются образцом мировой науки». Ольга и Игорь Морозовы, Институт химической физики РАН, Москва.

«Он был замечательный, умный, добрый, обладал чудесным чувством юмора. Совершенно не был заносчивым». Наталия Моисеева, ИОНХ РАН, Москва.



Семья



*Д.А. Гордон***Предки**

Мне хотелось бы рассказать о предках Жени, откуда он «пошёл бысть». Родителями Жени были Борис Ефимович Гордон и Эсфирь Ассировна Меламед.

Про родителей мамы известно немного. Неизвестно, откуда и из какой семьи был её отец Ассир Моисеевич Меламед, я только знаю, что это он купил в годы НЭПа квартиру, остатки которой после уплотнения были обменены на квартиру по адресу г. Киев, ул. Горького, д. 9, кв. 1, в которой Женя родился и вырос. Мама говорила, что он был мудрый и доброжелательный человек и пользовался большим уважением, люди приходили к нему советоваться, как быть, как поступить в той или иной ситуации, в которую они попадали. Он получил инженерное образование по химическому профилю, до войны был главным инженером лакокрасочного завода, который ему было поручено эвакуировать, когда началась война. Завод он эвакуировал, а сам не успел уехать, ждал выплаты денег, чтобы отправить их жене и дочери, которые с маленьким его внуком Женей (10 месяцев) должны были через Харьков эвакуироваться на восток страны. Перед этим всё, что у него было, он отдал



Родители Евгения Борисовича Гордона,
1938 г., Киев

жене сына, который был на фронте, она со вторым его внуком, которому было около двух лет, тоже эвакуировалась из Киева. С деньгами его обманули. Ассир Моисеевич не успел выехать из Киева до прихода немцев. Люди видели, как немцы вели его на расстрел.

Его жена, Женина бабушка, Берта Самуиловна Потяшкина, была из г. Радомышля в Украине, их было три сестры и брат. Они оказались гуманитарно одарёнными людьми. Брат стал художником, а сёстры были актрисами, играли в местном театре. Одна из них уехала учиться в Варшавскую консерваторию. С дочерью одной из сестёр Мэрой, двоюродной сестрой мамы, Женя дружил, она была всего на 10 лет старше, весёлая, заводная, доброжелательная. Её сын, т.е. троюродный брат Жени, и сейчас с семьёй живёт в Киеве.



У Ассира Моисеевича и Берты Самуиловны было двое детей – Эсфирь, Женина мама, и её брат, Моисей Асирович Меламед. Женина мама окончила химфак Киевского университета. До войны работала в институте химии АН УССР. После войны и до выхода на пенсию – заведующей аналитическим сектором заводской лаборатории Киевского завода «Красный резинщик». Мне очень повезло со свекровью. Это была красивая, очень добрая, весёлая, воспитанная и образованная женщина. Их с братом отличало врождённое благородство.

Её брат был инженер-строитель. В июне 1941 г. он ушёл на фронт, вернулся в конце 1945 г. Он был гвардии старшим лейтенантом инженерных войск, начальником штаба сапёрного батальона, участником Сталинградской битвы. Награждён двумя орденами Отечественной войны, орденом Красной звезды, медалями за оборону Сталинграда и Киева, взятие Будапешта и Вены, медалью за Победу.

Женя был единственный сын, а у дяди Моисея было два сына, Женины двоюродные братья. Один из них с семьёй с 1990-х живёт в Израиле, второй в Канаде. Они очень хорошо ко мне относятся и поддерживают меня. Особенно меня тронул своим вниманием Дан Меламед, проживающий в Нью-Йорке. Летом 2019 г., через полгода после Жениного ухода, он приезжал со своей очаровательной супругой Сарой в Россию и Украину. В Москве останавливались в гостинице Метрополь, приглашали нас с сыном в Большой театр, а весь следующий день провели в Черногловке.



Ассир Моисеевич Меламед и Берта Самуиловна Потяшкина, дедушка и бабушка Е.Б. Гордона с маминой стороны



Военная фотография Моисея Асировича Меламеда



В отличие от предков с маминой стороны о предках Жени со стороны отца имеются весьма обширные данные. Его бабушка Магдалина, мама отца, была дочерью купца Абрама Ильича Ашкинази, который родился ещё при жизни Пушкина в 1833 г. Он держал почтовый тракт от Броваров под Киевом до Вильно. На приведённой здесь фотографии прадед Жени Абрам Ашкинази и его жена Дебора со всей их многочисленной семьёй.



Маленький мальчик, стоящий справа во втором ряду в матросской форме – это Женин отец. Учитывая, что он 1910 г. рождения, фотография сделана где-то в 1914–15 гг. У прадеда Абрама было восемь детей – четверо мальчиков и четыре девочки. Кто-то из сыновей или внуков был управляющим у сахарозаводчика Бродского, после революции эмигрировал во Францию. Сын одной из дочерей Яша Берлинберг, говорят, был директором Ла Скала, женился на немке (полусидит между бабушкой Деборой и женщиной в белом платье). В семье была интересная ситуация: две дочери Абрама Ильича, Магдалина и Раиса, вышли замуж за двух братьев Гордонов, Ефима и Виктора, соответственно. Ефим и Магдалина и есть Женины дедушка и бабушка. Их расстреляли немцы в Бабьем Яру 29 сентября 1941 г. Вместе с ними были расстреляны один из братьев Магдалины, его дочь и сын.

Второй Женин прадед Илья Гордон, – отец деда Ефима Гордона, по-видимому, родился примерно в те же годы, что и Абрам Ашкинази. Он был че-





Две сестры Магдалина и Раиса Ашкинази.
Магдалина, бабушка Жени, слева. 1914 г.



Два брата Гордона Виктор (слева)
и Ефим, Женин дедушка.
Сидит их отец, Илья Гордон

ловеком Книги, сторонником Хаскалы, еврейского Просвещения, – движения, которое выступало за вливание евреев в Европу, принятие ценностей просвещения и роста образования в области светских наук, иврита и истории еврейского народа. Жил в Шостке, у меня есть фотография его дома. Это симпатичный и приличный деревянный дом, напротив был колодец с длинным журавлём. Они не были зажиточными. Я всегда недоумевала, почему купец отдал своих дочерей за молодых людей из небогатой семьи. Но наш старший сын, который интересуется историей и неплохо знает иудаизм, объяснил, что в еврейских семьях очень высоко ценились люди Книги. Похоже на правду: мы все знаем пример, как за бедного Марка Шагала отдали Бэлу, дочку богатого ювелира. Прадедущка Илья был три раза женат, первые две жены умерли. В общей сложности от трёх жён у него, кажется, было двенадцать-тринадцать детей, восемь из них от последней. Известно, что два сына от последней жены приняли христианство, поступили в высшие учебные заведения и получили инженерное образование. Женина мама всегда говорила, что Гордоны очень способные. По-видимому, так и было, потому что у многих была тяга к образованию. Одна из дочерей ещё в 1913 г. работала зубным врачом в Шостке.

У Ефима Гордона и Магдалины Ашкинази, Жениных бабушки и дедушки, было четверо детей: один из них младенцем обварился кипятком по недосмотру няни и умер. А трое сыновей: Лёля, Борис и Яков, рождённые в 1905, 1910 и 1912 гг., выросли, получили высшее образование. Лёля и Борис, Женин папа, закончили Киевский университет, а Яков – Харьковский инженер-



но-строительный институт по специальности Астрономо-геодезия (так написано в дипломе с отличием, вручённом в 1938 г.). Лёля умер молодым от тифа. Женин папа прожил долгую жизнь (1910–1997). Яков прожил 65 лет.

Оба брата, Борис и Яков, ушли на фронт в июне 1941 г. Борис был артиллеристом, командиром дивизиона полка, позже начальником штаба этого же полка. Ушёл лейтенантом, вернулся майором, награждён двумя орденами Отечественной войны, несколькими медалями. До войны работал в институте физики АН УССР. Защита его кандидатской диссертации была назначена на 28 июня 1941 г. Но 22 июня 1941 г. началась война и он ушёл на фронт. Вернувшись в конце 1945 г. с фронта, продолжил работу в институте физики АН УССР. В 1949 г. защитил кандидатскую диссертацию, а во время кампании 50-х годов против евреев был уволен из института как японский шпион: нашли в бумагах ссылку на японскую работу. Он долго не мог устроиться на работу, наконец, был принят заведующим отделом химических исследований в Научно-исследовательский институт судебной экспертизы в Киеве. Там он сумел сделать докторскую диссертацию и написать книгу.



Отец Борис Ефимович Гордон (1910–1997), известный химик, автор книги по спектроскопии «Спектральный эмиссионный анализ»



Брат отца Яков Ефимович Гордон (1912–1978), служил с 1941 по 1947 г. в военно-морских частях, после войны был комендантом в немецком городе Свинемюнде. С 1951 по 1978 г. был директором Николаевской обсерватории



Яков Гордон после окончания Харьковского инженерно-строительного института поступил в аспирантуру в Пулковскую обсерваторию. В 1941 г. ушёл на фронт. Я не знаю его званий и наград, знаю только, что служил в военно-морских войсках. Был назначен после окончания войны комендантом города Свинемюнде. Но по ходатайству Академии наук СССР был освобождён от должности и вернулся в Пулково продолжать работу над кандидатской диссертацией. После её защиты в 1951 г. был назначен директором Николаевской обсерватории в Украину. Он был на этой должности в течение 27 лет до скоропостижной смерти в 1978 г. Дядю Яшу все очень любили и уважали. У дяди Яши был единственный сын - тоже Женя Гордон (на два с половиной года старше моего Жени). Как видим, во многих семьях любят повторять имена. Он, к сожалению, скончался лет за пять до Жениного ухода.

У другой пары – Виктора Гордона и Раисы Ашкинази – было двое детей: Яков и Розалия. Из-за двойного родства (когда два брата женаты на двух сёстрах) дети от этих двух браков считаются родными. Таким образом, у Жениного папы кроме единоутробного брата Якова был ещё один брат Яков и сестра Розалия. Наиболее тесно родители общались с тётей Розой. Она была замужем за замечательным человеком, Яковом Яковлевичем Данильченко, который в сталинские времена служил заместителем министра геологии и спас многих сотрудников от увольнения и ареста. Мы не раз бывали в их квартире на Смоленской, а тётя Роза приезжала к нам в Черногоровку. Их дети, Алик и Лена, – Женины двоюродные брат и сестра. Лена унаследовала энергию и способности Гордонов. Она захотела, как и Женя, учиться на Физтехе и перешла туда из первого медицинского, где училась на биофаке. Алик пошёл по стопам отца, стал геологом.

Со вторым братом Яковом, которого все звали Шура, практически не было общения. Он с семьёй жил в г. Королёве Московской области. Я видела его только один раз на праздновании его девяностолетия в 1992 г. Помню, собралась многочисленная родня. Этот праздник ему устроил его внук, Дмитрий Гордон, сын старшего сына Ильи. Дмитрий Гордон – известный киевский журналист. И ему, на мой взгляд, передались способности и энергия Гордонов. Кроме этой встречи в 1992 г. я Диму никогда не видела. Были два опосредствованных случая общения. Первый раз – когда Женина мама, обнаружив в гардеробе старое пальто из добротного драпа, решила, что его надо перелицевать и сшить пальто своему внуку, нашему старшему сыну Серёже. Тогда, в 80-е годы, хорошие вещи были в дефиците. Поскольку мы жили далеко от Киева, мама решила, что на примерку можно попросить сходить Диму, он ведь всего на год старше нашего Серёжи. Маме казалось, что по комплекции они схожи. Это пальто Серёжа так ни разу и не надел, что и следовало ожидать, но старшее поколение, пережившее революции и войны, было бережливым и старалось вещи не выкидывать. Второй раз общались совсем недавно. Серёжа поехал 8-го марта 2020 г. в Киев и застрелял там из-за



пандемии, – и не просто застрял, а серьёзно заболел. Болезнь оказалась невероятно тяжёлой, и тем, кто считает, что паника поднята напрасно, я бы посоветовала быть поосторожнее. Я благодарна Диме и его папе за внимание, проявленное к Серёже.

У дяди Яши (Шуры), кроме сыновей Ильи и Эдика, как и у тёти Розы, есть дочь Лена (вот опять повторение имен!), она живёт в Королёве. У неё две дочери, с младшей из которых я дружу и очень люблю её. Кроме родных братьев и сестёр, папа общался ещё с двоюродной сестрой Авигаиль Ашкинази. Тётя Ава с семьёй в девяностые уехала из Киева в Израиль. Сейчас там живут две её дочери, Женины троюродные сёстры, с которыми я недавно виделась в свой последний приезд в Израиль уже без Жени, я их люблю.

Я пришла в семью Жени в 1966 г. Родители Жени были интеллигентные, образованные, доброжелательные люди. Они очень хорошо меня приняли и всегда очень тепло относились. Я никогда не ощущала, что они недовольны, что я другой национальности, не только не их, но даже не имею отношения к «большому брату». За все годы нашего общения я ни разу не слышала, чтобы они говорили на идише, а ведь, родившись до революции в еврейских семьях, они должны были бы знать его. Я уже упоминала, что Женин отец происходил по мужской линии из семьи хаскальников, сторонников ассимиляции и светского образования. Он считал, что нужно стараться перенять все лучшие черты русской интеллигенции: воспитанность, приличные манеры, порядочность, образованность и благородство.

Во время военных сборов в 1939 г., которые проходили под Киевом, он познакомился с Николаем Дмитриевичем Соколовым, видным учёным, физиком-теоретиком, который позже возглавлял теоретический отдел в Институте химической физики АН СССР (ныне ИХФ РАН им. Н.Н. Семёнова). Они подружились и пронесли эту дружбу через всю жизнь. Николай Дмитриевич происходил из дворянской семьи. Высокий, статный красавец с великолепными манерами, воспитанный, образованный, глубоко порядочный, он был в глазах отца образцом русского интеллигента. Его жена Лидия Прокопьевна тоже происходила из дворянской семьи. Её отец занимал такую же должность, как отец В.И. Ленина: он был директором народных училищ Таврической губернии (Крым). Врангель давал ему возможность покинуть с семьёй Крым, но он отказался. Лидия Прокопьевна рассказывала, что к ним однажды ворвались революционные матросы, кто-то крикнул: «расстрелять его», но какой-то матросик сказал: «Стойте, это же наш учитель». У замечательного писателя В.В. Вересаева есть рассказ об этой семье.

Женина мама всегда ставила Николая Дмитриевича в пример Жене на предмет того, как надо одеваться, сидеть за столом, держать себя. Женя очень любил Николая Дмитриевича, но очень не любил, когда мама его укоряла за отсутствие светских манер, присущих Николаю Дмитриевичу. Женя был совершенно другого склада человек. Он мало внимания уделял костюму



и манерам. Именно этой черте характера соответствует его замечательный ответ: «Не мешай мне думать!», когда я его попросила почистить ботинки, увидев утром перед уходом на работу сидящим в прихожей, действительно, с сосредоточенным видом и одевающим ботинки, которые я, к сожалению, не успела почистить. Таких историй наберётся немало.

Николай Дмитриевич очень радовался Жениным успехам. Он был в списке учёных, которым Нобелевский комитет доверял выдвижение кандидатур на Нобелевскую премию. Николай Дмитриевич считал, что цикл Жениных работ по низкотемпературным исследованиям заслуживает выдвижения на Нобелевскую премию, и делал это.

Женина мама была очаровательная, добрая, весёлая, красивая, очень непосредственная и искренняя женщина. Мама, конечно, уважала и поддерживала папины взгляды на многие вещи. Но была в этой хрупкой, маленькой женщине черта, которая отличала её от него, за которую я её безмерно уважала. При всём приятии всего замечательного из русской жизни и культуры, она никогда не забывала свой народ. Очень была предана ему, любила, сопереживала страданиям, испытанным им. Надо сказать, она и сама настрадалась. Она родилась в 1913 г. и ещё застала погромы евреев в Киеве. Рассказывала, как они дрожали от страха, слыша душераздирающие крики, их спасло только то, что они жили на пятом этаже, и до них погромщики не добирались. Её папу, свёкра, свекровь расстреляли немцы в 1941 г.

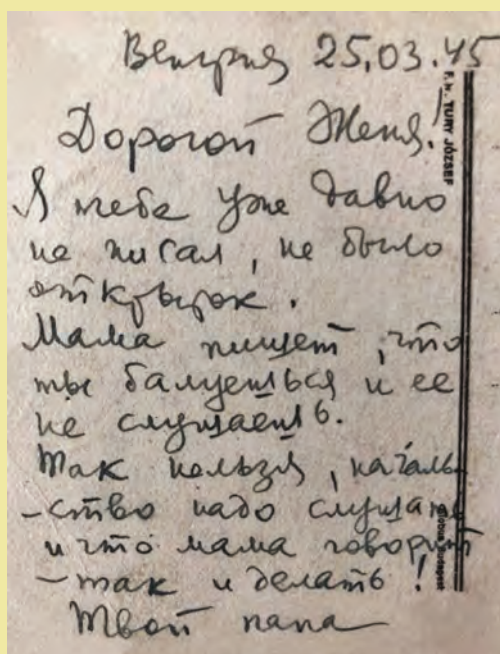
Женя перенял от мамы эту преданность, уважение к своему народу. Он никогда никому не спускал и дрался отчаянно много раз за «жидовскую морду». Помню, когда после нашего первого байдарочного похода по реке Тетерев в 1967 г. мы прибыли в Киев и повели наших друзей Никитиных, с которыми были в походе, во Владимирский собор, расписанный Врубелем и Васнецовым, к Жене подошёл человек и сказал, что жидам здесь не место и что мало вас Гитлер расстрелял. Женя немедленно врезал ему. Толя Никитин тоже поучаствовал в потасовке. Мне кажется, Женя взял не только способности Гордонов, но и мудрость дедушки Ассира Меламеда. Он всегда имел своё мнение на события, свою оценку. Как правило, они бывали верными, хотя и частенько не совпадали с общим мнением. Женя не был максималистом, разве что только атеистом был последовательным. Помню, когда мы, вдохновлённые перестройкой, приветствовали Ельцинские перемены и возлагали на них большие надежды, Женя говорил, что надо прежде всего об экономике думать и идти другим путём, возможно, китайским.

Я благодарна судьбе, что попала в эту замечательную семью образованных, интеллигентных, порядочных, умных и доброжелательных людей. Благодарна всем нашим с Женей родным, которые были рядом с нами и в радости, и в горе в течение всей нашей с ним жизни и продолжают сегодня быть рядом со мной и нашими детьми, поддерживая нас.





Мать – Эсфирь Ассировна Меламерд (1913–1995), химик, была заведующей аналитической группой на заводе «Красный резинщик», где Евгению Борисовичу пришлось два года работать слесарем.



Эту открытку отец прислал с фронта.



С мамой, 1960 год





Детская фотография



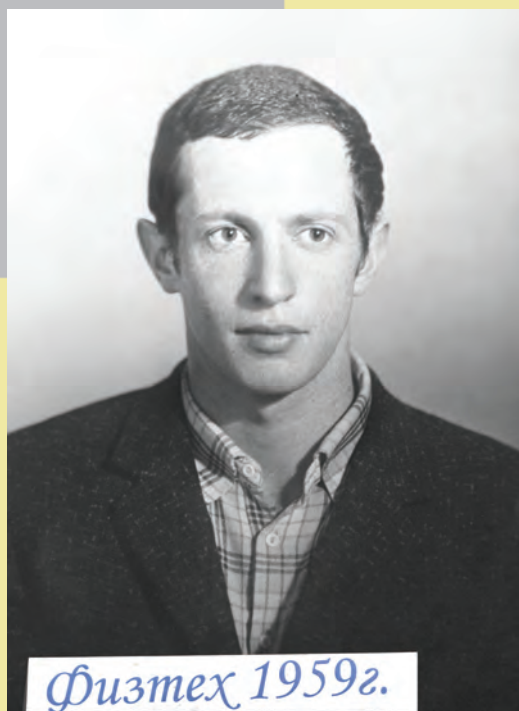
В детском саду.

Из воспоминаний Валерия Федорова: «Просто искал одну единственную фотографию из моего детства, на которой совершенно невозможно ошибиться, где Женя, а где я.

Мы уже тогда носили звёзды лейтенантов не на погонах, а на груди».

Женя Гордон – второй слева во втором ряду.





Регистрация брака 3 сентября 1966 г.



Поход на Урал с О. Копелевичем
и И. Михайловым, лето 1964 г.



В лаборатории, середина 1960-х гг.





Защита докторской диссертации, февраль 1981 г.



Слева направо: Н.Н. Семёнов, В.Л. Тальрозе, Е.Б. Гордон





С сыном Серёжей, весна 1969 г.



Соревнования между институтами,
Черноголовский спорткомплекс, 1970-е гг.

Слева направо: Е.Б. Гордон,
В.И. Матюшенко, И. Леднев,
Б. Кудряшов



В горах Кавказа после защиты докторской
диссертации. Весна 1981 г.





Банкет после защиты докторской диссертации.
На переднем плане – М.В. Алфимов, И. Батеха.

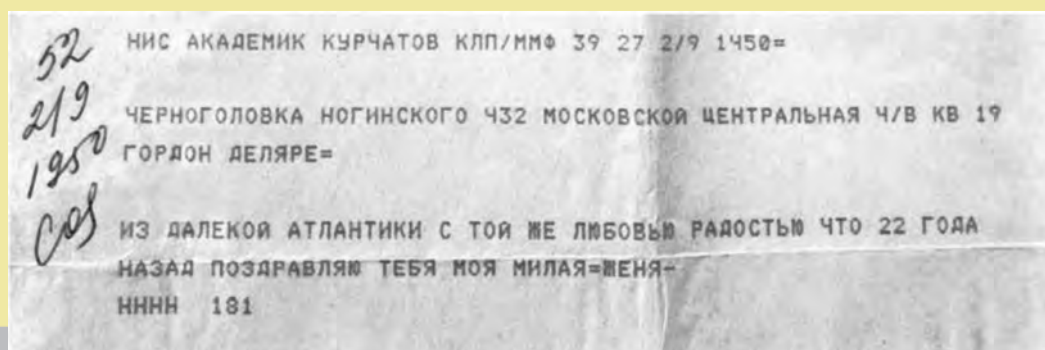


С женами сотрудников на каком-то празднике





Плавание на Научно-исследовательском судне «Курчатов», 1988 г.
Рядом с Евгением Борисовичем (стоит третий справа) –
руководитель экспедиции Олег Викторович Копелевич.



Телеграмма, которую Евгений Борисович прислал супруге в день годовщины свадьбы,
когда плавал на научном судне «Курчатов»





Португалия, 1988 г., одна из четырех остановок во время плавания на «Курчатове».

Слева направо: С.Е. Наливайко,
Е.Б. Гордон, В.Г. Егоров



Остановка в Лиссабоне, Португалия, 1988 г.

Будьте бдительными, впервые посещая
страну капиталистического лагеря!



Поход с Никитиными по реке Белой в 1989 г.





Антуан Вайс, Диляра Гордон,
Сильвия Вайс. Лейден, 2000 г.



Эту медаль подарил Евгению Борисовичу
друг юности, с которым они мечтали
поступать в Ленинградскую мореходку
(Е.Б. не прошел комиссию
из-за дальтонизма)



Празднование 50-летия Евгения Борисовича. Слева направо: О.В. Копелевич,
Т.Ф. Никитина, А.И. Никитин, Е.Б. Гордон, Д.А. Гордон





Кажется, Евгений Борисович
с чем-то не согласен



Е.Б. Гордон с А.Ф. Додоновым (справа)



Сидят слева направо: Е.Б. Гордон, И.К. Ларин, О.В. Копелевич.
Во втором ряду американские коллеги





Е.Б. Гордон с Анджеем Ежовски



На переднем плане Я. Питер Тоеннис, конференция по криокристаллам и квантовым кристаллам. Вроцлав, 2008 г.





Володя Мацаев у нас в Бонне, 15.09.1996.
Фотография из архива В. Лина

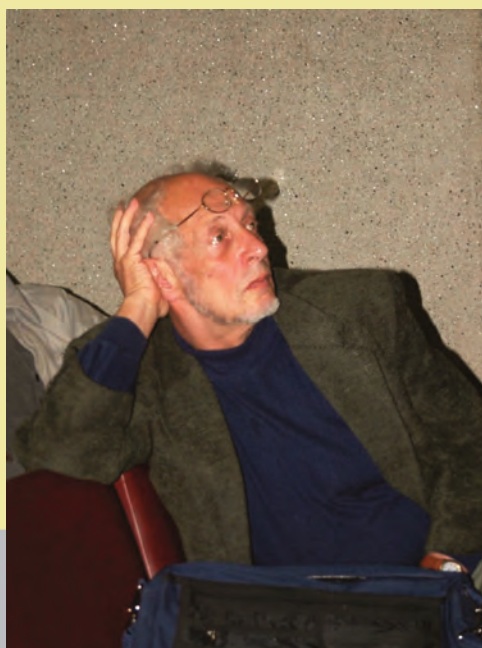


Евгений Борисович с Андреем Дробышевым (слева), организатором конференции
по криокристаллам и квантовым кристаллам. Алма-Ата, 2014 г.





«Почетные казахи» (члены оргкомитета) конференции по криокристаллам и квантовым кристаллам. Единственный «не казах» – А.С. Дробышев, организатор конференции. Алма-Ата, 2014 г.



Оппонирование диссертации
А.А. Левченко.
Фотография из архива В. Ефимова



С В.Е. Фортовым (слева) на юбилее
Е.Б. Гордона в 2010 г.





На праздновании юбилея А.Ф. Додонова, 1989 г.



Эйлат, май 2018 г.





На дни проведения конференции «Динамика атомно-молекулярных процессов», организаторами которой были В.И. Ошеров (слева) и Е.Б. Гордон, выпал день рождения Владимира Иосифовича



Участники российско-японского совещания по квантовым эффектам в низкотемпературных химических реакциях, 1992 г., Черноголовка. Первый ряд слева направо: А.Ф. Шестаков, О.Ф. Пугачев, Е.Б. Гордон, В.И. Гольданский, Т. Фуэки, К. Сато, Г.Б. Сергеев





Профессор Накамура – участник российско-японского совещания по квантовым эффектам в низкотемпературных химических реакциях, 1992 г., Черноголовка



Участники российско-японского совещания по квантовым эффектам в низкотемпературных химических реакциях, 1992 г., Нагойя.
В первом ряду: крайний справа Т. Миязаки, третий справа Е.Б. Гордон, пятый справа К.И. Замараев, четвертый слева В.Л. Тальрозе





Слева – Тетсуо Миязаки, организатор японско-российских встреч с японской стороны, с российской стороны организатором был Е.Б. Гордон. Считается, что если закрасить глаз этому божеству, то начатое дело завершится удачей.



На фотографии слева: профессор Мичио Таками, его супруга Йоко и Дильяра Гордон.
Справа: Е.Б. Гордон, Йоко и Дильяра Гордон, Япония, 1998 г.





Е.Б. Гордон с Д.А. Гордон,
весна 2002 г., Япония.



В гончарной мастерской. Япония, 2002 г.



Тошико – жена Я. Аратоно, ?, Инори - дочь Я. Аратоно,
Е.Б. Гордон, Д.А. Гордон, ?, Я. Аратоно





В гостях у профессора Джорджо Фроссати (слева). Лейден, 1999 г.





Е.Б. Гордон с женой выдающегося ученого Е.Л. Франкевича Лилей в Японии. Франкевичи были в Нагое по приглашению поработать, а Евгений Борисович – как организатор и участник российско-японской встречи. 1992 г.



Е.Б. Гордон с Я. Аратоно, Япония, 2002 г.





Пикник с сотрудниками лаборатории атомного центра, где Е.Б. Гордон работал весной 2002 г., Япония. Справа налево: Е.Б. Гордон, Я. Аратоно, в центре – Т. Кумада



Поход в горы с сотрудниками лаборатории, куда был приглашён поработать Евгений Борисович. Слева направо: Т. Момоза, ?, Т. Шида, ?, Д.А. Гордон, Е.Б. Гордон, Киото, осень 2002 г.





Слева направо: Хелия (жена Юлия), сын Юлий, профессор И. Сильвера,
Е.Б. Гордон, Д.А. Гордон, Бостон, 2009 г.



Профессор Исаак Сильвера с женой Лили, сыном и дочерью





Е.Б. Гордон (слева) с японским профессором Юичи Окуда, пляж пансионата МГУ «Буревестник» близ Туапсе, 2007 г.



Евгений Борисович выступает с докладом на симпозиуме «Современная химическая физика». Пансионат «Маяк», Шепси, 2014 г.



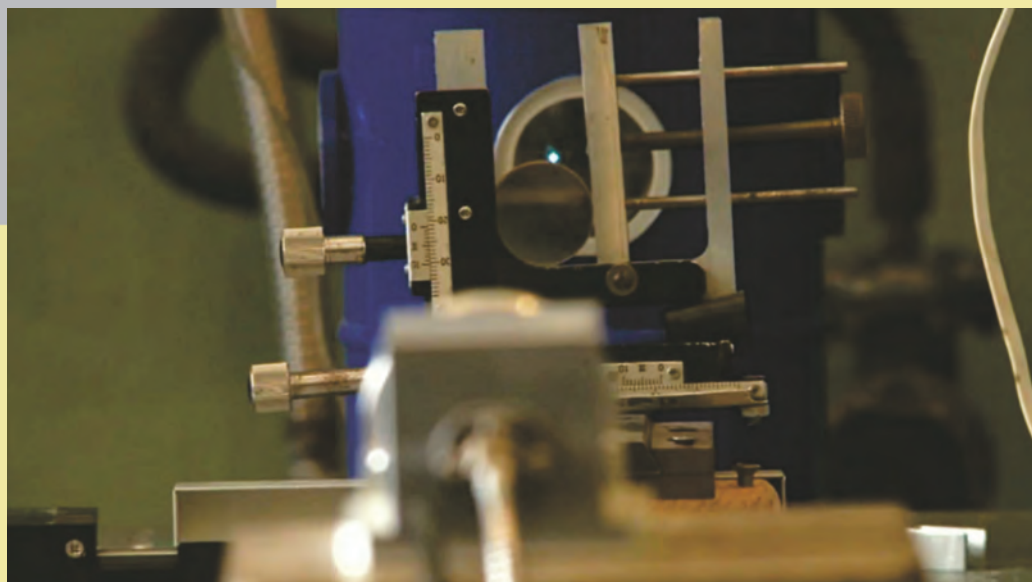


На пляже пансионата «Буревестник», часы досуга во время симпозиума. Евгений Борисович обычно подсаживался к группе участников и завладевал её вниманием – это были или байки, или обсуждение докладов



Слева направо: Е.Б. Гордон, Ю.Н. Молин, М.В. Воеводская





Экспериментальная установка для изучения свойств наноразмерных металлических проволок, образующихся в жидком гелии. Кадр из выпуска программы «Черные дыры, белые пятна» на телеканале «Культура» 22 марта 2018 г.



Сотрудники исследовательской группы, возглавляемой Е.Б. Гордоном – В.И. Матюшенко и М.Е. Степанов (слева). Кадр из выпуска программы «Черные дыры, белые пятна» на телеканале «Культура» 22 марта 2018 г.





Сотрудники исследовательской группы,
возглавляемой Е. Б. Гордоном:
Слева направо: В.Д. Сизов,
А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко



Геттинген, Германия. Крайний слева – А. Вилесов





Евгению Борисовичу нравился его портрет,
нарисованный художником
Леонидом Балаклавом



1983 г., Юлику 6 лет. Евгений Борисович
очень любил эту фотографию и взял ее
с собой в плавание на «Курчатове»



Сыну Юлию 1,5 года



Сыновья Сергей и Юлий, 2000-е гг.





Со старшим внуком Лёвой, 2002 г.



Евгений Борисович с внуком Артином.
Черноголовка, сентябрь 2016 г. Артин приехал
с родителями на празднование золотой свадьбы
Евгения Борисовича и Дилары Ахметовны



Евгений Борисович
с Диларой Ахметовной,
конференция по квантовым кристаллам и
криокристаллам, Финляндия, 2016 г.





Евгений Борисович с Дилярой Ахметовной, Бостон, 2006 г.
Фото из архива И. Сильверы



Е.Б. Гордон, Д.А. Гордон.
Имитация скульптуры В И. Мухиной
«Рабочий и колхозница».
Пуэрто-Рико, крепость
в Сан-Хуане, 2014 г.



Е. Гордон, Надя Мацаева,
Д. Лехциер (справа).
Филадельфия, США





С сыновьями в мангровом лесу, где находится птичий заповедник.
Пуэрто-Рико, 2014 г.



В доме Гордонов у камина с Тамарой и Верой Никитиными, январь 2009 г.





От составителя:

У моих родителей было девять внуков. Из них только одна девочка.
 На фотографии слева направо во втором ряду: Юлик Гордон, Альберт Гареев,
 Серёжа Гордон, Наиль Гареев. В первом ряду два Рустама Гареевых.
 Отсутствуют двое – Ильдар Жандарев и Марат Гареев.



Старший сын Е.Б. Гордона Сергей сфотографировался с японскими гейшами





Евгению Борисовичу очень нравилась эта фотография. Сын Юлий, внуки Лёва и Артин, внучатая племянница Дина.



Празднование 70-летия Е.Б. Гордона.
Слева направо: Е.Б. Гордон,
сын Юлий, Н.С. Гуцева

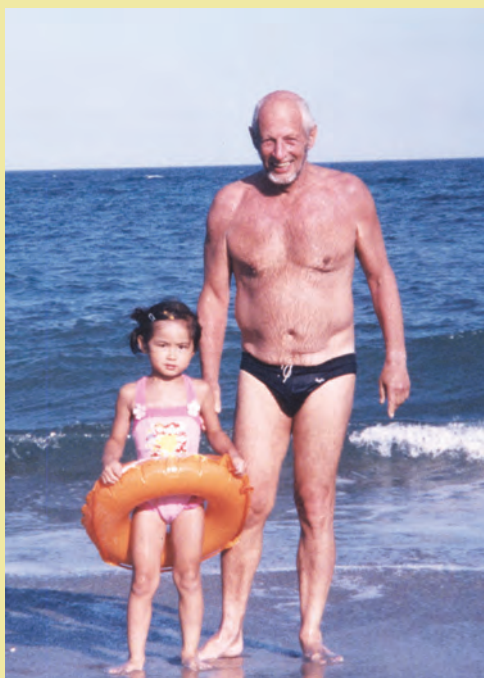


Евгений Борисович и Диляра Ахметовна Гордон с гостями
отмечают золотую свадьбу 3 сентября 2016 г.





С Анечкой, внучкой Никитиных.
Фотография от 4 ноября 2018 г.,
на праздновании бриллиантовой свадьбы
Т.Ф. и А.И. Никитиных



На берегу океана Евгений Борисович
сфотографировался с японской девочкой,
родителям которой предложил
поучить её плавать. И родители,
и девочка согласились



Интересно, чем он увлек этих молдавских сельских мальчишек? 1967 г.





Евгений Борисович на одной из конференций не упустил возможности поплавать, где никто не отважился, ледяная горная река



Евгений Борисович на одном из заседаний Ученого Совета (первый во втором ряду)





Сын Серёжа, Киев, 2015 г.



Сын Юлий со своим старшим сыном
Артином. 2014 г.



Сын Юлий со старшим и младшим
сыновьями Артином и Шаяном –
внуками Евгения Борисовича



Старшему внуку Леве 3 года. 1998 г.





Внуки Е.Б. Гордона – Лев...



... Артин и маленький Шаян



Младший сын Юлий с супругой и детьми





Родные из Татарии подарили
тюбетейку на 70 летие.
Перед правоверным «мусульмани-
ном» энциклопедия, которую пода-
рил юбиляру друг О.Копелевич



Тимна, копи царя Соломона, 2015 г.





Е.Б. Гордон выступает в программе «Черные дыры. Белые пятна»
на телеканале «Культура»



Кажется, и Евгения Борисовича кто-то озадачил





С другом по дороге на Физтех



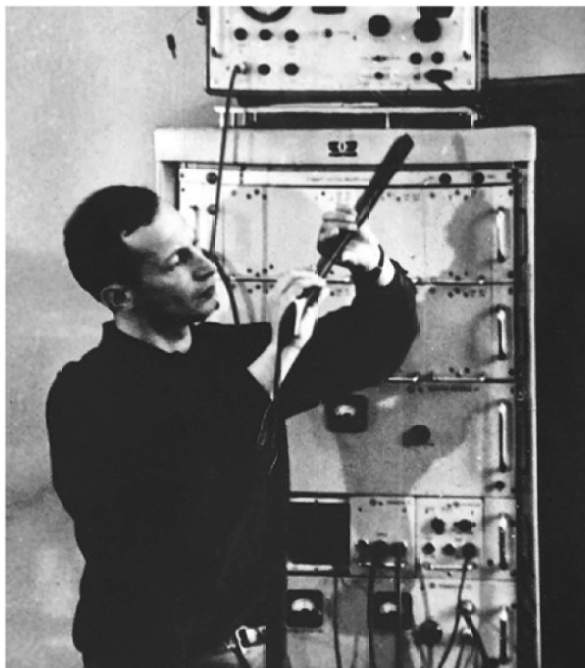
Отец и сын – участники конференции по спектроскопии, Коламбус, США, 2002 г.



МФИ- альма-матер отца и сына. На фото – сын Юлий



Научное наследие



Избранные статьи Е.Б. Гордона

а. Конденсация атомов в сверхтекучем гелии

Е.Б. Гордон, Л.П. Межов-Деглин, О.Ф. Пугачёв. Стабилизация атомов азота в сверхтекучем гелии. *Письма в ЖЭТФ*, **19** (1974) 103–106. (стр. 293)¹⁾

Е.Б. Гордон, А.А. Пельменев, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. Атомы водорода и дейтерия, стабилизированные конденсацией атомного пучка в сверхтекучем гелии. *Письма в ЖЭТФ*, **37** (1983) 237–239. (стр. 297)

б. Измерение скоростей химических реакций в водородном лазере

Е.Б. Гордон, Б.И. Иванов, А.П. Перминов, А.Н. Пономарёв, В.Л. Тальрозе, С.Г. Хидиров. Измерение сечений спинного обмена атомов H ($F=1$, $m_F=0$) на парамагнитных молекулах O_2 , NO и NO_2 в температурном интервале 310–390 К. - *Письма в ЖЭТФ*, **17** (1973) 548–551. (стр. 300)

E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, E.S. Medvedev, A.N. Ponomarev, V.L. Tal'roze. Investigation of chemical reactions $H + H_2$ and $H + D_2$ by a hydrogen maser. *Chemical Physics*, **8** (1975) 147–157. Reprinted with permission from Elsevier. (стр. 304)

E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, V.E. Balalaev. A measurement of formation rates and lifetimes of intermediate complexes in reversible chemical reactions involving hydrogen atoms. *Chemical Physics*, **35** (1978) 79–89. doi: 10.1016/0301-0104(78)85194-5. Текст отсутствует.

E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, V.E. Balalaev, A.N. Ponomarev, V.V. Filatov. Measurement of rate constants of hydrogen atom exchange with vibrationally excited H_2 , HD , and D_2 molecules. *Chemical Physics Letters*, **58** (1978) 425–430. doi: 10.1016/0009-2614(78)85067-2. Текст отсутствует.

с. Максимальная температура, достижимая в химических реакциях

Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, С.И. Светличный, Ю.Б. Шекк, В.М. Васильев, В.Л. Тальрозе. О максимальных температурах, достижимых в химических реакциях. *Физика горения и взрыва*, **№2** (1980) 66–73. (стр. 319)

д. Химическая лампа Гордона

Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, В.С. Павленко. Импульсное фотоиницирование взрывной реакции окисления сероуглерода. *Кинетика и катализ*, **21** (1980) 1406–1411. (стр. 327)

Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов. О природе самоускорения цепной разветвлённой реакции окисления сероуглерода. *Физика горения и взрыва*, **№2** (1980) 62–66. (стр. 334)

Е.Б. Гордон, С.Е. Наливайко, В.С. Павленко. Химический лазер на разветвлённо-цепной стадии реакции окисления сероуглерода. *Квантовая электроника*, **9** (1982) 171–174 [English edition: E.B. Gordon, S.E. Nalivai'ko, V.S. Pavlenko. Chemical laser utilizing the branched-chain stage of the oxidation of carbon disulfide. *Sov. J. Quantum Electron*, **12** (1982) 112–114]. doi: 10.1070/QE1982v012n01ABEH005427. (стр. 339)

1) Здесь и далее: номер страницы в данной книге



е. *Химические лазеры*

Е.Б. Гордон, В.В. Горохов, В.И. Матюшенко, В.И. Карелин, А.И. Павловский, П.Б. Репин, В.Д. Сизов. Электроразрядный химический $\text{H}_2\text{-F}_2$ -лазер с высоким КПД. *Квантовая электроника*, **13** (1986) 2534–2535. (стр. 344)

ф. *Фотоассоциация атомов Хе и Cl в газовой фазе*

E.B. Gordon, V.G. Egorov, S.E. Nalivaiko, V.S. Pavlenko, O.S. Rzhevsky. The theoretical and experimental distinguishing of photoassociation into the XeCl(B) state. *Chemical Physics Letters*, **242** (1995) 75–82. doi: 10.1016/0009-2614(95)00721-f. Текст отсутствует

г. *Утилизация UF_6*

Е.Б. Гордон, В.А. Дубовицкий, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, Ю.А. Колесников. Восстановление гексафторида урана атомарным водородом. *Кинетика и катализ*, **47** (2006) 151–160 [English edition: E.B. Gordon, V.A. Dubovitskii, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, Y.A. Kolesnikov. Uranium hexafluoride reduction with hydrogen atoms. *Kinetics and Catalysis*, **47** (2006) 148–156]. doi: 10.1134/s0023158406010204. (стр. 347)

Е.Б. Гордон, Ю.А. Колесников, А.Г. Чернов, *Способ восстановления гексафторида урана. Патент на изобретение RU 2204529 C2, 20.05.2003. Заявка № 2001108186/12 от 28.03.2001.* (стр. 362)

h. *Физическая лампа Гордона*

E.B. Gordon, A. Usenko, G. Frossati. Embedding impurities into solid helium. *Journal of Low Temperature Physics*, **130** (2003) 15–23. (стр. 367)

Е.Б. Гордон, Д. Фроссати, А. Усенко. Электронное возбуждение матрицы при дрейфе избыточных электронов через твёрдый ксенон. *ЖЭТФ*, **123** (2003) 962–974. (стр. 373)

E.B. Gordon, B.M. Smirnov. Free electron in compressed inert gases. *ЖЭТФ*, **134** (2008) 322–329. (стр. 390)

E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, B.M. Smirnov. Low-temperature electrical discharge through solid xenon. *Физика низких температур*, **34** (2008) 1203–1211 [English edition: *Low Temperature Physics*, **34** (2008) 952–959]. doi: 10.1063/1.3009594. (стр. 401)

i. *Нанопроволоки и нанокластеры в сверхтекучем гелии*

E.B. Gordon, Y. Okuda. Catalysis of impurities coalescence by quantized vortices in superfluid helium with nanofilament formation. *Физика низких температур*, **35** (2009) 278–283. (стр. 414)

P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Grobety, C. Neururer, E.B. Gordon, A. Weis. Nanowire formation by gold nano-fragment coalescence on quantized vortices in He II. *EPL (European Physics Letters)*, **90** (2010) 34002. Reprinted with permission from the EPL Editorial office. (стр. 422)

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Structure of metallic nanowires and nanoclusters formed in superfluid helium. *ЖЭТФ*, **112** (2011) 1061–1070]. (стр. 429)



Е.Б. Гордон. Влияние сверхтекучести на конденсацию примесей в жидком гелии. *Физика низких температур*, **38** (2012) 1320–1328. (стр. 443)

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, M.I. Kulish, V.I. Matyushenko, M.E. Stepanov. Coagulation of metals in superfluid and normal liquid helium. *Journal of Physical Chemistry A*, **121** (2017) 9185–9190. doi: 10.1021/acs.jpca.7b08645. Текст отсутствует.

E.B. Gordon, M.E. Stepanov, M.I. Kulish, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, I.I. Khodos. The nanowires growth by laser ablation of metals inside rotating superfluid helium. *Laser Physics Letters*, **16** (2019) 026002. (стр. 455)

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, M.E. Stepanov, I.I. Khodos. Preparation of quasi-one-dimensional metal heterostructures by simultaneous ablation of two targets over superfluid helium surface. *High Energy Chemistry*, **54** (2020) 164–169. (стр. 464)

j. Нанокатализ

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, T.N. Rostovshchikova, S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva, E.V. Golubina. Application of Au-Cu nanowires fabricated by laser ablation in superfluid helium as catalysts for CO oxidation. *Gold Bulletin*, **48** (2015) 119–125. (стр. 470)

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Production of ultrathin nanowires from refractory metals (Nb, Re, W, Mo) by laser ablation in superfluid helium. *Laser Physics Letters*, **12** (2015) 096002. doi: 10.1088/1612-2011/12/9/096002. (стр. 480)

Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, Т.Н. Ростовщикова, С.А. Николаев, Е.С. Локтева. Квази-1D металлы (Pd, Pt, Nb) как катализаторы окисления СО. *Теоретическая и экспериментальная химия*, **52** (2016) 75–83 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, T.N. Rostovshchikova, S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva. Quasi-1D metals (Pd, Pt, Nb) as catalysts for oxidation of CO. *Theoretical and Experimental Chemistry*, **52** (2016) 75–84]. doi: 10.1007/s11237-016-9453-y. (стр. 490)

k. Криокристаллы в космосе

E.B. Gordon, *Cryocrystals in the space: Low temperature evolution of interstellar dust*, in 12th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals. August 26–31, 2018: Wrocław, Poland. (стр. 501)



*а) Конденсация атомов в сверхтекучем гелии***СТАБИЛИЗАЦИЯ АТОМОВ АЗОТА В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ***Е.Б. Гордон, Л.П. Межов-Деглин, О.Ф. Пугачев*

Письма в ЖЭТФ, 19 (1974) 103–106

Показано, что стационарная концентрация атомов азота при их стабилизации в сверхтекучем гелии превышает 1,6%. Особенности рекомбинационного излучения позволили оценить энергию активации рекомбинации 0,1 ккал/моль и выдвинуть предположение о тепловом взрыве твердых крупинок азота при переходе λ -точки.

Целью настоящей работы было выяснить, является ли реакция рекомбинации атомов активированным процессом (т.е. требуется ли для ее осуществления подвод тепла извне) и, следовательно, ответить на вопрос, возможна ли, хотя бы в принципе, стабилизация больших концентраций атомов при приближении температуры к абсолютному нулю. В прошлом многочисленные эксперименты по вымораживанию атомов из разряда на подложку при 4,2 К (см. обзоры [1, 2]) привели к убеждению, что концентрации стабилизированных атомов не превышают десятый долей процента. Аналогичные результаты получены и в опытах по радиационному накоплению атомов в твердых молекулярных веществах [1–3]. Развитые теории [4–8] связывали существование предельной концентрации атомов с неустойчивостью по отношению к тепловому взрыву (процесс рекомбинации полагался неактивированным, а диффузия атомов в матрице – активированной). Однако, как показал анализ, описанные в литературе эксперименты были выполнены фактически при температуре в десятки градусов К: в момент осаждения температура подложки возрастала до ~20 К [2]; еще более высокую температуру имели «горячие точки» при радиационном накоплении [1–3]. Существенное понижение температуры в области интенсивного слипания атомов может привести к значительному увеличению их стационарных концентраций как из-за стабилизации атомов в более мелких ловушках матрицы, таки вследствие проявления гипотетической энергии активации процесса рекомбинации.

В рамках известных методик значительное понижение температуры в области интенсивного слипания принципиально невозможно. Поэтому мы решили, вводить атомы в виде пучка внутрь охлажденного жидкого гелия через его поверхность. Такой метод позволил бы сразу: 1) уменьшить температуру наблюдения до $1,2 \div 1,5$ К, 2) термализовать атомы перед их приходом в область интенсивного слипания, 3) обеспечить возможность работы с большими потоками (10^{20} частиц/сек и более) благодаря эффективному теплосъему в сверхтекучем гелии.

Для реализации этого Метода было совершенно необходимо создание направленного пучка, непосредственно подходящего к поверхности жидкости: в противном случае атомы уносились бы интенсивным восходящим потоком испаряющегося гелия. Весьма неожиданным оказалось, что истечение теплого (100–200 К) газа из малого отверстия в холодный (1,5–3,0 К) гелиевый газ под влиянием небольших градиентов давления ($\Delta P = P_{\text{He}}$ приводит к образованию ярко выраженного пучка.



Это связано с тем, что на порядки более плотный холодный гелий «обжимает» струю теплого газа за счет теплопередачи, как это имеет место в пламени газовой горелки. (Возможность введения направленных-газовых пучков в жидкий гелий представляет, как нам кажется, и самостоятельный интерес).

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Эксперименты проводились в основном с атомами азота, что связано с удобством наблюдения рекомбинации по хемилуминесценции в видимой области. Атомы получались диссоциацией молекул N_2 в безэлектродном ВЧ разряде, разрядная трубка охлаждалась жидким азотом. Для более полной диссоциации молекул N_2 в ВЧ разряде ($f = 40$ МГц, $p = 80$ Вт) использовались сильно разбавленные гелием смеси – $[N_2]:[He] = 1:20 + 1:1000$. Полный поток газа менялся от 10^{18} до 10^{20} частиц/сек (выходное отверстие разрядной трубки $\sim 0,75$ мм). Расстояние между источником и поверхностью гелия в верхнем стакане варьировалось в пределах $2 \div 5$ см.

Основные экспериментальные результаты состоят а следующем.

1) Оказалось возможным вплоть до давления 20 Тор подводить хорошо сформированный пучок¹⁾ непосредственно к поверхности HeII. Он хорошо виден из-за яркого рекомбинационного свечения. При расстоянии от источника до жидкости 3 см на ее поверхности наблюдалась лунка глубиной до 10 мм (рис. 2). Цвет факела менялся по длине от оранжево-желтого у источника (основные линии в видимой об-

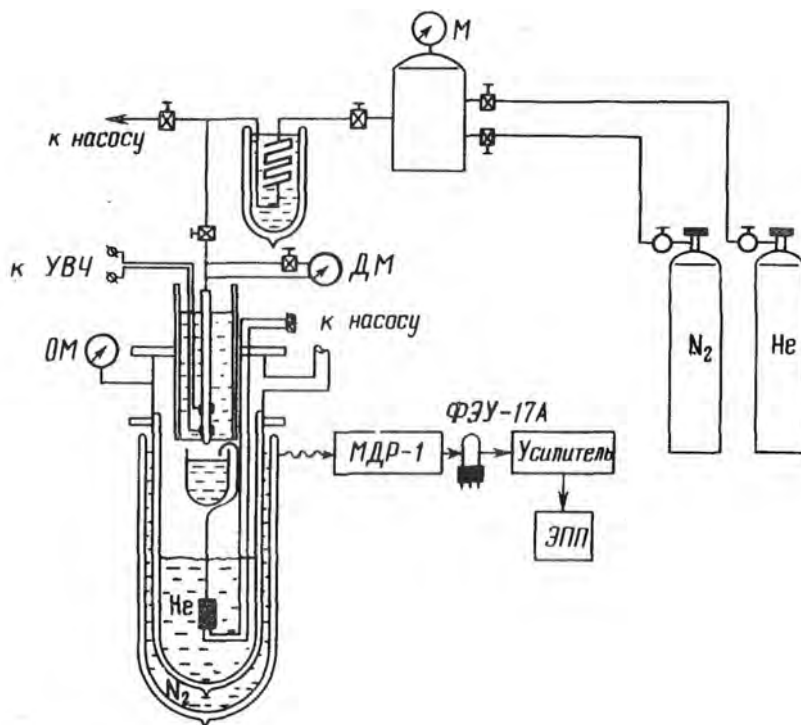


Рис.1. Схема установки: M – манометр, $ДМ$ – дифференциальный манометр, $ОМ$ – образцовый манометр-вакууметр, $УВЧ$ – высокочастотный генератор

1) Помимо атомов N и молекул N_2 в нем присутствуют, по-видимому, и кластеры N_3 , N_5 и т.д.



Рис.2. Фотография пучка и лунки на поверхности жидкого гелия

ласти 585,4; 580,4; 575,5 нм, соответствующие переходу $B^3\Pi_g \rightarrow A^1\Sigma_u^+$ молекулы N_2) зеленого (523; 540 и 560 нм). При испарении жидкого гелия из стакана и повышении температуры факел размывался, окраска его по длине становилась однородной, оранжево-желтой.

2) Внутри жидкости, особенно отчетливо в экспериментах с разбавлением 1:1000, наблюдалось темно-зеленое ($\lambda = 523$ нм) свечение, распространявшееся ко дну стакана с конечной скоростью. Интенсивность свечения внутри жидкого гелия (связанного, по-видимому, с наличием в нем мелкодисперсных частиц, содержащих атомы N) спадала с постоянной времени $t = 10\text{--}20$ сек. После выключения разряда и практически полного исчезновения свечения при медленном повышении температуры гелия в области 2,2–2,3 К (т.е. вблизи λ -точки) наблюдались резкие вспышки зеленого свечения вблизи дна стакана. При многократном последующем прохождении этой температуры вверх-вниз каждый раз наблюдалось (с уменьшающейся интенсивностью) свечение, но только в процессе нагревания. При разогреве выше 2,7 К вновь появлялось, постепенно усиливаясь, послесвечение. После испарения гелия из стакана свечение исчезало и лишь при ~ 10 К как и в [9, 10], снова наблюдались вспышки с $\lambda = 523$ нм.

3) При длительном облучении в экспериментах с разбавлением 1:20 на поверхности гелия вблизи стенок стакана образовалась светящаяся ($\lambda \approx 523$ нм) кромка, которая продолжая светиться, иногда опадала на дно. Время ее послесвечения составляло также 10–20 сек.

Обнаруженная в настоящей работе интенсивная рекомбинация атомов азота при 1,5 К (послесвечение), при 2,2 К (вспышка вблизи λ -точки) и в диапазоне 2,7–4,2 К говорит о том, что концентрации стабилизированных атомов заметно увеличиваются с понижением температуры. Эта концентрация может быть оценена снизу, исходя из следующих соображений: при понижении уровня HeII в стакане его стенки остаются покрытыми равномерным матовым налетом; сразу же после прекращения откачки этот налет полностью возгоняется взрывным образом за счет тепла рекомбинации атомов, присутствующих в твердом налете. Теплота сублимации молекулярного азота Q_c при $T = 20$ К составляет $\sim 1,8$ ккал/моль [11]. Энергия диссоциации N_2 (E_D) в пересчете на один атом равна 112,5 ккал/моль. Отсюда, относительная концентрация атомов: $n_N / n_{N_2} > Q_c / E_D = 1,6\%$.



Энергия активации брутто-процесса рекомбинации избыточной части атомов может быть оценена на основании общепринятой формулы для характеристического времени рекомбинации $\tau = \tau_0 \exp(E_A / RT)$ [4, 5, 8], где $\tau_0 = 10^{-12} - 10^{-14}$ сек. Для $\tau = 10 - 20$ сек при 1,5 К $E_A = 0,1$ ккал/моль, что на порядок ниже принятого в [4–8] барьера диффузии. Для выяснения того, принадлежит ли эта энергия активации более низкотемпературной диффузии или собственно акту рекомбинации, необходимы дополнительные эксперименты.

Резкие всплески рекомбинационного свечения при температурах 2,2–2,3 К (т.е. вблизи λ -точки) связаны, по-видимому, с тепловым взрывом крупинки, содержащих атомы азота. Этот взрыв может происходить за счет тепла рекомбинации из-за резкого уменьшения теплопроводности гелия при переходе λ -точки. Действительно, относительное увеличение температуры внутри крупинки при переходе λ -точки весьма значительно и составляет $\Delta T / T = 2(\kappa_{N_2} / \kappa_{He} \geq 1)$ (κ_{N_2} , κ_{He} – теплопроводность твердого азота и HeI, соответственно)²⁾.

Авторы выражают благодарность В.Л. Тальрозе, А.И. Шальникову, А.Н. Пономареву и С.И. Анисимову за полезные обсуждения и интерес к работе, а также С.И. Бусову и В.В. Хмеленко за участие в экспериментах.

Литература

1. Г. Минков. Замороженные свободные радикалы. М., ИИЛ, 1962.
2. Образование и стабилизация свободных радикалов под ред. А. Басса и Г. Бройды. М., ИИЛ, 1962.
3. D. Brown, R. Florin, L. Wall. J. Phys. Chem., 66, 2602, 1962.
4. J.L. Jakson. J.Chem. Phys., 31, 154, 1959.
5. J.L. Jakson. J.Chem. Phys., 31, 722, 1959.
6. A.L. Berlad. J. Chem. Phys., 35, 1180, 1961.
7. A.L. Berlad. J. Chem. Phys., 37, 2157, 1962.
8. Г.К. Васильев, В.Л. Тальрозе. Сб. Элементарные процессы химии высоких энергий, М., изд-во Наука, 1965, стр. 178.
9. B.J. Fontana. J. Appl. Phys., 29, 1667, 1958.
10. B.J. Fontana. J. Chem. Phys., 31, 148, 1959.
11. М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения, Москва, 1963.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР
Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 декабря 1973 г.

2) Оценки показывают, что, вообще говоря, необходимо учитывать и температурный скачок Капицы.



АТОМЫ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ КОНДЕНСАЦИЕЙ АТОМНОГО ПУЧКА В СВЕРХТЕКУЧЕМ ГЕЛИИ

Е.Б.Гордон, А.А.Пельменев, О.Ф.Пугачев, В.В.Хмеленко

Письма в ЖЭТФ, 37 (1983) 237–239

Конденсацией атомного пучка в сверхтекучий гелий достигнуты концентрации атомов Н и D, стабилизированных в молекулярной матрице, до $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Обнаружено превращение атомов D в атомы Н, свидетельствующее о протекании туннельных химических реакций обмена между атомом и молекулой изотопов водорода.

Атомы водорода являются атомами, для которых наиболее сильно должны проявляться коллективные квантовые эффекты. Поэтому проблеме накопления больших концентраций Н (n_{H}) при низких температурах уделяется сейчас пристальное внимание. Существенным успехом являются работы по стабилизации в газовой фазе ориентированных по спине в сильных магнитных полях атомов Н ($B \cong 11 T$ при $T \leq 0,3 \text{ K}$) [1]. Однако, сейчас достигнуты лишь концентрации 10^{17} см^{-3} и из-за ряда причин трудно ожидать существенного их увеличения.

Для более традиционного способа стабилизации атомов водорода в твердой молекулярной матрице важнейшим фактором, ограничивающим n_{H} на уровне 10^{18} см^{-3} , является неустойчивость образца конечных размеров по отношению к тепловому взрыву, инициированному медленной «темновой» рекомбинацией атомов [2]. Поэтому при намораживании атомов Н из газа на холодную поверхность можно исследовать лишь эффекты типа квантовой диффузии атомов [3].

С этой точки зрения большими преимуществами обладает развитый нами для атомов азота методический подход, основанный на конденсации атомного пучка введением его в сверхтекучий гелий [4]: благодаря предварительному охлаждению пучка до $T \leq 10 \text{ K}$ устраняется контакт «теплых» атомов с конденсатом, а высокая дисперсность конденсата (диаметр частиц $\sim 10^{-4} \text{ см}$) в сочетании с аномально высокой теплопроводностью HeII сдвигают условия возникновения теплового взрыва в область более высоких n_{H} .

В описанных в настоящем сообщении экспериментах атомы водорода и дейтерия из зоны ВЧ разряда направлялись в виде пучка на поверхность HeII, наполнявшего стакан специальной формы. Атомы, достигшие дна стакана, регистрировались методом ЭПР с помощью специально созданной приставки [5]. Температура HeII при конденсации была 1,8 K.

Спектр ЭПР атомов Н (1), показанный на рисунке (исходная смесь H_2 : Ne: He = 1:1:40, неон добавлялся для того, чтобы конденсат, содержащий атомы Н, тонул в жидком Ne), представлял собой, в согласии с [6], характерный дублет искаженных широких линий с расщеплением 508 Э и g-фактором, равным 2,002. Спектр атомов D (2) имел обычный вид (расщепления 76,7 и 78,7 Э, соответственно, ширины линий 5,8 Э). Характерно, однако, что спектр атомов Н был насыщен даже при СВЧ



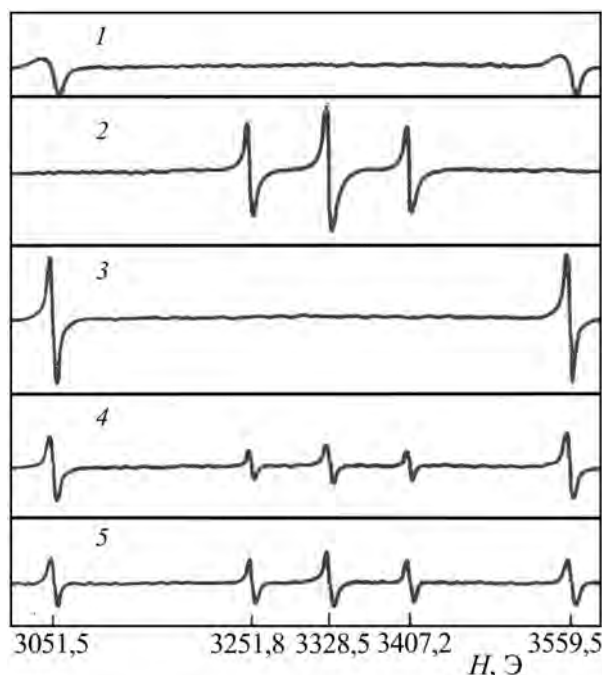


Рис.1. Спектры ЭПР атомов H и D для различных смесей:
 1 – $\text{H}_2:\text{Ne}:\text{He} = 1:1:40$; 2 – $\text{D}_2:\text{He} = 1:20$;
 3 – $\text{H}_2:\text{D}_2:\text{Ne}:\text{He} = 1:1:1:60$;
 4 – $\text{H}_2:\text{D}_2:\text{He} = 1:4:100$;
 5 – $\text{H}_2:\text{D}_2:\text{He} = 1:10:220$

мощности 1 мкВт, а для атомов D насыщения не проявлялось даже при мощности 100 мкВт.

В согласии с [3], атомы H были существенно менее стабильны, чем атомы D. При отогреве ($3 \cdot 10^{-3}$ К/с) атомы H уже не наблюдались при $T > 2,55$ К; а в ряде случаев в момент перехода λ -точки ($T = 2,19$ К) происходило резкое уменьшение ЭПР сигнала, подтверждающее высказанное нами [2] представление о возможности для систем, содержащих атомы, теплового взрыва при переходе λ -точки. Выдержка при $T = 1,8$ К в течение $3 \cdot 10^3$ с приводила к уменьшению n_{H} в 2–3 раза. Подобная же экспозиция атомов D не меняла величины сигнала. Более того, n_{D} не изменялась заметно даже при выдержке образца при $T = 4,2$ К в течение 10^4 с. Примесь неона в исходной смеси не влияла ни на какие характеристики ЭПР сигнала атомов D,

Ввиду указанных различий представляло большой интерес исследовать смеси, содержащие одновременно водород и дейтерий (см. рис.1). Удивительным образом оказалось, что а – для исходных смесей состава $\text{H}_2:\text{D}_2 = 1$ сигнал атомов D отсутствует, а сигнал атомов H перестает насыщаться; б – даже при содержании $\text{H}_2:\text{D}_2 = 1:10n_{\text{H}} = 0,6n_{\text{D}}$; в – атомы H в матрицах, содержащих дейтерий, были почти так же стабильны, как и атомы D, по отношению к изотермической выдержке и разогреву.

Поскольку нет сомнений в том, что в ВЧ разряде выходы атомов H и D приблизительно пропорциональны парциальным концентрациям H_2 и D_2 в исходной смеси, соответственно, существенно большие концентрации стабилизированных атомов H в дейтериево-водородных смесях говорят о том, что даже при низких температурах большая часть атомов D превращается в атомы H в химических реакциях обмена атома с молекулой. Действительно, туннельный канал в таких реакциях весьма заметен (оценка скорости туннельных реакций $\text{H} + \text{H}_2$ и $\text{D} + \text{H}_2$ по данным



расчета [7] и величине барьера для диффузии атомов $E = 30 \div 100$ К дает при $T \rightarrow 0$ величину $1 \div 10^4$ с⁻¹), но проявляться он может лишь для тех из них, в которых атом Н превращается в атом Н, а атом D – и в атом D, и в атом Н (другие из-за разницы в величине нулевых колебаний исходной молекулы и молекулы-продукта эндотермичны на 5–10 кДж/моль). В результате этих процессов и обычной квантовой диффузии исходные и образовавшиеся атомы Н мигрируют по матрице, пока не попадают в дейтериевую «шубу», стабилизирующую их по отношению к перемещениям и, соответственно, к рекомбинации.

Тот факт, что характерное время жизни атомов Н в молекулярной матрице, τ_{H} , при $T \cong 2,55$ К в наших экспериментах менее 10^2 с (в [3] при этих температурах $\tau_{\text{H}} \cong 10^4$ с), говорит о том, что достигнутые нами концентрации n_{H} гораздо выше, чем в [3]. Оценки, сделанные на основе калориметрических измерений величины потока, конденсирующегося в HeII, дают следующие значения для смесей 1–5 (рисунок);

- 1 – $[\text{H}] / [\text{H}_2] + [\text{Ne}] = 0,1\%$; 2 – $[\text{D}] / [\text{D}_2] = 0,6\%$;
- 3 – $[\text{H}] / [\text{H}_2] + [\text{D}_2] + [\text{Ne}] = 0,4\%$;
- 4 – $[\text{H}] / [\text{H}_2] + [\text{D}_2] = 0,15\%$; $[\text{D}] / [\text{H}_2] + [\text{D}_2] = 0,22\%$;
- 5 – $[\text{H}] / [\text{H}_2] + [\text{D}] = 0,04\%$; $[\text{D}] / [\text{H}_2] + [\text{D}_2] = 0,065\%$.

Авторы благодарны М.Я. Овчинниковой за полезные обсуждения.

Литература

1. Silvern I.F., Walraven J.T. Phys. Rev. Lett., 1980, 44, 164.
2. Гордон Е.Б., Межов-Деглин Л.П., Пугачев О.Ф., Хмеленко В.В. ЖЭТФ, 1977, 72, 952.
3. Катунин А.Я., Лукашевич И.И., и др. Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 375.
4. Гордон Е.Б., Межов-Деглин Л.П., Пугачев О.Ф. Письма в ЖЭТФ, 1974, 19, 103.
5. Гордон Е.Б., Пельменев А.Л., Пугачев О.Ф., Хмеленко В.В. ФНТ, 1982, 8, 601.
6. Jen C.K., Foner S.N., Cochran E.L., Bowers V.A. Phys. Rev. 1958, 112, 1169.
7. George T.F., Miller W.H. J. Chem. Phys., 1972, 57, 2458.

Отделение института химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
1 февраля 1983 г.



b) Измерение скоростей химических реакций в водородном лазере

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ СПИНОВОГО ОБМЕНА АТОМОВ Н ($F = 1, m_F = 0$) НА ПАРАМАГНИТНЫХ МОЛЕКУЛАХ O_2 , NO И NO_2 В ТЕМПЕРАТУРНОМ ИНТЕРВАЛЕ 310 ÷ 390 К

Е.Б. Гордон, Б.И. Иванов, А.П. Перминов
А.Н. Пономарев, В.Л. Тальрозе, С.Г. Хидиров
Письма в ЖЭТФ, 17 (1973) 548–551

С помощью водородного квантового генератора, работающего в импульсном режиме, измерены сечения спинового обмена атомов Н в сверхтонком состоянии ($F = 1, m_F = 0$) на парамагнитных молекулах O_2 , NO и NO_2 . Сечения равны $0,85 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $1,02 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ и $0,88 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, соответственно.

При столкновении атомов водорода с парамагнитными молекулами с большим сечением идет процесс спинового обмена, приводящий к изменению сверхтонкого состояния атома водорода. С другой стороны, известно, что в этих случаях с большой вероятностью протекает химическая реакция присоединения с последующим распадом или столкновительной стабилизацией комплекса. Настоящая работа посвящена измерению сечений спин-обмена атомов водорода с парамагнитными молекулами O_2 , NO, NO_2 , зависимости сечений от температуры и сопоставлению сечений спин-обмена и химической реакции атомов водорода с этими молекулами.

Расчеты показывают [1–3], что процесс спин-обмена является когерентным, т.е. фазовая информация, связанная с осциллирующим магнитным моментом системы атомов водорода, сохраняется в течение взаимодействия. Поэтому отношение времен релаксации разницы населенностей сверхтонких уровней T_1 и осциллирующей магнитной поляризации T_2 при взаимодействии атома Н с парамагнитной частицей равно 3/4. Экспериментальные значения средних сечений изменения сверхтонкого состояния при спин-обмене для 300 К составляют $\sigma_{H-O_2} = (1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_{H-NO} = (1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma_{H-NO_2} \sim 2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$.

В настоящей работе измерены константы скорости спинового обмена K_1^{co} и K_2^{co} атома водорода в состоянии ($F = 1, m_F = 0$) при его столкновении в газовой фазе с молекулами O_2 , NO, NO_2 в температурном интервале 310 ÷ 390 К.

Метод исследований [5, 6] состоял в измерении сечений релаксации сверхтонких уровней основного состояния атома водорода при их столкновении с молекулами исследуемого газа с помощью водородного лазера, работающего в импульсном режиме. Инверсная заселенность уровней ($F = 1, m_F = 0$) и ($F = 0, m_F = 0$) атомов Н в колбе-накопителе лазера, помещенной в СВЧ резонатор, достигалась фокусировкой пучка атомов в неоднородном магнитном поле. Исследуемые газы также напускались в колбу-накопитель, их концентрация изменялась в интервале $(0,5 \div 3,5) \cdot 10^{10}$ молекул/см³, концентрация атомов Н составляла около 10^8 атомов/см³. Осциллирующая магнитная поляризация системы атомов возбуждалась коротким по сравнению



нию с T_1 и T_2 90°-ным импульсом на частоте перехода. Поскольку в условиях экспериментов величина инверсной заселенности не превышала одной десятой от пороговой для возникновения генерации, сигнал когерентного излучения системы атомов («звон») изменялся во времени по закону $\exp(-t/T_2)$. Абсолютное значение времени получалось по закону спадающей начальной амплитуды «звона» от времени между моментом прекращения потока сфокусированных атомов в колбу и началом 90°-го импульса. Константы скорости спинового обмена определялись из соотношения $T_{1,2} = (K_{1,2}^{\text{co}} n_B)^{-1}$, n_B – концентрация исследуемых молекул (O_2 , NO или NO_2) в колбе-накопителе.

Результаты измерений приведены в таблице 1¹⁾.

Таблица 1

Константы скорости изменения сверхтонкого состояния атома Н K_1^{co} и средние сечения спин-обмена $\sigma = (n_B v T_2)^{-1}$ (n_B – концентрация свободных радикалов, v – относительная скорость сталкивающихся частиц) при столкновениях с молекулой В

В	Т, К	T_1 / T_2	$K_1^{\text{co}} \cdot 10^{10}$, см ³ /сек	$\sigma \cdot 10^{15}$, см ²
O_2	310	$0,72 \pm 0,07$	$3,04 \pm 0,20$	$0,880 \pm 0,07$
	315		$3,40 \pm 0,25$	$0,975 \pm 0,10$
	350		$3,03 \pm 0,20$	$0,830 \pm 0,07$
	388		$3,09 \pm 0,20$	$0,80 \pm 0,07$
NO	310	$0,73 \pm 0,07$	$3,67 \pm 0,25$	$1,06 \pm 0,09$
	373		$3,79 \pm 0,25$	$0,99 \pm 0,09$
NO_2	315	$0,75 \pm 0,07$	$3,06 \pm 0,50$	$0,88 \pm 0,20$

Для всех партнеров в пределах точности экспериментов отношение $T_1 / T_2 = 3 / 4$, отсутствует температурная зависимость сечений, а их величины приблизительно вдвое меньше измеренных Бергом при температуре 300 К с помощью аналогичного метода [4]. Расхождение, по-видимому, объясняется малой точностью измерения давления исследуемого газа и неучетом влияния индуцированного излучения в работе Берга.

Может быть поставлен вопрос о том, не является ли состояние пары частиц во время процесса обмена спинами той промежуточной компаунд-частицей, которая при стабилизации столкновениями приводит к химической реакции присоединения атома Н к свободному радикалу (или, другими словами, в этой реакции нет промежуточного состояния, как такового). Экспериментальные результаты, полученные нами для O_2 и $\text{NO}^{(2)}$, не противоречат этому предположению. Действительно, константа скорости тримолекулярной реакции $K^{(3)}$ может быть выражена через константу скорости бимолекулярного процесса присоединения K^1 , время жизни образовавшейся компаунд-частицы τ и константы скорости ее дезактивации $K^{(2)}$ при столкновениях следующим образом $K^{(3)} = K^{(1)} K^{(2)} \tau$ [7]. Если принять τ равным време-

1) В случае NO_2 производилась экстраполяция полученных значений сечения к моменту напуска газа для исключения влияния его адсорбции на стенках колбы.

2) О тримолекулярном процессе присоединения Н + NO_2 в литературе нет сведений, по-видимому, из-за его маскировки очень быстрым молекулярным процессом с образованием NO и OH.



ни пролета частиц друг вблизи друга, т.е. $4/3(r/\bar{v})$, где r – газокинетический радиус молекулы [7], $K^{(2)}$ – константа скорости столкновения НВ с Ar в приближении твердых сфер и $K^{(1)} = 2K_1^{(co)}$ (спин-обмен приводит к изменению спинов с вероятностью 1/2), то получающиеся значения $K_{(H+O_2+Ar)}^3 = 2,4 \cdot 10^{-32}$ см⁶/сек; $K_{(H+NO+Ar)}^3 = 3,0 \cdot 10^{-32}$ см⁶/сек; близки к экспериментально измеренным величинам [8–10] $K_{(H+O_2+Ar)}^{(3)} = (1,6 \div 1,9) \cdot 10^{-32}$ см⁶/сек; $K_{(H+NO+Ar)}^{(3)} = (2 \div 3) \cdot 10^{-32}$ см⁶/сек;

Альтернативным является предположение о том, что лишь часть траекторий, приводящих к спиновому обмену между частицами, приводит к их химической реакции. В этом случае время жизни компаунд-частицы должно превышать время пролета, и можно действительно говорить о промежуточном состоянии. С другой стороны, время существования этого промежуточного состояния должно быть заметно меньше характерных времен, соответствующих сверхтонкой частоте атома водорода ($\omega^{-1} = 10^{-10}$ сек)³. Поэтому вполне возможно, что взаимодействующий атом водорода может сохранять фазовую информацию, связанную с осциллирующей магнитной поляризацией. Тогда для «химического» канала $(T_1/T_2)_{хим} = 3/4$ и на основании эксперименте по спин-обмену принципиально нельзя сделать вывод о том, каков в этого канала в общее сечение.

Если же химическая реакция все-таки протекает некогерентным (по отношению к атому Н) путем и поэтому $(T_1/T_2)_{хим} \sim 1$, то поскольку в экспериментах вклад этого канала не был обнаружен, можно заключить, что $K_{(H+O_2)}^{(1)} \lesssim 8 \cdot 10^{-11}$ см³/сек, $K_{(H+NO)}^{(1)} \lesssim 1 \cdot 10^{-10}$ см³/сек и, следовательно, $\tau_{H \dots O_2} \geq 3,3 \cdot 10^{-13}$ сек, $\tau_{H \dots NO} \geq 1 \cdot 10^{-13}$ сек.

Ответ на вопрос о том, приводит ли в действительности протекающий за времена меньше 10^{-10} сек акт химической реакции к потере атомов Н когерентности, могут Дать эксперименты с простыми (двух- и трехатомными) диамагнитными молекулами, способными химически реагировать с атомом водорода.

Отметим, что полученная нами K_1^{co} для $H + NO_2$ на порядок превышает константу скорости известного для этих партнеров химического акта $H + NO_2 \rightarrow OH + NO$ (1) [11]. Однако не исключено, что наряду с процессом (1) с большими константами скорости идет образование более короткоживущей компаунд-частицы, распадающейся по обратному каналу на H и NO_2 . В этом плане были бы весьма интересны эксперименты по обнаружению любым методом тримолекулярного процесса $H + NO_2 + M \rightarrow HNO_2 + M$.

Таким образом, на базе сравнения характеристик процессов спин-обмена и химической реакции между атомом Н и парамагнитной молекулой в работе поставлен ряд вопросов, экспериментальный ответ на которые данным методом и средствами химической кинетики позволит сделать выбор механизма элементарных химических процессов присоединения атома водорода к свободному радикалу.

3) Оценка $\tau \lesssim 10^{-11}$ сек для O_2 и NO следует из того, что вплоть до давлений 2 атм экспериментально не было обнаружено отклонений от тримолекулярного характера соответствующих реакций присоединения атома Н [8–10].



Литература

1. J.P. Wittke, R.H. Dicke. Phys. Rev., 103, 620, 1956.
2. P.L. Bender. Phys. Rev., 132, 2154, 1963.
3. L.C. Balling, R.J. Hanson, F.M. Pipkin. Phys. Rev., 133, A607, 1964.
4. H.C. Berg, Phys. Rev., 137A, 1621, 1965.
5. Е.Б. Гордон, А.В. Пономарев, В.Л. Тальрозе. ХВЭ, 2, 512, 1968.
6. Е.Б. Гордон, А.П. Перминов, Б.И. Иванов, В.И. Матюшенко, А.Н. Пономарев, В.Л. Тальрозе. ЖЭТФ, 63, 401, 1972.
7. В.Н. Кондратьев. Кинетика химических газовых реакций, М., 1958.
8. J.J. Ahumada, J.V. Michael, D.R. Osborne. J. Chem Phys., 57, 3736, 1972.
9. W.P. Bishop, L.M. Dorfman. J. Chem. Phys., 52, 3210, 1970.
10. T. Nikida, J.A. Eyre, L.M. Dorfman. J. Chem. Phys., 54, 3422, 1971.
11. L.F. Phillips, H.J. Schiff. J. Chem. Phys., 37, 1233, 1962.

Институт химической физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 апреля 1973 г.



INVESTIGATION OF THE CHEMICAL REACTIONS H + H₂ AND H + D₂ BY A HYDROGEN MASER

E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov
E.S. Medvedev, A.N. Ponomarev and V.L. Tal'roze
Chem. Phys. 8 (1975) 147–157

The rate constants of the gaseous chemical reactions $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$ (I) ($k = 4.4 \pm 0.5 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3 / \text{molec.s}$ at $T = 440 \text{ K}$ and $8.2 \pm 0.8 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3 / \text{molec.s}$ at $T = 470 \text{ K}$) and $\text{H} + \text{D}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{D}$ (II) ($k = 2.35 \pm 0.3 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^3 / \text{molec.s}$ at $T = 470 \text{ K}$) were measured by a method using an H-maser as a highly sensitive relaxometer for hyperfine levels of hydrogen atoms.

From the ratio between the reaction rate constant and the rate constant for the coherence change induced by collision of the partners – which appeared to be 4/3 for reaction (I) and 1.0 for reaction (II) – the conclusion was made that the change in nuclear magnetic states of the partners [*ortho-para* conversion for reaction (I)] occurs by transition of the heavy particle only, i.e., as a result of the chemical reaction.

Theoretical analysis of the changes in population of the H-atom hyperfine levels and the H₂-molecule nuclear sublevels as a result of reaction (I) was carried out under the assumption of a small perturbation of the magnetic momenta. For the linear and triangular H₃ complexes it was found that the rate constant of reaction (I) is related to that of the complex formation as $k_{\text{H}} = \frac{1}{2} k_{\text{c}}^{\text{L}}$ and $k_{\text{H}} = \frac{2}{3} k_{\text{c}}^{\text{T}}$, respectively.

1. Introduction

The chemical reaction between a hydrogen atom and a hydrogen molecule always attracted great attention. Its simplicity enables ready theoretical interpretation and, moreover, it seems to be most convenient for the study of the tunneling mechanism in gaseous reactions.

Until now the experimental approach to the kinetics of the process $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$ consisted in measuring the degree of conversion of molecular *para*-hydrogen to *ortho*-hydrogen. The method used here permits to observe the variations in the spin state of the second reaction partner: the hydrogen atom. The advantages of the method are:

(1) In contrast to the methods used earlier, simultaneous measurement of *two* values defining the changes both in populations of the hyperfine levels of the H-atom ground state, and in the induced magnetic polarization of the system of atoms becomes possible. The relation between the relevant rate constants k_1 and k_2 depends upon the nature of the interaction, and knowledge of these two values would naturally yield additional information about the process. Thus the method, combined with conventional kinetic methods, can be of great help in the explanation of mechanisms of elementary reactions.

(2) The absolute accuracy of rate constants derived from a method based on the measurement of relaxation times in an H-maser is very high, as was experimentally verified for various systems [1] ($\pm 1 \div 3\%$). Such an accuracy, when realized, facilitates a reliable differentiation between the tunneling and the Arrhenius reaction channels.

2. Essence of the method

Observation of the spin states of hydrogen atoms was effected by running the reaction in the H-maser storage bulb. This maser operates on a hyperfine transition ($F = 1$,



Collisions of the gas molecules under investigation with hydrogen atoms in the bulb change the relaxation times of the population difference in active levels, T_1 and of the oscillating magnetic polarization, T_2 . Such changes are related to k_1 and k_2 as:

where n_x is the investigated gas concentration in the bulb, and the superscript “0” stands for times of “background” relaxation induced by processes on the bulb wall, by escape of atoms through the inlet, spin exchange between atoms, etc. (here $T^0 \approx 0.2\text{--}0.4$ s).

The relaxation times, T_1 and T_2 , can be measured by various techniques [3–6]. As stated earlier [6], the following one is most convenient. With an H-atom beam of an intensity lower than that of the threshold for the maser oscillation ($I/I_{\text{thr}} \ll 1$) a 90° resonance frequency pulse of a duration shorter than T_1 and T_2 ($\theta = (\mu H / \hbar) t_0 = \pi/2$, μ is the mag-

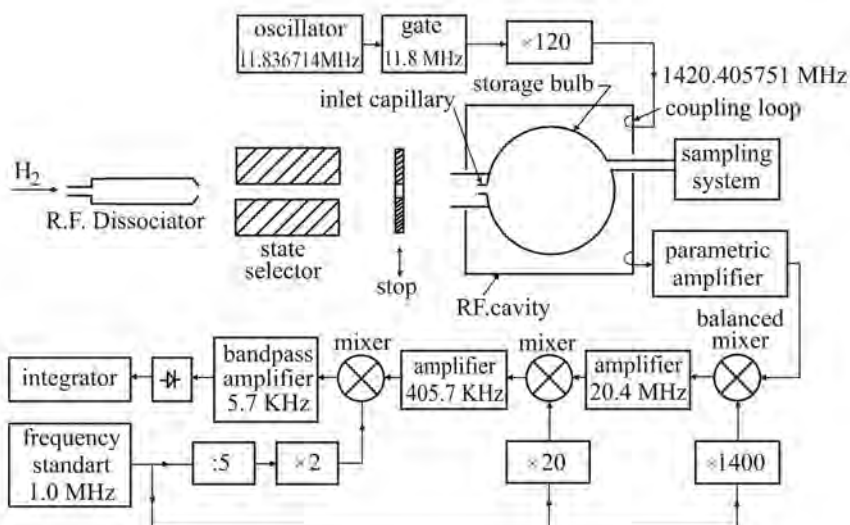


Fig.1. The experimental block scheme



netic moment of the atom, H the amplitude of the driving microwave field, t_0 the pulse duration) is directed to the cavity. After the pulse is turned off, both the oscillating magnetic polarization of the atomic system and the coherent microwave field it creates in the cavity, decay exponentially with a characteristic time T_2 . Thus the T_2 value can be determined directly and with fair accuracy from the shape of the H-maser response signal caused by the 90° pulse.

It will be noted that due to the high values of T_1 and T_2 , the condition for the pulse duration, $t_0 \ll T_1$, can be met and does not cause additional difficulties. Moreover, a receiver with a band width of several tens of Hz can be used for observations of the signal, thus making the method's sensitivity comparable to that of stationary methods (for instance, to the one that uses the radiation line shape).

The initial amplitude of the response signal is proportional to the population difference of levels at the moment the activating pulse is turned on, and thus can be used for determination of T_1 . If, at a certain moment of time, the atomic beam is turned off, the difference in level populations will decrease exponentially with the characteristic time T_1 . Thus, T_1 can be determined directly from the initial signal amplitude as a function of the delay of the activating pulse relative to the moment the beam is turned off. The accuracy of the T_1 determination will depend solely on the signal/noise ratio and on the stability of the beam intensity. The accuracy of the T_2 determination can be affected by other factors as well. A simple exponential shape of the signal $\exp(-t/T_2)$ is observed solely in cases where the change of the oscillating magnetization is a function of relaxation processes only. However, it can change also under the action of its own radiation field. The effect of induced radiation on the H-maser operating in the pulse mode has been investigated [7]. The conditions for I/I_{thr} , and also for deviation of the pulse parameters from the condition $\theta = 90^\circ$, that permits to neglect the field effect on the signal shape to a prefixed accuracy, were found accordingly. These conditions can be readily realized, and at $I/I_{\text{thr}} < 0.2$ and $|\theta - \pi/2| < 0.1$ the accuracy of the T_2 -measurement will also depend on the signal/noise ratio only.

The radiation receiver was a superheterodyne with triple frequency transformation. A low-noise parametric amplifier served as preamplifier. The transmission band width was about 300 Hz, the sensitivity was $2 \cdot 10^{-18}$ W.

The characteristic times of signal decay were determined by integrating its envelope for two successive intervals of time: t_Σ and $2t_\Sigma$ $\left(t_\Sigma \approx \frac{1}{2}T_2\right)$. This ensured better accuracy of the T_2 -determination. The integrator contained an "amplitude-frequency" converter and two adding circuits with output printers. The delay of the activating pulse relative to the moment the beam was turned off and the duration of integration intervals could vary over a range of 5–500 ms with a pitch of 5 ms and an accuracy to within 0.05 ms. The duration of the activating pulse varied from 1 to 5 ms.

3. Experimental

Hydrogen and deuterium were purified by diffusion through the wall of a nickel capillary heated to about 600°C . Mass spectrometric analysis of deuterium has shown that the H_2 and HD content did not exceed 0.5% after purification.

The concentration of atoms in the bulb, obtained from the measured value of I/I_{thr} and the calculated value of I_{thr} [7] was estimated as $n_{\text{H}} \approx 1.0 \cdot 10^8$ atoms/cm³ for working



atom beams. The H_2 and D_2 concentrations in the bulb ranged within 10^{13} to 10^{14} molec/ cm^3 . Under these conditions the spin exchange between hydrogen atoms occurring with a cross-section $2 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^2$ [4], as well as the consumption of molecules in the reaction (for D_2) could be neglected.

The measurements were performed as follows. First of all, the frequency of the activating field source was adjusted to the hydrogen atom emission line, using the H maser as amplifier. (The source stability was sufficiently high to render deviations of the activating field frequency from resonance negligible during measurement.) Then the ratio I / I_{thr} was determined from the measured H-maser amplification coefficient k . At a sufficiently low value of the input microwave signal the following relation holds at resonance:

$$k = \frac{H_c + H_S}{H_c} = 1 + \frac{I / I_{\text{thr}}}{1 - I / I_{\text{thr}}} = (1 - I / I_{\text{thr}})^{-1}.$$

Here H_c is the microwave field in the cavity, created by an extraneous source, H_S is the field of the hydrogen atom system. The atomic beam intensity was chosen such that $I / I_{\text{thr}} \approx 1/6 - 1/8$.

Then the microwave generator was switched over to the pulse mode. The duration of the activating pulse t_0 was chosen to yield maximum signal amplitude and was checked by observation of the amplitude of a pulse of double duration $2t_0$ (signal minimum). Deviations from exponential shape of the signal with characteristic time T_2 did not exceed 1–1.5%.

The background values T_1^0 and T_2^0 were then observed using the above technique and, after admission of the gas under investigation, T_1 and T_2 were measured.

The measurements were repeated 7 to 10 times for each temperature with various n_x of the gas added. The cavity and the bulb contained in it were thermostatted to within 0.5°C . Consequently, the temperature of the gas in the bulb was equal to that in the thermostat.

4. Results

The minimum value of the rate constant which can be measured by the proposed method depends upon the limiting concentration of the gas in the bulb, i.e., the concentration at which the focused atomic beam can still penetrate into the bulb. With the size of the inlet capillary used, this concentration is $3 \cdot 10^{14}$ molec/ cm^3 , which gives $k_{\text{min}} \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{molec.s.}^{1)}$

The investigated reactions have relatively high activation energies and can be measured by the described method at temperatures above 450 K only. Measurements at room temperature yielded $k_{\text{H}+\text{H}_2}$ and $k_{\text{H}+\text{D}_2} < 5 \cdot 10^{-15} \text{ cm}^3/\text{s}$ (no reaction was observed). An increase in temperature to 440–470 K, under otherwise identical conditions, was sufficient for a noticeable change in T_1 and T_2 . The k_1 and k_2 values and their temperature dependence for reaction (I) could be measured with fair accuracy.

1) If an aperture is used instead of a capillary, the range of measured rate constants can be enlarged by more than a power of ten. This would require much higher intensities of the focused atomic beam, a condition which can be readily met.



Table I

Gas	T (K)	k_2 / k_1	$k_1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^3/\text{s}$	$E_{\text{act}} \text{ kcal/mole}$
H ₂	440	0.79 ± 0.01	4.4 ± 0.5	8.3 ± 0.4
	470		8.2 ± 0.8	
D ₂	470	0.9 ± 0.12	2.35 ± 0.3	



For the slower reaction (II) k_1 and k_2 could be obtained only at the highest temperature of the experiment (470 K) (table 1). The activation energy for reaction (I) was calculated in terms of the Arrhenius temperature dependence of the rate constant

$$k = A \exp(-E_{\text{act}} / RT).$$

Paramagnetic impurities (first of all O₂ molecules) are the most dangerous source of errors in measuring relatively low rate constants. This is accounted for by the high rate constants of H-atom spin exchange for such molecules ($k_{s-e} \approx 2 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ [4, 10]).

An oxygen impurity due to inflow into the system would be particularly undesirable in this case, as the ratio for spin exchange is $k_2 / k_1 = 3 / 4$.

It was clear from the results of low-temperature measurements that the effect of atmospheric oxygen on the rate constant value was not important. Yet control experiments have been made. They consisted in prolonged measurement of T_2 without admission of H₂ and D₂. No changes were observed to within 2%. A higher accuracy in the determination of rate constants can be obtained by extending the temperature range of measurements, i.e., by passing to higher k , and also by increasing the limiting concentration of the molecules in the maser bulb.

5. Relation between k_1 , k_2 , and the characteristics of elementary steps H + H₂ and H + D₂

Though the general mechanism of the elementary step studied, like that of any chemical process involving altered electron configurations, is rather complicated, evolution of the nuclear (and electron) spins can readily be described on account of the spin conservation law and the weakness of spin-spin interaction.

Indeed, projections of total nuclear and electron spins must be conserved during the reaction. Moreover, it is clear from chemical kinetics experience that the lifetime of the H transition state cannot exceed 10^{-13} s . The characteristic time of nuclear spin-spin interaction is 10^{-7} s , and that of electron-nuclear spin (hyperfine) interaction is 10^{-10} s . Spin-orbit coupling is the fastest process here, but the orbitals would scarcely become excited to such an extent that the relevant frequency can be compared to 10^{13} s^{-1} .

This means that the spin projections of all nucleus would be conserved for reaction (I) (as well as for those with various isotope content: H + D₂, D + H₂, etc.). Hence a change in spin states of the H atom and H₂ molecule can occur solely upon transition of a heavy particle (nucleus) from one collision partner to another. In other words, *ortho-para*



conversion in the given case can occur only as a result of a chemical reaction, as has been correctly stated by Pelzer and Wigner [9].

Let us consider accordingly the elementary step $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_3^* \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$. The rate constant, k_c , for formation of the transition state H_3^* depends on the detailed pattern of electron interaction and its calculation is a rather complicated task. We shall consider this constant here as a given value. It will be noted only that k_c is virtually independent of the spin states of the partners. It is convenient to treat the decay of the H_3 transition state as occurring by two independent channels:

(1) Decay of H_3 (with probability w) to initial particles. It follows from the above that in this case no changes occur in the spin states of particles and in this sense the channel considered brings the system to the initial state.

(2) A different H atom is detached from H_3 by decay of the latter. This channel would involve *ortho-para* conversion of the H_2 molecule and a change in the hyperfine state of the H atom (obviously, this channel can, with a certain probability, as well restore the initial state of the system).

The value of w certainly depends on the structure of the transition states. According to [8] two limiting cases of linear and triangular H_3 structures can be considered. In the first case the two outer atoms of the complex are equivalent in terms of electron interaction (and, consequently, in the probability of H-atom detachment). In the second case this would pertain to all three atoms. Thus, the w -value would obviously be 1/2 and 1/3 for the linear and triangular H_3 models, respectively (see appendix A).²⁾

From the above follows that the density matrix of the system involving the chemical interaction $\text{H} + \text{H}_2$, which results in the H_3 transition state and its subsequent decay, is

$$\rho^f = w\rho^i + (1-w)S\rho^i S^+ \quad (2)$$

The S matrix defines proton exchange by collision.

The equation for changes in the whole density matrix of the system (only the second channel contributing to H and H_2 changes) is

$$d\rho / dt = (1-w)(k_c / V)[(S\rho^i S^+) - \rho^i] - (i / \hbar)[\mathcal{H}, \rho] \quad (3)$$

where V is the volume of the system.

The expression for changes in the density matrix of H_2 molecules can be obtained from (3) by tracing over quantum numbers corresponding to various H-atom states

$$d\rho_{\text{H}_2} / dt = (1-w)k_c n_{\text{H}} \text{tr}_{\text{H}}(S\rho^i S^+ - \rho^i) \quad (4)$$

The expression for H-atom motion is derived in a similar way

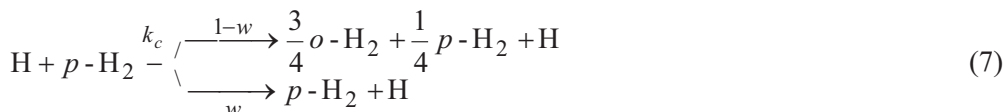
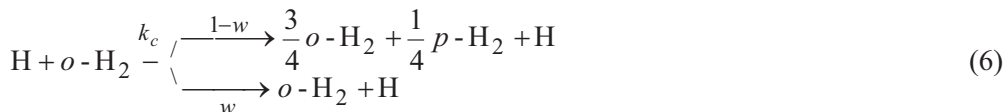
$$d\rho_{\text{H}} / dt = (1-w)k_c n_{\text{H}_2} \text{tr}_{\text{H}_2}(S\rho^i S^+ - \rho^i) - (i / \hbar)[\mathcal{H}, \rho_{\text{H}}] \quad (5)$$

(1) First let us find the changes in nuclear spin states of H_2 molecules induced by proton exchange in the reaction $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$.

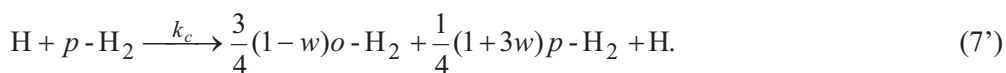
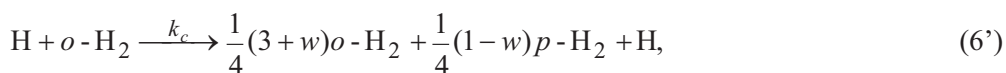
2) The values $w = 1/6$ and $1/9$ that have been obtained [8] refer to a very long-lived H_3 complex, such that even its decay to initial products leads to a change in spin states of the atom and molecule (see appendix A).



The composition of products for the second channel can be shown to correspond to thermodynamic equilibrium [9] (see appendix A). Thus, leaving aside the H-atom state, the reaction will be written as



or



The rate constant of *ortho-para* conversion as measured in experiments on the rate $p\text{-H}_2$ disappearance is related to that for formation of state H_3 (k_c) as

$$k_H = (1-w)k_c, \quad (8)$$

which, for the two H_3 models discussed, yields

$$k_H = \frac{1}{2}k_c^L \text{ (linear),}$$

$$k_H = \frac{2}{3}k_c^T \text{ (triangular),}$$

in contrast to the results obtained in [8], where $k_H = \frac{5}{6}k_c^L$ and $k_H = \frac{8}{9}k_c^T$. Thus it appears that the constant of H_3 formation may considerably exceed the experimental rate constant of *ortho-para* conversion.

(2) Consider now the changes in the hyperfine state of H atoms caused by the chemical process studied. General considerations show that the H atom that appears to be in the initial state $|1,0\rangle$ at the end of the process, will be in phase with all other atoms and will take part in the radiation since the projections of all spins undergo no changes. If the probability of any of the four states of the H atom after the reaction is the same, then (similarly to spin exchange of a hydrogen atom with a paramagnetic molecule [4, 7]) the rate constants for relaxation of the population difference between levels $|1,0\rangle$ and $|0,0\rangle$ (k_1) and for radiation in the microwave cavity (k_2) will be

$$k_1 = (1-w)k_c = k_H \text{ and } k_2 / k_1 = 3/4, \quad (9)$$

respectively.

A more strict derivation of (9) is given in appendix B. It will be noted only that the physical reason for the deviation of k_2 / k_1 from unity is solely the absence of variations in



the magnetic moments in the course of the H_3 quasi-molecule formation and decay. In the opposite case, as assumed inexplicitly in [8], the usual ratio $k_2 / k_1 = 1$ would be observed.

Thus, the rate of relaxation of the population difference between the hyperfine levels $|1,0\rangle$ and $|0,0\rangle$ for hydrogen atoms upon collisions with H_2 molecules is equal to the rate of H_2 *ortho-para* conversion obtained from the measured decrease in *para*-hydrogen concentration. In this sense the proposed method is an independent means for the determination of the rate constant. The k_2 / k_1 ratio is a measure of magnetic moment perturbations in the course of a chemical reaction.

Finally, consider briefly the reaction of hydrogen atoms with deuterium. This case is much more complicated, firstly, in view of the large number of nuclear spin states in the D_2 molecule ($I_{\text{D}_2} = 2, 1, 0$) and, secondly, in view of the energetic non-equivalence of channels for the decay of the HD_2^* transition state. However, the rules for changes in the H-atom spin state can be obtained from most general considerations. Suppose the chemical reaction is to occur by two channels as before: (a) decay of the HD_2^* transition state to initial species with a probability w , and (b) its decay by the HD and D channel. Then we find, repeating the considerations made above, that:

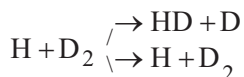
(1) the first channel has no effect on the composition of reagents and, consequently, cannot be observed experimentally,

(2) the second channel inevitably results in disappearance of the H atom as such, and consequently the following relations hold:

$$k_1 = k_2 = k_{\text{H}}^{\text{HD}} = (1 - w)k_c. \quad (10)$$

Here k_{H}^{HD} is the rate constant measured by the rate of HD formation or of H disappearance.

An interesting result ensues: the reaction



seems to involve no change in the D_2 spin state (unlike the case for a similar reaction with H_2). This is actually true for the first channel, and the second channel results in disappearance of D_2 . This can readily be checked experimentally.³⁾

6. Discussion

The ratio k_2 / k_1 obtained here for reaction $\text{H} + \text{H}_2$ (I) is close to 3/4 (and at any rate lower than unity). For $\text{H} + \text{D}_2$ (II) this value obviously is higher and is in fair agreement with the theoretical value $k_2 / k_1 = 1$. These results favour the conclusion of invariance of all spins in the chemical reaction between a hydrogen atom and a molecule.

Rate constants for the H_2 *ortho-para* conversion and the reaction $\text{H} + \text{D}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{D}$, particularly those obtained by an independent method, are of great interest. The specificity of isotopic hydrogen exchange is that, on the one hand, the extreme simplicity of the chemical species investigated and the possibility of studying the tunnel effect are very attractive for theoreticians. On the other hand, experimental kinetic studies encounter great difficulties, such as the specificity of *ortho*- and *para*-state determinations. Just this is the

3) In the same way, the H_2 *ortho-para* conversion should not occur in a $\text{D} + \text{H}_2$ collision; relevant experiments would be of great interest.



reason for the considerable excess of theoretical papers over those containing experimental results, particularly for relatively low temperatures. Moreover, experimental results are not always reliable. For instance, the values of E_{act} for reaction (1) vary over a wide range from 6.0 to 9.4 kcal/mole [11] and the pre-exponential factor varies from $1.26 \cdot 10^{-11}$ [12] to $5.0 \cdot 10^{-9}$ cm³/s [13]. Nevertheless the difference in rate constants within the range 440–470 K is not that large. For instance, the results obtained at, or recalculated to, 470 K are: $6.4 \cdot 10^{-14}$ [14], $9.5 \cdot 10^{-14}$ [15], $6.1 \cdot 10^{-14}$ [16] cm³/s. These results are in good agreement with the k_1 values obtained here.

Introducing a factor to allow for the temperature dependence of tunneling Γ [17] and taking, for convenience, the result of the present research as $k = A\Gamma(T)\exp(-E_{\text{act}}^t / RT)$, we obtain $E_{\text{act}}^t = 9.7$ kcal/mole. This value must be equal to the height of the potential barrier E_c and, consequently, it can be compared with the theoretical values: 7.49 [18], 7.74 (allowing for the correlation of electrons [19]), 13.99 (allowing for the six *S*-orbitals) and 11.35 kcal/mole (allowing for the fifteen *S*- and *P*-orbitals [20]). Semiempirical refinement of the latter result yields $E_c = 9.785$ kcal/mole [17], which is close to the E_{act}^t value obtained here.

The rate constant for $\text{H} + \text{D}_2 \rightarrow \text{HD} + \text{D}$ (II) at 470 K obtained in this work is considerably larger than the experimental values: $2.85 \cdot 10^{-15}$ [21], $3.45 \cdot 10^{-15}$ [22], and $1.0 \cdot 10^{-14}$ cm³/s [15].

It should be noted that the accuracy of rate-constant determinations by the H-maser method is even now higher than the accuracy obtainable by physico-chemical methods. The technique proposed can readily be improved in the future. Replacement of the collector capillary by an aperture seemingly raises the permissible concentration of the gas in the bulb by a power of ten. This would increase the accuracy of measurements and facilitate the operation at lower temperatures. Moreover, up to about 300°C the coating properties are virtually independent of temperature, and in principle this method ensures measurements over a range of 400 to 600 K to within several percent.

Appendix A: Calculation of relative populations of the H-ortho- and para-states in reaction $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$

The variations in nuclear spin states of a hydrogen molecule undergoing reaction $\text{H} + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$ with a given structure of the transition complex H_3 can be obtained by direct treatment of various collisions.

It will be noted that in view of the abovementioned small perturbation of nuclear spins during the complex's lifetime, ortho-para conversion consists in proton exchange between the atom and the molecule without a change in their spin projections. Consider, as done in ref. [8], two models of the H_3 structure: a linear one involving two equivalent outer atoms, and a triangular one with the three H atoms equivalent. Leaving aside the electron spin of the H atom, the following eight nuclear spin states are possible:

$$\alpha \times (\alpha\alpha) \equiv |1\rangle, \alpha \times (\alpha\beta + \beta\alpha) \equiv |2\rangle,$$

$$\alpha \times (\alpha\beta - \beta\alpha) \equiv |3\rangle, \beta \times (\alpha\alpha) \equiv |4\rangle,$$

$$\alpha \times (\beta\beta) \equiv |5\rangle, \beta \times (\alpha\beta + \beta\alpha) \equiv |6\rangle,$$



$$\beta \times (\alpha\beta - \beta\alpha) \equiv |7\rangle, \beta \times (\beta\beta) \equiv |8\rangle,$$

where α and β stand, as usual, for spin projections $1/2$ and $-1/2$, respectively.

A.1. Linear H_3 complex

Exchange is possible with one of the H_2 atoms only. For instance, let the system be in state $|2\rangle$. Then the complex will decay as shown in scheme 1. Hence

$$|2\rangle \rightarrow \frac{5}{8}|2\rangle + \frac{1}{8}|3\rangle + \frac{1}{4}|4\rangle. \quad (A.1)$$

As the H_3 lifetime is short compared to the characteristic time of variations in nuclear spin states the hydrogen atom will “see” the molecule in state $\alpha\beta$ or $\beta\alpha$ with equal probability. As the two outer atoms in linear H_3 are identical, the detachment of any by complex decay is equiprobable. However, if H_3 decays by the path of its formation, the states $\alpha\beta$ and $\beta\alpha$ must be interpreted as the initial state (here $\alpha\beta + \beta\alpha$). This is the main difference from the idea expressed in [8], where these states have been interpreted as a mixture of $\alpha\beta + \beta\alpha$ and $\alpha\beta - \beta\alpha$ with equal weight.

The resulting matrix for transition probabilities is

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1							
2		5/8	1/8	1/4				
3		1/8	5/8	1/4				
4		1/4	1/4	1/2				
5					1/2	1/4	1/4	
6					1/4	5/8	1/8	
7					1/4	1/8	5/8	
8								1

(A.2)

(A.2). Triangular H_3 complex

In a triangular complex exchange may occur with the two molecule atoms. As an example consider again the system in initial state $|2\rangle$. From similar considerations we obtain scheme 2. Hence

$$|2\rangle \rightarrow \frac{1}{2}|2\rangle + \frac{1}{6}|3\rangle + \frac{1}{3}|4\rangle. \quad (A.3)$$

The matrix for transition probabilities is

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1							
2		1/2	1/6	1/3				
3		1/6	1/2	1/3				
4		1/3	1/3	1/3				
5					1/3	1/3	1/3	
6					1/3	1/2	1/6	
7					1/3	1/6	1/2	
8								1

(A4)


The simplified method described above cannot be used for the treatment of variations in spin states of hydrogen atoms, since it is valid only for the calculation of relevant diagonal elements of the density matrix. The radiation of an atomic system in the H maser reactor on the other hand is a function of oscillating polarization and, consequently, of non-diagonal elements of the density matrix. Appendix B gives a more precise treatment of *ortho-para* conversion and the characteristics of variations in the hyperfine states of the H atom and of the nuclear spin state of the H_2 molecule for an arbitrary structure of the H_3 complex.

Appendix B: Calculation of the states of products obtained by the reaction

$H + H_2 \rightarrow H_2 + H$

In general the initial density matrices of atomic and molecular hydrogen systems are

$$\rho_H^i = \begin{bmatrix} a_1 & & & \\ & a_2 & & \\ & & a_3 & \Delta \\ & & \Delta^* & a_4 \end{bmatrix}, \Delta = \delta e^{i\omega t}, \sum_{i=1}^4 a_i = 1, a_3 \geq a_4. \quad (B.1)$$

$$\rho_{H_2}^i = \begin{bmatrix} b_1 & & & \\ & b_1 & & \\ & & b_1 & \\ & & & b_2 \end{bmatrix}, 3b_1 + b_2 = 1. \quad (B.2)$$

Both matrices are written in terms of basis functions

$$|1\rangle = |1,1\rangle, |2\rangle = |1,-1\rangle, |3\rangle = |1,0\rangle, |4\rangle = |0,0\rangle$$

for states with defined spin values and their projections. Coinciding atom and molecule quantization axes can be chosen, since the molecular density matrix $\rho_{H_2}^i$ of type (B.2) is invariant relative to rotation.

In determining the S matrix it is convenient to use states $|m, M_1\rangle |M_2, M_3\rangle$ with fixed values of spin projections for electron m and for nuclei M_1, M_2, M_3 (for simplicity assume that exchange occurs between nuclei with projections M_1 and M_2). In this basis

$$\begin{aligned} |1\rangle &= |\alpha AAA\rangle, |2\rangle = |\alpha ABB\rangle, |3\rangle = |\alpha AAB\rangle, \\ |4\rangle &= |\alpha ABA\rangle, |5\rangle = |\beta BAA\rangle, |6\rangle = |\beta BBB\rangle, \\ |7\rangle &= |\beta BAB\rangle, |8\rangle = |\beta BBA\rangle, |9\rangle = |\alpha BAA\rangle, \\ |10\rangle &= |\alpha BBB\rangle, |11\rangle = |\alpha BAB\rangle, |12\rangle = |\alpha BBA\rangle, \\ |13\rangle &= |\beta AAA\rangle, |14\rangle = |\beta ABB\rangle, |15\rangle = |\beta AAB\rangle, \\ |16\rangle &= |\beta ABA\rangle; \end{aligned}$$

the S -matrix elements that are not zero are unity

$$\begin{aligned} S_{1,1} &= S_{2,11} = S_{3,3} = S_{4,9} = S_{5,16} = S_{6,6} = S_{7,14} = S_{8,8} = \\ &= S_{9,4} = S_{10,10} = S_{11,2} = S_{12,12} = S_{13,13} = \end{aligned}$$



$$= S_{14,7} = S_{15,15} = S_{16,5} = 1.$$

According to (2) the density matrices of atomic and molecular systems after collisions resulting in the second reaction channel can be calculated as

$$\rho_{\text{H}}^{\text{f}} = (1-w)U \{ \text{tr}_{\text{H}_2} [S(U\rho_{\text{H}}^{\text{i}}U)(U\rho_{\text{H}_2}^{\text{i}}U)S] \} U, \quad (\text{B.3})$$

$$\rho_{\text{H}_2}^{\text{f}} = (1-w)U \{ \text{tr}_{\text{H}} [S(U\rho_{\text{H}}^{\text{i}}U)(U\rho_{\text{H}_2}^{\text{i}}U)S] \} U, \quad (\text{B.4})$$

where U is the unitary matrix for transformation from one basis ($|F, M_F\rangle$) to the other ($|m, M_1\rangle$ or $|M_2, M_3\rangle$)

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad (\text{B.5})$$

A simple, but rather cumbersome calculation gives for the initial basis

$$\rho_{\text{H}}^{\text{f}} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 + (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) & 1 - (\Delta + \Delta^*) - (a_1 - a_2) & 1 & (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) \\ 1 - (\Delta + \Delta^*) - (a_1 - a_2) & 1 + (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) & (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) & 1 \\ 1 & (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) & (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) & 1 \\ (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) & 1 & 1 & (\Delta + \Delta^*) + (a_1 - a_2) \end{bmatrix}. \quad (\text{B.6})$$

For the H_2 molecule only the diagonal elements of the density matrix are of interest

$$\begin{aligned} (\rho_{\text{H}_2}^{\text{f}})_{11} &= \frac{1}{4} [1 - (\Delta + \Delta^*)], \\ (\rho_{\text{H}_2}^{\text{f}})_{22} &= \frac{1}{4} [1 + (\Delta + \Delta^*)], \\ (\rho_{\text{H}_2}^{\text{f}})_{33} &= \frac{1}{4} [1 + (a_3 - a_4)(b_1 - b_2)], \\ (\rho_{\text{H}_2}^{\text{f}})_{44} &= \frac{1}{4} [1 - (a_3 - a_4)(b_1 - b_2)]. \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

In experiments using the H maser $b_1 = b_2$, since H_2 is non-polarized, and $a_3 \approx a_4$ after the 90° pulse is turned off. In *ortho-para* conversion investigations the H atoms naturally are in thermodynamic equilibrium $a_1 = a_2 = a_3 = a_4$. It follows from (B.6) that both under our conditions and in experiments on *ortho-para* conversion of molecular hydrogen, the relation between populations of the H_2 *ortho*- and *para*-states after the reaction corresponds to thermodynamic equilibrium.

Let us find now the relation between the rate constant k_{H} measured in experiments on *ortho-para* conversion and the rate constants k_1 for changes in the difference between populations of levels $|3\rangle$ and $|4\rangle$, as well as k_2 for relevant oscillating polarization, using the



density matrix (B.6) obtained for the H-atom system in the presence of H_2 molecules. The law for density matrix motion is described by the conventional equation:

$$d\rho_{\text{H}} / dt = -(i / \hbar)[\mathcal{H}, \rho_{\text{H}}] + k_{\text{H}} n_{\text{H}_2} (\rho_{\text{H}}^{\text{f}} - \rho_{\text{H}}), \quad (\text{B.8})$$

where $\mathcal{H}$ is the hamiltonian of hyperfine interaction, $k_{\text{H}} = (1 - w)k_{\text{c}}$, and $\rho_{\text{H}}^{\text{f}}$ is the matrix defined by eq. (B.6).

The differential equations for the density matrix elements can be readily obtained from (B.8)

$$d(\Delta\rho) / d\tau = -(\Delta\rho), \quad (\text{B.9})$$

$$d\rho_{+} / d\tau = \frac{1}{2} - \rho_{+}, \quad (\text{B.10})$$

$$d\rho_{-} / d\tau = \frac{1}{2}(x - \rho_{-}). \quad (\text{B.11})$$

$$dx / d\tau = -i\Omega y - \frac{1}{2}(x - \rho_{-}), \quad (\text{B.12})$$

$$dy / d\tau = -i\Omega x - y. \quad (\text{B.13})$$

Where $\tau = k_{\text{H}} n_{\text{H}_2} t$ stands for the dimensionless time; $\Omega = \omega_0 / k_{\text{H}} n_{\text{H}_2}$, $\omega_0 \approx 10^{10} \text{ s}^{-1}$ is the hyperflne frequency; $\Delta\rho = \rho_{33} - \rho_{44}$ is the population difference between the working maser levels, $\rho_{+} = \rho_{11} + \rho_{22}$, $\rho_{-} = \rho_{11} - \rho_{22}$; and the function $x = \rho_{34} + \rho_{43}$ stands for the real part of oscillating polarization, and $y = \rho_{34} - \rho_{43}$ for its imaginary part.

Eq. (B.9) yields the characteristic decay time for the population difference as $T_1 = (k_{\text{H}} n_{\text{H}_2})^{-1}$, or, in other words,

$$k_1 = k_{\text{H}}. \quad (\text{B.14})$$

Eq. (B.10) describes the behaviour of $\rho_{11} + \rho_{22}$, and a secular equation results from the set of eqs. (B.11)–(B.13)

$$\lambda^3 + 2\lambda^2 + \Omega^2\lambda + \frac{1}{2}\Omega^2 = 0. \quad (\text{B.15})$$

At $\Omega \gg 1$ (in experiments with the H maser $\Omega = \omega_0 T_1 \approx 10^{10} \text{ s}^{-1} \times 0.2 \text{ s} = 2 \times 10^9$) it can be solved as

$$\lambda_{1,2} = \pm i\Omega - \frac{3}{4}, \lambda_3 = -\frac{1}{2}, \quad (\text{B.16})$$

It will be seen from eq. (B.16) that the amplitude of oscillating polarization at the resonance frequency ω_0 has a characteristic decay time $T_2 = \left(\frac{3}{4} k_{\text{H}} n_{\text{H}_2}\right)^{-1}$ which yields

$$k_2 \approx \frac{3}{4} k_{\text{H}}. \quad (\text{B.17})$$



References

1. E.B. Gordon, A.P. Perminov, B.I. Ivanov, V.I. Matyushenko, A.N. Ponomarev and V.L. Tal'roze, *Zhur. Exp. Teor. Fiz.* 63 (1972) 401.
2. D. Kleppner, H.M. Goldenberg and N.F. Ramsey, *Phys. Rev.* 126 (1962) 603.
3. N.G. Basov, G.M. Strakhovskii, A.I. Nikitin, T.F. Nikitina, V.M. Tatarenkov and A.V. Uspenskii. *Radiotekhnika i Elektronika* 10 (1965) 1809.
4. H.C. Berg, *Phys. Rev.* 137 (1965) A1621.
5. C. Audion, *Phys. Letters* A28 (1968) 372.
6. E.B. Gordon, A.N. Ponomarev and V.L. Tal'roze, *Khim. Vysokikh Energii* 2 (1968) 512.
7. E.B. Gordon, B.I. Ivanov and A.P. Perminov, *Kvantovaya Elektronika* N6 (1B) (1973) 121.
8. D. Brillouin and Z.Z. Hugus, Jr., *J. Chem. Phys.* 33 (1960) 1830.
9. H. Pelzer and E. Wigner, *Z. Phys. Chem. (Leipzig)* 15B (1932) 445.
10. E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, A.N. Ponomarev, V.L. Tal'roze and S.G. Khidirov, *Letters to Zhur. Exp. Teor. Fiz.* 17 (1973) 548.
11. V.N. Kondratiev, *Konstanty Skorosti Gasofaznykh Reaktsii* (Ed. Nauka, Moscow, 1970).
12. K.H. Geib and P. Harteck, *Zs. Phys. Chem. Bodenstein Festband* (1931) 349.
13. W.R. Schulz and D.J. Le Roy, *J. Chem. Phys.* 42 (1965) 3869;
B.A. Ridley, W.R. Schulz and D.J. Le Roy, *J. Chem. Phys.* 44 (1966) 3344.
14. E.J. Rosenbaum and T.R. Hogness, *J. Chem. Phys.* 2 (1934) 267.
15. M. van Meersche. *Bull. Soc. Chim. Belg.* 60 (1951) 99.
16. A. Farkas, *Zs. Elektrochemie* 36 (1930) 782; *Z. Phys. Chem.* B10 (1931) 419;
A. Farkas and L. Farkas, *Proc. Roy. Soc. A* 152 (1935) 124.
17. J. Shavitt, *J. Chem. Phys.* 49 (1968) 4028.
18. M. Karplus, R.N. Porter and R.D. Sharma, *J. Chem. Phys.* 40 (1964) 2033.
19. H. Conroy and B.L. Bruner, *J. Chem. Phys.* 47 (1967) 921.
20. J. Shavitt, R.H. Stevens, F.L. Minn and H. Karplus, *J. Chem. Phys.* 48 (1968) 2700.
21. W.R. Schulz and D.J. Le Roy, *Canad. J. Chem.* 42 (1964) 2480.
22. A.A. Westenberg and N. de Haas, *J. Chem. Phys.* 47 (1967) 1393.

Institute of Chemical Physics,
Academy of Sciences of the USSR.
Moscow, USSR

Received 20 August 1974



с) Максимальная температура, достижимая в химических реакциях

О МАКСИМАЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ, ДОСТИЖИМЫХ В ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЯХ

*Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, С.И. Светличный
Ю.Б. Шекк, В.М. Васильев, В.Л. Тальрозе*
Физика горения и взрыва, №2 (1980) 66–73

Об эффективности и качестве химических топлив обычно судят по их теплотворной способности по отношению к тому или иному окислителю. Такой подход, однако, не дает представления о температурах, получаемых при сжигании данного топлива. Между тем вопрос о максимальных температурах, принципиально достижимых в химических реакциях¹⁾ представляет определенный теоретический и практический интерес. В адиабатических условиях конечная температура продуктов химической реакции определяется тепловым эффектом реакции и теплоемкостью конечных продуктов при этой температуре [1, 2]. При этом необходимо учитывать, что при достаточно высоких температурах продукты реакции могут быть частично диссоциированы; это уменьшает эффективное энерговыделение и тем самым снижает достигаемую температуру продуктов сгорания. Для температур выше 4000 К указанный эффект играет заметную роль, и часто именно прочность конечных продуктов реакции, а не калорийность топлива определяет адиабатическую температуру. Чем более прочными являются молекулы-продукты, тем более высокая температура может быть принципиально достигнута.

Цель настоящего сообщения – выяснение теоретических пределов для температур, достижимых химическим путем, а также выбор наилучших для получения высоких температур химических соединений и условий их сгорания. Насколько авторам известно, в таком виде в литературе этот вопрос ранее не обсуждался.

Из всех известных химических соединений наиболее прочные химические связи встречаются у двухатомных молекул [3], и, следовательно, при прочих равных условиях наибольшие температуры должны достигаться в тех реакциях, продуктами которых являются самые прочные из двухатомных молекул. (Двухатомные молекулы лучше многоатомных и своей более низкой теплоемкостью.)

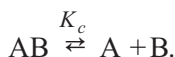
Если известны теплоты сгорания, константы равновесия всех возможных химических реакций и теплоемкость всех компонентов, то для каждой конкретной химической системы можно рассчитать достигаемую адиабатическую температуру $T_{ад}$. Обычно это так и делают, ввиду громоздкости задачи используя ЭВМ. Оказывается, однако, возможным проводить приближенные вычисления $T_{ад}$ по формулам, общим для любых химических реакций. Помимо открывающейся возможности быстрого подбора подходящих систем по простым критериям, такой анализ полезен еще и тем, что позволяет понять, как и в какой степени температура продуктов сгорания зависит от основных характеристик химического процесса.

Соотношение, связывающее адиабатическую температуру, тепловой эффект и прочность молекул-продуктов для реакций, продуктами которых являются двух-

1) Здесь не рассматривается вопрос о возможных локальных перегревах, например, во фронте ударных или детонационных волн.



атомные молекулы, может быть получено из следующих соображений. В простейшем случае, когда продукт реакции один – молекула АВ, количество диссоциированного продукта определяется константой равновесия K_c реакции



По определению

$$K_c = \frac{[A][B]}{[AB]} = K_c^0 \exp\left(-\frac{E_{\text{дисс}}}{RT}\right), \quad (1)$$

где $E_{\text{дисс}}$ – энергия диссоциации АВ. Вводя степень диссоциации

$$\xi = [A] / [AB]_0 = [B] / [AB]_0,$$

где $[AB]_0$ – концентрация АВ в отсутствие диссоциации, можно записать:

$$K_c = \xi^2 / (1 - \xi) \cdot [AB]_0,$$

откуда

$$\xi = K_c / 2[AB]_0 \cdot (\sqrt{1 + 4[AB]_0 / K_c} - 1). \quad (2)$$

Тепло Q , выделяющееся в химической реакции (или вводимое в систему извне), затрачивается на нагрев молекул АВ, на их диссоциацию и на нагрев образующихся атомов А и В. Поскольку $c_p > c_V$, то для достижения более высоких температур реакцию целесообразно проводить в замкнутом объеме ($v = \text{const}$). Учитывая все сказанное, запишем уравнение теплового баланса:

$$Q = 2c_V^{(1)}[A]\Delta T + c_V^{(2)}[AB]\Delta T + \xi E_{\text{дисс}}[AB]_0, \quad (3)$$

где $c_V^{(1)}$ и $c_V^{(2)}$ – теплоемкости атомов и двухатомной молекулы соответственно. Если пренебречь зависимостью $c_V^{(1)}$ и $c_V^{(2)}$ от температуры, то, подставляя в (3) $c_V^{(1)} = \frac{3}{2}R$,

$c_V^{(2)} = \frac{7}{2}R$, $[A] = [B] = \xi[AB]_0$ и $[AB] = (1 - \xi)[AB]_0$, получаем

$$\tilde{Q} = (7 - \xi) / 2 \cdot R\Delta T + \xi E_{\text{дисс}}, \quad (4)$$

где $\tilde{Q} = Q / [AB]_0$ – тепловой эффект реакции (или количество введенной извне теплоты), отнесенный к молю продукта АВ. Заменяя далее $\Delta T = T - T_H \approx T$ ($T_H \ll T$) и деля обе части в (4) на $E_{\text{дисс}}$, получаем искомое соотношение в безразмерной форме

$$\frac{\tilde{Q}}{E_{\text{дисс}}} = \frac{7 - \xi(0)}{2} \theta + \xi(\theta). \quad (5)$$

где $\theta = RT / E_{\text{дисс}}$, а выражение $\xi(\theta)$ получается после подстановки (1) в (2)

$$\xi(\theta) = \frac{K_c^0}{2[AB]_0} \exp\left(-\frac{1}{\theta}\right) \left(\sqrt{1 + \frac{4[AB]_0}{K_c^0} \exp \frac{1}{\theta}} - 1 \right). \quad (6)$$



Типичные значения предэкспоненциального множителя константы равновесия K_c^0 могут быть вычислены по термодинамическим данным [4] и для большинства интересующих нас реакций лежат в диапазоне $(0,4 \div 2,0) \cdot 10^4$

моль/л. На рис. 1 представлены результаты расчета по формуле (6) зависимости «приведенной» адиабатической температуры от «приведенного» энергозапаса $\tilde{Q} / E_{\text{дисс}}$ для концентраций $[AB]_0 = 0,045$ моль/л (соответствующих давлению смесей 1,0 атм при $T = 300$ К). Как видно из рис. 1, кривые $\theta = f(\tilde{Q} / E_{\text{дисс}})$ имеют два линейных участка: один при малых значениях $\tilde{Q} / E_{\text{дисс}}$ с наклоном $R / c_V^{(2)}$ соответствующий разогреву молекулярных продуктов АВ, и второй при очень больших значениях $\tilde{Q} / E_{\text{дисс}}$ с наклоном $R / 2c_V^{(1)}$, со-

ответствующий разогреву атомов А и В, получившихся при диссоциации АВ. Между ними расположена область с очень большой эффективной теплоемкостью, обусловленной расходом энергии на диссоциацию продуктов.

Максимальная энергия, которая может быть выделена в химической реакции типа $A + B \rightarrow AB$, – это энергия диссоциации ($E_{\text{дисс}}$) молекулы АВ. Ясно, что такого максимального тепловыделения можно достичь лишь в реакциях рекомбинации атомов или в реакциях очень слабо связанных исходных молекул. Поэтому в качестве характеристики, определяющей максимально достижимую температуру в реакциях типа $A + B \rightarrow AB$, можно использовать величину $\theta^* = \theta(\tilde{Q} / E_{\text{дисс}} = 1)$. Как видно из рис. 1, для любых молекул величина $\theta^* = 0,086–0,092$, а соответствующая этим θ^* максимальная теоретически достижимая температура

$$T^* = \theta^* \cdot E_{\text{дисс}} / R \quad (7)$$

является характеристикой молекулы-продукта (а не реакции) и пропорциональна ее энергии диссоциации. Заметим, что величина θ^* , а следовательно, и T^* весьма слабо зависят от K_c^0 (см. рис. 1) и, что особенно важно, от концентрации (давления) смеси (рис. 2). О характерных величинах T^* можно судить из следующих примеров: для СО ($E_{\text{дисс}} = 256$ ккал/моль) $T^* = 11500$ К; N_2 ($E_{\text{дисс}} = 225$ ккал/моль) – $T^* = 10000$ К; HF ($E_{\text{дисс}} = 135$ ккал/моль) – $T^* = 6000$ К; (F_2 $E_{\text{дисс}} = 37$ ккал/моль) – $T^* = 1600$ К и т.д. Естественно, что рекорсменами в этом ряду оказались молекулы СО и N_2 , являющиеся, как известно [3], самыми прочными из всех известных молекул.

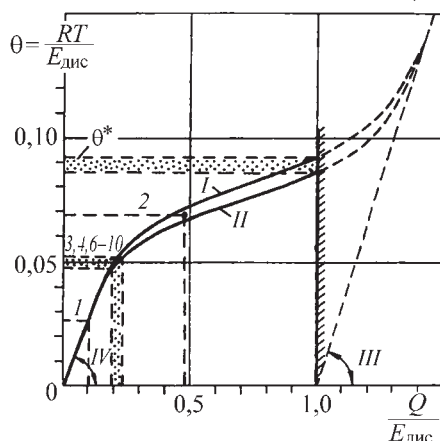


Рис. 1. Зависимость $\theta = f(\tilde{Q} / E_{\text{дисс}})$, рассчитанная по формулам (5) и (6), $K_c^0 = 0,4 \cdot 10^4$ (I) и $2,0 \cdot 10^4$ моль/л (II) ($V = \text{const}$) (цифры соответствуют номерам реакций из табл. 2, III – $(2c_V^{(1)} / R)^{-1}$; IV – $(c_V^{(2)} / R)^{-1}$)

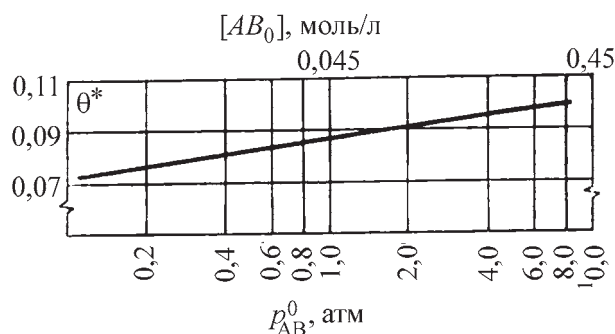


Рис.2. Зависимость θ^* от $[AB]_0$,
рассчитанная по формулам (5) и (6),
при $K_c^0 = 2 \cdot 10^4$ моль/л ($V = \text{const}$)

Однако, как уже упоминалось, реальные химические реакции всегда идут с тепловым эффектом, меньшим $E_{\text{дисс}}$ (для реакций типа $A_2 + B_2 \rightarrow 2AB$ – на сумму энергий связи в исходных молекулах A_2 и B_2). Это означает, что в реальных химических реакциях достигаемые температуры $T_{\text{ад}}$ всегда будут ниже T^* . Как видно из рис.1, тепловой эффект реакции «производительно» расходуется на разогрев продуктов до тех пор, пока

$$\tilde{Q} / T_{\text{дисс}} \leq 0.2. \quad (8)$$

При более высоких приведенных тепловыделениях (начиная с $\tilde{Q} \approx 0.3 \cdot E_{\text{дисс}}$) эффективная теплоемкость системы становится в несколько раз выше, чем при малых ($\tilde{Q} / E_{\text{дисс}}$, из-за больших расходов тепла на диссоциацию²⁾, поэтому даже существенное увеличение тепловыделения мало изменяет $T_{\text{ад}}$.

Пользуясь рис. 1, можно теперь отобрать самые высокотемпературные химические реакции и оценить достигаемые в них адиабатические температуры продуктов. По признаку (7) претендентами на самые горячие среди газозафазных реакций должны быть реакции, продуктами которых являются молекулы CO и N_2 . Кроме того, чтобы эти реакции действительно были самыми горячими, нужно потребовать, согласно (8), чтобы приведенные тепловыделения в них составляли не менее 45–50 ккал/ моль. В наибольшей мере этим требованиям удовлетворяют реакции окисления соединений цианового ряда кислородом, озоном и окисью азота (табл. 1 и 2). Пламена этих реакций при $p = \text{const}$ действительно известны как самые горячие. В табл. 1 представлены имеющиеся в литературе сведения о температурах, достигаемых в наиболее горячих пламенах при $p = 1$ атм.

Как уже упоминалось, при проведении реакций в замкнутом объеме ($V = \text{const}$) развивающиеся температуры должны быть выше, чем в соответствующих пламенах, приблизительно в c_p / c_v раз. Однако в отличие от пламен подобного рода данные о взрывах в замкнутом объеме, как расчетные, так и экспериментальные, в литературе практически отсутствуют. Помимо того, что такого рода сведения представляют несомненный самостоятельный интерес, они были нужны для сравнения получаемых по предлагаемому в настоящей работе методу величин $T_{\text{ад}}$ с точными значениями. Поэтому были выполнены полные термодинамические расчеты адиабатических температур и составов продуктов для ряда высокотемпературных

2) В области $\tilde{Q} / E_{\text{дисс}} \geq 0.3$ на диссоциацию конечных продуктов расходуется около 6/7 теплового эффекта реакции. При охлаждении эта энергия выделяется, замедляя скорость падения температуры.

реакций при $V = \text{const}$ на ЭВМ БЭСМ-6. Процессы ионизации при расчетах не учитывались.

Полученные результаты представлены в табл.2, откуда видно, что оценки максимальных температур из рис. 1 находятся в разумном согласии с результатами полных термодинамических расчетов. Для тех реакций, в которых получаются разные, но сравнимые по прочности связи молекулы (например, CO и N_2), при оценках в качестве $E_{\text{дисс}}$ принималось значение для более слабосвязанной молекулы. Максимальные температуры, оцененные из зависимости $\theta = f(\tilde{Q}/E_{\text{дисс}})$, получаются несколько ниже температур, даваемых полным термодинамическим расчетом. Авторы связывают это с тем, что при выводе формул сделано пренебрежение зависимостью c_v от T и в качестве c_v было принято ее максимальное значение $c_v = 7/2 \cdot R$.

Таблица 1

Температуры пламен некоторых высокотемпературных реакций ($p = 1$ атм)

Номер реакции	Реакция	Q , ккал.моль	Температура, К	Литература
1	$H + \frac{1}{2}O_2 = H_2O$	52	2963*	[5]
			2930**	[5]
2	$CO + \frac{1}{2}O_2 = CO_2$	68	2433*	[5]
			2620**	[5]
3*	$C_{\text{тн}} + \frac{1}{2}O_2 = CO$	26	3323*	[5]
4	$C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$	106	3383*	[5]
			3370**	[5]
5	$C_2N_2 + 2O_2 = 2CO_2 + N_2$	261	3500*	[6]
6	$C_2N_2 + 2N_2O = 2CO + 3N_2$	165	4195*	[7]
7	$H_2 + F_2 = 2HF$	128	4300**	[8]
8	$C_2N_2 + NO_2 = 2CO + \frac{3}{2}N_2$	135	4640*	[7]
9	$C_2N_2 + 2NO = 2CO + 2N_2$	168	4865*	[7]
			4850*	[12]
			4770**	[12]
10	$C_2N_2 + O_2 = 2CO + N_2$	126	4830*	[6, 10]
			4500**	[6]
11	$C_2N_2 + \frac{2}{3}O_3 = 2CO + N_2$	151	5208*	[11]
12	$C_4N_2 + 2O_2 = 4CO + N_2$	232	5261*	[9]
13	$C_4N_2 + \frac{4}{3}O_3 = 4CO + N_2$	277,5	5516*	[9]

* Расчет.

** Эксперимент.



Таблица 2

Температуры и состав продуктов некоторых высокотемпературных реакции при $V = \text{const}$

Номер реакции	Реакция	Оценка из рис. 1			Полный термодинамический расчет		
		$Q, \frac{\text{калл}}{\text{моль}}$	$E_{\text{дисс}}, \frac{\text{Ккал}}{\text{моль}}$	$Q, \frac{\text{калл}}{\text{моль}}$	$T_{\text{ад}}, \text{К}$	исходное давление, атм	давление при $T_{\text{ад}}, \text{атм}$
1	$C_{\text{ТВ}} + \frac{1}{2}O_2 = CO$	26,4	256	26,4	3840	0,67 (O_2)	10,77
2	$H_a + F_2 = 2HF$	128,4	135	64,2	4725	1,0	22,53
3	$C_2N_2 + 2N_2O = 2CO + 3N_2$	165,4	225	33	4500	1,0	30,59
4	$C_2N_2 + NO_2 = 2CO + \frac{3}{2}N_2$	134,5	225	38,4	5060	1,0	36,26
5	$C_{\text{ТВ}} + \frac{1}{3}O_3 = CO$	37,7	256	37,7	5170	0,25 (O_3)	15,67
6	$C_2N_2 + O_2 = 2CO + N_2$	126,6	225	42	5630	1,0	32,59
7	$C_2N_2 + 2NO = 2CO + 2N_2$	168	225	42	5630	1,0	29,00
8	$C_4N_2 + 2O_2 = 4CO + N_2^{**}$	232	225	46,4	5850	—	—
9	$C_2N_2 + \frac{2}{3}P_3 = 2CO + N_2^{***}$	151	225	50,3	6100	1,0	> 6000
10	$C_4N_2 + \frac{4}{3}O_3 = 4CO + N_2^{**}$	277,5	225	55,5	6300	—	—

* Запись $CO\ 2,97(-2)$ означает, что $[CO] = 2,97 \cdot 10^{-2}$ моль/л. ** В справочнике [4] данные для C_4N_2 отсутствуют.*** В справочнике [4], на основе которого составлены наши программы, термодинамические данные для C_2N_2 даются только до 6000 К.

Проверка показала, что вполне разумные результаты получаются и в тех случаях, когда продуктами реакции являются трехатомные молекулы с той лишь разницей, что значения $T_{\text{ад}}$ здесь получаются несколько выше точных адиабатических температур (в основном из-за большей теплоемкости трехатомных молекул-продуктов). При этом за величину $\tilde{Q}$ принимался тепловой эффект реакции, отнесенный к числу молей связей в молекулах-продуктах.

И наконец, необходимо подчеркнуть, что предлагаемый подход дает неудовлетворительные результаты в тех случаях, когда в реакции образуются молекулы существенно разной химической прочности. Эта ситуация характерна, например, для сравнительно горячих реакций окисления углеводородов:



В таких и других апалогичных случаях для получения разумных результатов намного более прочные молекулы CO следует рассматривать как инертный газ-разбавитель, диссоциацией которого при температурах ниже 5500 К можно пренебречь. Если повторить все те рассуждения, которые были сделаны при выводе формулы (5), то для реакции (9) в тех же обозначениях получим

$$\frac{\tilde{Q}}{E_{\text{дисс}}} = \frac{7 \frac{k+l}{l} - \xi(0)}{2} \theta + \xi(\theta), \quad (10)$$

где $\tilde{Q} = Q / l$ – тепловой эффект реакции, приведенный к молю менее прочных молекул, а степень диссоциации $\xi(\theta)$ по-прежнему описывается выражением (6). Расчет по формуле (10) приводит к значениям $T_{\text{ад}}$ близким к получаемым при точном термодинамическом расчете реакций окисления углеводородов. Аналогичным образом могут быть получены и зависимости температуры сгорания химически активной смеси от ее разбавления инертным газом, а также при отступлении начального состава смеси от стехиометрии.

Следует отметить, что при оценках и расчетах, обсуждающихся выше, начальная температура смеси $T_{\text{н}}$ считалась постоянной и малой. В то же время в химически активную смесь часть энергии можно ввести извне (в том числе и за счет тепла, выделяющегося в другой химической реакции). Характер зависимости $T_{\text{ад}}$ от начального разогрева $T_{\text{н}}$ также можно легко установить из зависимостей, данных на рис. 1, если под $\tilde{Q}$ понимать сумму теплового эффекта реакции и тепловой энергии предварительного нагрева реагентов. Если допускать начальный нагрев смеси, то теоретически конечная температура ничем не ограничивается.

В действительности же приходится, однако, учитывать реальные возможности получения сколь-нибудь стабильной смеси при повышенных температурах. Если говорить о наиболее высокотемпературных реакциях взрывного окисления соединений цианового ряда, то мыс полуострова цепного воспламенения смеси C_2N_2 и O_2 находится в районе 900–1000°C [13], а для смеси C_4N_2 и O_2 – всего лишь в районе 100°C [14]. При этом начальный разогрев смеси C_2N_2 и O_2 даже на 700° приводит к увеличению $T_{\text{ад}}$ всего лишь на 200°; для второй смеси возможное



увеличение $T_{ад}$ благодаря начальному разогреву смеси (или компонентов) и вовсе незначительно. В этом смысле начальный разогрев может быть намного более эффективным для реакции 1 (см. табл.2 и рис.1), для которой конечная температура возрастает практически на величину начального разогрева.

Заметим, что до сих пор говорилось лишь о газофазных реакциях как по исходным реагентам, так и по конечным продуктам (за исключением реакций твердого углерода). Поэтому в стороне остались реакции горения металлов (Mg, Al, Ti, Zr и т.д.), продуктами которых являются весьма прочные твердые окислы³⁾ металлов [3, 4], что должно приводить к весьма высоким температурам продуктов. При строгом рассмотрении этих, но существу гетерогенных, реакций требуется учет удельных теплот фазовых переходов как в исходных веществах, так и в продуктах, что может в принципе существенно влиять на тепловой баланс в системе. Если использовать в качестве $\tilde{Q}$ приведенный к моллю продуктов тепловой эффект этих реакций с учетом теплот фазовых переходов, то для оценки достигаемых температур также можно пользоваться зависимостью $\theta(\tilde{Q} / E_{дисс})$ из рис. 1. Как показали такие оценки, которые сравнивались с результатом выполненных нами полных термодинамических расчетов, адиабатические температуры в самых горячих из этих реакций близки к 6000 К. Наибольшая адиабатическая температура (5923 К) достигается в реакции сгорания твердого Zr в кислороде при $p_0 = 5$ атм ($V = \text{const}$). Однако в отличие от газофазных реакций взрывного окисления циановых производных, где высокие температуры продуктов* достаточно легко реализуются, гетерофазные реакции окисления металлов идут столь медленно (по сравнению со скоростью теплоотвода), что реально достигаемые при сгорании проволок Zr в O_2 температуры не превышают 4500 К [16].

Литература

1. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., Мир, 1968.
2. В.Н. Кондратьев, Е.Е. Никитин. Кинетика и механизм газофазных реакций. М., Наука, 1973.
3. Л.В. Гурвич и др. Энергии химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. М., Наука, 1974.
4. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Под ред. В.П. Глушко. М., Изд-во АН СССР, 1962.
5. R. Mavrodineanu, H. Boiteux. Flame Spectroscopy. N.Y. Wiley, 1965.
6. J. Janin, A. Bouvier. Spectrochim. Acta, 1964, 20, 1787.
7. C.S. Stokes, R.P.M. Werner et al. Ind. Eng. Chem., 1960, 52, 75.
8. R.H. Wilson, G.B. Conway et al. J. Am. Chem. Soc., 1951, 73, 5514.
9. A.D. Kirschenbaum, A.V. Grosse. J. Am. Chem., 1956, 78, 2020.
10. M. Aillet, A. van Tiggelen. Bull. Soc. Chim. Beiges, 1968, 77, 433.
11. A.G. Streng, A.V. Grosse. J. Am. Chem. Soc., 1957, 79, 5583.
12. J.G. Gros, A. Bouvier, J. Chevalere. Combustion Flame, 1971, 16, 205.
13. H. James. Rev. Inst. Franc. Retrole Ann. Combust. Ziguide, 1957, 12, 1241.
14. Е.Б. Гордон, С.Е. Наливайко, В.С. Павленко. Кинетика и катализ, 1978, 19, 813.
15. Е.А. Еремин, Е.Т. Махров и др. Приборы и техника эксперимента 1974, 4, 164.

3) Хотя энергия связи в моноокислах металлов существенно ниже, чем у CO или N_2 , в твердом окисле прочность связи между элементами оказывается выше из-за того, что в твердом теле каждый атом химически связан с несколькими атомами, а не с одним, как в двухатомных молекулах.



d) Химическая лампа Гордона

ИМПУЛЬСНОЕ ФОТОИНИЦИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОЙ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ СЕРОУГЛЕРОДА

Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, В.С. Павленко
Кинетика и катализ, 21 (1980) 1406–1411

Для смесей CS_2 с O_2 , находящихся до фотолиза вне полуострова цепного самовоспламенения, воздействие УФ-облучения связано с импульсным разогревом. Взрыв происходит, если при достаточной энергии инициирования смесь попадает глубоко внутрь полуострова воспламенения, где время индукции меньше характерного времени теплоотвода.

Внутри полуострова самовоспламенения при малых энергиях УФ-облучения резкое сокращение времени развития взрыва есть результат положительного взаимодействия цепей в реакции окисления сероуглерода.

Импульсный УФ-фотолиз горючих смесей часто приводит к их взрыву. При этом, как было обнаружено для смесей ряда водородсодержащих веществ с кислородом [1] и фтора с водородом [2], переход к взрыву может иметь по энергии инициирующего импульса характер предельного явления. Аналогичное явление наблюдалось нами и для смесей сероуглерода с кислородом [3].

В цепных разветвленных реакциях, к которым принадлежит реакция окисления сероуглерода, наблюдаемые при фотоинициировании взрывы в принципе могут быть обусловлены двумя причинами: вхождением в полуостров воспламенения первоначальной смеси за счет повышения температуры и изменением положения предела самовоспламенения, связанным с изменением состава смеси. Одной из целей настоящей работы является выяснение того, в какой мере тот или иной механизм ответствен за наблюдаемые при фотоинициировании смесей CS_2 с O_2 предельные явления.

Отличительной особенностью реакции окисления сероуглерода является положительное взаимодействие цепей [4]. Это означает, что и небольшие концентрации активных центров, образованных посторонним источником, например УФ-светом, могут приводить к резкому увеличению скорости реакции для смесей, находящихся в полуострове самовоспламенения. В настоящей работе мы попытались выяснить возможность однородного по объему быстрого поджига смеси CS_2 с O_2 светом импульсных ламп сравнительно низкой интенсивности.

Методика эксперимента

Опыты проводили на установке, принципиальная схема которой описана в [5]. Реакционный сосуд представлял собой трубку из оптического кварца (граница пропускания света ~ 180 нм) диаметром 2 см и длиной 60 см; трубку нагревали намотанной на нее нихромовой спиралью; экранировка инициирующего света спиралью была весьма незначительной. Температуру в реакторе можно было изменять от 20 до 180°C. Наличие длительных периодов индукции (как правило, несколько секунд и больше) давало возможность проводить эксперименты как вне, так и внутри полуострова воспламенения, быстро перепуская холодную смесь из смесительного бач-



ка в нагретую кювету. Время установления теплового равновесия со стенками по оценкам не превышало 0,1 сек.

Фотоиницирование осуществлялось с помощью двух последовательно соединенных импульсных ламп, заполненных ксеноном до давления 20 Тор (размеры и материал ламп те же, что и у реакционного сосуда). Источником электрической энергии служила батарея из двух конденсаторов емкостью по 3 мкф, заряжаемая до напряжения ≤ 40 кв. Минимальная энергия инициирования W составляла 90–100 Дж. Для увеличения интенсивности инициирующего света лампы и реакционный сосуд помещали внутрь алюминиевого цилиндрического отражателя. Длительность импульса УФ-излучения составляла 40 мксек. Степень фотодиссоциации сероуглерода ϵ определяли по методике [6]; она составляла $\sim 10\%$ при энергии, запасенной в конденсаторах, $W = 1$ кДж и давлении CS_2 около 0,5 Тор.

О протекании реакции судили по ИК- и видимому свечению, наблюдавшемуся через торцевые окна кюветы после инициирующего импульса с помощью фотосопротивлений ФСГ-22-3А1 или ФС-АГ2 с системой оптических фильтров и диафрагм. Форму импульсов света регистрировали на запоминающем осциллографе (С1-51 или С8-2).

Реакционный сосуд периодически очищали от постепенно образующейся на его поверхности пленки продуктов взрыва. Использовали сероуглерод марки «ч.». Дополнительная очистка сероуглерода по методике [7] не приводила к каким-либо существенным изменениям в результатах экспериментов. Кислород и другие газы брали из баллонов. Состав рабочей смеси характеризовали параметрами $\alpha = (\text{O}_2) / (\text{CS}_2)$ и $\beta = (\text{M}) / (\text{CS}_2)$, где М – инертный газ-разбавитель.

Результаты и их обсуждение

Первые эксперименты по фотоиницированию взрывов в смесях CS_2 с O_2 [3] показали, что реакция протекает в две стадии (рис.1). Первая, сопровождающаяся интенсивным свечением в ИК-области, имеет место непосредственно при фотоиницировании и обязана протеканию быстрых химических реакций:

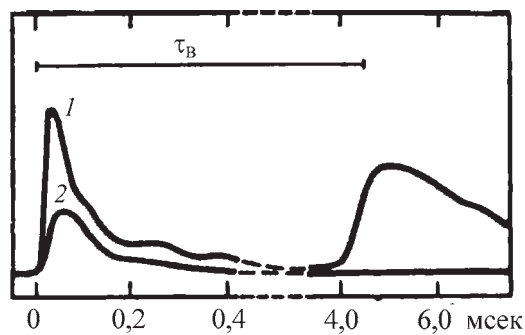


Рис.1. Осциллограммы ИК-свечения при импульсном фотолизе смеси CS_2 с O_2 ($\alpha = 19$, $P_{\text{CS}_2} = 1$ Тор, $T_0 = 21^\circ\text{C}$); 1 – $W = 1,6$, 2 – $W = 0,6$ кДж (τ_b – время задержки второй стадии реакции)

в третьей из которых образуется сильно колебательно-возбужденные молекулы CO [8].

Вторая стадия, четко отделенная по времени от первой, возникает лишь тогда, когда энергия инициирования превышает некоторую пороговую ($W > W_{\text{пор}}$). Эта стадия сопровождается мощным излучением как в ИК-, так и в видимой областях спектра. Если в первой стадии реакция идет лишь до некоторой глубины (при $W < W_{\text{пор}}$ повторное инициирование снова сопровождается свечением [5]), то во второй стадии реакция проходит до конца. Интересно, что временные характеристики второй, более медленной стадии реакции, аналогичны наблюдавшимся при самовоспламенении смесей того же состава и начального давления [9]).

Возникновение второй стадии реакции при увеличении энергии инициирования имеет характер ярко выраженного предельного явления. Переходная область по крайней мере меньше, чем точность измерения энергии, запасенной в конденсаторах, составляющая 2%; возможно, поэтому нам не удалось в экспериментах при комнатной температуре обнаружить времена развития взрыва $\tau_{\text{в}}$ больше, чем 10 мсек. При $W > W_{\text{пор}}$ чем выше вкладываемая энергия, тем короче $\tau_{\text{в}}$. Однако, начиная с $\tau_{\text{в}} \approx 2$ мсек, зависимость $\tau_{\text{в}}(W)$ становится слабой: так, для уменьшения $\tau_{\text{в}}$ с 2 до 1,5 мсек требуется двукратное превышение энергии над $W_{\text{пор}}$ (рис. 2).

Энергии инициирования, необходимые для «увлечения» взрывной реакции при комнатной температуре, вообще говоря, значительны (рис. 3). При увеличении на-

Рис.2. Зависимость $\tau_{\text{в}}$ от W
($\alpha = 4$, $P_{\text{CS}_2} = 3$ Торр);
1 – $T_0 = 21$, 2 – $T_0 = 140^\circ\text{C}$

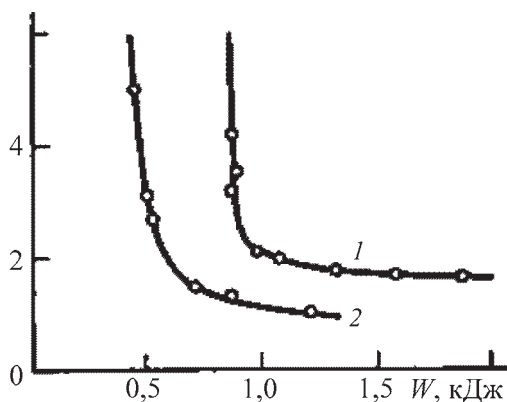
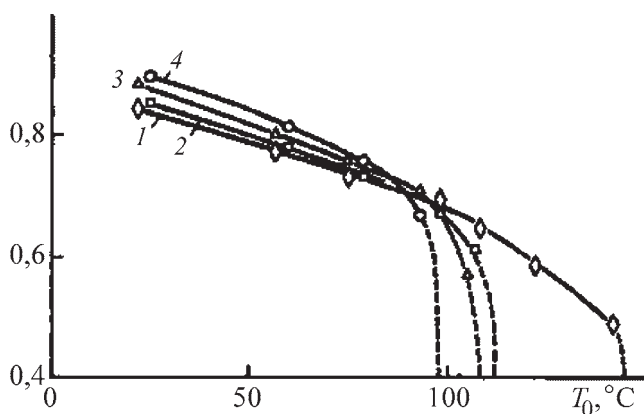


Рис.3. Зависимость $W_{\text{пор}}$ от T_0
при разном содержании кислорода
($P_{\text{CS}_2} = 3$ Торр):
1 – $\alpha = 4$, 2 – $\alpha = 9$,
3 – $\alpha = 14$, 4 – $\alpha = 19$.
Пунктир соответствует
областям самовоспламенения



чальной температуры смеси T_0 величина $W_{\text{пор}}$ приблизительно линейно уменьшается, но даже вблизи предела воспламенения остается большой. С повышением T_0 предельные явления становятся менее выраженными (см. рис. 2), вблизи полуострова воспламенения удается зарегистрировать значения $\tau_v \sim 1$ сек, но даже у предела самовоспламенения изменения в W на 10% приводят к изменениям τ_v на 2–3 порядка.

Если начальная температура T_0 такова, что смесь сразу находится внутри полуострова воспламенения, т.е. и без воздействия света самопроизвольно взрывается (через время индукции $\tau_{\text{инд}}$), то имеет смысл говорить о влиянии интенсивности облучения на время задержки воспламенения, тем более, что форма импульса свечения, как оказывается, и здесь практически не зависит от интенсивности фотоиницирования. На рис. 4 приведены зависимости времени τ_v от энергии W , запасенной в конденсаторах. Из рисунка видно, что уже при весьма малых значениях W наблюда-

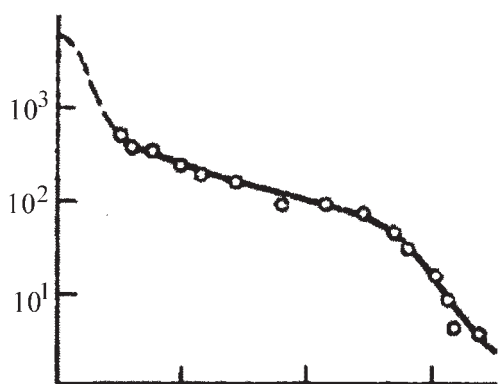


Рис.4. Влияние W на τ_v внутри полуострова самовоспламенения

($\alpha = 14$, $P_{\text{C}_2\text{S}_2} = 3$ Тор, $T_0 = 115^\circ\text{C}$).

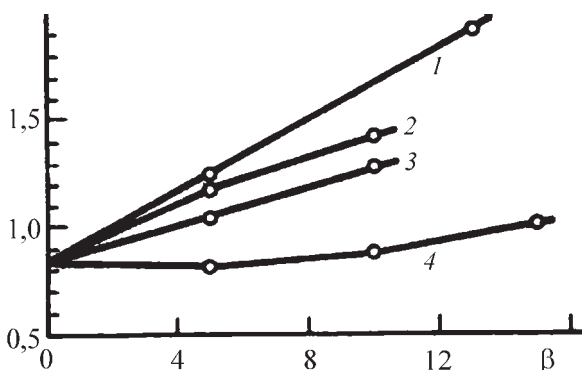
При $W = 0$ на $\tau_v = \tau_{\text{инд}} = 6$ сек

ется существенное изменение времен τ_v . Так, например, при энергии порядка 150 Дж время τ_v в 15 раз меньше τ_v . С другой стороны, энергии инициирования, необходимые для того, чтобы смесь взорвалась через время ~ 10 мсек (что характерно для τ_v вне полуострова воспламенения), по-прежнему велики и близки к значениям, полученным линейной экстраполяцией зависимостей рис.3 к данным температурам. Таким образом, создается впечатление, что при быстром развитии взрыва механизм не зависит от того, находится ли смесь внутри полуострова воспламенения или вне его.

Для того чтобы попытаться разделить вклад двух возможных причин воспламенения смеси CS_2 с O_2 , находящейся вне полуострова самовоспламенения, – нагрева излучением при фотоннициировании и фотохимического образования активных частиц, нами были проведены эксперименты по изучению зависимости предельной энергии инициирования $W_{\text{пор}}$ от общего давления P_0 , добавления инертных газов и относительного содержания кислорода в смеси. В области малых давлений (до 15 Тор) величина $W_{\text{пор}}$ резко падает с ростом P_0 , а затем стремится к некоторому значению, слабо зависящему от давления. Сама по себе такая зависимость не может являться аргументом в пользу того или иного механизма: с уменьшением давления, с одной стороны, уменьшается температура к моменту воспламенения из-за увеличения коэффициента теплопроводности, с другой – повышается температура самовоспламенения [1, 10]. Однако тот факт, что $W_{\text{пор}}$ перестает зависеть от давления, начиная с $P_0 \approx 15$ Тор, где вычисляемое время теплопроводности для смеси $\text{CS}_2:\text{O}_2 = 1:4$ в сосуде $d = 20$ мм, составляющее 17 мсек, не намного превышает задержки воспламенения $\tau_v \approx 5$ мсек, указывает на тепловой механизм. В то же время зависимости $W_{\text{пор}}$ от концентрации газов-разбавителей (рис. 5) прямо говорят об участии теплового



Рис.5. Действие различных газов-разбавителей на $W_{\text{пор}}$ для смеси $\text{CS}_2:\text{O}_2 = 1:4$ ($P_{\text{CS}_2} = 3 \text{ Тор}$, $T_0 = 2^\circ\text{C}$:
1 – CO_2 2 – He, 3 – N_2 , 4 – O_2



разогрева в механизме инициированного воспламенения. Действительно, величина $W_{\text{пор}}$ хорошо коррелирует с теплоемкостью разбавленной смеси (CO_2 и N_2) или ее теплопроводностью (He).

В рамках теплового механизма легко получить наблюдаемую в эксперименте линейную зависимость $W_{\text{пор}}(T_0)$. Если предположить, что взрыв происходит тогда, когда адиабатический нагрев смеси при фотолизе $\Delta T_{\text{ад}}$ приводит к температуре $T_{\text{в}}$ (большей, чем температура самовоспламенения), при которой время индукции цепной разветвленной реакции сравнимо с временем остывания смеси, то можно записать условие воспламенения

$$T_0 + \Delta T_{\text{ад}} = T_{\text{в}}(\alpha) \quad (1)$$

(предполагая, что $T_{\text{в}}(\alpha)$ слабо зависит от других параметров горючей смеси). Адиабатический разогрев $\Delta T_{\text{ад}}$ можно представить в виде

$$\Delta T_{\text{ад}} = \frac{\varepsilon \Delta q}{c_{\text{CS}_2} + \alpha c_{\text{O}_2} + \beta c_{\text{M}}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot W$ – степень фотодиссоциации CS_2 ; $\Delta q = \Delta q_1 + \Delta q_2$; $\Delta q_1 = \overline{h\nu} - D_{\text{S-CS}}$ – избыток энергии поглощенных квантов света по отношению к энергии диссоциации CS_2 ; Δq_2 – тепловой эффект быстрых вторичных реакций (II)–(IV), c_i – теплоемкость i -го компонента смеси. Из (1) и (2) получаем выражение

$$W_{\text{пор}} = \frac{T_{\text{в}}(\alpha) - T_0}{\varepsilon_0 \Delta q} (c_{\text{CS}_2} + \alpha c_{\text{O}_2} + \beta c_{\text{M}}), \quad (3)$$

которое качественно правильно описывает экспериментальные зависимости $W_{\text{пор}}(T)$ и $W_{\text{пор}}(\beta)$.

Количественная оценка разогрева только за счет избытка поглощенной энергии света по формуле (2) для смеси с $\alpha = 4$, $\beta = 0$, $\varepsilon \approx 0,1$ и $\Delta q = \Delta q_1 = 141 - 105 = 36$ ккал/моль (полагаем, что $\overline{h\nu}$ соответствует $\bar{\lambda} \approx 200 \text{ нм}^1$) дает величину $\Delta T_{\text{ад}}^{(1)} = 120^\circ$. Однако, исходя из формулы (3) и экстраполируя линейный начальный участок зависимости $W_{\text{пор}}(T_0)$ к большим T_0 , можно по экспериментальным данным рис.3 вы-

1) Вклад длинноволновой полосы поглощения CS_2 290–340 нм в диссоциацию ми по сравнению с коротковолновой из-за низкого коэффициента поглощения [11].

числить величины T_B , которые оказываются $\geq 300^\circ\text{C}$. Это указывает на сравнимый вклад в разогрев при инициировании теплового эффекта Δq быстрых вторичных реакций, протекающих за времена, меньшие чем характерное время теплопроводности смеси. Наблюдаемая зависимость $W_{\text{пор}}$ от относительного содержания кислорода в смеси (т.е. от α) явно не описывается выражением (3). Поскольку теплоемкость O_2 равна теплоемкости N_2 , то зависимость $W_{\text{пор}}(\alpha)$ должна совпадать с зависимостью $W_{\text{пор}}(\beta_{N_2})$. Однако необходимо учитывать, что при увеличении содержания кислорода в смеси, во-первых, снижается предел самовоспламенения [10] и, значит, уменьшается величина T_B ; во-вторых, при этом значительно может увеличиваться тепловыделение в инициируемых светом быстрых реакциях Δq_2 за счет увеличения скорости процесса $SO + O_2 \rightarrow SO_2 + O$ и процесса (II), конкурирующего с термонеutralным процессом



Развитая модель, таким образом, сводит действие инициирующего фотоимпульса на смесь сероуглерода с кислородом к достижению некоторой критической величины температуры T_B , на столько превышающей температуру самовоспламенения, что время индукции становится меньше времени теплоотвода (т.е. порядка мсек).

Приняв указанный механизм действия инициирующего УФ-света на смесь CS_2 с O_2 , находящуюся первоначально вне полуострова воспламенения, рассмотрим теперь действие флеш-фотолиза на развитие разветвленно-цепной реакции внутри полуострова воспламенения. При больших энергиях вспышки, когда времена развития взрыва τ_B меньше характерного времени теплоотвода, как уже упоминалось, зависимость $\tau_B(W)$ такая же, как и при инициировании смеси вне полуострова воспламенения (рис.4). Полагая, что энергии инициирования $W \approx 1$ кДж соответствует суммарный разогрев $\Delta T \approx 340^\circ$, можно оценить величину «энергии активации времени τ_B » $E_{\tau_B} \approx 23$ ккал/моль. Интересно, что измеренная нами энергия активации времени индукции при самовоспламенении холодных смесей CS_2 с O_2 , впрыскиваемых в нагретую кювету, в диапазоне времен $\tau_{\text{инд}} = 10 \div 10^3$ сек оказывается также около 20 ккал/моль. Такое совпадение может указывать на близость химических процессов, определяющих длительность задержек воспламенения в секундном и миллисекундном временных диапазонах. При энергиях инициирования, меньших 0,5 кДж, зависимость $\tau_B(W)$ становится гораздо более слабой, причем переходная область лежит в районе $\tau_B \approx 60$ мсек, т.е. времени, близкого к вычисляемому времени теплоотвода, равному в данных условиях приблизительно 50 мсек. Такая зависимость находит естественное объяснение в нарушении при больших временах τ_B адиабатичности нагрева.

Начиная с времен задержки воспламенения $\tau_B \approx 300$ мсек, влиянием нагрева фотолизом можно уверенно пренебречь: к моменту воспламенения температура не может заметно отличаться от T_0 . Это означает, что при указанных временах τ_B влияние фотоиницирования, заключающееся в сокращении времени задержки воспламенения от $\tau_{\text{инд}} \approx 6$ сек до $\tau_B \approx 300$ мсек, целиком обязано фотохимическому зарождению активных центров CS и S . Как известно, при линейном разветвлении время развития взрыва очень слабо зависит от начальных условий. Поэтому естественно считать



наблюдаемый эффект непосредственным проявлением положительного взаимодействия цепей, которое для реакции $\text{CS}_2 + \text{O}_2$ предполагалось на основании изучения распространения соответствующих холодных пламен.

Тот факт, что квазиизотермическое ускорение проявляется лишь до времен ~ 300 мсек, говорит о том, что характеристические времена положительного взаимодействия цепей того же порядка. Другими словами, используя особенности механизма реакции окисления сероуглерода, смесь CS_2 с O_2 можно однородно «поджечь» светом во всем объеме, затрачивая незначительную энергию, но за довольно большие времена. Для быстрого «поджига» специфика данной реакции пропадает: энергии инициирования должны быть значительными.

Литература

1. Р.Г. Норриш, Сб. Химическая кинетика и цепные реакции, «Наука», М., 1966, стр.559.
2. Г.К. Васильев, В.В. Вижин, Е.Ф. Макаров, Ю.А. Чернышев, В.Л. Тальрозе, Химия высоких энергий, 9, 154, 1975.
3. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, Ю.Л. Москвин, В.С. Павленко, В.Л. Тальрозе, Тез. докл. на 2-м Всесоюзном совещании по фотохимии, Сухуми, 1974, МГУ, М., 1974, стр.23.
4. В.Г. Воронков, Н.Н. Семенов, Ж. физ. химии, 13, 1695, 1939.
5. Е.Б. Гордон, В.С. Павленко, Ю.Л. Москвин, М.С. Дроздов, П.С. Виноградов, В.Л. Тальрозе, Ж. эксперим. и теор. физики, 63, 1159, 1972.
6. E.B. Gordon, Yu.L. Moskvina, V.S. Pavlenko, V.L. Tal'roze, J. Photochem., 5, 401, 1976.
7. А. Вайсбергер, Э. Проскауэр, Д. Риддик, Э. Тупе, Органические растворители, Изд-во иностр. лит., М., 1958.
8. G. Hancock, C. Morley, I.W. M. Smith, Chem. Phys. Letters, 12, 193, 1971.
9. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, В.Д. Шампов, В.Л. Тальрозе, Физ. горения и взрыва, 10, 15, 1974.
10. W. Thompson, C.F. Kearton, Z. phys. Chem., B14, 359, 1931.
11. J.W. Rabalais, J.M. McDonald, V. Scherr, S.P. McGlynn, Chem. Revs, 71, 73, 1971.

Отделение Института химической физики
АН СССР, Черноголовка

Поступила в редакцию
15 октября 1979 г.



О ПРИРОДЕ САМОУСКОРЕНИЯ ЦЕПНОЙ РАЗВЕТВЛЕННОЙ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ СЕРОУГЛЕРОДА

Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов

Физика горения и взрыва, №2 (1980) 62–66

Большинство авторов, исследовавших цепное самовоспламенение смесей сероуглерода с кислородом (или воздухом), отмечают существование длительных времен индукции взрыва $\tau_{\text{инд}}$ [1–3] (в настоящих экспериментах до 40 мин) наряду с быстрым последующим развитием реакции ($\tau_p \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ с). Эта кинетическая особенность, не укладывающаяся даже качественно в обычную схему разветвленно-цепного процесса (по которой $\tau_{\text{инд}} \sim \tau_p$), до сих пор последовательно не анализировалась. В настоящей работе сообщается о результатах экспериментов по исследованию кинетики самовоспламенения смесей CS_2 и O_2 , направленных на выяснение природы несоответствия между временами индукции и развития реакции.

Эксперименты ставились следующим образом. Предварительно приготовленная при $T \approx 300$ К смесь $\text{CS}_2 : \text{O}_2 = 1 : 4$ впрыскивалась до получения заданного давления ($p_0 = 5 \div 40$ Торр) в вакуумированный сосуд, стенки которого равномерно нагреты до температуры T_0 ($T_0 = 120 \div 200^\circ\text{C}$). Использовались кварцевые и стальные сосуды с характерным размером в несколько сантиметров и объемом $200 \div 400 \text{ см}^3$. О самовоспламенении судили по излучению в видимой области спектра, обязанному молекулам SO_2 , и по изменению давления смеси (датчик давления ДД-10 со вторичным прибором ИД-2И; чувствительность ~ 1 Торр, временное разрешение $\sim 10^{-3}$ с). Типичное семейство кривых $\tau_{\text{инд}}(p_0)$ при различных T_0 для одного из применявшихся кварцевых сосудов приведено на рис. 1.

Рассматривались следующие гипотетические механизмы, объясняющие переход медленно развивающегося химического процесса в быстрый взрыв:

1) ингибирование в принципе быстрой разветвленно-цепной реакции выгорающими в ходе реакции неконтролируемыми примесями, подобно тому как это имеет место при хлорировании водорода и углеводородов [4];

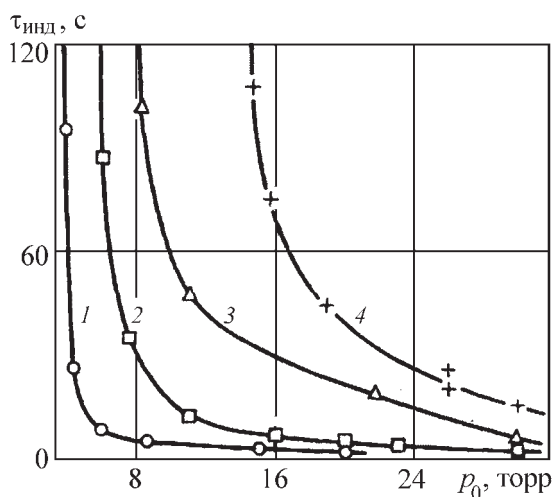


Рис.1. Зависимость времени индукции от начального давления при начальной температуре 200 (1), 175 (2), 150 (3) и 135°C (4). Смесь $\text{CS}_2 : \text{O}_2 = 1 : 4$, кварцевый сосуд с характерным размером 70 мм

- 2) тепловой взрыв смеси, возникающий на некотором этапе принципиально медленной цепной разветвленной реакции¹⁾;
- 3) изменение свойств поверхности (ингибирование или катализ) в ходе реакции;
- 4) нелинейное разветвление в реакции (которое формально может быть описано положительным взаимодействием цепей).

Для проверки гипотезы об ингибировании выгорающей примесью проведено исследование влияния степени очистки исходного сероуглерода (по методике, описанной в [6]) на величины $T_{\text{инд}}$ и τ_p . В диапазоне концентраций примесей $1 \div 0,1\%$ (содержание примесей в CS_2 контролировалось масс-спектрометрически) не обнаружено уменьшения времени индукции при увеличении степени чистоты CS_2 . Эти результаты в рамках гипотезы об ингибировании означали бы, что содержание ингибирующей примеси не изменяется заметно при используемой методике очистки и, кроме того, что эта примесь является необычайно эффективной в реакции гибели на ней активных частиц (для эффективного торможения цепного разветвления с характерным временем $\sim 10^{-3}$ с при содержании примеси $0,1\%$ константа скорости ее реакций с активными частицами должна быть не менее $10^{-11} \text{ см}^3/\text{с}$). Указанные соображения делают эту гипотезу маловероятной, тем более что большие значения наблюдались, например, в [2], где степень очистки применявшегося CS_2 составляла $\sim 0,001\%$ и применялась принципиально иная методика очистки.

Стандартным приемом при установлении тепловой природы взрывного химического процесса является измерение предразогрева смеси: для обычного теплового взрыва перед началом быстрой его стадии разность между температурой внутри сосуда и на его стенке должна быть порядка температуры Франк-Каменецкого $\Theta = RT_0 / E_a$, где E_a – энергия активации молекулярной реакции [7].

В эксперименте предразогрев при самовоспламенении смесей CS_2 и O_2 измерялся по изменению давления, связанного с температурой соотношением $\Delta p / p \simeq \Delta T / T$. Зависимость давления от числа частиц в реакции окисления в период индукции связана только с процессами обрыва цепей на стенке и, как показывают оценки, относительно мала. Временные характеристики датчика давления позволяли обнаружить повышение давления, связанное с предразогревом, поскольку время существования последнего должно быть не меньше времени теплоотвода в системе, составляющего $0,3 \div 1,3$ с. В экспериментах использовались «чистые» смеси CS_2 и O_2 ($\alpha = [\text{O}_2] / [\text{CS}_2] = 4$) и смеси, разбавленные He ($\beta = [\text{He}] / [\text{CS}_2] = 15, 35, 50$), давления варьировались в пределах $1100 \div 760$ Тор, начальная температура составляла $\sim 150^\circ\text{C}$.

При самовоспламенении указанных смесей не замечено изменения давления вплоть до быстрой стадии взрыва, когда оно резко (характерное время переднего фронта $\sim 10^{-3}$ с) возрастало (рис. 2), т.е. в пределах точности эксперимента, составлявшей $2\text{--}3^\circ\text{C}$, предразогрев не обнаружен. Величине $\Delta T \leq 3^\circ\text{C}$ соответствует $E \geq 120$ ккал/моль, что близко к энергии диссоциации CS_2 . Ясно, что ни о каком тепловом взрыве при молекулярной реакции с такой энергией активации не может быть и речи. Однако существующая теория теплового взрыва разработана для нецепных

1) Чисто тепловое самовоспламенение смеси CS_2 и O_2 следует отвергнуть сразу как из-за экспериментальной очевидности цепной природы воспламенения [5], так и ввиду того, что наблюдаемые времена $\tau_{\text{инд}}$ значительно превышают характерные времена теплоотвода (которые в условиях настоящих опытов составляют $\sim 0,1$ с).



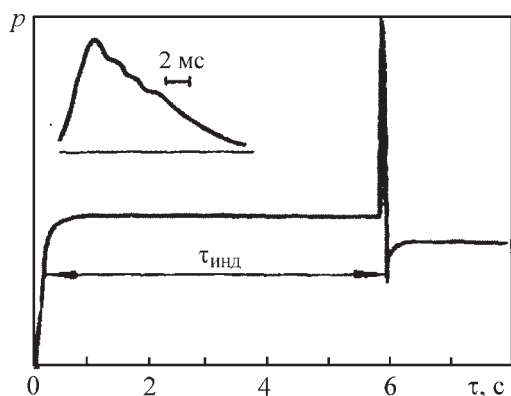


Рис.2. Временной профиль давления при самовоспламенении смеси CS_2 : $\text{O}_2 = 1:4$ ($p_0 = 200$ Тор, $T_0 = 150^\circ\text{C}$, стальной сосуд диаметром 34 мм). Выброс вниз на заднем фронте – результат дифференцирования схемы измерения; уменьшение давления после взрыва отвечает уравнению $\text{CS}_2 + 4\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{SO}_2 + \text{O}_2$; форма импульса показана вверх (скачок давления во взрыве $p/p_0 \approx 10$)

реакций. Можно показать, что для разветвленно-цепных реакций, скорость разветвления которых сильно зависит от температуры (а реакция окисления сероуглерода принадлежит именно к таким реакциям²⁾, тепловое ускорение воспламенения может происходить при начальном разогреве, существенно более низком, чем следует из критерия $\Delta T \approx \Theta$.

Действительно, в простейшем модельном случае скорость цепной разветвленной реакции может быть представлена в виде

$$W \sim W_0(T) \cdot 1/\varphi(T) \cdot e^{\varphi(T)t}, \quad (1)$$

где $W_0(T)$ – скорость зарождения, а фактор разветвления $\varphi(E) = k_p(T) - k_r$ ($k_p(T)$ и k_r – эффективные константы скоростей разветвления и гибели; вблизи предела $k_p(T) \sim k_r$). Все температурные зависимости предполагаются аррениусовскими. Тогда из условия тепловой устойчивости

$$dW/dT = W/(T - T_0) \quad (2)$$

для критической величины разогрева получается выражение $\Delta T = RT_0^2 / E_{\text{эфф}}$, где

$$E_{\text{эфф}} \approx E_0 + E_p \cdot k_p \cdot \tau_{\text{инд}} \quad (3)$$

(E_0 и E_p – энергии активации зарождения и разветвления). Поскольку в (3) для случая окисления сероуглерода величина $k_p \cdot \tau_{\text{инд}}$ может достигать значений $\sim 10 \div 30$, то предразогрев перед тепловым взрывом может быть в несколько раз меньшим, чем для нецепных процессов.

Таким образом, в данном конкретном случае отсутствие заметных предразогревов еще не говорит о нетепловом характере самоускорения. При исследовании самовоспламенения в смесях CS_2 и O_2 , сильно разбавленных аргоном, оказалось, что, несмотря на почти изотермический режим протекания реакции (даже максимальное повышение температуры, реализующееся на больших глубинах сгорания не превышало 15°), скорость реакции, измеряемая как по интенсивности хемилюминесценции, так и по накоплению продукта реакции SO_2 (спектрофотометрическая методика), претерпевает резкий скачок. Это означает, что по крайней мере, для сильно разбавленных инертным газом смесей самоускорение носит изотермический характер.

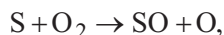
2) По В.Н. Кондратьеву лимитирующей стадией разветленно-цепного процесса окисления сероуглерода является реакция $\text{CS} + \text{O}_2$ с энергией активации 15 ккал/моль [4, с.467].

С целью анализа возможного влияния изменения состояния поверхности кюветы в процессе реакции на ее скорость поставлена серия экспериментов³⁾, в которых поверхность кюветы находилась в постоянном контакте с горючей смесью, но сама смесь непрерывно обновлялась. Это достигалось следующим образом: смесь CS_2 и O_2 прокачивалась через нагретый трубчатый кварцевый реактор (диаметр 2, длина ~60 см). С помощью дозирующих вентилей на входе и выходе кюветы поток регулировался так, что внутри реактора давление смеси составляло ~30 Тор, а градиент по длине практически отсутствовал. Температура смеси, равная температуре стенок ($T_0 = 140 \div 150^\circ\text{C}$), успевала установиться за счет теплообмена с ними на нескольких сантиметрах от входа в реактор. Регулировкой скорости потока среднее время пребывания в сосуде выбиралось в несколько раз меньшим длительности периода индукции ($4 \div 5$ с), воспроизводимо наблюдавшегося в экспериментах с неподвижной смесью при тех же давлении и температуре. Оказалось, что в таких условиях смеси не самовоспламеняются. Эти опыты позволяют заключить, что ускорение реакции не может быть объяснено только гетерогенными процессами. В частности, несостоятелен механизм, объясняющий длительные индукционные периоды изменением вероятности гетерогенной гибели активных частиц в течение периода индукции. Уменьшение этой вероятности, связанное с «насыщением» поверхности, должно было бы приводить к ускорению процесса.

В описанных выше экспериментах смесь не воспламенялась и при таких скоростях потока, когда время пребывания газа в реакторе равнялось периоду индукции. И только когда это время в несколько раз превышало «нормальное» время индукции, смесь начинала регулярно взрываться с периодом около 1 мин. С увеличением температуры частота взрывов возрастала, и при дальнейшем нагреве стенок устанавливалось стационарное пламя. Указанный эффект объясняется, по-видимому, диффузионным уходом накапливающихся в период индукции активных частиц в области с малым их содержанием.

Таким образом, проведенные эксперименты приводят к выводу, что в течение индукционного периода изменяется состав газовой фазы, в ней накапливаются реакционноспособные частицы, времена жизни которых сравнимы с временем индукции. Наиболее известной долгоживущей частицей такого рода является уже упоминавшийся малоактивный свободный радикал CS . В кварцевом сосуде диаметром 2 см время жизни CS , образующегося при импульсном фотолизе CS_2 при комнатной температуре составляет ~1 мин [8]. Если принять для энергии активации гибели CS на кварце величину ~7 ккал/моль [9], то время жизни CS в условиях настоящих опытов будет порядка 1 с.

Накопление CS в период индукции приводит к новому составу смеси ($\text{CS}_2 : \text{O}_2 : \text{CS}$), в которой при достижении некоторой концентрации CS возможна, например, новая и более быстрая цепь



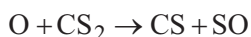
являющаяся разветвленной ввиду наличия реакции



3) Такие эксперименты необходимы, поскольку измеряемые времена индукции, вообще говоря, зависели от состояния и рода поверхности применявшихся кювет.



Поскольку быстрая реакция



в данном случае есть процесс обрыва цепи, надо ожидать, что переход к новому механизму разветвления будет возможен только при значительных концентрациях CS.

О концентрации радикалов CS, необходимой для того, чтобы указанная быстрая цепь вносила существенный вклад в скорость процесса, можно судить из поставленных опытов. Сероуглерод и кислород по очереди напускались в нагретую кварцевую кювету (одна часть CS₂, четыре части O₂, общее давление $p_0 = 20 \div 40$ Тор). Температура стенок подбиралась так, чтобы $\tau_{\text{инд}} \sim 5$ с. Оказалось, что предварительное (перед быстрым последующим напуском O₂) облучение CS₂ ультрафиолетовым светом импульсной лампы (энергия батареи конденсаторов 3 кДж, длительность импульса света ~ 40 мкс, степень фотодиссоциации CS₂ по оценкам $\geq 10\%$) не приводит к значительному уменьшению времени индукции. Поскольку между облучением CS₂ и напуском O₂ проходило несколько секунд, что сравнимо с временем жизни радикала CS в этих условиях, отсутствие ускорения означает, что концентрация CS $\geq 1\%$ от концентрации CS₂, имеющаяся к моменту напуска O₂ не может еще обеспечить переход к быстрой стадии воспламенения.

Итак, проведенный в настоящей работе анализ, опирающийся на ряд специально поставленных экспериментов, позволяет заключить, что указанная ранее кинетическая особенность самовоспламенения смесей CS₂ и O₂ – быстрое развитие реакции после продолжительного периода индукции – носит чисто цепной характер и связана с переходом от медленного механизма разветвления к более быстрому. Это вполне согласуется с представлениями Н.Н. Семенова о положительном взаимодействии цепей в реакции окисления сероуглерода [5, с.560]. Из проведенных экспериментов следует, что переход к быстрой стадии воспламенения происходит при достаточно больших концентрациях радикала CS, т.е. при заметных степенях выгорания исходного CS₂. Это обстоятельство дает надежду на возможность экспериментального исследования кинетики образования конечных или промежуточных продуктов окисления в периоде индукции.

Авторы благодарны Ю.Л. Москвину за обсуждение условий возникновения теплового взрыва в разветвленно-цепной реакции.

Литература

1. A.L. Myerson, F.R. Taylor. JACS, 1953, 75, 17, 4348.
2. W.P. Wood, J. Heicklen. J. Phys. Chem., 1971, 75, 7, 861.
3. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов и др. ФГВ, 1974, 10, 1, 15.
4. В.Н. Кондратьев, Е.Е. Никитин. Кинетика и механизм газофазных реакций. М., Наука, 1974.
5. Н.Н. Семенов. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности. М., Изд-во АН СССР, 1958.
6. А. Вайсберг и др. Органические растворители. М., 1958.
7. Д.А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., Наука, 1974.
8. F.J. Wright. J. Phys. Chem., 1960, 64, 1648.
9. В.Н. Кондратьев. Изв. АН СССР, сер. хим., 1940, 4, 501.

Поступила в редакцию
12 марта 1979



ХИМИЧЕСКИЙ ЛАЗЕР НА РАЗВЕТВЛЕННО-ЦЕПНОЙ СТАДИИ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ СЕРОУГЛЕРОДА

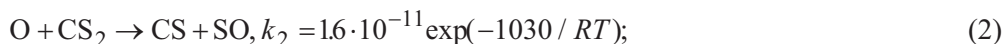
Е.Б. Гордон, С.Е. Наливайко, В.С. Павленко
Квантовая электроника, 9 (1982) 171–174

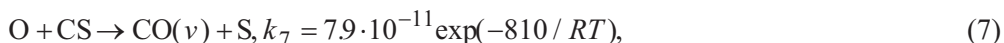
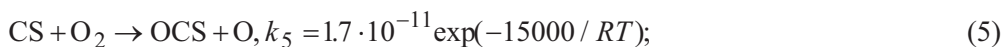
На основании установленного ранее механизма окисления сероуглерода сделан вывод о возможности достижения лазерного эффекта на колебательно-вращательных переходах молекул CO, образующихся на взрывной, разветвленно-цепной стадии реакции $\text{CS}_2 + \text{O}_2$. Вывод подтвержден экспериментально – впервые создан лазер, использующий разветвление химических цепей. Одновременный поджиг смесей $\text{CS}_2 - \text{O}_2$, разбавленных гелием или закисью азота и находящихся в полуострове цепного воспламенения, осуществлялся импульсом УФ-излучений. Лазерная генерация возникала на фронте быстрой стадии окисления и продолжалась ~ 1 мс. Энергия генерации достигала 20 мДж при усилении $> 20\%/м$.

Важнейшим реализованным преимуществом химических лазеров по сравнению с лазерами всех других типов является возможность использования химической цепи, в каждом звене которой образуются инверсно возбужденные молекулы. В широко известных лазерах на колебательно-вращательных переходах молекулы HF (реакция $\text{H}_2 + \text{F}_2$) на один образованный внешним источником энергии активный центр (атом F или H) образуется до 100 колебательно-возбужденных молекул HF [1].

Еще более заманчивым было бы использовать в лазерах явление разветвления химических цепей – в этом случае высокие скорости химической реакции, необходимые для получения лазерного эффекта, в принципе могли бы быть достигнуты при весьма малых энергозатратах на инициирование. Несмотря на очевидную привлекательность этой идеи лазер на разветвленно-цепной стадии химической реакции до сих пор создать не удалось; более того, проблематичной является сама возможность его осуществления на известных разветвленно-цепных реакциях (РЦР). Основной причиной этого, на наш взгляд, является противоречие между требованиями стабильности химически активной смеси в течение времени напуска или смешения и высокой результирующей скорости инициированной реакции. Смесь, для которой выполнены условия развития разветвленных цепей, взрывается самопроизвольно, причем согласно Н.Н. Семенову [2] время индукции взрыва $\tau_{\text{и}}$ сравнимо со временем развития реакции $\tau_{\text{р}}$.

Счастливым исключением среди быстрых РЦР является реакция окисления CS_2 , для которой внутри полуострова воспламенения $\tau_{\text{и}}$ может составлять от нескольких секунд до нескольких минут, а $\tau_{\text{р}} \sim 1$ мс [3]; при комнатной температуре смеси CS_2 с O_2 являются стабильными. Особенности самовоспламенения этих смесей связаны с протеканием следующих элементарных процессов [4]:





где константы скорости даны в $\text{см}^3/\text{с}$; энергии активации – в кал/моль, гетерогенная гибель радикалов CS происходит в кинетической области, радикалов SO – в диффузионной.

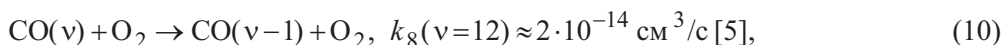
Уравнение нижнего предела самовоспламенения имеет вид

$$v_{\text{CS}} v_{\text{SO}} = 1, \quad (8)$$

где $v_{\text{CS}} = k_5 [\text{O}_2] / k_6$ и $v_{\text{SO}} = k_3 [\text{O}_2] / k_4$ – длины цепей по соответствующим активным частицам. В процессе медленного разветвленно-цепного окисления (период индукции, реакции (2)–(6)) в смеси экспоненциально во времени идет накопление радикала CS, при достижении критической концентрации которого $[\text{CS}]_* = [\text{CS}_2] k_2 / k_3 v_{\text{SO}}$ и выполнении условия $v_{\text{SO}} > 1$ происходит резкое нелинейное ускорение реакции, обусловленное включением процесса (7) и последующего быстрого разветвления в процессе (1). При импульсном фотоинициировании внутри полуострова воспламенения при сравнительно небольших значениях энергии инициирования E условия быстрого разветвленно-цепного окисления могут быть достигнуты за весьма малые времена ($\tau_{\text{и}}^{\Phi} \sim \tau_{\text{р}}$ из-за образования CS при фотодиссоциации CS_2 и нагрева смеси при фотолизе и в быстрых реакциях (1) и (2). Кинетика быстрой стадии самовоспламенения, а также инициированного УФ светом воспламенения в изотермическом приближении с учетом квазистационарности по [O] и [S] описывается уравнениями

$$\frac{d[\text{SO}]}{dt} = k_4 \left(\frac{[\text{SO}]}{[\text{CS}]_* - 1} \right) [\text{SO}], \quad \frac{d[\text{CS}]}{dt} = k_4 \left(v_{\text{SO}} - \frac{[\text{CS}]}{[\text{CS}]_*} \right) [\text{SO}]. \quad (9)$$

Важной особенностью реакции $\text{CS}_2 + \text{O}_2$ является то, что элементарный акт (7) с образованием колебательно-возбужденной молекулы CO является одним из основных в быстрой стадии. Расчет, основанный на системе уравнений (9) с учетом наиболее быстрого процесса релаксации



дает для концентрации $[\text{CO}(\nu)]$ в момент половинного выгорания CS_2

$$[\text{CO}(\nu)] \approx 0,8(k_3 / k_8)[\text{CS}_2]_0 \approx 20 \exp(-3250 / T)[\text{CS}_2]_0. \quad (11)$$

Учитывая, что пороговая для возникновения лазерной генерации концентрация $[\text{CO}(\nu)] \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$, можно получить условие порога генерации: ‘

$$p_{\text{CS}_2} [\text{мм рт.ст.}] \exp(-3250 / T) \gtrsim 10^{-3}. \quad (12)$$



Это означает, что при $T \approx 400$ К порог может быть достигнут при $p_{\text{CS}_2} \gtrsim 1$ мм рт. ст.

Помимо условия (12), давление и температура связаны еще условием нахождения смеси вблизи полуострова воспламенения, где $\tau_{\text{и}} \sim 10$ с (для увеличения рабочих давлений CS_2 и температуры необходимо использовать смеси, разбавленные инертным газом).

При иницировании смесей CS_2 с O_2 при комнатной температуре, как это имело место во всех CS_2 / O_2 -лазерах с фотоиницированием, быстрая стадия также может возникать (аналогично рис.1), но это имеет место при очень больших энергиях иницирования, когда оптические неоднородности, появляющиеся вследствие неоднородности поглощения света сероуглеродом, приводят к значительным потерям [6]. Поэтому в обычном лазере генерация имеет место лишь в «ультрабыстрой» стадии, синхронной с импульсом УФ света и определяемой процессами (1), (2) и (7), которые не приводят к возникновению химической цепи.

Поэтому наши эксперименты, направленные на обнаружение генерации в разветвленно-цепной стадии реакции окисления CS_2 , мы проводили со смесями, находящимися в полуострове воспламенения. Для этого заранее приготовленная смесь напускалась с помощью электромагнитного клапана в нагретую кювету. Температура стенок кюветы T_0 подбиралась такой, чтобы $\tau_{\text{и}} = 2\text{--}5$ с (время напуска и термализации составляло около 0,5 с). Через 1 с после напуска смесь подвергалась воздействию УФ света, основное назначение которого состояло не в иницировании быстрых реакций (1), (2) и (7), обеспечивающих генерацию в обычных импульсных CS_2 / O_2 -лазерах, а в одновременном выполнении критического условия (8) по всей длине кюветы. Энергия иницирования менялась в пределах 200–600 Дж, т.е. была в несколько раз ниже, чем в экспериментах с обычным лазером.

Эксперименты проводились на установке, описанной ранее [6]. Нагрев лазерной кюветы осуществлялся с помощью навитой на нее спирали. Температура внутренней поверхности стенок кюветы T_0 могла меняться от комнатной до 190°C. Оптический резонатор состоял из двух глухих сферических зеркал с алюминиевым покрытием (радиусы кривизны 4 и 6 м, длина резонатора 190 см). Вывод энергии лазерного излучения осуществлялся через внутрирезонаторную пластинку из BaF_2 (~5,5% на вывод). Применялись также резонаторы с плоскими диэлектрическими выходными зеркалами (коэффициенты отражения в области $\lambda \approx 5$ мкм 80, 90 и 95%). Форма сигналов генерации и хемилюминесценции регистрировалась с помощью фотосопротивлений Ge:Au (77 К) и запоминающего осциллографа. Энергия импульсов генерации измерялась лазерным калориметром ИЭК-1.

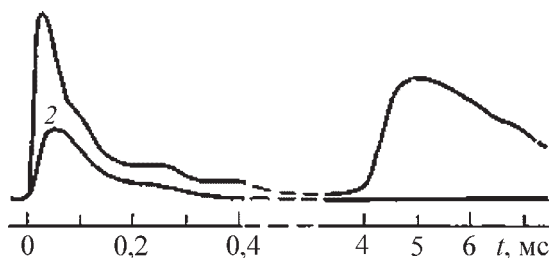


Рис.1. Сигналы ИК люминесценции, наблюдаемые при фотоиницировании реакции $\text{CS}_2 + \text{O}_2$: $T_0 = 170^\circ\text{C}$, смесь $[\text{O}_2][\text{CS}_2] = 15$ при давлении 8,8 мм рт. ст.; $E = 0,6$ (1) и 0,32 кДж (2)



Полученные результаты показаны на рис.2. Действительно, в некотором диапазоне условий помимо «ультракороткой» генерации ($\tau_1 \sim 10$ нс) возникает лазерная генерация большой длительности ($\tau_2 \sim 1$ мс), которая коррелирует по времени с началом регистрируемой по ИК люминесценции СО разветвленно-цепной стадии окисления сероуглерода. При малых энергиях иницирования и быстрая стадия реакции, и «длинная» генерация возникают через несколько миллисекунд. Это свидетельствует о том, что наблюдаемая генерация является следствием разветвленно-цепного ускорения химического процесса.

Характерно, что длинная генерация гораздо слабее зависит от энергии иницирования, чем ультрабыстрая; более того, могут быть реализованы условия, когда генерация в ультрабыстрой стадии вообще отсутствует (рис.2,б). Длинная генерация весьма чувствительна к составу смеси: она возникает лишь в разбавленных гелием (очень слабая) или закисью азота (сильная) смесях при исходном соотношении $[O_2]/[CS_2] \equiv \alpha \geq 10$ (оптимальное соотношение $\alpha = 15-20$). Попытка использовать в качестве разбавителей SO_2 и SF_6 положительного эффекта не дала, скорее всего, из-за колебательной релаксации СО (ν) на этих молекулах.

Сравнение осциллограмм, представленных на рис.2,а и б, показывает, что данный лазер также подвержен влиянию неоднородностей иницирования и связанной

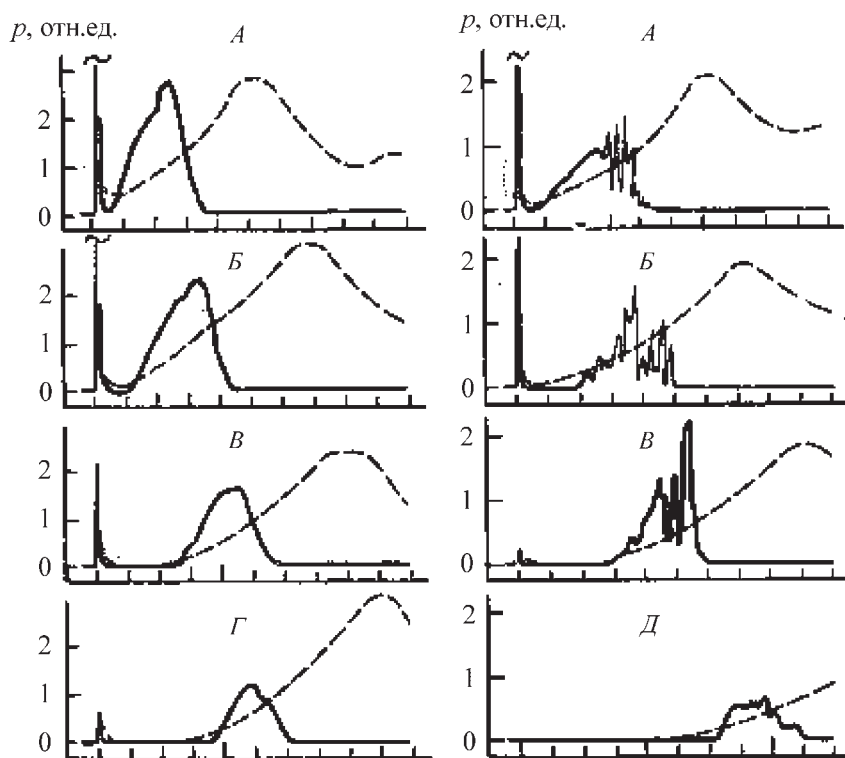


Рис.2. Осциллограммы импульсов генерации (сплошные кривые) и И К люминесценции (штриховые) при импульсном фотоиницировании реакции $CS_2 + O_2$ в смесях $CS_2:O_2:N_2O = 1:15:3$:

а) $T_0 = 157^\circ C$, полное давление смеси $p = 19,1$ мм рт. ст.; б) $T_0 = 148^\circ C$, $p = 28,2$ мм рт. ст.

Энергия иницирования $E = 486$ (А), 384 (Б), 294 (В), 254 (Г) и 234 Дж (Д)

с ними оптической неоднородности, о чем свидетельствует модуляция интенсивности миллисекундной генерации. По-видимому, именно это ограничивает выходную энергию исследуемого лазера: как следует из (11), одним из немногих параметров, определяющих энергию генерации, является давление CS_2 ; однако повышение $[\text{CS}_2]$ как и в, обычном CS_2/O_2 -лазере [6], ведет к резкому увеличению потерь из-за возникновения акустических волн. Энергия миллисекундного импульса генерации, измеренная для зеркала с пропусканием 5%, не превышала 20 мДж при коэффициенте усиления на проход, большем 20%.

Сейчас, по-видимому, рано говорить о перспективах подобных лазеров основным результатом настоящей работы мы считаем доказательство осуществимости химических лазеров, использующих разветвление химических цепей.

Литература

1. В.Я. Агроскин, Г.К. Васильев, В.И. Кирьянов, В.Л. Тальрозе. Квантовая электроника, 5, 2436 (1978).
2. Н.Н. Семенов. Цепные реакции. – Л.: Госхимтехиздат, 1934.
3. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, В.Д. Шатров, В.Л. Тальрозе. Физика горения и взрыва, 10, 15 (1974).
4. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, Ю.Л. Москвин, В.Ч. Бокун. В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Кинетика химических реакций. Материалы VI Всесоюз. симп. по горению и взрыву, Черноголовка, 1980, с. 78.
5. G. Hancock, I.W. M. Smith. Appl. Optics, 10, 1827 (1971).
6. Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин, В.С. Павленко, В.Л. Тальрозе. Квантовая электроника, 3, 625 (1976).

Отделение института химической физики
АН СССР, Черноголовка,
Московская область

Поступило в редакцию
15 мая 1981 г.



е) Химические лазеры

ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ Н₂–F₂-ЛАЗЕР С ВЫСОКИМ КПД

Е.Б.Гордон, В.В.Горохов, В.И.Матюшенко
В.И.Карелин, А.И.Павловский, П.Б.Репин, В.Д.Сизов
Квантовая электроника, 13 (1986) 2534–2535

Приведены результаты исследования химического Н₂–F₂-лазера с электроразрядным инициированием. На смеси F₂: O₂: SF₆: H₂ = 5:1:3:2 (p_{Σ} = 84 мм рт. ст.) получена энергия генерации E_{Γ} = 5,8 Дж при физическом КПД η_{Φ} = 240%. В безэлегазовой смеси F₂: O₂: He: H₂ = 10:2:30:2,5 (p_{Σ} = 340 мм рт. ст.) E_{Γ} = 2 Дж, η_{Φ} = 100%.

Возможность достижения технического КПД $\eta_{\Gamma} \approx 100\%$ в химических HF-лазерах с поперечным электроразрядным инициированием (HF-ЭХЛ) была продемонстрирована в [1, 2], однако полученные там удельный энергоусвоение ϵ_y и энергия генерации E_{Γ} не превышали 3 Дж/л и 0,15 Дж соответственно. Более высокие значения ϵ_y = 17,5 Дж/л и E_{Γ} = 5,25 Дж при физическом КПД η_{Φ} = 65% и η_{Γ} = 23% достигнуты в лазере [3] на основе трехэлектродной системы (4) за счет повышения удельных энергоусвоений, которые обеспечивались разбавлением горючей смеси гексафторидом серы с оптимизацией разряда по однородности при высоких парциальных давлениях SF₆. В [3] парциальное давление p_{SF_6} было 112 мм рт. ст.; оптимальные по η_{Φ} значения [SF₆] в лазерах с фотоинициированием заметно ниже и при тех же концентрациях горючей смеси составляют 20–30 мм рт. ст. [5, 6]. Это отличие, по-видимому, не связано с кинетикой возбуждения молекул HF и обусловлено ухудшением однородности разряда при переходе к смесям с низким содержанием элгаса. С точки зрения повышения η_{Φ} и η_{Γ} представляет интерес исследование работы ЭХЛ с малым парциальным давлением SF₆ и на безэлегазовых (F₂–H₂–He) смесях. Последний случай важен также для выявления возможности создания установки, излучающей в зависимости от состава смеси в двух спектральных диапазонах: $\lambda \approx 2,7$ мкм (HF) и 10,6 мкм (DF–CO₂). Большое сечение поглощения SF₆ в области $\lambda \approx 10$ мкм вынуждает отказаться от использования элгаса в рабочей среде DF–CO₂-лазера.

Схема установки, на которой проводились эксперименты, аналогична приведенной в [3]. Корпус разрядной камеры (РК) был изготовлен из фторопласта и представлял собой трубу, уплотненную с торцов фланцами. Внутренний диаметр РК 210 мм, длина 410 мм. Внутри трубы размещена электродная система, включающая в себя иницирующий катод, основной катод (К) и сплошной профилированный анод (А) длиной 290 и шириной 90 мм. Иницирующий катод представляет собой ряд тонких проволочек, натянутых параллельно оси РК. Основной катод – плоская сетка. Расстояние между основными электродами (К–А) – 48 мм. На фланцах РК укреплены плоскопараллельные окна из CaF₂, одно из которых являлось выходным зеркалом резонатора. Глухим зеркалом служила плоская стеклянная пластина с золотым покрытием. В качестве источника питания (ИП) использовался шестикаскадный ге-



нератор Аркадьева–Маркса с ударной емкостью 0,33 нФ и зарядным напряжением 25–60 кВ. Рабочая смесь готовилась непосредственно в РК. Напуск газов производился в следующей последовательности: F_3 , O_2 , SF_6 (или He), H_2 .

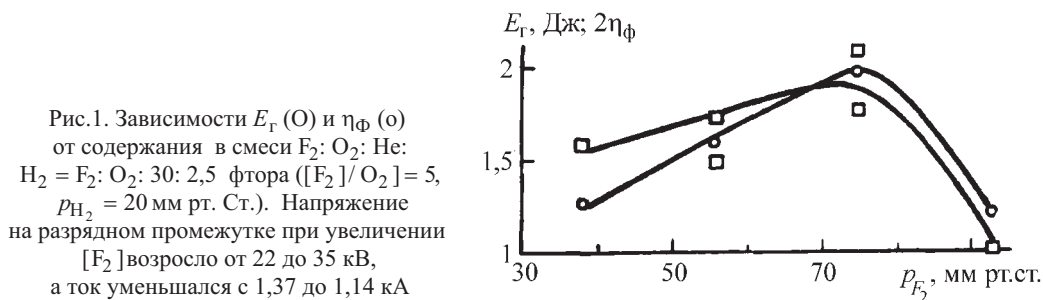
В экспериментах измерялись напряжение на основном катоде (высоковольтным резистивным делителем) и ток разряда (малоиндуктивным шунтом). Регистрация электрических сигналов осуществлялась на осциллографе 6ЛОР-04. Поперечное сечение разряда определялось фотографированием. Энергия ЭХЛ измерялась калориметром ИКТ-1М. Погрешности измерения вкладываемой в разрядный промежуток электрической энергии и энергии генерации ЭХЛ не превышали 15%.

В экспериментах установлено, что в промежутке К–А однородный электрический разряд формируется в HF-лазерных средах при парциальных давлениях электроотрицательных компонентов до 100 мм рт. ст. Напряжения на катоде К в зависимости от состава смеси и зарядного напряжения ИП составляли 35–60 кВ, а токи разряда – 1,2–4 кА. Длительность импульса напряжения ~ 80 нс при фронте нарастания 5–10 нс. Длительность тока ~ 60 нс. Объем разряда $\sim 0,7$ л.

Зависимости энергии генерации E_{Γ} и КПД ЭХЛ по вложенной в активный объем энергии η_{Φ} от концентрации F_6 для смесей $\text{F}_2\text{-O}_2\text{-He-H}_2$ ($p_{\text{He}} = 225$ мм рт. ст.) приведены на рис.1. Увеличение $[\text{F}_2]$ при одновременном повышении зарядного напряжения ИП ведет к росту энергии, вложенной в активный объем. Энергия генерации и η_{Φ} при этом также растут вплоть до $p_{\text{F}_2} = 75$ мм рт. ст., достигая для смеси $\text{F}_2:\text{O}_2:\text{He}:\text{H}_2 = 10:2:30:2,5$ (полное давление 340 мм рт. ст.) $E_{\Gamma} = 2$ Дж и $\eta_{\Phi} = 100\%$. Дальнейшее повышение $[\text{F}_2]$ ведет к ухудшению однородности разряда и снижению E_{Γ} . Полученное значение E_{Γ} является наибольшим из известных нам по литературным данным для ЭХЛ на смеси $\text{F}_2\text{-O}_2\text{-He-H}_2$.

Замена гелия гексафторидом серы ($p_{\text{SF}_6} = 75$ мм рт. ст.) расширяет диапазон парциальных давлений F_2 , при которых разряд в смеси остается однородным, до $p_{\text{F}_2} = 90$ мм рт. ст. Энергия генерации для смеси $\text{F}_2\text{-O}_2\text{-SF}_6\text{-H}_2$ (рис.2) при изменении p_{F_2} от 37 до 90 мм рт. ст. практически постоянна, а значение η_{Φ} возрастает с 80 до 100%.

Уменьшение p_{SF_6} от 75 до 22 мм рт. ст. при постоянных парциальных давлениях F_2 и H_2 приводит к более чем двукратному увеличению КПД ЭХЛ. Для смеси $\text{F}_2:\text{H}_2:\text{SF}_6:\text{H}_2 = 5:1:3:2$ ($p_{\Sigma} = 84$ мм рт. ст.) зависимости E_{Γ} и η_{Φ} от зарядного напряжения ИП (U_3 показаны на рис.3. Обе величины E_{Γ} и η_{Φ} возрастают с вкладываемой в разряд энергией и достигают при $U_3 = 55$ кВ значений 5,8 Дж и 240% соответственно. Дальнейшее увеличение U_3 приводит к контракции разряда.



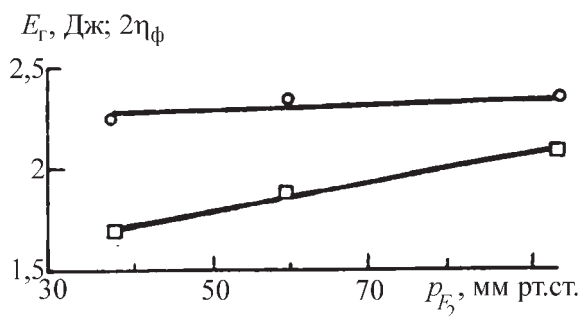


Рис.2. Зависимости E_r (O) и η_ϕ (o) от содержания в смеси $F_2-O_2-SF_6-H_2$ фтора ($[F_2]/[O_2] = 5$, $p_{H_2} = 20$ мм рт. ст., $p_{SF_6} = 75$ мм рт. ст.). Напряжение на разрядном промежутке при увеличении $[F_2]$ возросло от 38 до 46 кВ, а ток уменьшался с 1,14 до 0,76 кА

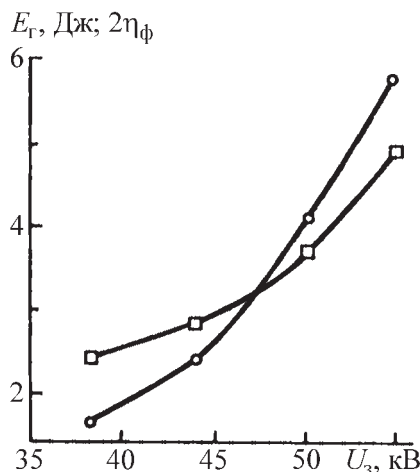


Рис.3. Зависимости E_r (O) и η_ϕ (o) от зарядного напряжения ИП для смеси $F_2: O_2: SF_6: H_2 = 5:1:3:2$ ($p_\Sigma = 84$ мм рт. ст.)

Оптический резонатор ЭХЛ в настоящей работе не оптимизировался. Увеличение добротности резонатора при малых уровнях иницирования горючей смеси (~ 3 Дж/л), реализуемых на описываемой установке, может привести к определенному росту энергии и КПД ЭХЛ. Отметим также, что во всей области существования однородного разряда рост энергии иницирования ведет к увеличению как энергии генерации, так и КПД ЭХЛ (см. рис.3). Это дает основание предполагать, что в наших экспериментах энерговклад в активный объем меньше оптимального с точки зрения η_ϕ ЭХЛ, что позволяет надеяться на достижение более высоких КПД.

Литература

1. I.V. Parker, R.R. Stephens. Appl. Phys. Letts, 22, 450 (1973).
2. I.D. Whitter, R.L. Kerber. IEEE J. QE-10, 844 (1974).
3. В.С. Босамыкин, Е.Б. Гордон, В.В. Горохов и др. Квантовая электроника, 9, 1489 (1982).
4. А.И. Павловский, В.С. Босамыкин, В.И. Карелин, В.С. Никольский. Квантовая электроника, 3, 601 (1976).
5. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов. Квантовая электроника, 9, 2186 (1982).
6. С.Д. Великанов, С.Б. Кормер, М.В. Сеницын и др. Письма в ЖТФ, 9, 134 (1983).

Институт химической физики
АН СССР, Черноголовка Моск. Обл.

Поступило в редакцию
17 марта 1986 г.

g) Утилизация UF_6

URANIUM HEXAFLUORIDE REDUCTION WITH HYDROGEN ATOMS

*E.B. Gordon, V.A. Dubovitskii, V.I. Matyushenko
V.D. Sizov, Yu.A. Kolesnikov*
Kinetics and Catalysis, 47 (2006) 148–156

The simulation of uranium hexafluoride reduction to uranium tetrafluoride by hydrogen and fluorine in flow has demonstrated that the high-capacity thermochemical atom generators designed for continuous-wave chemical lasers are promising for the industrial implementation of the continuous reduction process. Two variants of the reduction process are suggested: one uses a generator of H atoms and the other uses a generator of F atoms.

The optimization of ^{235}U -depleted uranium hexafluoride conversion technologies has been stimulated by the challenging problem of the safe storage and utilization of this product. The total amount of this environmentally hazardous gas, which is a valuable raw material at the same time, has exceeded 1 million tons and is steadily increasing. Therefore, for a successful solution of the UF_6 utilization problem, the UF_6 processing rate should be ~ 1 mol/s or ~ 1 t/h over many hours.

A promising way of converting depleted uranium is by the so-called water-free UF_6 reduction with hydrogen to UF_4 or uranium metal according to the scheme



As is clear from reactions (I) and (II), the uranium hexafluoride molecule is so strong that its reduction to uranium metal with dihydrogen is very endothermic and its reduction to UF_4 , which is the subject of this study, will be exothermic only if the resulting uranium tetrafluoride gas is condensed into solid particles. Furthermore, this reaction is rather slow: the activation energy of the rate-limiting step of UF_6 reduction is $E_a \sim 150\text{--}200$ kJ/mol [1, 2]. Therefore, continuous combustion in a flow reactor can be carried out only if two conflicting requirements are simultaneously satisfied. On the one hand, the reaction temperature must be sufficiently high for molecular reduction to proceed at a high rate. On the other hand, this temperature must be low enough to allow the reaction products to aggregate into solid particles and thus ensure favorable energetics for the overall process (the boiling point of UF_4 is $T_b = 1690$ K [3]). For this reason, it is rather difficult to design a high-capacity burner for $\text{UF}_6 + \text{H}_2$ mixtures.

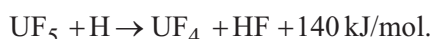
It was suggested to circumvent this difficulty by carrying out the reduction process in excess hydrogen and fluorine [4] or, in other words, to burn UF_6 in a fluorine-hydrogen flame. However, this method implies a marked increase in F_2 consumption and suffers from the following drawback: the $\text{H}_2 + \text{F}_2 \rightarrow 2\text{HF}$ reaction is so fast that all of the fluorine burns out before UF_6 reduction takes place. This case can be considered as reaction (I)



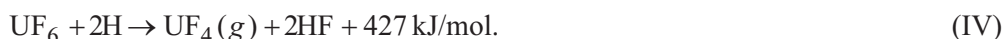
initiated at an elevated initial temperature. At the same time, it is well known for thermally neutral reactions such as reaction (I) with no cluster formation that, at equilibrium, the starting reactants and reaction products will be present in comparable amounts at any temperature. Therefore, it is generally impossible to achieve the desired deep conversion of UF_6 into UF_4 by this method. Thus, this approach also does not allow one to raise the final mixture temperature above the point at which UF_4 clustering begins (T_b).

Problem formulation

The method using H atoms in UF_6 reduction [5] is free of the above drawbacks. The mechanism of this process consists only of successive abstractions of fluorine atoms from UF_6 by H atoms:



Both steps are very exothermic and proceed at rather high rates even at comparatively low temperatures. It is natural that the overall heat of UF_6 reduction with hydrogen atoms is higher than the heat of reaction (I) by the value of H_2 dissociation energy, which is 431 kJ/mol:



A specific feature of uranium hexafluoride reduction with hydrogen atoms is that a high relative concentration of these atoms is necessary: one should have at least 2H atoms per UF_6 molecule. The hydrogen atom consumption in UF_6 reduction will be governed by the competition between reactions (III), initiated by these atoms, and the recombination reaction



Uranium hexafluoride reduction with hydrogen atoms is accompanied by a considerable self-heating because of the high exothermicity of the reaction. As this takes place, reactions (III), which are characterized by rather high activation energies, are accelerated, while the rate of the recombination reaction (V) somewhat decreases with an increasing temperature. Therefore, even if the domination of the reduction reaction over the recombination reaction is achieved at a high conversion, there will in any case be a “cold” zone adjoining the reaction zone, where hydrogen atoms will be lost through recombination, heating the reaction mixture at the same time. Note an interesting fact facilitating the analysis of the problem: due to the coincidence of the heats of reactions (IV) and (V), heat evolution and the temperature profile in the reactor are independent of the reduction efficiency factor (the ratio of the recombination and reduction rates). Although the recombination reaction reduces the hydrogen atom consumption, it nevertheless exerts a beneficial effect, stabilizing the process conditions. Indeed, UF_6 reduction can be initiated at any temperature by adjusting the initial composition of the reaction mixture. At lower temperatures, the reaction will proceed in a similar way until the downstream temperature reaches an appropriate value owing to the partial recombination of hydrogen atoms.

Chemical generators of H atoms for continuous-wave chemical lasers (CWCLs) have already been designed and manufactured, making our suggestion all the more important for practice. These generators can operate at high temperatures in a fluorine or hydrogen



fluoride atmosphere and have an output capacity sufficient for industrial UF_6 utilization [6].

These generators are based on the thermal dissociation of F_2 molecules (in which the F–F bond dissociation energy is as low as 37 kcal/mol) followed by the “quenching” of the resulting F atoms, their mixing with flowing dihydrogen, and the formation of H atoms via the fast chemical reaction



Fluorine is usually heated by using the reaction $\text{D}_2 + \text{F}_2$ in excess F_2 . However, deuterium is too expensive for the process suggested and can well be replaced with hydrogen, a cheaper gas.

An important advantage of chemical atom generators is that they can operate at supersonic gas velocities, since, under these conditions, the heat released in the reaction zone cannot propagate upstream and, therefore, it is possible to maintain the nozzle assembly at a temperature low enough to prevent its disintegration.

Based on the CWCL operation practice, we will assume that the working gas of the thermochemical generator of F atoms is a hydrogen-fluorine mixture with $\text{F}_2 : \text{H}_2 = 3 : 1$, the dissociation of the excess fluorine is complete ($\text{H}_2 + 3\text{F}_2 \rightarrow 2\text{HF} + 4\text{F}$), and 1/4 mol of H_2 and 3/4 mol of F_2 are spent for the formation of 1 mol of F atoms. One HF molecule per two fluorine atoms forms as ballast.

The schematic diagram of the reactor for UF_6 reduction with H atoms is presented in Fig. 1a. The left-hand part of the reactor (to the left of nozzle assembly 2) is similar in design to a CWCL. Next is the first mixing chamber, in which the fluorine atoms are mixed

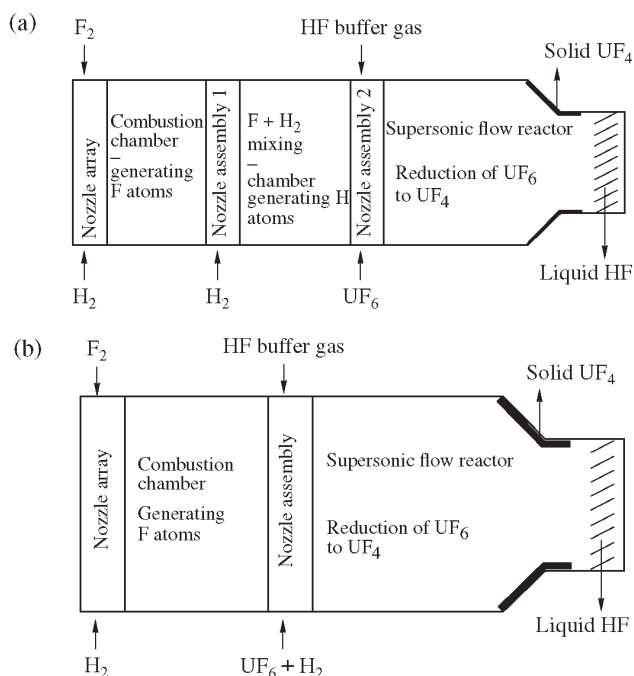
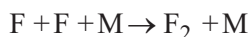


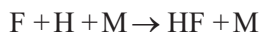
Fig.1. Schematic diagrams of the UF_6 reduction reactors: (a) H generator and (b) F generator

with H_2 and hydrogen atoms are generated via the fast reaction (VI). In the second chamber, the H atoms are mixed with UF_6 . From the above, we deduce the following stoichiometric relationships: two hydrogen atoms are spent per reduced UF_6 molecule, resulting in three molecules of HF, which plays the role of an inert gas in this case.

A simpler reactor design is also possible (Fig. 1b). In this design, there is a single mixing chamber, in which the F atoms that have formed in the burner are mixed directly with UF_6 and, if necessary, with an inert gas. In this case, the chemical generator produces fluorine atoms, which are almost inert toward UF_6 , and their fast reaction with dihydrogen (reaction (VI)) yields H atoms. This approach is in some respects more advantageous than use of a separate hydrogen atom generator. Indeed, the main cause of the wastage of hydrogen atoms is their recombination, which competes successfully with the desired reaction at high atom concentrations. In the first design (H generator), all of the hydrogen atoms necessary for the reduction reaction are formed before this reaction. In the other design (F generator), they result from the reaction between H_2 and F atoms and are simultaneously involved in UF_6 reduction. The latter reaction reduces the steady-state concentration of H atoms and, accordingly, the rate of their recombination. The recombination rate of F atoms,



is two orders of magnitude lower than the rate of reaction (V). Although the cross recombination of active sites,



is nearly as fast as reaction (V), the low rate of F recombination ensures some gain in the active species efficiency factor, and this gain can overbalance the adverse loss of F atoms through their attachment to uranium fluoride molecules [7, 8]:



An obvious disadvantage of this design is the extra self-heating in the reaction zone caused by reaction (VI), whose heat is 134 kJ/mol. Furthermore, because this design uses a single mixer, it has a smaller number of controlled parameters and is, therefore, less flexible.

The need for a high-throughput process for the utilization of large amounts of UF_6 dictates that the gas-phase reduction of UF_6 should be designed as a closed cycle in which all of the final products should be either solid (like UF_4) or liquid (like HF condensed on cryo-panels). Such a process can be carried out for stoichiometric mixtures not diluted with an inert gas and at product (HF) pressures well above the triple-point pressure ($P_{TP} \sim 12$ Torr).

In this case, the final adiabatic temperature of the mixture is $T_a = T_0 + \Delta T$, where T_0 is the initial temperature, and, because of the thermal neutrality of reaction (I), the temperature rise is $\Delta T = \Delta Q / C$ (here, ΔQ is the heat of the recombination of H atoms, and C is the heat capacity of the mixture). Taking the heat capacity of UF_6 , HF, and H atoms to be 167, 29, and 21 kJ mol⁻¹K⁻¹, respectively, and neglecting the variation of the total heat capacity during the reaction, we obtain $\Delta T \sim 1500$ K. Therefore, even if the mixture is not preheated by heating the nozzle assembly, $T_a \sim 1800$ K. This implies that, if no diluent gas



is used, the temperature rise during the reaction will prevent the condensation of the resulting UF_4 . This circumstance substantially facilitates the analysis of the reduction process: it is unnecessary to include, in the reaction mechanism, cluster formation, growth, and disintegration, whose rate constants can be estimated, but only with a high degree of uncertainty.

The uranium hexafluoride reduction reaction is rather complicated: it takes place under essentially nonisothermic conditions, and the discrepancy between rate constants reported for its elementary steps is as large as several orders of magnitude (see, e.g., [9, 10]). Nevertheless, the simulation of this reaction seems to be very promising, for it is expected to elucidate the main features of UF_6 reduction, to bound the range of process conditions, and to reconcile the requirements imposed on the process parameters.

The consecutive reactions of uranium hexafluoride reduction with hydrogen atoms are always favorable steps. In the ideal case, the reduction is complete,

$$\eta = [\text{UF}_6]_{\text{fin}} / [\text{UF}_6]_0 \rightarrow 0, \quad (1)$$

the desired-product selectivity is the highest possible,

$$\chi = [\text{UF}_4]_{\text{fin}} / [\text{UF}_6]_0 \rightarrow 1, \quad (2)$$

the reactant consumption is the lowest possible,

$$[\text{F}]_0 / [\text{UF}_4]_{\text{fin}} \rightarrow 2, \quad (3)$$

and the length of the reaction zone is a few centimeters. Here, the subscripts 0 and fin stand for the initial and final conditions, respectively. Furthermore, because of the high yield of H atoms in the reaction between dihydrogen and F atoms, we set $[\text{F}]_0 = [\text{H}]_0$.

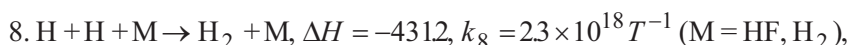
Obviously, in multiparametric optimization, it is necessary either to impose a special constraint on the parameters or to single out the most significant parameter and to optimize it under some constraints (e.g., inequality ones) imposed on the other parameters. In our calculations, we took the latter approach.

In mathematical modeling, we considered both reactor designs, namely, the H generator (in which the hydrogen atoms produced in a multinozzle mixer are mixed with UF_6 in another mixer) and the F generator (which has a single mixer in which the F atoms are mixed directly with a $\text{UF}_6 + \text{H}_2$ mixture).

We considered the following elementary reactions, including the reverse ones:

1. $\text{H} + \text{H} + \text{UF}_6 \rightarrow \text{H}_2 + \text{UF}_6$, $\Delta H = -4312$, $k_1 = 7 \times 10^{18} T^{-1}$,
2. $\text{H} + \text{UF}_6 \rightarrow \text{UF}_5 + \text{HF}$, $\Delta H = -2868$, $k_2 = 6 \times 10^{11} \exp(-293 / RT)$,
3. $\text{H} + \text{UF}_5 \rightarrow \text{UF}_4 + \text{HF}$, $\Delta H = -1403$, $k_3 = 6 \times 10^{11} \exp(-502 / RT)$,
4. $\text{H} + \text{UF}_4 \rightarrow \text{UF}_3 + \text{HF}$, $\Delta H = 628$, $k_4 = 6 \times 10^{11} \exp(-83.7 / RT)$,
5. $\text{H} + \text{UF}_3 \rightarrow \text{UF}_2 + \text{HF}$, $\Delta H = -431$, $k_5 = 6 \times 10^{11} \exp(-83.7 / RT)$,
6. $\text{H} + \text{H} + \text{UF}_4 \rightarrow \text{H}_2 + \text{UF}_4$, $\Delta H = -4312$, $k_6 = 7 \times 10^{18} T^{-1}$,
7. $\text{H} + \text{H} + \text{UF}_5 \rightarrow \text{H}_2 + \text{UF}_5$, $\Delta H = -4312$, $k_7 = 7 \times 10^{18} T^{-1}$,





The changes in enthalpy (kJ/mol) are taken from [3, 11, 12]. The rate constants k_i (in $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$ for bimolecular reactions and in $\text{cm}^6 \text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$ for termolecular reactions) and the activation energies (kJ/mol) are taken from [6, 13]. The unknown rate constants were set to be equal to those of similar reactions. The rate constants of the reactions reverse to reactions (1)–(14) were calculated using the corresponding equilibrium constants.

We made the following simplifying assumptions in mathematical modeling: the mixing of reactants was considered to be instantaneous and perfect, the linear velocity of the flowing reactants was considered to be constant and was set at 200 m/s, and the temperature of the nozzle assembly was considered to be known. Diffusion and heat conduction were neglected. With these simplifications, the problem of determining the stationary concentration and temperature fields is reduced to the Cauchy problem for ordinary differential equations in which the independent variable is the axial coordinate and the initial conditions are the inlet concentrations and temperature. In greater detail, the model and computational procedure are described in the Appendix.

Numerical experiments, results, and discussion

The ultimate goal of our calculations was to determine the following quantities as a function of mixture stoichiometry and temperature:

(1) UF_6 conversion ($\eta = 1 - [\text{UF}_6]_{\text{fin}} / [\text{UF}_6]_0$),

(2) active species (H(F) atom) efficiency factor (which is defined as the number of U–F bonds broken by one H atom: $k = [\text{HF}]_{\text{fin}} / (2[\text{H}_2]_{\text{fin}} + [\text{HF}]_{\text{fin}})$, where $[\text{HF}]_{\text{fin}}$ is the number of HF molecules resulting from UF_6 reduction and $[\text{H}_2]_{\text{fin}}$ is the number of hydrogen molecules resulting from the recombination of H atoms), and

(3) the relative yield of the desired product, UF_4 ($\chi = [\text{UF}_4]_{\text{fin}} / [\text{UF}_6]_0$).

The initial concentration of uranium hexafluoride molecules $[\text{UF}_6]_0$ was taken to be $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$. The corresponding concentration of HF molecules at the reactor outlet was $\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$. We considered the process kinetics after the mixing of the initial active mixture with UF_6 . In most cases, the initial composition of the active mixture was UF_6 : H: F: HF = 1: ν : 0: $3/2\nu$, where $\nu = [\text{H}]_0 / [\text{UF}_6]_0$. It was assumed that $5/4$ mol of H_2 and $3/4$ mol of F_2 are consumed in the formation of 1 mol of H atoms, yielding $3/2$ mol of HF.

The results of our calculations are presented in Figs. 2–6.



Figure 2 shows typical profiles of reactant and product concentrations. For the H generator, the extent of the reaction zone is ~ 3 cm. UF_5 forms initially, and its further reduction is incomplete under the conditions examined: the product contains $\sim 15\%$ UF_5 . At the same time, the UF_6 conversion is complete even at short distances along the reaction zone: after the completion of the process, the mixture contains little, if any, uranium hexafluoride. The F generator is characterized by a greater self-heating because of the exothermic reaction (VI). With this design, the favorable reactions sooner begin to compete with the recombination of H atoms and, therefore, it is unnecessary to use H atoms in amounts larger than are dictated by the stoichiometric coefficients (Fig. 2 refers to the stoichiometric case).

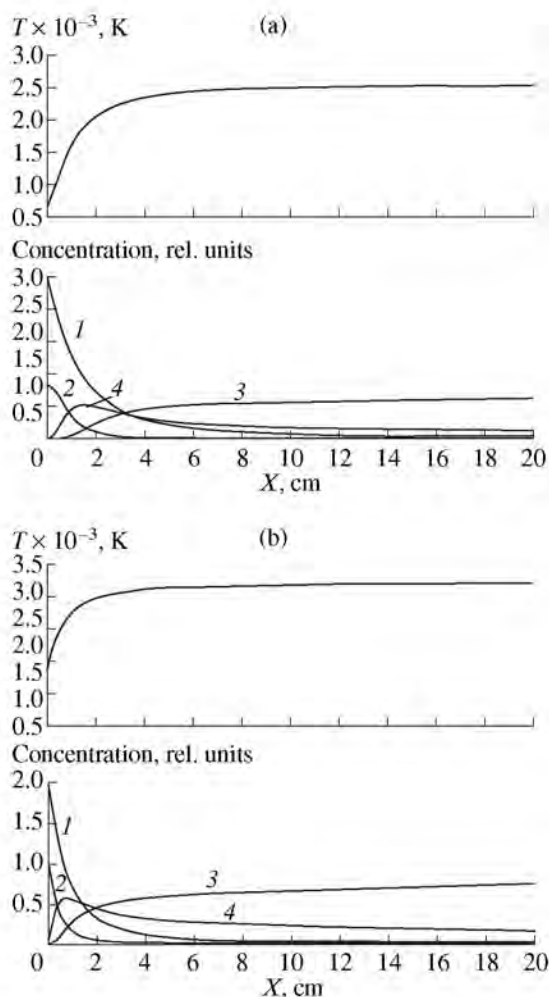


Fig.2. Profiles of final mixture temperature (T) and of the relative concentrations of (1) H, (2) UF_6 , (3) UF_5 , and (4) UF_4 as a function of the axial coordinate X for the (a) H-generator- and (b) F-generator-type reactors. The flow velocity is $2 \cdot 10^4$ cm/s, the initial temperature is $T_0 = 600$ K, and the concentrations are relative to $[\text{UF}_6] = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The initial mixture composition is (a) $\text{UF}_6 : \text{H} : \text{F} : \text{HF} = 1 : \nu : 0 : 3/2\nu$ ($\nu = [\text{H}]_0/[\text{UF}_6]_0 = 3$) and (b) $\text{UF}_6 : \text{H} : \text{F} : \text{HF} : \text{H}_2 = 1 : 0 : \nu : 1/2\nu : \nu$ ($\nu = [\text{F}]_0/[\text{UF}_6]_0 = 2$)

As is mentioned above, the chemical generation of free atoms allows the chemical process to be accelerated and a nonequilibrium product composition to be obtained at some stage. Since we take into account the reverse of all reactions, the product composition at long distances along the reaction zone is equal to the equilibrium composition. The equilibrium concentrations, which are established at a distance of about 100 m, are $[UF_6] = 1 \times 10^{-10}$, $[UF_5] = 0.2 \times 10^{-2}$, $[UF_4] = 0.9$, $[UF_3] = 0.1$, and $[UF_2] = 0.4 \times 10^{-2}$ for the H generator and $[UF_6] = 3 \times 10^{-2}$, $[UF_5] = 6 \times 10^{-3}$, $[UF_4] = 0.9$, $[UF_3] = 0.1$, and $[UF_2] = 0.4 \times 10^{-2}$ for the F generator (all concentrations are relative to $[UF_6]_0 = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$). It is interesting that, even at equilibrium, the extent and selectivity of reduction are rather high. This fact, which was also mentioned in an earlier publication [1], is a consequence of the large change in entropy. In any case, the most significant inferences from this computational step are that UF_6 is reduced with H and F atoms at a high rate and that only small extra amounts of the reactants are required, particularly in the case of the F generator. The temperatures established during the reactions are so high that the lower fluorides UF_3 and UF_2 are present in the product mixture.

Figure 3 plots the main parameters of uranium hexafluoride reduction as a function of the relative H content v_H and the relative F content v_F for the H generator and F generator, respectively. The stoichiometric v value for uranium tetrafluoride reduction is 2. Throughout the H and F concentration ranges examined, the final mixture temperature is well abo-

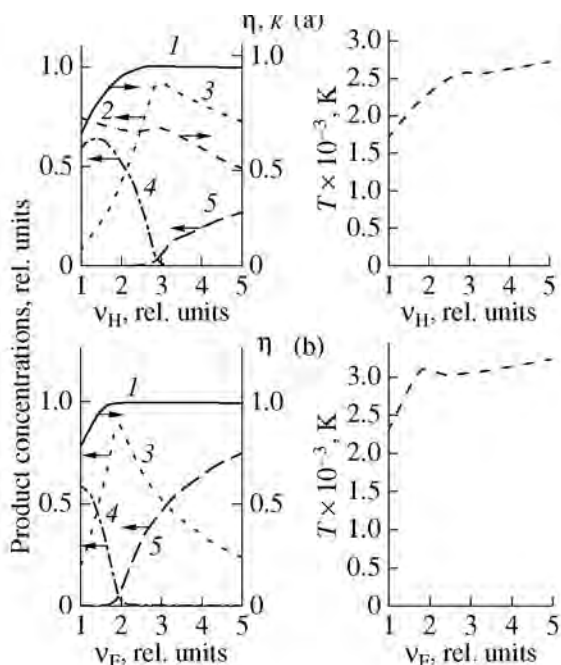


Fig.3. (1) UF_6 conversion (n), (2) hydrogen atom efficiency factor (k), (3–5) the relative concentrations of (3) UF_4 , (4) UF_5 , and (5) $UF_3 + UF_2$, and the final temperature (T) versus the initial concentrations of hydrogen atoms (v_H) and fluorine atoms (v_F) for the (a) H generator and (b) F generator. (a) UF_6 : H : F : HF = 1 : v : 0 : $3/2v$; $T_0 = 600$ K. (b) UF_6 : H : F : HF : H_2 = 1:0: v : $1/2v$; $T_0 = 600$ K. All concentrations are relative to $[UF_6]_0 = 2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

ve the boiling point of UF_4 , resulting only in a negligible product clustering. The conversion of UF_6 is complete once the stoichiometric requirement is satisfied. However, as is noted above, the highest concentration of the desired product UF_4 is reached at a relative H concentration of 3 and a relative F concentration of 2. As the atom concentration increases, the extent of UF_4 reduction to UF_3 and UF_2 increases and the concentration of UF_5 decreases down to zero. The endothermic reduction reactions yielding UF_3 and UF_2 , which proceed at a high rate, stabilize the reaction temperature.

Figure 4 illustrates the effect of the initial mixture temperature on the reduction process for the H generator design. A decrease in T_0 is equivalent to a decrease in the relative H content of the mixture (some of the H atoms recombine to heat the mixture to a temperature at which the reduction process becomes effective). This stabilizing effect of atomic recombination is clearly illustrated by the results of a computer experiment presented in Fig.5. In this experiment, we deliberately excluded the recombination reactions. It might be expected that eliminating the waste of active species would only favor the desired process. In fact, sustained combustion in the case of the H generator is impossible for initial temperatures below 300 K, while the complete reaction network allows sustained combustion at any T_0 .

A $\Delta v = 0.6$ increase in the initial atom concentration is estimated to be equivalent to a 300 K increase in the initial temperature of the mixture. The calculated data presented in Fig.6 corroborate this simple estimate. The utilization of the heat of recombination of H atoms in the preheating of the mixture might seem to be very costly, because it would require extra amounts of molecular fluorine, an expensive and scarce gas. However, the power necessary to heat the gas flowing at a rate of ~ 1 mol/s by $\Delta T = 300$ K is estimated at $N \approx 80$ kW. At such a high power demand, any other heating method will hardly ensure the uniformity of temperature throughout the nozzle assembly.

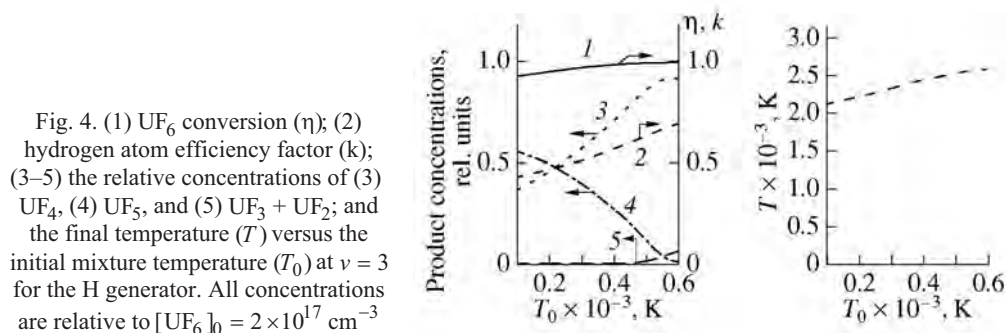


Fig. 4. (1) UF_6 conversion (η); (2) hydrogen atom efficiency factor (k); (3–5) the relative concentrations of (3) UF_4 , (4) UF_5 , and (5) $\text{UF}_3 + \text{UF}_2$; and the final temperature (T) versus the initial mixture temperature (T_0) at $v = 3$ for the H generator. All concentrations are relative to $[\text{UF}_6]_0 = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

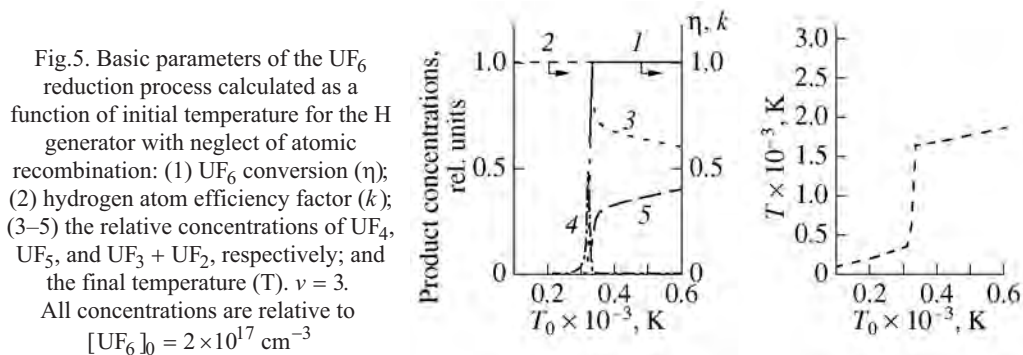


Fig.5. Basic parameters of the UF_6 reduction process calculated as a function of initial temperature for the H generator with neglect of atomic recombination: (1) UF_6 conversion (η); (2) hydrogen atom efficiency factor (k); (3–5) the relative concentrations of UF_4 , UF_5 , and $\text{UF}_3 + \text{UF}_2$, respectively; and the final temperature (T). $v = 3$. All concentrations are relative to $[\text{UF}_6]_0 = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

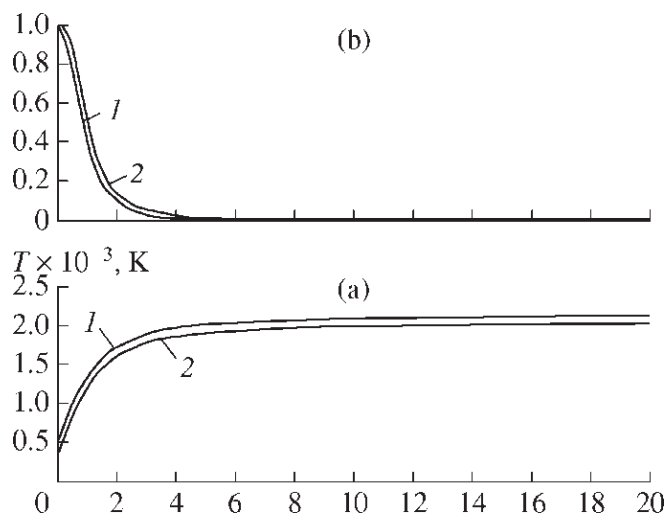


Fig. 6. (a) The final mixture temperature (T) and (b) relative UF_6 concentration versus the axial coordinate X for the H generator: (1) $\nu = 3$ and $T_0 = 600 \text{ K}$; (2) $\nu = 3.6$ and $T_0 = 300 \text{ K}$. The flow velocity is $2 \times 10^4 \text{ cm/s}$, UF_6 : H: F: HF = 1: ν : 0: $3/2\nu$ ($\nu = [\text{H}]_0 / [\text{UF}_6]_0$). The concentration is relative to $[\text{UF}_6]_0 = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

Temperature is a rather important process parameter. Because of the large cross-sectional areas of the nozzle assembly and reactor, the process temperature can be controlled only by varying the composition of the gas mixture. In particular, the reaction temperature can be decreased (e.g., in order to suppress the deep reduction of UF_6 to UF_2 and UF_3) only by diluting the mixture with a buffer gas. This is generally in conflict with the requirement that no noncondensable gases should be present at the reactor outlet, and there is a single gas that can be used as the buffer. This gas is hydrogen fluoride, which is a reaction product at the same time. It can be liquefied and returned into the operating cycle. Furthermore, an extra amount of HF can serve to raise the outlet partial pressure above the triple-point pressure in order to maintain the steady-state pressure gradient responsible for the reactant flow. The simple kinetic analysis carried out in this study ignores the molecular reactions involving H_2 and the pyrolysis of UF_6 yielding fluorine atoms, reactions possible at the high temperatures established in the decomposition of UF_6 with hydrogen and fluorine atoms. These reactions are very favorable for the process, since they reduce the required flow rate of fluorine, which is the most critical reactant. Therefore, it is appropriate to simulate UF_6 reduction taking into account these reactions, although only rough estimates of their rate constants are available.

APPENDIX

Mathematical model and computational procedure

Let us represent the chemical reactions examined in the following general symbolic form:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_{ij} u_i \longleftrightarrow \sum_{i=1}^m \beta_{ij} u_i. \quad (\text{A.1})$$



Let the overall reaction involve m substances with concentrations $u_1, \dots, u_m$ (mol/cm³) taking part in n elementary steps (in the process considered, $m=10$ and $n=16$). Here, α_{ij} and β_{ij} are nonnegative, integer, stoichiometric coefficients. We will assume that the rates of the chemical reactions obey the law of mass action and, for the forward and reverse reactions, are expressed as

$$w_j^+(u, T) = k_j^+(T) \exp(-E_j^+ / RT) u^{\alpha_{1j}} \dots u^{\alpha_{mj}}, \quad (\text{A.2})$$

$$w_j^-(u, T) = k_j^-(T) \exp(-E_j^- / RT) u^{\beta_{1j}} \dots u^{\beta_{mj}},$$

where $k_j^+(T) = k_j^+ T^{d_j}$, $k_j^-(T) = k_j^- T^{d_j}$, E_j^+ , and E_j^- are the preexponential factors of the rate constants and activation energies for the forward and reverse reactions and d_j is the exponent in the preexponential factor for the j -th reaction. Obviously, the following thermodynamic relationships are valid for all of the reactions:

$$k_j^+ / k_j^- = V^{\sum_{i=1}^m (\alpha_{ij} - \beta_{ij})} \exp \left(\sum_{i=1}^m (\beta_{ij} - \alpha_{ij}) s_i / R \right), \quad (\text{A.3})$$

$$Q_j = \sum_{i=1}^m (\alpha_{ij} - \beta_{ij}) h_i \quad (\text{A.4})$$

$$E_j^- - E_j^+ = Q_j, \quad (\text{A.5})$$

where $V = 22400 \text{ cm}^3$ is the molar gas volume under standard conditions and s_i and h_i are the specific entropies and enthalpies of the reactants and products, which are assumed to be constant. The factor standing before the exponential function in Eq. (A.3) converts molar volume units (which are given in thermodynamic handbooks) to cubic centimeters for reactions with a changing number of species. The above relationships, which express the equality of the chemical potentials of the reactants and products at equilibrium, are mathematically equivalent to the statement that, at any temperature T , the concentration set

$$u_i^*(T) = \exp(s_i / R - h_i / RT - \ln V) \quad (\text{A.6})$$

is the detailed-balancing point, at which the rates of the forward and reverse reactions are equal to $w_j^+(u, T) = w_j^-(u, T)$ ($j=1, \dots, n$) and are positive. Furthermore, Eqs. (3A) and (4A) make the set of linear equations

$$\sum_{i=1}^m (\beta_{ij} - \alpha_{ij}) x_i = b_j, \quad j=1, \dots, n$$

solvable for x_i in the cases of $b_j = \ln(k_j^+ / k_j^-)$ and $b_j = Q_j$. This imposes a nontrivial constraint on the reaction parameters, since the rank of the stoichiometric matrix $\{\beta_{ij} - \alpha_{ij}\}_{ij}$ is incomplete because of the material balance equations.



We took into account these relationships directly when choosing kinetic parameters for the reactions listed in Table 1. The heats (Q_j) of these reactions were calculated from bond dissociation energy data [3, 11, 12], applying small ($\sim 5\%$) corrections lying within the confidence intervals to ensure the solvability of Eq. (A.4) for the enthalpies h_i . The thermodynamic functions necessary for calculating the rate constants and activation energies of reverse reactions, as well as the heat capacities and matched enthalpies of the reactants and products, are listed in Table 2. The temperature dependences of these quantities are neglected.

Table 1.

Reactions included in the kinetic network and their parameters

No.	Reaction	Q_j	d_j	k_j^+	E_j^+	k_j^-	E_j^-
1	$\text{H} + \text{H} + \text{UF}_6 \longleftrightarrow \text{H}_2 + \text{UF}_6$	430.5	-1	7.0×10^{18}	0	4.480×10^{19}	430.5
2	$\text{H} + \text{UF}_6 \longleftrightarrow \text{UF}_5 + \text{HF}$	286.3	0	6.0×10^{11}	29.3	4.681×10^8	315.6
3	$\text{H} + \text{UF}_5 \longleftrightarrow \text{UF}_4 + \text{HF}$	140.0	0	6.0×10^{11}	50.2	1.364×10^{10}	190.2
4	$\text{H} + \text{UF}_4 \longleftrightarrow \text{UF}_3 + \text{HF}$	-62.7	0	6.0×10^{11}	83.6	4.075×10^9	20.9
5	$\text{H} + \text{UF}_3 \longleftrightarrow \text{UF}_2 + \text{HF}$	-43.1	0	6.0×10^{11}	83.6	2.901×10^{10}	40.5
6	$\text{H} + \text{H} + \text{UF}_4 \longleftrightarrow \text{H}_2 + \text{UF}_4$	430.5	-1	7.0×10^{18}	0	4.480×10^{19}	430.5
7	$\text{H} + \text{H} + \text{UF}_5 \longleftrightarrow \text{H}_2 + \text{UF}_5$	430.5	-1	7.0×10^{18}	0	4.480×10^{19}	430.5
8	$\text{H} + \text{H} + \text{HF} \longleftrightarrow \text{H}_2 + \text{HF}$	430.5	-1	2.3×10^{18}	0	1.470×10^{19}	430.5
9	$\text{F} + \text{H}_2 \longleftrightarrow \text{HF} + \text{H}$	133.8	0	1.6×10^{14}	6.7	1.774×10^{14}	140.5
10	$\text{H} + \text{F}_2 \longleftrightarrow \text{HF} + \text{F}$	409.6	0	1.6×10^{14}	10	2.634×10^{13}	419.6
11	$\text{F} + \text{H} + \text{HF} \longleftrightarrow \text{HF} + \text{HF}$	564.3	-1	2.3×10^{18}	0	1.632×10^{19}	564.3
12	$\text{F} + \text{H} + \text{UF}_6 \longleftrightarrow \text{HF} + \text{UF}_6$	564.3	-1	7.0×10^{18}	0	4.890×10^{19}	564.3
13	$\text{F} + \text{H} + \text{UF}_5 \longleftrightarrow \text{HF} + \text{UF}_5$	564.3	-1	7.0×10^{18}	0	4.890×10^{19}	564.3
14	$\text{F} + \text{H} + \text{UF}_4 \longleftrightarrow \text{HF} + \text{UF}_4$	564.3	-1	7.0×10^{18}	0	4.890×10^{19}	564.3
15	$\text{H} + \text{H} + \text{H}_2 \longleftrightarrow \text{H}_2 + \text{H}_2$	430.5	-1	2.3×10^{18}	0	1.470×10^{19}	430.5
16	$\text{F} + \text{H} + \text{H}_2 \longleftrightarrow \text{HF} + \text{H}_2$	564.3	-1	2.3×10^{18}	0	1.632×10^{19}	564.3

Note: Q_j , E_j^+ , and E_j^- are, respectively, the heat and the activation energies of the forward and reverse reactions (kJ/mol); k_j^+ and k_j^- are the rate constants of the forward and reverse reactions (in $\text{cm}^3 \text{mol}^{-1} \text{s}^{-1}$ for bimolecular reactions and in $\text{cm}^6 \text{mol}^{-2} \text{s}^{-1}$ for termolecular reactions); and d_j is the exponent (T^{d_j}).

Table 2.

Thermal and thermodynamic properties of the components [12]

Property	H	H ₂	HF	UF ₂	UF ₃	UF ₄	UF ₅	UF ₆	F	F ₂
$C_p, \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$	20.7	28.8	29.1	117.2	117.2	117.2	166.2	166.2	22.8	31.4
$S, \text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ (at 298 K)	114.7	130.6	173.8	298.1	332	349.6	377.2	376.8	158.7	203.1
H, J/mol	0	-430.5	-564.3	1936.6	1329.2	702.2	278	0	0	-154

Note: C_p is molar heat capacity, S is entropy and H is matched enthalpy.



Consider a cylindrical reactor of length L in which the reactants flow with a steady-state velocity v along the X axis. Under steady-state conditions, the component concentrations and the mixture temperature in the reactor are functions of the coordinate X alone and the mass and energy conservation laws imply the following set of equations:

$$\frac{d(vu_i(x))}{dx} = \sum_{j=1}^n (\beta_{ij} - \alpha_{ij})(w_j^+(u, T) - w_j^-(u, T)), \quad i=1, \dots, m \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{d(vc(u)T)}{dx} = \sum_{j=1}^n Q_j(w_j^+(u, T) - w_j^-(u, T)),$$

where $c(u) = \sum_{i=1}^m c_i u_i$ is the total heat capacity of the system and c_i is the molar heat

capacity of the i -th component at a constant volume (in $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$). The change of variables $x \rightarrow t = x / v$ (t is the time taken by the flowing mixture to travel the distance between a nozzle and the point x) converts the set of equations (A.7), which describes steady-state profiles, to a set of ordinary differential equations of nonisothermal kinetics. Since the inlet concentrations and temperatures are preset, we deal with an initial-value Cauchy problem. The properties of the equations of chemical kinetics are well studied [14–16]. In particular, owing to the presence of a positive-material-balance vector in the system and the validity of the energy conservation law (Eq. (A.4)), the solution of Eq. (A.7) is defined at any $t \geq 0$ and is nonnegative and bounded. It is interesting that even a slight deviation from Eq. (A.4) (which can take place if unmatched kinetic constants, either calculated or observed, are used) may lead to such solutions for Eq. (A.7) that an infinite temperature rise occurs in a finite time. Obviously, this is physically meaningless. In turn, condition (A.3) implies that any stationary point is a detailed-balancing point. This property, which was discovered by Zel'dovich [17] for reversible isothermic reactions, is also possessed by nonisothermic reactions, since the set of equations (A.7) has the same form when expressed in terms of the Gibbs free energy function

$$G(u, T) = \sum_{i=1}^m u_i (RT \ln u_i - Ts_i + h_i - RT + RT \ln V).$$

It can readily be checked that

$$w_j^+(u, T) = w_j(T) \exp(\langle \nabla_u G, \alpha_j \rangle),$$

$$w_j^-(u, T) = w_j(T) \exp(\langle \nabla_u G, \beta_j \rangle),$$

where $w_j(T) = k_j^+ T^{d_j} \exp(-E_j^+ / RT) [u^*(T)]^{\alpha_j}$ is the reaction rate at the temperature T at the equilibrium point given by Eq. (A.6) and the brackets $\langle \dots \rangle$ designate the scalar multiplication of the vectors that they include. Thus, the scalar multiplication of the first equations in the set of equations (A.7) by the gradient $\nabla_u G$ yields

$$\langle du / dt, \nabla_u G \rangle = \sum_{j=1}^n w_j(T) (\langle \beta_j, \nabla_u G \rangle - \langle \alpha_j, \nabla_u G \rangle)$$



$$\times (\exp(\langle \alpha_j, \nabla_u G \rangle) - \exp(\langle \beta_j, \nabla_u G \rangle)).$$

Since all terms on the right-hand side of this equation are nonpositive, the equality $\langle \beta_j, \nabla_u G \rangle = \langle \alpha_j, \nabla_u G \rangle$ must be true at the stationary point; that is, detailed balancing does take place at this point.

In the numerical solution of Eq. (A.7), we used a method known from the literature [15, 16] and a standard integration program to implement this method. This program is based on Euler's implicit difference scheme. The slow combinations are preliminarily singled out to improve the conditioning of the difference equations. A computational mesh consisting of points t is adapted by double calculation in order to achieve a closer approximation for abruptly changing unsteadystate processes. The implicit difference equations are solved by the Newton method. With this algorithm, the solutions of the differential equations (A.6) can be approximated with a relative accuracy of 10^{-3} in about 150 steps on the variable, adaptable mesh to obtain a stationary solution ($0 \text{ cm} \leq x \leq 10^6 \text{ cm}$). Furthermore, this algorithm requires only a moderate computing power ($\sim 1 \text{ s}$ per variant on an AMD K6-2/450 PC). The stationary solution of the Euler scheme is always the stationary solution of the set of equations (A.7); that is, it defines the chemical equilibrium in the system. The high degree of approximation achieved with this first-order implicit difference scheme is explained by the fact that, as applied to fast reactions, this scheme preserves the property of solution positiveness and the asymptotics inherent in the kinetic system [15]. By contrast, integrating the set of equations (A.7) using Gear's familiar program from the FORTRAN library IMSL [18], which implements a stiff, stable solver and is based on multistep implicit difference schemes of order 1 through 5 [19], leads to unreliable computations in the case considered. For typical computation conditions, we observed 20% deviations from the energy conservation law $c(u(x))T(x) - \sum h_i u_i(x) = \text{const}$. This is apparently explained by the fact that the difference schemes used in these computations break the special asymptotics inherent in kinetic equations.

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 04-03-32684.

References

1. Tumanov, Yu.N. and Galkin, N.P., *At. Energ.*, 1972, vol.32, no.1, p.21.
2. Myerson, A.L. and Chludzinski, J.J., *J. Phys. Chem.*, 1981, vol.85, p.3905.
3. Tumanov, Yu.N. and Tsirel'nikov, K.V., *Fiz. Khim. Obrab. Mater.*, 1991, no.6, p.66.
4. *Khimiya i tekhnologiya fluoristykh soedinenii urana* (Chemistry and Production of Uranium-Fluorine Compounds) Galkin, N.P., Ed., Moscow: Gosatomizdat, 1961, p.345.
5. RF Patent 2204529, 2003.
6. *Handbook of Chemical Lasers*, Gross, R.W.F. and Bott, J.F., Eds., New York: Wiley, 1976.
7. Kim, K.C., Reisfeld, M., and Seits, D., *J. Chem. Phys.*, 1980, vol. 73, p. 5605.
8. Lyman, J.L. and Holland, R., *J. Phys. Chem.*, 1987, vol. 91, p. 4821.
9. Lewis, W.B., Wampler, F.B., and Huber, E.J., *J. Photo-chem.*, 1979, vol.11, no.6, p.393.
10. Rienacker, K., Dissertation, Gotingen: Max-Planck Institut, 1961.
11. Gurvich, L.V., Karachintsev, G.B., and Kondrat'ev, V.N., *Energii razryva khimicheskikh svyazei. Potentsialy ionizatsii i srodstvo k elektronu* (Dissociation Energies of Chemical Bonds, Ionization Potentials, and Electron Affinity), Moscow: Nauka, 1974.



12. Termodinamicheskie svoistva individual'nykh veshchestv. Spravochnik (Thermodynamic Properties of Individual Compounds: A Handbook), Glushko, V.P., Ed., Moscow: Nauka, 1982.
13. Termicheskie konstanty veshchestv: baza dannykh (Thermal Constants of Substances: A Database) Yungman, V., Ed., version of May 28, 2003, <http://www.chem.msu.su/cgi-bin/tkv1/pl?show=welcome.html>
13. Kondrat'ev, V.N., Konstanty skorosti gazofaznykh reaktsii (Rate Constants of Gas-Phase Reactions), Moscow: Nauka, 1971.
14. Vol'pert, A.I. and Khudyaev, S.I., Analiz v klassakh razryvnykh funktsii i uravneniya matematicheskoi fiziki (Analysis in Classes of Discontinuous Functions and Equations of Mathematical Physics), Moscow: Nauka, 1975.
15. Dubovitskii, A.Ya. and Dubovitskii, V.A., Numerical Integration of Ordinary Differential Equations of Nonisothermal Kinetics Using Slow Combinations, Preprint of Inst. of Chemical Physics, USSR Acad. Sci., 1986, Chernogolovka, Moscow oblast, 1986, p.31.
16. Dubovitskii, A.Ya. and Dubovitskii, V.A., Zh. Vychisl. Mat. Mat. Fiz., 1983, vol.23, no.5, p.1960.
17. Zel'dovich, Ya.B., Zh. Fiz. Khim., 1938, vol.11, no.5.
18. Barten'ev, O.V., Fortran dlya professionalov (Professional FORTRAN), Moscow: Dialog MIFI, 2000, vol.3.
19. Gear, C.W., Numerical Initial Value Problems in Ordinary Differential Equations, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1971.

Received June 2, 2004



СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

Е.Б. Гордон, Ю.А. Колесников, А.Г. Чернов
Патент

Изобретение относится к способам восстановления гексафторида урана до низших фторидов и до металлического урана и может быть использовано при переработке обедненного гексафторида урана. Результат способа: возможность получения продукта заданного состава и осуществления реакции восстановления гексафторида урана при более низкой температуре. Восстановление UF_6 осуществляют предварительно атомизированным водородом в химическом реакторе в смеси с буферным газом-разбавителем в режиме непрерывного самопроизвольного горения. Атомарный водород получают при смешении в потоке молекулярного водорода с атомарным фтором. Фтор вводят через сопловой блок из камеры сгорания. В камере сгорания осуществляют непрерывное горение молекулярного водорода в избытке молекулярного фтора, поджигаемого в блоке горелок, так что избыток молекул фтора термически диссоциирует на атомы фтора. Восстановление UF_6 осуществляют до металлического урана при соотношении концентраций атомарного водорода и молекул UF_6 в смеси, подаваемой в реактор, 6:1 соответственно. Восстановление UF_6 осуществляют до тетрафторида урана при соотношении концентраций атомарного водорода и молекул UF_6 в смеси, подаваемой в реактор, 2:1 соответственно. 2 з.п. ф-лы, 1 ил.

Изобретение относится к области химической физики, конкретно к способам восстановления гексафторида урана до низших фторидов и до металлического урана, и может быть использовано при переработке обедненного гексафторида урана, накопленного и накапливаемого на производствах по обогащению урана.

Известен способ переработки обедненного гексафторида урана методом пиролиз-гидролиза, применяемый на заводе фирмы COGEMA (Франция) и на демонстрационной установке фирм Allied Signal и General Atomics (США) [US 5346684, кл. С 01 В 007/19; С 01 В 009/08, 1994 г.]. Он основан на взаимодействии газообразного обедненного UF_6 и водяного пара с последующим испарением азеотропной смеси HF -2 H_2O в разогретом реакторе с получением газообразного HF . Промежуточный продукт – оксифторид UO_2F_2 подают во второй реактор, куда дополнительно вводят водяной пар и (или) азеотропную смесь, в результате чего получают U_3O_8 и HF . При необходимости получения UO_2 во второй реактор подают также водород. Для получения безводного HF азеотропную смесь подвергают дистилляции, но часть ее возвращается на рецикл в реакторы, где она используется для реакции пиролиз-гидролиза. Недостатком метода является многоступенчатость, чрезвычайная коррозионная способность азеотропной смеси HF -2 H_2O (намного превышающая таковую для «сухого» HF), необходимость обезвоживания HF , высокий уровень энергозатрат.

Наиболее близким к предлагаемому является способ возбуждения реакции восстановления гексафторида урана «введением в реакционное пространство частично расщепленного на атомы водорода». [Галкин Н.П. и др. Химия и технология фтористых соединений урана]. Однако в этом случае:

1) не раскрыт способ расщепления молекул водорода на атомы, и, как известно, молекула водорода чрезвычайно жесткая и требуются очень большие энергии для ее расщепления (диссоциации) на атомы – 104 ккал/моль;



2) хотя процесс ведут в отрыве от стенок реактора и стенки реактора остаются холодными и на них не происходит отложений продуктов реакций, тем не менее в зоне реакции температура гораздо выше 1000°C ;

3) конечный продукт помимо целевого продукта содержит значительное количество нецелевых фторидов урана.

Техническим результатом настоящего изобретения является возможность получения продукта заданного состава и осуществления реакции восстановления гексафторида урана при более низкой температуре.

Для достижения указанного технического результата предложено в известном способе восстановления гексафторида урана с использованием атомарного водорода восстановление UF_6 осуществлять предварительно атомизированным водородом в химическом реакторе в смеси с буферным газом-разбавителем в режиме непрерывного самопроизвольного горения; при этом атомарный водород получают в отдельном сопловом блоке при смешении в потоке молекулярного водорода с атомарным фтором, вводимым через сопловый блок из камеры сгорания, в которой осуществляют непрерывное горение молекулярного водорода в избытке молекулярного фтора, поджигаемого в блоке горелок, так что избыток молекул фтора термически диссоциирует на атомы фтора.

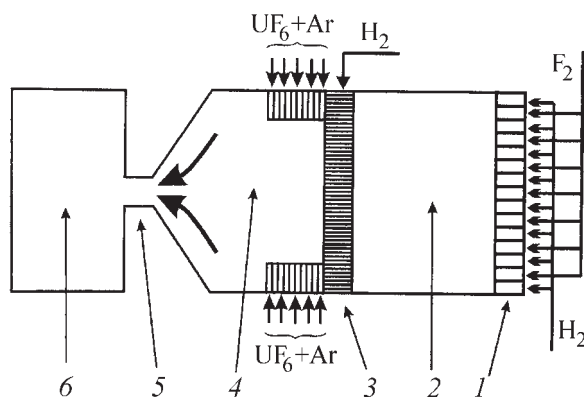
Способ восстановления гексафторида урана до металлического урана осуществляют при соотношении атомарного водорода и гексафторида урана в смеси, подаваемой в химический реактор, 6:1, а до тетрафторида урана – при соотношении 2:1.

В предлагаемом способе показано, что использование атомарного водорода, полученного в реакции молекулярного водорода с атомарным фтором, который первоначально получают в отдельном блоке при горении H_2 в избытке F_2 , позволяет снизить температуру в зоне реакции восстановления гексафторида урана атомами водорода.

Предлагаемый способ дает возможность получать продукт заданного состава (либо тетрафторид урана, либо металлический уран) высокой чистоты, регулируя количество подаваемого атомарного водорода и температуру в зоне реакции.

Температуру в зоне реакции поддерживают на заданном уровне введением определенного количества буферного газа-разбавителя.

На чертеже, поясняющем существо изобретения, представлена блок-схема химического реактора, реализующая предложенный способ.



Химический реактор состоит из блока горелок 1 для подачи водорода и фтора (с избытком фтора), камеры сгорания водорода во фторе 2, сопловых блоков 3, в которых продукт этого сгорания – термически диссоциированный на атомы фтор – смешивают с молекулярным водородом (и инертным газом, обеспечивающим заданные температуру и величину потока) для получения атомарного водорода.

Особенность данной системы состоит в том, что энергию для последовательного восстановления фторидов урана черпают из экзотермических химических реакций. В блок горелок 1 подают смесь слабосвязанных молекул фтора с молекулами водорода при избытке фтора и поджигают на входе в камеру сгорания 2; реакция $\text{H}_2 + \text{F}_2 \Rightarrow 2\text{HF}$ сильно экзотермична, и выделяющегося тепла достаточно для диссоциации остальных (избыточных) молекул фтора (энергия связи ~ 37 ккал/моль), и в этом случае брутто-реакция имеет вид: $\text{H}_2 + n\text{F}_2 \Rightarrow 2\text{HF} + 2(n-1)\text{F}$, где n – избыток количества фтора по сравнению с количеством водорода. Оптимальным для такого процесса является $n = 4$.

Каждые $2(n-1)$ атомов фтора смешивают в реакторе 4 с $2(n-1)$ молекулами водорода: $2(n-1)\text{F} + 2(n-1)\text{H}_2 \Rightarrow 2(n-1)\text{HF} + 2(n-1)\text{H}$, при этом образуются $2(n-1)$ атомов водорода.

После соплового блока содержащий атомы Н газ смешивают с UF_6 и буферным газом-разбавителем, и в реакторной зоне 4 происходит восстановление UF_6 путем последовательного отщепления от него атомов фтора атомами водорода.

В принципе возможна организация процесса, когда «обдирка» идет до металлического урана: $2(n-1)\text{H} + (n-1)/3 \text{UF}_6 \Rightarrow (n-1)/3 \text{U} + 2(n-1)\text{HF}$. Из этого выражения следует, что для получения одного моля U в оптимальном случае ($n = 4$) требуется 4 моля F_2 и 7 молей H_2 , при этом образуется 14 молей HF.

При получении тетрафторида урана процесс в реакторе описывается выражением: $2(n-1)\text{H} + (n-1)\text{UF}_6 \Rightarrow (n-1)\text{UF}_4 + 2(n-1)\text{HF}$. В этом случае для получения одного моля UF_4 при $n = 4$ необходимы 1,33 моля F_2 и 2,33 моля H_2 , при этом образуется 4,67 моля HF.

Продукты реакции через сопло торможения 5 попадают в камеру разделения, очистки и утилизации продуктов 6.

Преимущества способа восстановления UF_6 атомарным водородом заключаются в следующем.

Если целевым продуктом является тетрафторид урана, то обе реакции последовательной обдирки UF_6 до UF_4 :

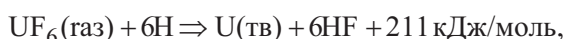
$\text{UF}_6 + \text{H} \Rightarrow \text{UF}_5 + \text{HF} + 289 \text{ кДж/моль}$ и $\text{UF}_5 + \text{H} \Rightarrow \text{UF}_4 + \text{HF} + 144 \text{ кДж/моль}$ сильно экзотермичны и достаточно быстры при температурах в несколько сотен °С. Поэтому для организации стационарного горения не требуется никакой внешней энергии, и оно устойчиво и при достаточно низких температурах. В то же время реакции:



являющиеся следующими стадиями обдирки, существенно более медленны, так что в условиях поддержания температуры смеси на уровне нескольких сотен °С, что для реактора большой протяженности может быть достигнуто лишь использованием буферного газа-разбавителя, при стабильном горении должна реализоваться высокая селективность восстановления UF_6 до UF_4

Сложнее реализовать режим восстановления UF_6 до металлического урана, поскольку приведенные выше газовые реакции обдирки UF_4 до U являются эндотермическими.

Однако здесь следует иметь в виду, что в отличие от восстановления молекулярным водородом брутто-процесс восстановления UF_6 до металлического урана:



является, тем не менее, экзотермическим (дополнительная энергия выделяется при конденсации урана). Поэтому в условиях квазиadiaбатического высокотемпературного горения с участием сажеподобных твердых продуктов, содержащих низшие фториды и U , можно добиться полного восстановления.

О возможностях метода можно судить по следующим примерам.

Пример 1. Восстановление UF_6 до UF_4

В блок горелок 1 подают потоки молекул водорода – $[H_2] = 0,1$ моль/с (0,2 г/с) и молекул фтора – $[F_2] = 0,4$ моль/с (15,2 г/с). При сгорании водорода в избытке фтора (температура 500–600°С) в камере 2 образуются фтористый водород – $[HF] = 0,2$ моль/с (4 г/с) и атомарный фтор $[F] = 0,6$ моль/с (11,4 г/с). Атомарный фтор, полученный в камере 2, поступает (вместе с HF) в сопловые блоки 3, где его смешивают с подаваемым в эти блоки молекулярным водородом – $[H_2] = 0,6$ моль/с (1,2 г/с). В результате реакции молекулярного водорода с атомарным фтором на входе в реактор 4 образуется атомарный водород – $[H] = 0,6$ моль/с (0,6 г/с) и фтористый водород – $[HF] = 0,6$ моль/с (12 г/с) дополнительно к HF , поступающему из камеры 2. В реактор 4 подают гексафторид урана – $[UF_6] = 0,3$ моль/с (105,6 г/с) и буферный газ-разбавитель аргон. Атомарный водород восстанавливает гексафторид урана до тетрафторида урана – $[UF_4] = 0,3$ моль/с (94,2 г/с) с получением фтористого водорода – $[HF] = 0,6$ моль/с (12 г/с), к которому добавляется фтористый водород, получаемый в камере 2 и на входе в реактор 4; температура в реакторе 4 не превышает 1000°С).

Таким образом, при восстановлении гексафторида урана до тетрафторида урана с производительностью $[UF_6] = 105,6$ г/с расходуется $[F_2] = 15,2$ г/с и $[H_2] = 1,4$ г/с; при этом образуется $[UF_4] = 94,2$ г/с и безводный фтористый водород $[HF] = 28$ г/с. Выход UF_4 относительно всех фторидов урана – 98%.

Пример 2. Восстановление UF_6 до металлического урана.

Пример 2 в точности повторяет Пример 1 вплоть до подачи гексафторида урана в реактор 4.

В блок горелок 1 подают потоки молекул водорода – $[H_2] = 0,1$ моль/с (0,2 г/с) и молекул фтора – $[F_2] = 0,4$ моль/с (15,2 г/с). При сгорании водорода в избытке фтора (температура 500–600°С) в камере 2 образуются фтористый водород – $[HF] = 0,2$ моль/с (4 г/с) и атомарный фтор $[F] = 0,6$ моль/с (11,4 г/с). Атомарный фтор, полученный в камере 2, поступает (вместе с HF) в сопловые блоки 3, где его смешивают с по-



даваемым в эти блоки молекулярным водородом – $[H_2] = 0,6$ моль/с (1,2 г/с). В результате реакции молекулярного водорода с атомарным фтором на входе в реактор 4 образуется атомарный водород – $[H] = 0,6$ моль/с (0,6 г/с) и фтористый водород – $[HF] = 0,6$ моль/с (12 г/с) дополнительно к HF, поступающему из камеры 2. В реактор 4 подают гексафторид урана – $[UF_6] = 0,1$ моль/с (35,2 г/с) и буферный газ-разбавитель аргон. Атомарный водород восстанавливает гексафторид урана до металлического урана – $[U(met)] = 0,1$ моль/с (31,4 г/с) с получением фтористого водорода – $[HF] = 0,6$ моль/с (12 г/с), к которому добавляется фтористый водород, получаемый в камере 2 и на входе в реактор 4; температура в реакторе 4 около 1000°C).

Таким образом, при восстановлении гексафторида урана до металлического урана с производительностью $[UF_6] = 35,2$ г/с расходуется $[F_2] = 15,2$ г/с и $[H_2] = 1,4$ г/с; при этом образуется $[U(met)] = 31,4$ г/с и безводный фтористый водород $[HF] = 28$ г/с.

Выход $U(met)$ относительно всех фторидов урана – 99%.

Источники информации

1. Патент США 5346684, кл. С 01 В 007/19; С 01 В 009/08, 1994 г.
2. Галкин Н.П. и др. Химия и технология фтористых соединений урана[

Формула изобретения

1. Способ восстановления гексафторида урана UF_6 водородом, включающий получение безводного фтористого водорода, отличающийся тем, что восстановление UF_6 осуществляют предварительно атомизированным водородом в химическом реакторе в смеси с буферным газом-разбавителем в режиме непрерывного самопроизвольного горения, при этом атомарный водород получают при смешении в потоке молекулярного водорода с атомарным фтором, вводимым через сопловой блок из камеры сгорания, в которой осуществляют непрерывное горение молекулярного водорода в избытке молекулярного фтора, поджигаемого в блоке горелок, так, что избыток молекул фтора термически диссоциирует на атомы фтора.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что восстановление UF_6 осуществляют до металлического урана при соотношении концентраций атомарного водорода и молекул UF_6 в смеси, подаваемой в реактор, 6:1 соответственно.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что восстановление UF_6 осуществляют до тетрафторида урана при соотношении концентраций атомарного водорода и молекул UF_6 в смеси, подаваемой в реактор, 2:1 соответственно.

Патентообладатели:
Государственный научный центр РФ
Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований
ГЛОУБ НУКЛЕАР СЕРВИСИЗ ЭНД
СЭПЛАЙ ГНСС, ЛИМИТЕД

Патент RU 2 204 529 С2
Дата начала действия патента:
28.03.2001



h) *Физическая лампа Гордона*

EMBEDDING IMPURITIES INTO SOLID HELIUM

E.B. Gordon, A. Usenko, G. Frossati

Journal of Low Temperature Physics, 130 (2003) 15–23

We have developed a new technique to imbed impurities in solid ^4He . It consists in injecting helium gas mixed with the impurity on the top surface of Helium liquid-solid interface, with the solid continuously moving downwards by pumping at the bottom of the cell. Due to the large temperature gradient, sedimentation occurs through the thin (1–2 mm) upper layer of liquid helium. We achieved a guest-particle density of $3 \cdot 10^{19}$ per cm^3 and a doped crystal growth rate of 0.05 mm/s. The possibilities of this novel method for matrix isolation spectroscopy as well as for quantum crystal studies are discussed.

1. Introduction

Embedding micro-impurities into solid helium represents a very intriguing experimental problem from several viewpoints – for the spectroscopy of atoms and molecules isolated in the most inert and simultaneously quantum matrix; [1] for studying the possibility of impurity-ordering in helium with formation of the so-called Impurity-Helium Solid Phase, [2] etc. Unlike the single-temperature experiments performed with molecules captured in liquid helium droplets, [3] the study of impurities embedded in solid helium may be carried out in a wide range of temperatures and pressures. It also avoids the dilemma of whether the peculiarities of the rotational structure of spectra for molecules inserted in condensed helium are the fingerprints of ^4He superfluidity [4] or are caused by the flexibility of the helium matrix. [5].

Unlike heavier rare gases commonly used for matrix isolation, the introduction of impurities into solid has proven to be a more complicated problem. Only one successful attempt is known where by using the delicate two-step scheme of laser ablation from a metallic target placed into solid helium the authors [6] have managed to achieve a steady concentration of rubidium atoms in solid helium of about 10^8 per cc.

In the present work we have developed a novel approach to the problem, which allows to strongly enhance the density of particles in solid by at least 8 orders of magnitude. In some sense it represents further development of the technique of embedding impurities into superfluid helium. [7, 8]

2. Description of the method

The essence of our approach is as follows. Let us imagine a helium crystal grown in a vertical cylindrical cell, placed in the bath of a pumped liquid helium cryostat with temperature around 1.5 K. The upper part of the cell is connected to the high pressure (2.6–3.0 MPa) helium gas supply. Provided we will allow helium to leave the cell from its bottom, the crystal will move downwards as a whole because its friction with the cell wall will be negligible in comparison with the force on the top crystal surface even with a very small pressure gradient. The crystal surface level is kept constant by the helium input. In this way, in spite of the fact that the crystal shape and position are kept steady, its content



will change at a rate determined by the helium outflow. Let us suppose then that supply tube has a small orifice as inlet. In that case at a high enough outflow value the gas inflow will form a jet, which on the account of the peculiarity of “hot rarified” gas motion through “cold dense” gas has to be needle-shaped and to propagate with a velocity close to the sound velocity. [7] The introduction of a small amount of particles that we wish to study to the supplied gas doesn’t change the jet gas-dynamics. Thus the particles will be transported together with helium gas to the condensed helium surface in about 10^{-4} s. The temperature of the inlet orifice should of course be kept high enough to prevent the impurities from freezing out, and its content in the supplied helium gas should be low enough to avoid their coalescence in the gas jet.

A scheme of the experimental setup is shown in Fig. 1. The cell body is a vertically installed sapphire tube 14 mm I.D and 17 mm O.D. providing simultaneously optical transparency (even if in this experiment it was not perfectly polished) and good thermal contact with the helium bath. The tube is indium-sealed to two copper flanges. The helium-impurity mixture enters the tube from the upper flange. The source is represented by two coaxial thin-walled stainless steel tubes of 3 and 10 mm diameter. The heater is wired on

the inner tube along its length, which was inserted into the cryostat. 50% of heater power is released near the very bottom of the source. The inner capillary has an orifice of 0.25 mm soldered at its bottom. To create an impedance for the outflow several layers of aluminum oxide mesh are installed at the bottom of the sapphire tube. A stainless steel capillary is connected to the cell bottom with a needle valve to control the outflow. A flow-meter was used to measure the helium flow at the output.

At a flow level of 10^{20} helium atoms per second the rate of the doped He crystal growth should be 1.3 mm per minute. The heat released in cooling the jet and for condensation is about 1 W in steady-state conditions. The Sapphire tube wall thickness is 1.5 mm and the area of its wall in the upper part that is filled with gaseous and liquid helium is about 10 cm^2 , so the heat transferred to the liquid helium bath can be as high as 7 W/K. The condensed helium surface in the cell is thus expected to be at a temperature

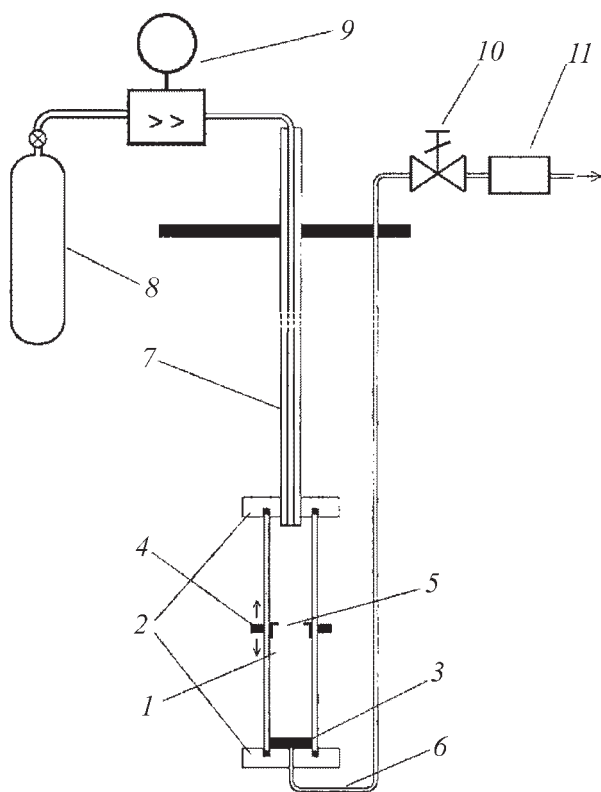


Fig. 1. Scheme of the experimental setup.

- 1, sapphire tube 110 mm length; 2, copper flanges;
- 3, mesh; 4, movable magnet ring with a holder; 5, nickel disk;
- 6, output capillary; 7, input source; 8, helium cylinder;
- 9, gas regulator; 10, needle-valve; 11, gas flow-meter

only 0.15 K higher than that of the helium bath. We should mention that only the upper part of the tube should have high thermal conductivity since thermal exchange in the part occupied by solid is dominated by its rather poor thermal conductivity. In an experiment done recently we have used a cell with the upper part made of copper while the rest was made of quartz. [9]

A photo of the low temperature part of the cell is shown in Fig. 2. The bronze disc spring just above the lower flange was designed to compensate the difference of thermal expansion for the materials used. Such a construction turned out to survive in multiple cooling cycles and it worked reliably at least up to pressure of 60 bar. The Teflon cap seen beneath the upper flange served as thermal insulation of the orifice.

At the beginning of an experiment at $T = 4.2$ K and $P = 0.5\text{--}1$ MPa helium gas from the supply system is allowed to liquefy in the cell until the flow of gas stops. The cryostat bath is then pumped down to 1.4 K and the helium in the cell is solidified by increasing the pressure up to 3 MPa. Because the interface was not clearly seen under our experimental conditions (the sapphire tube was not transparent enough), we used a light nickel disk provided with a central hole, placed inside the cell that could be moved up and down using a (NdFeB) magnet ring outside the sapphire tube. Usually, before solidification the disk was lifted to the top of the cell. After the crystal was grown the magnet was moved away from the disk, to the bottom of the cell. The disk fell down to the solid-liquid interface position. At a heater power of 1 W, a bath temperature of 1.4 K and a pressure of 3 MPa the interface was 20 mm below the source orifice, a convenient distance for the helium jet to form. [8]

4. Experimental results and conclusion

Being easily detectable by Raman scattering, molecular nitrogen and oxygen were chosen as the dopants in the first experiments – we simply used technical helium gas containing 1000 ppm of air. Under initial gas-liquid helium condensation the contaminants of course collected at the sapphire wall in the form of grains and flakes decreasing the transparency. In the absence of outflow the disk was immobile. It started to move downwards with a constant velocity governed by the flow value, adjusted with a needle valve and monitored by a calibrated flow-meter. From time to time we tried to move the Ni disk using the ring-magnet to convince ourselves that it was well frozen into the solid.

The results of a typical experiment are shown in Fig. 3. The photography of the cell was made through the vertical unsilvered slit of a usual glass Dewar, at equal intervals of

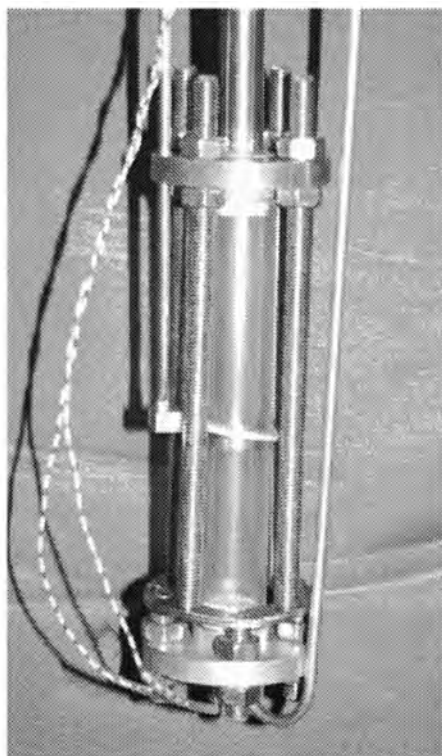


Fig. 2. Photo of the low temperature part of the cell for doped-helium crystal growth



time – 2 min at a flow $\Phi = 0.93 \cdot 10^{20}$ atoms per sec, and 1 min at $\Phi = 2.02 \cdot 10^{20}$ and $\Phi = 2.89 \cdot 10^{20}$ atoms per sec. In Fig.4 the kinetics of the disk motion was compared with that calculated through the simple formula

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\Phi}{Ap}, \quad (1)$$

where h is the disk position, $A = 1.54 \text{ cm}^2$ is the sapphire tube cross-section, and $\rho = 3 \cdot 10^{22}$ is the particle density of solid helium at $T = 1.5 \text{ K}$ and $P = 3 \text{ MPa}$. [10]

Analysis of Figs.3 and 4 leads to the following interesting conclusions:

The solid *below the ring*, originating from liquid from the beginning of the experiment carried clearly visible “dirt” on the walls of the cell.

Meanwhile the solid formed *above the ring* by condensation of the gas jet is nicely transparent. That is because the impurities in the jet come out of the orifice at high speed and are imbedded in the solid before they have time to coalesce into large particles or diffuse to the wall. The size of the impurities is certainly smaller than that of visible light.

At the end of the experiment the pressure was decreased to below 25 bar. The solid helium melted and the walls became covered by sediment as in the beginning, showing that there were indeed impurities in the Helium crystal.

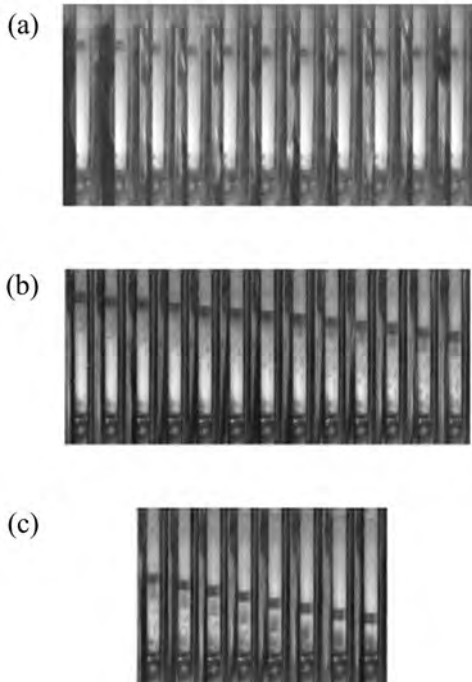


Fig. 3. Photo-sequence of the cell with solid helium at different outflow values Φ made with repetition rates $\Delta\tau$: (a) $\Phi = 0.15 \text{ mmol/s}$, $\Delta\tau = 2 \text{ min}$; (b) $\Phi = 0.34 \text{ mmol/s}$, $\Delta\tau = 1 \text{ min}$; (c) $\Phi = 0.48 \text{ mmol/s}$, $\Delta\tau = 1 \text{ min}$

As it can be derived from Figs.3 and 4 the velocity of the disk is always *less* than that calculated by formula (1). The reason is that solid actually flows through the disk hole, which can also be seen in the faster flow experiments where clean solid forms below the disk in the second and third runs—one can clearly see that transparent solid appears and grows in height proportionally to time. It is well known that quantum crystals of helium and hydrogen can flow because of the high vacancy mobility.

The experiment demonstrates the possibility of doping helium crystals with high concentrations of guest particles. We don't know yet what is the state of the N_2 and O_2 molecules imbedded in the solid – are they solitary molecules, dimers or small clusters. In earlier experiments done with similar jets entering superfluid helium where the sediments were small clusters ($\sim 30 \text{ nm}$) sticking together in a fractal structure, [11] the sediments were semitransparent but distinguishable.

Since merging of impurities can occur only during their transport from the “hot” jet to the condensed helium surface this may be



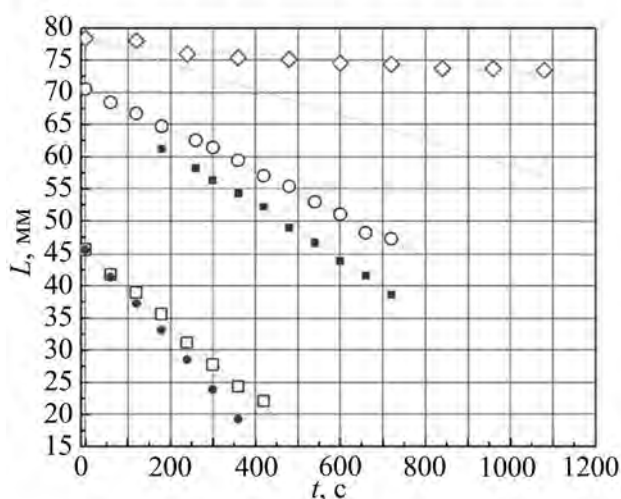


Fig. 4. The rates of doped He crystal growth measured from Fig.2. Open signs correspond to disk's bottom edge positions; closed ones – to visible interface positions; solid lines – to the interface positions calculated assuming constant mass flow

eliminated by decreasing the impurity content in the gas mixture. An estimate shows that at very high impurity concentrations (say 1000 ppm or more, corresponding with an impurity density in solid He of $3 \cdot 10^{19}$ per cc) that we used here, the coalescence is quite probable but at an impurity level lower than 1 ppm even dimerization should be neglected. The corresponding density in the solid He matrix – $3 \cdot 10^{16}$ per cc – is high enough for absorptive optical spectroscopy of most guest molecules. Much lower concentrations are sufficient for Raman scattering studies, NMR and especially ESR and LIF spectroscopy.

CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) study of D_2 and CH_4 molecules embedded to solid Helium recently performed in JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) [9] confirms this conclusion. The setup was practically the same as just described but with a sapphire tube of optical quality placed inside of an optical cryostat. In particular, it allowed to easily observe the interfaces between gas and liquid and between liquid and solid. In the best cases the layer of liquid helium had a thickness of 1–2 mm and it was stable during the whole procedure of sample preparation.

Using our technique, doped helium crystals can then be investigated over a large temperature range, from millikelvins to about 4 K also on a large pressure range. This method of isolating molecules is also more convenient than that using para-hydrogen, commonly used for high-resolution molecular spectroscopy. In particular:

- (i) it is not necessary to carry out the thorough ortho-para conversion of the buffer gas;
- (ii) high-vacuum technology is not required;

(iii) because of the high heat removal capacity from the region of gas condensation through superfluid helium, the sample preparation rate is much higher – we have grown a 1 mm height sample in 20 seconds, that is already 20 times faster than recent record achieved for para-hydrogen; [12]



(iv) changing guest molecules is much simpler. The next sample can be grown just after the former one. A continuous analysis is also possible.

Because matrix isolation by helium from a spectroscopic point of view is at least as good as with para-hydrogen, we believe the present technique will substitute the previous one also because of the lack of danger, always present when manipulating Hydrogen.

Besides these advantages, the isolation of microscopic impurities by the quantum matrix of solid helium has its own specificity making it very interesting for basic science. Some of the most interesting aspects are related to the possibility of using also ^3He as a matrix and as such, to compare the influence of the bosonic ^4He matrix with the fermionic ^3He matrix-the presence of a magnetic moment in ^3He should result in significant broadening of impurity particles spectral lines. [8] Doped ^3He crystals may be grown using the same procedure, however the growth rate should be much lower because ^3He is not superfluid at $T = 1.5\text{ K}$ and as such has a much lower thermal conductivity. Solid ^3He can be cooled to very low temperatures and nuclear interaction effects with several guest particles could be studied, also in very high magnetic fields.

It would also be possible to study thermal and acoustic properties of solid helium containing large amounts of impurities suspended in bulk as small clusters (quantum behavior in restricted geometry).

By comparison of the spectra of molecules isolated in liquid and solid helium (in the last case below and above $T = 2.2\text{ K}$) it should be feasible to solve the problem of whether ^4He superfluidity has an effect in molecular spectroscopy.

Acknowledgments

The authors are grateful to V. Sizov, V. Matyushenko, and A. Klotchkov for assistance and to A. Shestakov and R. Jochemsen for numerous and useful discussions. The work was supported in part by the NWO-RFBR Grant 047.008.015; RFBR Grants 01-03-32247 and 00-15-97400 and by the Lion Institute of Physics of the Leiden University.

References

1. E.B. Gordon and A.F. Shestakov, *Low Temp. Phys.* 26, 1 (2000).
2. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, A.A. Pelmenov, E.A. Popov, O.F. Pugachev, and A.F. Shestakov, *Chem. Phys.* 170, 441 (1993).
3. R. Frochtenicht, J.P. Toennies, and A. Vilesov, *Chem. Phys. Lett.* 229, 1 (1994).
4. S. Grebenev, J.P. Toennies, and A.F. Vilesov, *Science* 279, 2083 (1998).
5. E.B. Gordon and A.F. Shestakov, *Chem. Phys. Reports* 21(1), 16 (2002).
6. S.I. Kanorsky and A. Weis, *Adv. Atom. Mol. Opt. Phys.* 38, 87 (1997).
7. E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin, and O.F. Pugachev, *JETP Lett.* 19, 63 (1973).
8. R.E. Boltnev, G. Frossati, E.B. Gordon, I.N. Krushinskaya, E.A. Popov, and A. Usenko, *J. Low Temp. Phys.* 127, 516 (2002).
9. E.B. Gordon, T. Kumada, and Y. Aratono (to be published).
10. J. Wilks, *Properties of Liquid and Solid Helium*, Oxford University Press (1959).
11. V. Kiryukhin, B. Keimer, R.E. Boltnev, E.B. Gordon, and V.V. Khmelenko, *Phys. Rev. Lett.* 79(9), 1774 (1997).
12. M.E. Fajardo and S. Tam, *J. Chem. Phys.* 108, 4237 (1998).

Received May 2, 2002; revised July 22, 2002



ЭЛЕКТРОННОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ МАТРИЦЫ ПРИ ДРЕЙФЕ ИЗБЫТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ЧЕРЕЗ ТВЕРДЫЙ КСЕНОН

Е.Б. Гордон, Дж. Фроссати¹⁾, А. Усенко
ЖЭТФ, 123 (2003) 962–964

Экспериментально показано, что квантовый выход экситонной люминесценции ($\lambda = 172$ нм), возбуждаемой избыточными электронами, дрейфующими через твердый ксенон при 77 К в полях 10 кВ/см, составляет 20 ± 5 на один электрон, а люминесценция имеет место в течение всего дрейфа. Реализован постоянный объемный разряд через твердый ксенон (ток до 20 А/см^2) и наблюдается интенсивная видимая люминесценция, обязанная возбуждению примесей электронным ударом. Обсуждены перспективы использования твердых тяжелых инертных газов в качестве матриц для исследования процессов в низкотемпературной плазме и для создания эффективных преобразователей электрической энергии в области вакуумного ультрафиолета.

1. Введение

Способность жидких и твердых тяжелых инертных газов (ТИГ) ксенона, криптона и аргона служить проводниками избыточных электронов хорошо известна: их подвижности в ТИГ даже выше чем в металлах, а длины свободного пробега достигают нескольких метров. С другой стороны, известно также, что облучение ТИГ быстрыми (более 10 эВ) электронами с высокой вероятностью приводит к образованию электронных возбуждений матрицы (экситонов) и, соответственно, к излучению света в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ). Именно эти свойства делают жидкие ТИГ перспективным рабочим телом сцинтилляционных детекторов частиц высокой энергии [1].

В 1994 г. одним из авторов настоящей работы (Е.Б. Г.) с соавторами была предложена модель дрейфа избыточных электронов через конденсированные ТИГ в умеренно сильных электрических полях, объясняющая основные характеристики дрейфа возбуждением экситонов дрейфующими электронами [2, 3]. Ввиду малости энергетических потерь электронов при их движении по атомному кристаллу (или жидкости), уже давно полагалось, что достигаемая электронами энергия существенно превышает термическую, однако считалось, что она не может быть больше той, при которой происходит восстановление величины упругого рассеяния электронов в соответствующем газе после рамзауэровского минимума, т.е. 0.3–0.7 эВ [4]. Утверждение о том, что в твердом теле электроны могут разгоняться до необходимых для возбуждения матрицы энергий 8–11 эВ, превышающих их средние энергии даже в газовых разрядах, выглядело достаточно смелым. Тем не менее первая попытка экспериментальной проверки предсказаний работ [2, 3], предпринятая группой Видора [5], показала, что при дрейфе эмитированных холодным катодом электронов через жидкий ксенон под напряжением 70 В действительно наблюдается достаточно интенсивное свечение в области 172 нм, совпадающее по спектру с излучением двухцентровых экситонов Xe_2^* . К сожалению, из данных работы [5], так же как и из более подробного описания этих экспериментов [6], невозможно даже оценить квантовый

1) G. Frossati, Kamerling-Onnes Lab. Leiden University, P. O. Box 9504, 2300 RA Leiden, the Netherlands.



выход излучения, т.е. количество ВУФ-квантов, приходящееся на один дрейфующий электрон. Поэтому нельзя было с определенностью сказать, является ли наблюдаемая электролюминесценция уникальным событием или же, как это предполагалось в [2, 3], дрейфующий электрон много раз достигает необходимой для возбуждения энергии, каждый раз теряя ее в этом процессе. Естественно, что только в последнем случае можно говорить о практическом использовании данного эффекта, скажем, для создания эффективных преобразователей энергии электростатического поля в ВУФ-свет.

Следует особо подчеркнуть, что, как показал проведенный недавно анализ [7], обсуждаемый эффект должен быть присущим лишь конденсированному состоянию: никто никогда не наблюдал никакого свечения при дрейфе электронов в газобразном ксеноне при давлениях больше 10 бар. Более того, подстановка в формулы газовой модели [8] плотностей, характерных для твердого тела и жидкости, приводит к значениям электрического поля, при которых должна наблюдаться «эксимерная» люминесценция и которые находятся в экспериментально недостижимом диапазоне. Переход в конденсированную фазу принципиально меняет характер движения электрона через среду. На это ясно указывает интересный эффект, впервые обнаруженный в [4], подвижность избыточного электрона (измеренная по времени задержки импульса тока в малых полях) в газовом ксеноне убывает, как и полагается, обратно пропорционально его давлению, но в критической точке она скачком возрастает на четыре (!) порядка, оставаясь высокой и в жидкости, и в твердом теле. Это означает, что в них эффективное сечение упругого рассеяния такое же, как в газе при 0.1 бар. Качественно это можно рассматривать как геометрическую компенсацию отклонения при взаимодействии электрона сразу с многими атомами (его длина волны де-Бройля больше межатомного расстояния). Но такой компенсации не должно быть при насыщающемся взаимодействии «химического» типа электронном возбуждении, образовании ионов, химических реакциях, когда электрон взаимодействует с одним центром. Поэтому сечения таких процессов должны оставаться близкими к газофазным (особый интерес представляет вопрос о том, как трансформируется такой размерный эффект как эффект Рамзауэра при переходе к конденсированной фазе). В частности это касается упругого рассеяния электрона на состоянии метастабильного отрицательного возбужденного иона инертного газа, которое лежит для всех ТИГ на 0.4 эВ ниже уровня атомного (одноцентрового) возбуждения, хотя, однако, и выше уровня двухцентрового (молекулярного) экситона. По этой причине рассеяние на структуре отрицательного иона, наблюдаемое, но не затрагивающее основные характеристики дрейфа в газе, в конденсированном состоянии может оказаться важным механизмом упругих потерь, затрудняющих набор электроном энергии, достаточной для возбуждения одноцентрового экситона, обычно являющегося предшественником двухцентрового [9]. В результате в течение продолжительного времени электрон движется в направлении поля, имея постоянную энергию, и, значит, квантовый выход электролюминесценции может быть значительно ниже своего предельного значения, определяемого как отношение приложенного напряжения U к энергии W_a возбуждения одноцентрового экситона. Как показывает анализ, проведенный в [7], это и является причиной постоянства дрейфовой скорости электрона в больших электрических полях.



Трудность проведения последовательного анализа специфики дрейфа электронов в конденсированных средах стимулировала эксперименты, направленные на обнаружение предсказанного эффекта и определение величины квантового выхода электролюминесценции.

2. Методика эксперимента

Настоящая работа посвящена измерению квантового выхода η ВУФ-излучения при дрейфе избыточных электронов через твердый ксенон. Его надежное определение представляет собой непростую задачу, поскольку для этого обычно следует найти число дрейфующих электронов и восстановить полное число излучаемых фотонов с учетом геометрии наблюдения, эффективностей оптического тракта и фотодетектора и т.д. Дополнительным затрудняющим обстоятельством является тот факт, что измерения следует проводить при весьма низких электронных токах. Это связано с проблематичностью очистки ксенона до такой степени, чтобы концентрация примесного кислорода в нем была меньше 0.3 ppb, что отвечает плотности 10^{13} см $^{-3}$ в твердом ксеноне. В то же время уже концентрации отрицательных ионов (которые возникают при захвате электронов неподвижными в твердом ксеноне молекулами O $_2$), равной 10^{11} см $^{-3}$, достаточно, чтобы за счет пространственного заряда полностью скомпенсировать электрическое поле 1 кВ/см. В результате возникает ограничение сверху на величину полного заряда, протекающего через образец, и чем меньше ток, тем дольше можно работать с твердым образцом без его перекристаллизации.

Для решения поставленной задачи был предложен метод [10], суть которого ясна из рис. 1. Использовалась трехэлектродная ячейка, цинковый катод которой обладал значительным выходом фотоэлектронной эмиссии в ультрафиолетовой части спектра. Кристалл ксенона выращивался внизу ячейки между анодом и сеткой. Верхняя часть ячейки заполнялась либо аргоном до давления в несколько миллибар (если эксперименты проводились при температуре 77 K), либо насыщенными парами ксенона при таком же давлении (в этом случае температура поддерживалась равной 125 K). Металлическая сетка была заземлена, а на электроды подавались напряжения – отрицательное на катод и положительное на анод – от двух независимых источников питания. Через отверстие в аноде, изготовленном из нержавеющей

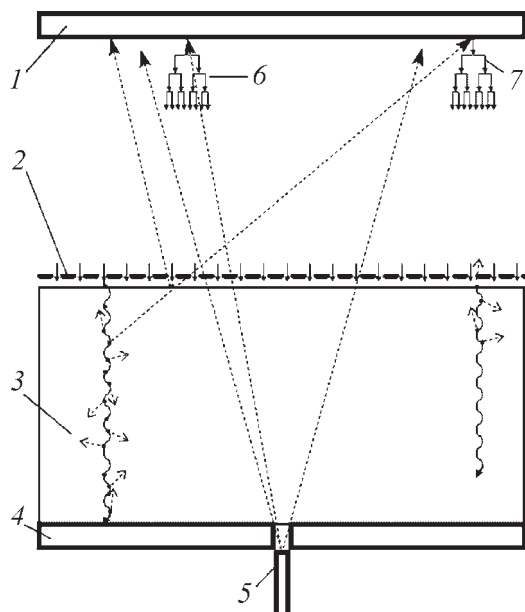


Рис. 1. Схема электролитической ячейки: 1 – фотокатод; 2 – сетка; 3 – кристалл ксенона; 4 – анод; 5 – световод; 6 и 7 – лавины, соответственно, первичных и вторичных электронов. Сплошные стрелки соответствуют электронам, пунктирные – фотонам



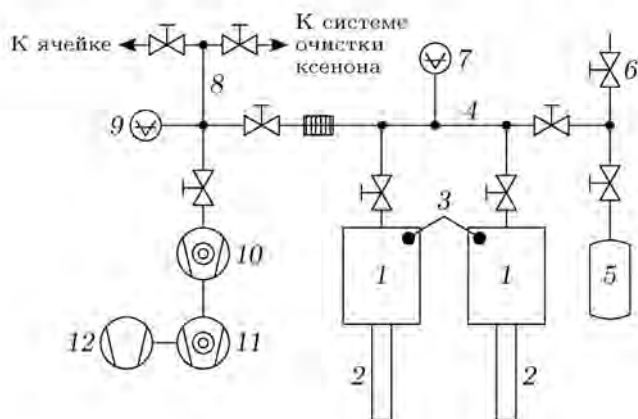
щей стали, катод облучался импульсами излучения четвертой гармоники импульсно-периодического Nd:YAG лазера (длина волны 266 нм, длительность импульса 1 нс, частота следования импульсов 10^4 Гц), подаваемого через кварцевый световод. Количество эмитируемых катодом фотоэлектронов составляло 10^4 – 10^5 за импульс. Образующиеся при дрейфе электронов через твердый ксенон кванты ВУФ-света, попадая на фотокатод, должны, в свою очередь, образовывать новые фотоэлектроны.

Описанная конструкция привлекательна сразу с нескольких точек зрения. Во-первых, наличие промежутка между кристаллом и катодом, заполненного газом низкого давления, позволяет подавить известный эффект обратной диффузии, на порядки снижающий вероятность выхода электрона из катода в конденсированную среду при их прямом контакте, даже если (как это имеет место для ТИГ) свободная энергия электрона в веществе ниже, чем в вакууме [11]. Во-вторых, ускоряясь под действием электрического поля, электроны многократно ионизуют находящийся в промежутке катод-сетка инертный газ, приводя к образованию электронной лавины. Но самое главное, что этот своеобразный, «встроенный» в измерительную ячейку фотоэлектронный умножитель увеличивает и число вторичных, образующихся под действием экситонного излучения, электронов. Благодаря этому, положительная обратная связь (при дрейфе в твердом ксеноне электроны вызывают ВУФ-излучение, порождающее новые электроны, которые, размножаясь в газе, попадают в твердый ксенон и т.д.) становится столь мощной, что позволяет преодолеть естественные потери (ограниченный телесный угол светосбора, неполная прозрачность сетки и др.) вплоть до достижения порога возникновения самоподдерживающегося разряда.

3. Техника эксперимента

В вакуумной системе, схема которой представлена на рис. 2, использовались исключительно материалы и устройства, предназначенные для работы в условиях сверхвысокого вакуума. Все трубопроводы были выполнены из нержавеющей стали, для соединений использовались фланцы и медные прокладки фирмы Varian. При изготовлении измерительной ячейки и системы очистки ксенона никакие пластики, клеи и (из-за невозможности полного удаления флюса) пайки не применялись. Вся вакуумная система могла прогреваться до 200°C для обезгаживания. Откачка осу-

Рис. 2. Вакуумная система:
1 – бачки для хранения ксенона с «пальцами» 2 и неиспаряемыми геттерами 3; 4 – гребенка;
5 – бачок для хранения аргона;
6 – высоковакуумный вентиль;
7 – вакуумметр IKR-251;
8 – вакуумпровод; 9 – манометр CMR-261; 10 – высоковакуумный турбо молекулярный насос;
11 – турбомолекулярный насос;
12 – мембранный насос



ществлялась высоковакуумным турбомолекулярным насосом TPU-170, поддерживаемым на выходе tandemом турбомолекулярного и мембранного насосов TRH-065 (все насосы фирмы Pfeiffer). Бачки для хранения ксенона имели снизу специальные «пальцы», в которые при необходимости ксенон сморазивался жидким азотом, и были снабжены коммерческими неиспаряемыми геттерами для поддержания чистоты газа.

Система очистки ксенона, представленная на рис. 3, составляла одно целое с вакуумной системой. За основу был

взят простой и надежный метод искрового разряда, впервые предложенный Ободовским с сотр. [12]. Его принцип близок к принципу работы геттерно-ионного насоса, но работающего в жидкости. Катодом камеры очистки являлось заточенное до остроты лезвия титановое кольцо, а анодом – цилиндрический металлический стержень, межэлектродное расстояние составляло 0.2 мм. Перед началом процедуры вся камера погружалась в сосуд с этиловым спиртом, охлаждаемым постоянно добавляемым к нему жидким азотом до кашеобразной консистенции. Ксенон конденсировался в камеру в таком количестве, чтобы уровень жидкости был на 1 см выше плоскости катода. При достаточном высоком напряжении

между катодом и анодом внутри жидкого ксенона возникали одна или две искры, перемещавшиеся по кругу по мере распыления материала катода. Ток искры ограничивался мощным высоковольтным резистором сопротивлением 1 МОм. Распыляющийся титан, осаждаясь на аноде, поглощал примеси из жидкого ксенона, а возникающая при пробое кавитация вызывала интенсивное перемешивание жидкости, поставляющее свежие порции в зону очистки. В соответствии с рекомендациями [12], о степени очистки судили по звуку, цвету и продолжительности искрового пробоя. Если в ксеноне, первоначально очищенном многократным перемораживанием с откачкой при $T = 77$ К остающихся паров, искра была яркой, краткой и сопровождалась громким хлопком, то после нескольких часов электроискровой очистки она становилась бледной, продолжительной и сопровождалась тихим шипением. Напряжение при этом приходилось поднимать до 10 кВ. Согласно [12], степень очистки таким методом лучше чем 10^{-9} ; об ее эффективности можно было судить по следующему наблюдению: дополнительная конденсация небольшого количества очищенного перемораживанием ксенона из гребенки вакуумной системы сразу приво-

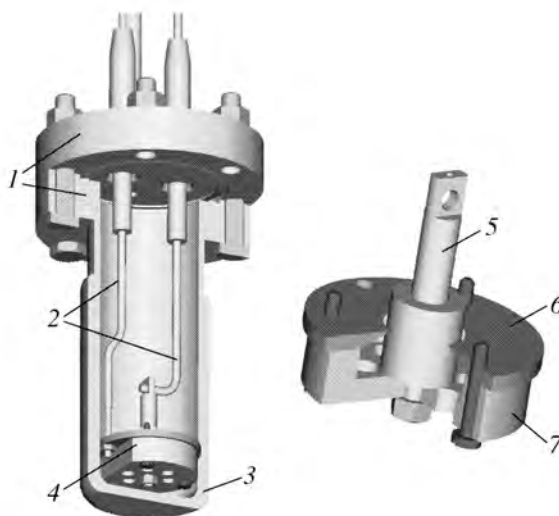


Рис. 3. Камера очистки ксенона электроискровым методом:

- 1 – вакуумные фланцы; 2 – медные токопроводы;
- 3 – стеклянная ячейка (пирекс); 4 – электродный узел (отдельно показан справа); 5 – анод;
- 6 – титановое кольцо; 7 – электроизолятор из Макора



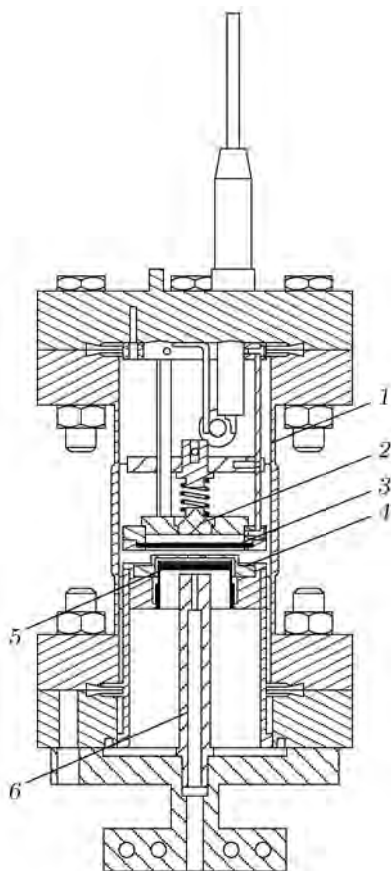


Рис. 4. Электролитическая ячейка:
1 – тело ячейки; 2 – цинковый катод;
3 – сетка; 4 – анод;
5 – сапфировое окно;
6 – рубашка световода

дила к заметному изменению характеристик искры. Очищенный ксенон хранился в бачке с предварительно активированным геттером.

Конструкция электролитической измерительной ячейки ясна из рис. 4. Ее основная часть представляла собой стеклянный цилиндр, соединенный через коваровые переходы с двумя стальными фланцами. Нижний фланец был электрически соединен с укрепленным на нем стальным анодом, имеющим центральное отверстие диаметром 2 мм, закрытое снаружи сапфировым окном. Полированный конец кварцевого световода, служащего для облучения катода импульсами лазерного излучения, был укреплен в непосредственной близости от окна. Конструкция анодного узла определялась необходимостью как максимального уменьшения паразитного объема ниже поверхности анода, так и компенсации механических напряжений, возникающих при охлаждении ячейки. К нижнему концу анодного узла присоединялся массивный медный стержень диаметром 14 мм, служащий хладопроводом от жидкого азота к ячейке. На верхнем фланце, снабженном двумя высоковольтными вводами, укреплялся цинковый катод рабочим диаметром 10 мм и сетка. Расстояние между катодом и сеткой составляло 2 мм, их электрическая изоляция осуществлялась шайбой из керамики Макор; использовалось несколько типов сеток медных и из нержавеющей стали с геометрической прозрачностью от 40 до 60%. Изменением длины держателей катода расстояние между сеткой и анодом могло меняться

от 1 до 2 мм, соответственно менялась и толщина образца. Ячейка была снабжена двумя электрическими нагревателями, намотанными на верхний и нижний фланцы, а также платиновым термометром.

Ячейка помещалась в прозрачный стеклянный дьюар, в который заливался жидкий азот так, чтобы медный стержень был погружен в жидкость. Подачей напряжения на нижний нагреватель температура ячейки поднималась до $T = 165$ К, отвечающей сосуществованию жидкости и газа вблизи тройной точки ксенона. После этого медленно конденсировали ксенон из бачка в ячейку. Количество газа в бачке подбиралось таким образом, чтобы после завершения процедуры поверхность жидкого ксенона находилась на уровне сетки (после кристаллизации и дальнейшего охлаждения верхний край образца опускался заметно ниже). После этого ячейка отделялась вакуумным вентилем от остальной части установки, и сбросом напряжения, подаваемого на нагреватель, производилось медленное отверждение образца и его даль-



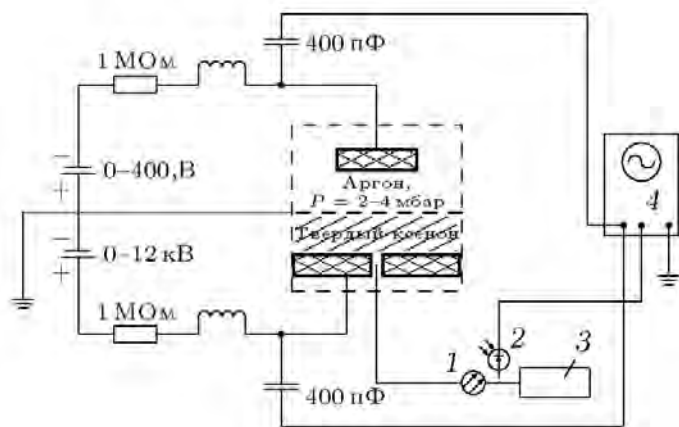
нейшее охлаждение либо до температуры 125 К, когда давление насыщенных паров ксенона составляло 1.2 мбар, либо до 77 К. В последнем случае после достижения температуры 100 К жидкий азот доливался в дьюар до уровня верхнего фланца ячейки и в нее дополнительно напускался предварительно очищенный аргон до давления 1.2 мбар. Образец всегда оставался прозрачным в течение всей процедуры.

Электрическая схема измерений представлена на рис.5. Индуцированный лазерным импульсом электронный ток в промежутках катод сетка и сетка анод детектировался путем измерения переменной составляющей напряжения на соответствующем источнике питания с помощью запоминающего осциллографа ($f = 500$ МГц, вход 50 Ом). Используемая схема позволяла избежать попадания высокого напряжения на вход осциллографа и при этом детектировать сигналы с временным разрешением не хуже 2 нс. Все сигналы синхронизовались лазерным импульсом, детектируемым фотодиодом.

4. Экспериментальные результаты

Рис. 5. Электрическая схема:

- 1 – устройство ввода излучения в световод;
- 2 – фотодиод системы синхронизации;
- 3 – Nd : YAG-лазер ($\lambda = 266$ нм);
- 4 – осциллограф



Для выяснения работоспособности методики прежде всего было необходимо определить характеристики газового «фотоэлектронного умножителя» его временное разрешение и достижимые величины коэффициента умножения числа электронов, ограниченные сверху возникновением самоподдерживающегося разряда между катодом и сеткой. В откаченной пустой ячейке сигнал от первичных, эмитированных лазерным импульсом из катода, электронов, измеренный в верхнем (катод сетка) промежутке имел длительность 2 нс, близкую к длительности лазерного импульса, и насыщался при напряжении $U_{cg} \approx 100$ В. При напуске инертного газа в ячейку амплитуда электронного тока начинает экспоненциально зависеть от U_{cg} , причем характеристики токового сигнала нечувствительны как к изменению температуры в диапазоне $T = 77-300$ К, так и к наличию напряжения между сеткой и анодом. Типичные зависимости приведены на рис. 6а,б, при этом максимальные представленные там напряжения уже весьма близки к порогу зажигания разряда. Увеличение давления газа приводило к уширению токового импульса, поэтому использовались давления, при которых длительность импульса не превышала 10 нс. Для удобства сравнения характеристик лавинного размножения электронов в различных

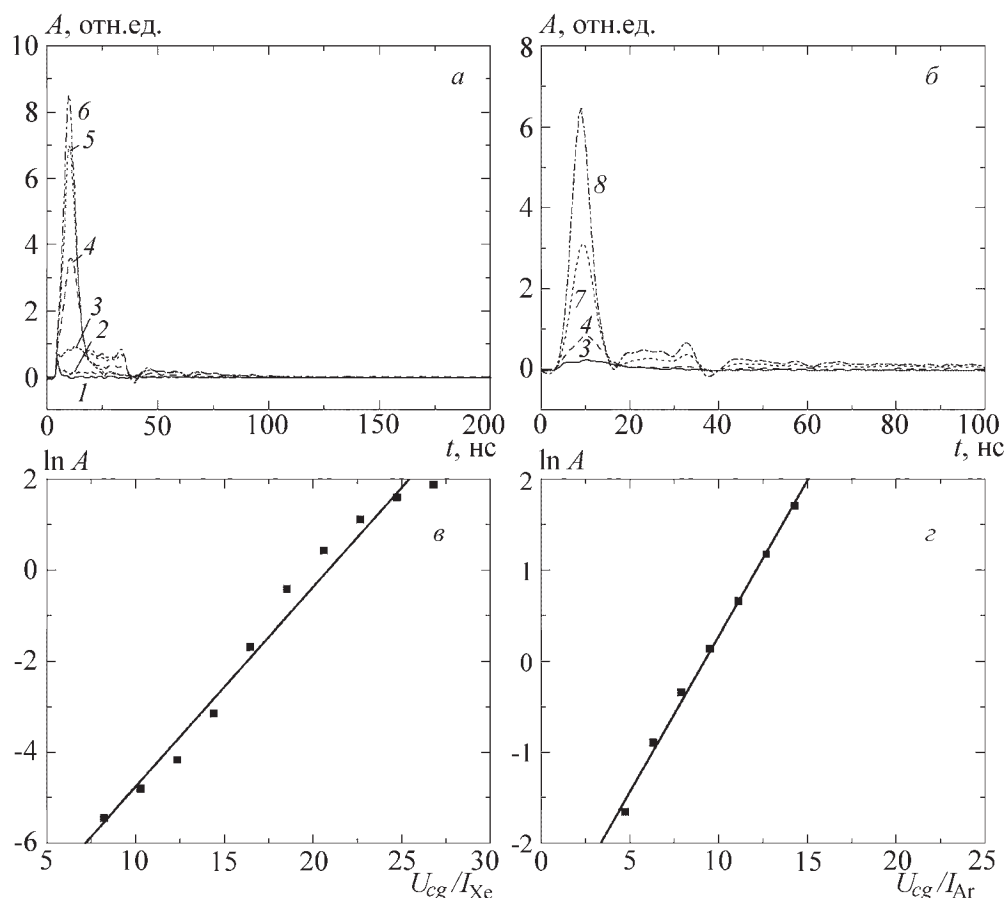


Рис. 6. Импульсы электронного тока в промежутке катод-сетка при давлении газа 1.2 мБар и различных напряжениях $U_{cg} = 0$ (1), 50 (2), 100 (3), 150 (4), 165 (5), 175 (6), 200 (7), 245 В (8) для ксенона (а) и аргона (б), а также зависимости логарифма пиковой интенсивности импульсов от безразмерного напряжения $U_{cg}/I_{Xe, Ar}$ ($I_{Xe, Ar}$ – потенциал ионизации соответствующего атома): в – Xe, $P = 2.4$ мБар, $T = 300$ К, $\alpha = 1.55$; г – Ar, $P = 3.6$ мБар, $T = 77$ К, $\alpha = 1.40$.
Наивысшие напряжения на 5–10 В ниже порогового для зажигания разряда

инертных газах зависимости амплитуды тока J от приложенного напряжения представлены на рис. 6в,г в виде

$$k = \frac{J}{J_0} = \alpha^{U/I_0} = \exp\left(\frac{U}{I_0} \ln \alpha\right), \quad (1)$$

где k – коэффициент умножения, I_0 – потенциал ионизации соответствующего газа, а α – коэффициент размножения электрона при его неупругом столкновении с атомом ($1 < \alpha < 2$). Интересно, что коэффициент размножения практически одинаков для всех использованных инертных газов (He, Ar, Xe) и довольно высок (приблизительно половина всей приобретенной электроном от поля энергии расходуется на ионизацию).



В целом же характеристики «фотоумножителя» вполне удовлетворяют поставленной задаче: 1) коэффициент умножения воспроизводим и достаточно велик, $k = 300\text{--}1000$, чтобы в заметной мере компенсировать сравнительно низкую (определяемую геометрией ячейки и прозрачностью сетки) вероятность у попадания ВУФ-кванта из кристалла ксенона на катод и низкий выход фотоэлектронной эмиссии из цинка, $\epsilon (\lambda = 172 \text{ нм}) \approx 10^{-3}$; 2) характеристическое время отклика фотоумножителя на короткий сигнал, равное 10 нс, меньше других характеристических времен в системе.

Специальными экспериментами было подтверждено также, что присутствие твердого ксенона в нижнем (сетка анод) промежутке никак не влияло на токовые характеристики фотоумножителя при условии, что на этот промежуток подавалось запирающее для электронов напряжение $U_{ga} < 0$.

Пороговым условием для возникновения в электростатической ячейке с фотокатодом самоподдерживающегося разряда является соотношение

$$\epsilon k \eta \gamma = 1, \quad (2)$$

означающее, что за счет положительной обратной связи через ВУФ-излучение каждый первичный электрон приводит к образованию еще одного электрона. Поскольку квантовый выход электролюминесценции $\eta = 10$ в наших условиях уже вполне достаточно для достижения порога самоподдерживающегося разряда, в принципе, можно было бы определить зависимость порогового значения напряжения от приложенного к кристаллу напряжения U_{ga} и далее, на основании соотношения (2), квантовый выход η и его зависимость от U_{ga} .

Однако сделать это оказалось совсем непросто, и надежность такого определения не могла быть достаточно высокой. Прежде всего оказалось невозможным работать в условиях, когда сетка заморожена в твердый ксенон. Ввиду дрейфового характера движения электронов в твердом теле «прозрачность» сетки для них много меньше геометрической: поскольку толщина сетки была сравнима с поперечным размером ее ячеек, даже при попадании в область «прозрачности» электрон с очень большой вероятностью оказывается на стенке «канала». Увеличить же размер ячейки до более чем 0.1 мм было невозможным из-за «провисания» поля при полной ширине зазора 1–2 мм. Поэтому мы всегда оставляли зазор 0.1–0.2 мм между нижним краем сетки и верхней поверхностью образца. Это, в свою очередь, приводило к тому, что при изменении напряжения U_{ga} на нижнем промежутке одновременно менялся коэффициент умножения электронов, k . Это изменение было тем более значительным, что из-за высокой диэлектрической постоянной твердого ксенона напряженность поля в области, занимаемой газом, почти в два раза выше, чем в образце. Более того, при приготовлении образца и его охлаждении ксенон частично осаждался на сетку, меняя ее прозрачность для света и особенно для электронов. Это, наряду с «отравлением» катода примесными газами (несмотря на очень высокую относительную чистоту ксенона их абсолютное количество было достаточно велико), приводило к значительным вариациям в величинах токовых сигналов от эксперимента к эксперименту.

Поэтому квантовый выход ВУФ-излучения определялся следующим образом. В отсутствие положительной обратной связи ток в промежутке между катодом и сеткой должен был представлять собой короткий импульс, подобный приведенному



на рис. 6а,б – ток, связанный с дрейфовым движением электронов через твердый ксенон, не может давать никакого вклада, поскольку он протекает по другой электрической цепи. В ячейке с твердым ксеноном положительная обратная связь существует в любом случае. Дело в том, что, как показали наши эксперименты с электронной лавиной в газе, энергия электронов там достаточна для эффективной ионизации газа и заведомо достаточна, особенно при использовании аргона, для возбуждения экситонов в твердом ксеноне. Бомбардировка поверхности твердого ксенона приводит, как известно, к эффективной экситонной люминесценции, причем радиационное время высвечивания экситонов в твердом ксеноне составляет $\tau_R = 30$ нс [9]. Это означает, что на заднем фронте импульса электронного тока в верхнем промежутке, отвечающего электронной лавине в газе, должен наблюдаться более медленный сигнал, экспоненциально спадающий с характеристическим временем 30 нс и отвечающий вторичным электронам, эмитированным из катода под действием излучения поверхностных экситонов. При этом нет никаких оснований считать, что выход этой электролюминесценции заметно отличается от единицы [9]. Если же, кроме того, электроны образуют экситоны в течение всего их дрейфа через твердый ксенон, то за экспоненциально спадающим сигналом должен следовать гораздо более длинный хвост от вторичных электронов, возникающих под действием излучения этих экситонов. Вдали от порога возникновения разряда, когда можно пренебречь вкладом от третичных, четвертичных и т.д. электронов, этот сигнал должен иметь вид плато, простирающегося до времени прихода на анод дрейфующих через образец первичных электронов. Естественно, что площади токовых сигналов, порожденных объемными и поверхностными экситонами, пропорциональны количеству соответствующих вторичных электронов, так что с учетом сказанного выше их отношение должно быть равно квантовому выходу ВУФ-фотонов на один дрейфующий электрон. При этом практически все эффекты, ухудшающие воспроизводимость результатов, – отравление катода, блокада сетки оседающим на ней ксеноном, влияние неконтролируемого зазора между сеткой и поверхностью кристалла – не влияют на величину отношения, поскольку одинаково действуют на обе стадии сигнала.

Как видно из рис. 7, экспериментальные результаты хорошо согласуются с приведенными представлениями. При достаточно низких напряжениях токовый сигнал в верхнем промежутке помимо убывающего с характеристическим временем около 30 нс хвоста содержит плато, длительность которого не только пропорциональна толщине d образца твердого ксенона, но численно совпадает с временем дрейфа избыточного электрона через ксенон, $\tau = d / v_d$, где v_d – дрейфовая скорость электрона (как хорошо известно [13], в используемом диапазоне напряженности E электрического поля скорость v_d не зависит от E). В принципе, величина v_d несколько зависит от степени очистки ксенона и температуры, при которой проводятся измерения; с учетом этого величина $v_d = 13 \cdot 10^5$ см/с, следующая из наших экспериментальных данных, представляется хорошо согласующейся с литературными данными, полученными для ксенона высокой чистоты [14].

Однако наиболее убедительным доказательством справедливости приведенной выше трактовки является наблюдение закономерностей перехода к самостоятельному разряду. При импульсном рождении первичных электронов по мере приближения системы к порогу токовый импульс в общем случае приобретает так называемый



мый регенерационный характер, связанный с суммарным вкладом вторичных, третичных и всех последующих поколений электронов в электронный ток. Порог зажигания разряда соответствует условиям, при которых площадь регенерационного пика, т. е. количество порожденных положительной обратной связью электронов, становится равной площади исходного импульса тока, равной числу первичных электронов. Легко видеть, что в силу своей интегральной природы регенерационный сигнал максимален на временах, отвечающих окончанию действия положительной обратной связи, ответственной за развитие разряда (для обратной связи, имеющей вид прямоугольника, это утверждение является математически строгим).

В ячейке с фоточувствительным катодом в любом случае положительная обратная связь, обеспечивающая переход к разряду, осуществляется фотоэлектронной эмиссией за счет облучения катода индуцированным электронами ультрафиолетовым излучением [8]. Но если в газе низкого давления ответственным за фотоэмиссию электронов обычно является излучение на оптически разрешенных переходах атомов и молекул, возбужденных электронным ударом ($\Delta t \approx 10$ нс), то в присутствии кристалла ксенона оптическое излучение индуцируется электронами в течение всего времени их дрейфа через твердый ксенон. И действительно, как видно из рис. 6, в газовой ячейке приближение к порогу возникновения разряда приводит лишь к уширению импульса тока ($\Delta t \approx 10$ нс). В противоположность этому регенерация в ячейке с твердым ксеноном (см. рис. 7) развивается на два порядка медленнее и максимум пика жестко привязан к моменту времени, когда дрейфующие через ксенон первичные электроны покидают ячейку, уходя в анод²⁾. В частности, дву-

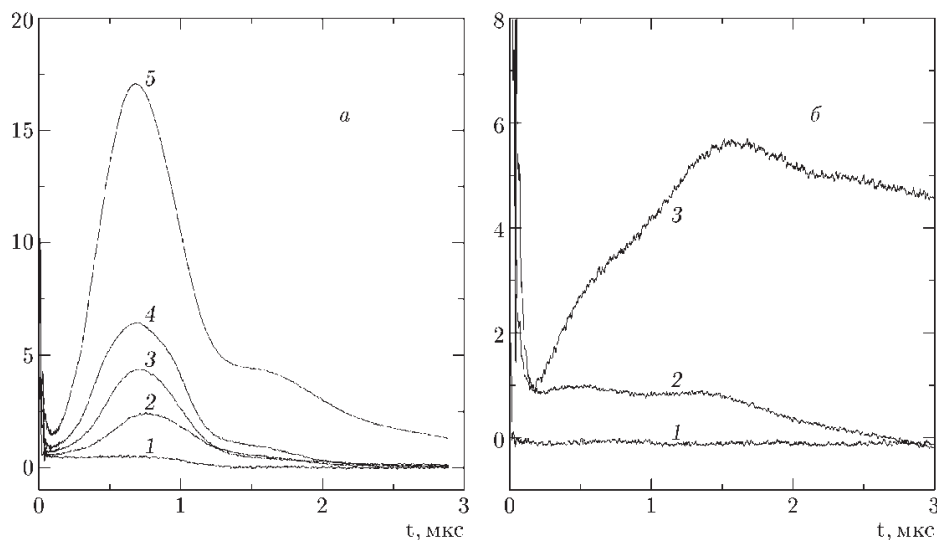


Рис. 7. Электронный ток в газовом промежутке (катод-сетка) при различных напряжениях, приложенных к кристаллу ксенона: а – кристалл толщиной 1 мм, $T = 125$ К, газ – ксенон; $U_{cg} = 380$ В; $U_{ga} = 270$ (1), 310 (2), 330 (3), 350 (4), 370 В (5); б – кристалл толщиной 2 мм, $T = 77$ К, газ-аргон: 1 – $U_{cg} = 280$ В, $U_{ga} = 0$ В; 2 – $U_{cg} = 280$ В, $U_{ga} = 1000$ В; 3 – $U_{cg} = 400$ В, $U_{ga} = 700$ В

2) Это является удобным (ввиду большой величины сигнала и отсутствия необходимости обосновывать пренебрежение регенерационными эффектами) методом определения скорости дрейфа электрона.

кратное увеличение толщины твердого образца приводит к двукратному увеличению времени достижения максимума, что служит лишним подтверждением того, что задержка обратной связи не связана с электронной эмиссией под влиянием бомбардировки катода медленно летящими тяжелыми ионами из газа (последняя, в принципе, может быть ответственна за развитие разряда [8]).

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что при дрейфе электронов в электрическом поле через твердый ксенон происходит многократное возбуждение ими экситонов и именно излучение этих экситонов является ответственным за положительную обратную связь, вызывающую переход к самостоятельному разряду. Отношение площадей медленной (отвечающей возбуждению объема кристалла) и быстрой (связанной с возбуждением его поверхности) компонент тока вторичных электронов для данных рис. 7а ($T = 77$ К, $d = 2$ мм, $U_{ga} = 1000$ В) дает величину квантового выхода электролюминесценции $\eta = 20 \pm 5$. Эта величина, естественно, зависит от приложенного к кристаллу напряжения, поэтому более универсальной является величина эффективности преобразования энергии электрического поля в энергию ВУФ-излучения, определяемая как

$$\kappa = \eta \hbar \nu / eU, \quad (3)$$

где $\hbar \nu$ – энергия ВУФ-кванта, U – приложенное напряжение. Для приведенных данных $\kappa = 18\%$. Таким образом, несмотря на высокие абсолютные значения квантового выхода, большая часть приобретаемой дрейфующим электроном от электрического поля энергии тратится на возбуждение решетки кристалла. Этот вывод находится в согласии с наблюдаемым во всех экспериментальных работах постоянством дрейфовой скорости электрона в высоких электрических полях E : согласно развитой в [7] модели независимость v_d от E может иметь место лишь в случае, если электрон большую часть времени имеет линейную скорость v_T , отвечающую энергии порога образования метастабильного иона $(\text{Xe}^*)^-$, $E_{th} = 8.0$ эВ, двигаясь при этом в направлении поля со скоростью v_d^∞ . Образование двухцентрового экситона Xe_2^* может произойти либо в результате процесса



имеющего невысокую вероятность из-за большой разницы межатомных расстояний в кристалле ксенона и в двухцентровом экситоне, либо как следствие преодоления хвостом распределения дрейфующих электронов по энергии узкого ($\Delta E \approx 0.01$ эВ ≈ 100 К) пика рассеяния электронов на структуре отрицательного иона, дальнейшего набора электроном энергии до $E^* = 8.4$ эВ, достаточной для образования одноцентрового экситона Xe^* , и процесса



В последнем случае скорость набора электроном энергии E^* должна существенно зависеть от температуры, особенно при $T < 100$ К. К сожалению, для $T = 125$ К (см. рис. 7,б) сигнал от поверхности кристалла слишком слаб для надежного определения квантового выхода, но тем не менее можно утверждать, что как квантовый выход, так и эффективность преобразования при 125 К выше, чем при 77 К.



Значительно сложнее интерпретировать результаты измерений электронного тока в промежутке сетка-анод (типичный вид такого сигнала представлен на рис. 8). В частности, и в отсутствие положительной обратной связи через УФ-излучение на сигнале должно наблюдаться плато, отвечающее току дрейфующих через твердый ксенон первичных электронов. Помимо всего прочего, неконтролируемый вклад в сигнал дает газовый промежуток между сеткой и верхней поверхностью твердого ксенона, входящий в электрическую цепь. Характерной особенностью наблюдаемых сигналов является воспроизводимое наличие квазипериодических осцилляций с периодами 50 нс в передней части сигнала и около 150 нс на его хвосте; их происхождение не вполне понятно, во всяком случае они не связаны с радиотехническими процессами в системе регистрации.

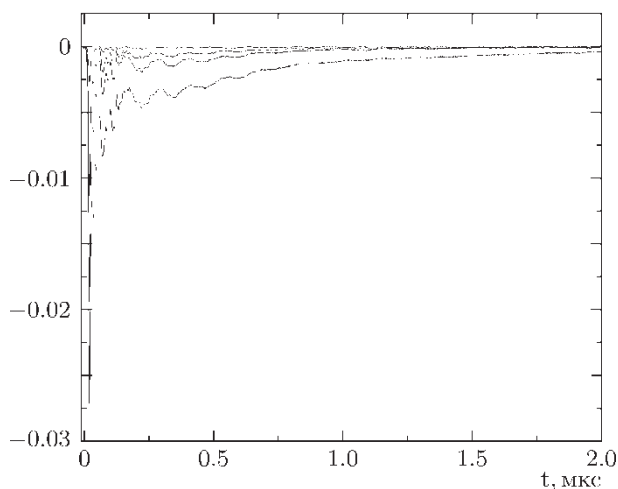


Рис. 8. Электронный ток в промежутке сетка-катод. Толщина кристалла 1 мм, $U_{cg} = 300$ В, $U_{ga} = 250, 290, 310, 330$ В

После достижения порога самоподдерживающегося разряда, естественно, нет необходимости в создании первичных электронов с помощью лазера — непрерывный разряд возникает самопроизвольно при подаче необходимых напряжений U_{cg} и U_{ga} . Он сопровождается чрезвычайно ярким свечением, характеризующимся непрерывным спектром во всей видимой области. Интенсивность этого свечения на много порядков превышала интенсивность свечения газового разряда над твердым ксеноном и в заполненной ксеноном ячейке без образца. Естественно, что даже в присутствии ограничивающего ток разряда сопротивления 1 МОм непрерывный разряд приводил, в конце концов, к плавлению ксенона и даже к прожиганию сетки. Поэтому для определения достижимых тока разряда и интенсивности сопровождающего его свечения был использован следующий прием: источник напряжения катод-сетка заменяли конденсатором емкостью $C = 10$ мкФ, заряжаемым до напряжения, превышающего пороговое для возникновения разряда (при этом убирали также и ограничивающее ток сопротивление). Импульс свечения разряда, регистрируемый с помощью фотодиода представлен на рис. 9. Зарегистрированный для сравнения с того же расстояния (около 2 м) импульс света от фотовспышки направленной на фотодиод цифровой фотокамеры «Минолта» имел интенсивность всего в три раза выше. Зная напряжение $U_{cg} = 300$ В и характерную длительность свечения $\tau_p = 70$ мкс можно было оценить ток разряда $J \approx CU_{cg} / 2\tau_p = 20$ А.



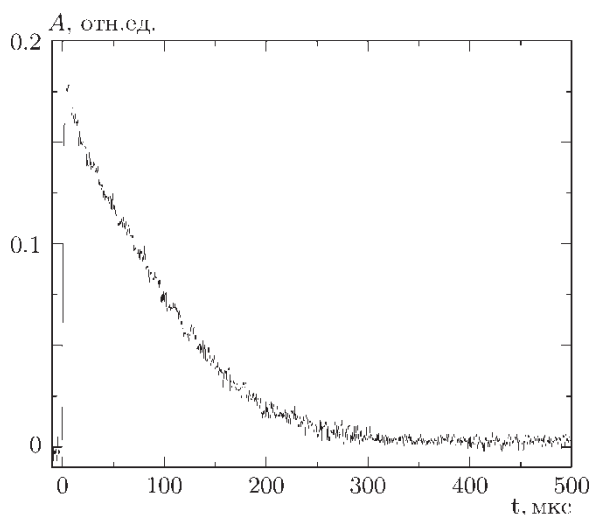


Рис. 9. Импульс видимого свечения при разряде через твердый ксенон (1 мм) конденсатора емкостью 10 мкФ, заряженного до 300 В

5. Влияние примесей

Визуальное наблюдение области видимого свечения показывает, что оно исходит из объема кристалла и не может быть люминесценцией конструкционных материалов, возбуждаемой экситонным ВУФ-излучением. Сам ксенон также не может возбуждаться, поскольку он прозрачен в спектральной области своей эмиссии [15], кроме того, в этом случае спектр должен был бы состоять из узких полос [9]. Поэтому наблюдаемое интенсивное свечение безусловно является следствием возбуждения растворенных в твердом ксеноне малых примесей либо ВУФ-излучением, либо электронным ударом.

К нашему удивлению, при проведении экспериментов в режиме самоподдерживающегося разряда, несмотря на большой ток, ни ток разряда, ни его свечение со временем не уменьшались, хотя вдали от порога сигналы тока уменьшались (из-за образования неподвижных отрицательных ионов кислорода и компенсации их зарядом приложенного к кристаллу напряжения) при на порядки меньших значениях суммарного заряда, протекающего через образец. «Отбеливание» отрицательных ионов может быть вызвано как УФ-светом, так и высокоэнергетичными электронами.

Для того чтобы проанализировать проблему более количественно, необходимо знать скорость образования отрицательных ионов. Ее расчет представляет собой непростую задачу, поскольку сечение электронного захвата сильно убывает с увеличением энергии электрона, и поэтому эта скорость весьма чувствительна к виду функции распределения электронов по энергии при малых энергиях (диссоциативное прилипание электрона к O_2 , сечение которого возрастает с энергией, вряд ли возможно в твердом теле) [16]. Более рационально воспользоваться экспериментально измеренной длиной Λ затухания тока дрейфующих через жидкий ксенон избыточных электронов (поскольку все характеристики электронного дрейфа через жидкий и твердый ксенон близки, такая оценка представляется надежной). В жидком ксеноне, очищенном близким к нашему методом, $\Lambda \approx 2$ м [17] при близких значениях напряженности электрического поля. Поскольку истинный путь электрона длиннее его дрейфового пути в v_T / v_d раз (здесь v_T – скорость электрона, определяемая его кинетической энергией, $v_T = 10^8$ см/с для электронов с энергией



несколько электронвольт), длина свободного пробега электрона до захвата его примесью составляет

$$\lambda = \frac{1}{\sigma_{\alpha} n} = \frac{v_T}{v_d} \Lambda. \quad (6)$$

где σ_{α} – эффективное сечение захвата, n – концентрация электроотрицательной примеси. Если принять оценку остаточной концентрации кислорода в ксеноне, приведенную в [17], $n \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$, то из (6) следует, что эффективное сечение прилипания электрона $\sigma_{\alpha} = 5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$. Столь малая величина сечения свидетельствует, с одной стороны, о высокой средней энергии дрейфующих в жидком ксеноне электронов (сечение прилипания электрона в газе при его энергии $T = 0.1 \text{ эВ}$ еще составляет около 10^{-15} см^2 [16]), а с другой, об отсутствии в конденсированной фазе процесса диссоциативного прилипания электрона к кислороду (в газе при $T_e \approx 8 \text{ эВ}$ его сечение равно $5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ [16]).

Для типичных условий наших экспериментов концентрация отрицательных ионов, достаточная для полной компенсации приложенного напряжения, составляет 10^{11} см^{-3} [3]. При анализе того, какой из процессов может быть ответственным за «отбеливание»³⁾ отрицательных ионов в твердом ксеноне, с этой величиной следует сравнивать стационарную концентрацию n^- ионов O_2^- , оцениваемую из равенства скоростей их образования и распада. Соответственно, для механизмов разрушения отрицательных ионов при электронном ударе получим

$$n^- = \left(\sigma_{ed} \Lambda \frac{v_T}{v_d} \right)^{-1}. \quad (7)$$

а при фотодиссоциации

$$n^- = (\sigma_{pd} \Lambda \eta)^{-1}, \quad (8)$$

где σ_{ed} и σ_{pd} – сечения соответствующих процессов. В газе $\sigma_{ed} \approx 5 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$ при $T_e = 5\text{--}20 \text{ эВ}$, а $\sigma_{pd} = 1 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ для $\lambda = 150\text{--}180 \text{ нм}$ [16]. Используя эти значения, получаем, что при отбеливании электронами стационарная концентрация O_2^- равна всего 10^9 см^{-3} и этот процесс действительно в состоянии поддерживать постоянный электронный ток через ксенон. При фотораспаде $n^- \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, так что его недостаточно, чтобы поддерживать концентрацию O_2^- достаточно низкой. Соотношения (7) и (8) имеют прозрачный физический смысл – путь, проходимый электроном в среде, в $v_T / v_d \approx 10^3$ раз больше, чем путь фотона, а сечения ионизации электронным ударом много больше, чем фотоионизации. Поэтому, несмотря на высокий квантовый выход электролюминесценции, электронная компонента «плазмы» более активна в разрушении отрицательных ионов, чем фотонная.

3) Процесс отрыва электронов от ловушек под действием света.



Аналогичные соображения приводят к выводу о том, что наблюдаемое нами сильное видимое свечение твердого ксенона при протекании через него электронного тока вызвано возбуждением примесей электронным ударом, а не фотовозбуждением.

Анализ соотношения (7) позволяет сделать еще один важный вывод. Если относительное содержание электроотрицательных примесей в ксеноне достаточно велико, скажем, больше $3 \cdot 10^{-8}$, а это для большинства применений еще очень чистое вещество, электролюминесценция твердого ксенона при больших токах должна наблюдаться лишь в течение очень короткого времени, до заполнения «ловушек». Другими словами, для возникновения стационарного разряда через твердый ксенон существует порог по концентрации в нем электроотрицательной примеси.

6. Заключение и выводы

Таким образом, экспериментально доказано, что при дрейфе в умеренно сильных электрических полях через твердый ксенон избыточные электроны многократно возбуждают в нем экситоны, приводя тем самым к интенсивной люминесценции в ВУФ-области спектра. Тот факт, что эффективность люминесценции, будучи достаточно высокой и равной 18%, тем не менее существенно ниже предельной, свидетельствует в пользу предсказания [7] трудности преодоления электронами энергии $T_e = 8.0$ эВ, отвечающей образованию отрицательного иона $(\text{Xe}^*)^-$. Это означает, что функция распределения стационарно дрейфующих электронов по энергии должна иметь резкий максимум при 8.0 эВ; при этом следующая из результатов экспериментов [11] низкая величина эффективного сечения σ_a захвата электронов кислородом свидетельствует об отсутствии в распределении низкоэнергетичного «хвоста».

Нет никаких сомнений в том, что подобное поведение избыточного электрона должно иметь место и в жидком ксеноне, и в жидких и твердых криптоне и аргоне. Другими словами, при дрейфе избыточных электронов через конденсированные ТИГ следует ожидать формирования в них ансамблей квазимонохроматических электронов с энергиями 8.0, 9.6 и 11.2 эВ и эффективной электролюминесценции на длинах волн 172, 148 и 127 нм соответственно для Хе, Кг и Аг. Будучи монохроматическими по энергии, дрейфующие электроны, в отличие от электронных (и, кстати, световых) пучков, движутся хаотично, и их путь в среде приблизительно на три порядка больше, чем толщина образца. Это во столько же раз увеличивает вероятность воздействия электронов на примеси, в том числе намеренно введенные в твердую матрицу. Реализация последней идеи позволит развить новый метод изучения плазмохимических реакций (энергия электронов, будучи даже выше, чем в газовой низкотемпературной плазме, достаточна для осуществления многих процессов электронного возбуждения, диссоциации, диссоциативного прилипания и т.п.) при низких, в том числе очень низких, температурах в условиях матричной изоляции реагентов и продуктов. В «чистых» матрицах это может быть использовано для создания эффективных прямых преобразователей энергии электростатического поля в ВУФ-излучение, в том числе когерентное.

Сконструированная для проведения описанных экспериментов трехэлектродная ячейка может служить прообразом как плазменного твердотельного реактора



(при использовании конденсатора в режиме самопроизвольного разряда достигнутая доза составляла 10^{17} электронов в см^3 за импульс, что вполне достаточно для большинства приложений), так и экситонной ВУФ-лампы. Легкость организации объемного разряда через ксенон в трехэлектродной схеме с газовым промежутком и фотокатодом особенно впечатляет в сравнении с двухэлектродной схемой. В последнем случае для пробоя слоя чистого жидкого ксенона толщиной 0,2 мм требуется (как это имело место в системе очистки ксенона) использование лезвиеподобного катода и напряжения 10 кВ, в то время как в первом случае разряд через образец твердого ксенона толщиной 1 мм легко зажигается в плоской геометрии при суммарном напряжении всего 600–700 В.

Авторы благодарны Н.М. Ободовскому за полезные советы и А. Ключкову за помощь в проведении экспериментов, Б.М. Смирнову за плодотворные дискуссии и предоставление рукописи его обзора [18].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант У 01-03-32247), Гранта поддержки ведущих научных школ РФ (№00-15-97400) и Совместного гранта РФФИ NWO (№047-008-015).

Литература

1. E. Aprile and M. Suzuki. IEEE Trans. Nucl. Sci. 36, 311 (1989).
2. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky, Chem. Phys. Lett. 217, 605 (1994).
3. Е.Б. Гордон, О.С. Ржевский, В.В. Хмелепко, КЭ 21(3), 207 (1994).
4. S.S.-S. Huang and G.R. Freeman, Phys. Rev. A 24, 714 (1981).
5. A.S. Schussler, J. Burglioom, P. Wyder et al., Appl. Phys. Lett. 77, 2786 (2000).
6. A.S. Schussler, PhD Thesis, High Magnetic Field Lab., Grenoble, France (1998).
7. Е.Б. Гордон, А.Ф. Шестаков, ФНТ 27, 1192 (2001).
8. Ю.П. Райзор, Физика газового разряда, Наука, Москва (1992).
9. Е.В. Савченко, И.Я. Фуголь, Криокристаллы, ч. 4, под ред. Б.И. Веркина, А.Ф. Приходько, Наукова Думка, Киев (1983).
10. A. Usenko, G. Frossati, and E.B. Gordon, Phys. Rev. Lett. (2003), in press.
11. E. Aprile, A. Bolotnikov, D. Chen et. al., Nucl. Instr. Meth. A 343, 129 (1994).
12. S.G. Pokachalov, M.A. Kirsanov, A.A. Kruglov, and I.M. Obodovski, Nucl. Instr. Meth. A 327, 159 (1993).
13. G. Ascarelli, J. Phys. Chem. 84, 1193 (1980).
14. Е.М. Гушип, А.А. Круглов, И.М. Ободовский, ЖЭТФ 82, 1114 (1982): [Sov. Phys. JETP 55, 650 (1982)].
15. H. Nahmo and N. Schwentner, Appl. Phys. B 51, 273 (1990).
16. B.M. Smirnov, Negative Ions, McGraw-Hill, New York (1982).
17. M. Ichige, E. Aprile, T. Doke et al., Nucl. Instr. Meth. A 333, 355 (1993).
18. В.М. Смирнов, УФН 172, 1411 (2002).

Поступила в редакцию
31 октября 2002 г.



FREE ELECTRON IN COMPRESSED INERT GASES

E.B. Gordon, B.M. Smirnov

ЖЭТФ, 134 (2008) 322–329

The behavior of excess and intrinsic free electrons inside compressed inert gases is described as a function of pressure by using a pairwise approximation for the electron interaction with atomic surroundings. The change of sign from negative to positive for the xenon atom electric potential inside condensed xenon is predicted to occur at a pressure around 3 GPa, preventing slow electron embedding into solid xenon from the gas phase at higher pressure. To overcome this difficulty, the electrons should be injected into a solid sample just before its pulsed shock loading. The ionization of xenon by pressure and its further metallization are described by decreasing the forbidden gap at the account of increasing the xenon ground electronic term and simultaneous splitting the upper ionized electronic state. A good coincidence between calculated and measured pressure of the dielectric-metal transition in xenon is demonstrated.

1. Introduction

When an excess electron is injected into a heavy condensed inert gas, this system becomes similar to a metal with respect to electron transport. Indeed, the mean free path of a slow excess electron in condensed argon, krypton, and xenon may be as large as several meters, and the electron mobility in these condensed systems is several times greater than that in metals [1]. Due to the smallness of the electron number density, this system is convenient for the study of metal properties in the absence of the electron electron interaction and the electric field screening by space charge inherent to standard metals [2–4]. In particular, such an analysis shows [5] that excess electrons propagate inside condensed heavy inert gases along specific channels, the lines of the Voronoi–Delone net for this system.

These matrices are also suitable for experimental study [6–8]. Indeed, the electric potential for an electron inside dense inert gases is lower than that in the vacuum fl, and an electron freely penetrates dense inert gases from outside. The excess electrons inside a condensed inert gas can be governed by an external electric field and can even excite the matrix, but ionization processes are absent there [9], in contrast to gases. Therefore, to organize an electric discharge in a condensed inert gas, it is necessary to provide the electron multiplication outside the matrix. This scheme of an electric discharge was realized in [10–12] by using the transformation of the exciton energy into the energy of emitted VUV photons and then into the secondary electron photoemission from a cathode. Because the efficiency of the electric field energy transformation into VUV light is about 20%, this effect can be used for an effective generation of VUV photons. The fast excess electrons appearing inside the matrix can also induce various physical and chemical processes inside condensed inert gases.

The systems under consideration are known to be the most popular objects for studying the matter transformation at high and superhigh pressure. The dielectric metal transition has been experimentally proved specifically for xenon [13–15] as proceeding at the pressure 130–140 GPa. The aim of this paper is to analyze the electric properties of condensed inert gases with and without excess electrons at high pressures from these standpoints.



2. Excess electrons inside dense inert gases

In considering the conductivity of dense inert gases involving excess electrons, we deviate from the traditional scheme [16–21] that assumes the interaction of excess electrons inside inert gases to be a sum of interactions with individual atoms. This approach is valid only at low atom densities or at a high electric field. In our case of high electron mobilities, every electron interacts collectively with a system of surrounding atoms. Based on experimental data, we found [5] that electrons propagate through Voronoi–Delone channels [22, 23], which are found to exist between nearest atoms of a condensed inert gas. Indeed, in a rare inert gas, an electron is repulsed from an atom in the vicinity of the atom and is attracted to the atom at intermediate distances between atoms. Hence, there is an optimal density of a heavy inert gas [9] at which an electron prefers to be located between neighboring atoms.

The Voronoi–Delone channels are shown in Fig. 1 in the case where atoms of a condensed inert gas form a crystalline structure. We note that in reality, electrons are located in tubes around the Voronoi Delone channels, and therefore the crystal structure is not mandatory for the electron free motion if the curvature of these tubes is sufficiently small. This character of electron conductivity in compressed inert gases is important for the analysis of these processes at high pressures.

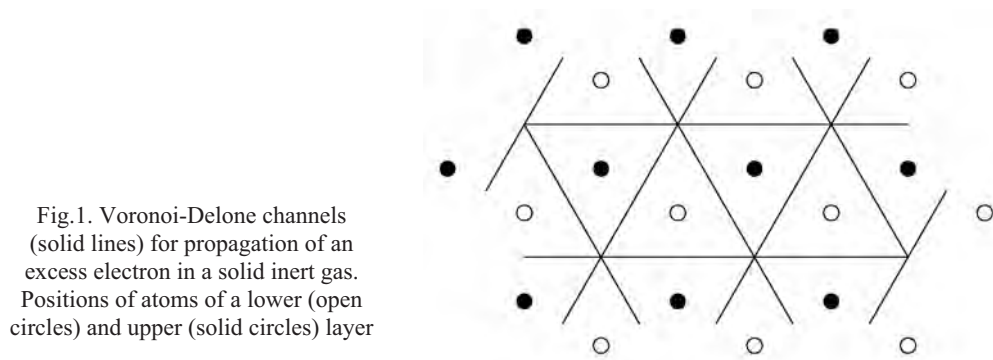


Fig.1. Voronoi-Delone channels (solid lines) for propagation of an excess electron in a solid inert gas. Positions of atoms of a lower (open circles) and upper (solid circles) layer

Table 1.

Parameters of the potential energy for an excess electron inside condensed inert gases			
	Ar	Kr	Xe
$U_{\min}, \text{eV [24–27]}$	–0.33	–0.53	–0.77
$N_{\min}, 10^{22} \text{ cm}^{-3}$	1.2	1.1	1.1
C, eV	0.44	0.71	1.04
α	4	4	4
A, eV	6	10	14
$N_{\text{cr}}, 10^{22} \text{ cm}^{-3}$	2.4	2.6	2.4

Thus, in considering the collective character of the electron drift in condensed inert gases, we are based on two types of electron interaction with valent electrons of atoms. The first type of exchange interaction occurs if an electron penetrates inside an atom and is repulsed from there in accordance with the Pauli exclusion principle. The other type of the



electron atom interaction proceeds above the atom surface. In principle, the set of valent electrons can provide the interaction of different signs, but in the particular case of Ar, Kr, and Xe atoms, this electron atom interaction is attractive. Based on the above consideration, we represent the interaction potential for an electron with a condensed rare gas as

$$U(N) = -C \frac{N}{N_{\min}} + A \exp\left(-\alpha \frac{N_{\min}}{N}\right), \quad (2.1)$$

where N is the current number density of atoms and $N_{\min}$ is the number density of atoms at which the interaction potential has a minimum. Of course, only the general form of the $U(N)$ dependence can be predicted this way, and therefore the parameters in (2.1) have to be determined from experimental data [5]; they are given in Table 1. We note that the value of this interaction potential is proportional to the electric potential for the electron placed in a condensed system. The maximum attraction of an electron inside an inert gas occurs at the number density $N_{\min}$ of atoms when the electric potential of the electron is equal to $-U_{\min} / e$.

Figure 2 demonstrates the reliability of the electron energy presentation in form (2.1) with the example of Ar. As follows from (2.1), an electron can be attracted by xenon inside a condensed matter only in a limited range of the atom number densities. Table 1 contains the critical atom number density N_{cr} at which the electron energy becomes zero. For the atom number densities exceeding this value, the Voronoi Delone mechanism of electron mobility is not valid because an excess electron does not experience attraction inside the inert gas anymore.

The existence of the critical atom number density N_{cr} is important for experiment. Indeed, until the electric potential inside an inert gas is below the potential in the vacuum, electrons penetrate this inert gas from outside freely, and electric discharge in a compressed inert gas may be arranged as it was arranged at ambient pressure. According to the data in Table 1, this possibility is lost at pressures of 3 GPa, which correspond to the molar volume 25 cm^3 . The mobility of an excess electron inside the solid starts decreasing long before that pressure is reached.

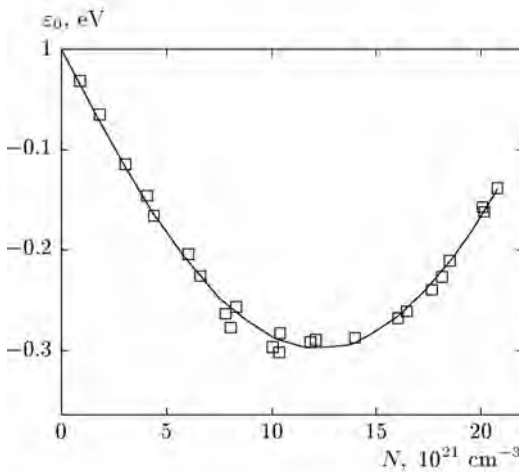


Fig.2. The electron energy inside compressed argon. Small squares, – experiment [24]; solid curve, – formula (2.1)



3. Conductivity of condensed inert gases at high pressures

At a much higher pressure, another conductivity mechanism of compressed inert gases can develop due to a dielectric metal transition in this system [28]. From the general standpoint, this should happen for xenon compressed such that the distances between nearest neighbors become shorter than the distance between nuclei of the diatomic ion.

Indeed, the energy of the electron ground state increases due to a repulsive interaction between atoms, and the energy of the ionized state may decrease due to an attractive interaction between an atomic ion and surrounding atoms. Our goal is to find the pressure at which the energy gap separating the ground electron state of this system and its ionized state starts to significantly decrease and eventually disappears. The experimenters describe that effect as the “ionization by pressure”. In this consideration, we assume the pair interaction potential between neighboring atomic particles to be relatively small. This is justified by a large number (around 12) of the nearest-neighbor atoms.

As a condensed inert gas shrinks under the action of an external pressure, repulsion of nearest atoms due to overlapping of their electron shells increases. Because the exchange interaction potential of two atoms due to the overlap of their electron orbits is determined mainly by a region of electron coordinates near the axis that joins nuclei of the interacting atoms [29], the interaction should be close to the pairwise one; therefore, the interaction between two nearest atoms is almost independent of the positions of other atoms. Then the total interaction potential of a given atom is the sum of its interaction potentials with neighboring atoms.

We next express the change in the total electron energy ΔE of the atom ensemble depending on the atom configuration as

$$\Delta E = \frac{\langle \Psi | \hat{H} | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle},$$

where $\hat{H}$ is the electron Hamiltonian and, in the one- electron approximation, the wave function Ψ of the total atom ensemble is expressed through the wave functions of electrons of individual atoms ψ_i as

$$\Psi = \prod \psi_i,$$

where ψ_i is the wave function of electrons for the i -th atom.

We divide the Hamiltonian of electrons of a given system into the one-atom part $\hat{h}_i$ and the two-atom part $\hat{h}_{ji}$.

$$\hat{H} = \sum_i \hat{h}_i = \sum_{i \neq j,k} \hat{h}_{jk} + \hat{h}_{jk}.$$

The two-atom part of the Hamiltonian includes the interaction between electrons of neighboring atoms. Taking only the exchange interaction for electrons belonging to different atoms into account, we find the total electron energy of this system as

$$\Delta E = E_0 + n \frac{q}{2} \frac{\langle \psi_j(1) \psi_k(2) | \hat{h}_{jk} | \psi_k(1) \psi_j(2) \rangle}{1 + \langle \psi_j(1) \psi_k(2) | \psi_k(1) \psi_j(2) \rangle} = E_0 + n \frac{q}{2} U(R_0), \quad (3.1)$$



where for simplicity the distances between nearest neighbors are assumed to be the same and equal to R_0 . Then q is the average number of nearest neighbors, $U(R)$ is the interaction potential for two atoms at the distance R between them, and n is total number of atoms. The summation in formula (3.1) ranges all the atoms and all the valence electrons of each atom.

Thus, we represent the interaction potential for an atom located inside a system of inert gas atoms under high pressure as a sum of the pair interaction potentials between nearest neighbors, and the pair interaction potentials are determined by exchange interactions, which are expressed through the overlap of the wave functions for electrons belonging to different atoms. As has already been stated, the exchange interaction of two atoms is assumed to be independent of their interaction with other atoms, and hence the total interaction potential can be represented as the sum of the pair interaction potentials. The factor one half in formula (3.1) accounts for the fact that each interaction involves two atoms.

At small distances, the pair interaction potential of two atoms with completed electron shells is determined by the overlapping of electron shells and leads to a strong repulsion of atoms. Hence, the repulsive interaction potential $U(R)$ of two atoms varies sharply with the distance R . between atoms, and we approximate it by the dependence

$$U(R) = U(R_0) \left(\frac{R_0}{R} \right)^k, \quad k = \left. \frac{d \ln U}{d \ln R} \right|_{R=R_0}, \quad (3.2)$$

In what follows, we consider only xenon atoms because the electric properties of compressed xenon are better studied experimentally. Table 2 gives the parameters of the pair interaction potential of xenon atoms in a range where it is close to 1 eV. Experimental parameters [30–32] are determined from small-angle scattering measurements in a system of two xenon atoms, and the theoretical parameters [29, 33, 34] follow from the asymptotic theory that assumes distances between the interacting atoms to be sufficiently large, such that the interaction potential of atoms is small compared to the atom ionization potential. According to the asymptotic theory [29, 33, 34], the exchange interaction potential of two atoms is given by

$$U(R) = A^4 F(\gamma) R^{7/2\gamma-1} \exp(-2R\gamma). \quad (3.3)$$

where $\gamma^2/2$ is the atom ionization potential, A is the asymptotic coefficient, and we use the atomic units $\hbar = m_e = e^2 = 1$; we note a confined accuracy of the asymptotic coefficient. In the case of xenon, these parameters are $\gamma = 0.944$ and $A = 2.0$, and the interaction potential is [29, 33, 34]

$$U(R) = 14R^{2.71} e^{-1.888R}. \quad (3.4)$$

The reliability of the experimental data and of their theoretical description can be seen from Table 2.



Table 2.

Parameters of the interaction potential for two xenon atoms in the range of their strong repulsion, where $U(R_0) = 1\text{ eV}$

	$R_{0,}$	k
Experiment [30]	5.5,	6.7
Experiment [31]	5.0	6.4
Theory [33, 34]	5.6	7.8

Thus, the main interaction in the ground electron state of condensed inert gases is due to the exchange interaction between valence electrons. Expressing this interaction potential through pair exchange interaction potentials between nearby atoms allows improving the accuracy of the data by conjugation of experimental and theoretical data. This interaction leads to a decrease in the ionization potential for a condensed inert gas. We see that under the adopted conditions, this value depends on the number of nearest neighbors of a given structure. Guided by the solid state of xenon, we note a nonuniform distribution of atoms there [35]. Indeed, this atomic system consists of individual clusters domains in which the number of nearest neighbors is $q = 12$, while an average number of nearest neighbors is approximately $q = 10$. This implies that in the course of compression of inert gases, the gap between the ground electron state and the ionized state should disappear first inside the clusters, with the boundaries between them remaining isolators. Thus, the transition from the dielectric to the metal state has a complex character in compressed inert gases.

Along with an increase in the energy of the electron term of the ground state of condensed xenon, there is a decrease in the energy of the electron term for an ionized state. But the nature of this effect is different from that for the ground state. Indeed, on average, the electron term of the ionized state does not change under compression, but splits in energy, transforming into a band with its edges moving up and down. In what follows, we assume the steady distribution of atoms in the crystal in the interaction frame between nearest neighbors only. We additionally assume that the pressure is so high that the distances between an ion and surrounding atoms are identical to those between neighboring atoms. Under these conditions, we construct the electron terms of the ionized state. Evidently, due to the exchange ion atom interaction with nearest neighbors, each electron term of the ionized state splits into 12 electron terms. There is also an additional splitting of each of these terms due to translation symmetry along the crystal, but because this additional splitting is identical for all terms, we do not take this part of interaction into account.

We derive the wave function of the ionized state in the form

$$\Psi = \sum c_i \psi_i,$$

(3.5)

where ψ_i is the wave function describing an ion connected to the i th nucleus. Restricting ourselves by the interaction of a test nucleus with nearest neighbors only, we obtain 12 electron states with a different set of coefficients c_i , which are determined by the state symmetry. To find the minimal gap between the ionized and ground state, we find the term with the lowest energy. A test nucleus forms with its 12 nearest neighbors an octahedron; this geometric figure has the symmetry with respect to certain reflections and rotations of the frame of reference, and each operation leads to a certain transformation of the



coefficients c_i in the expansion of the wave function. In the lowest electron state, these coefficients should be conserved under any symmetry operation. Hence, the wave function of this state has the form

$$\Psi = \sum c_i \psi_i, \quad (3.6)$$

and the coefficient c originates from the normalization condition. The corresponding negative energy shift per ion related to the symmetric lowest-energy state is

$$\Delta E = \frac{\langle \Psi | \hat{H} | \Psi \rangle}{\langle \Psi | \Psi \rangle} = \frac{q \langle \psi_i | \hat{h}_{ik} | \psi_k \rangle}{2 \langle \psi_i | \psi_k \rangle} = \frac{q}{4} \Delta(R_0). \quad (3.7)$$

where the wave function ψ_i means that the ion is connected to i th nucleus, R_0 is the average distance between nearest neighbors, and we reduced the change in the electron term of the ionized state to the pair exchange interaction potential $\Delta(R)$ for the interaction of the ion with the parent atom at a separation R . The exchange interaction potential between atoms i and k is here defined as

$$\Delta(R_{jk}) = 2 \langle \psi_i | \hat{h}_{ij} | \psi_k \rangle - 2 \langle \psi_i | \hat{h}_{ik} | \psi_i \rangle \langle \psi_i | \psi_k \rangle, \quad (3.8)$$

where $\hat{h}_{ik}$ is the one-electron Hamiltonian describing the electron located in the field of two nuclei. The above expression is valid at large distances between nuclei when the overlap of the wave functions centered on different cores is not large.

We recall that in contrast to the single-electron term of the ground state, we have in this case the number of electron terms coincident with the number of nuclei. These electron terms are concentrated with respect to energy into separate groups. The number of such groups is approximately equal to the number of nearest neighbors, and their energies differ remarkably. Formula (3.7) relates to the lowest electron term of the symmetric state. Only this state is interesting to us because it opens the shortest route for the electron passage from the ionized to ground state, i.e., for atom ionization. Eventually, the intersection of electron terms related to the ionized and ground states of the atom system leads to the dielectric metal transition.

We use formula (3.7) in the particular case of the interaction of an ion with the parent atom. Setting $q=1$, we obtain the electron energy

$$\varepsilon_g = -\frac{1}{2} \Delta(R). \quad (3.9)$$

where R is the distance between the nuclei. There are two electron terms in this case, even (gerade g) and odd (ungerade u) ones, and if we account for the exchange interaction only, the energies of these states are

$$\varepsilon_g = -\frac{1}{2} \Delta(R), \quad \varepsilon_u = \frac{1}{2} \Delta(R). \quad (3.10)$$

This means that the gerade (even) electron term goes down, the ungerade (odd) electron term goes up, and the splitting of these terms $\varepsilon_g - \varepsilon_u$, the exchange interaction potential, is $\Delta(R)$.



For xenon, it is important that the exchange interaction potential depends on the angular momentum projection for a p -electron transferring valence. With the angle between the axis that joins the interacting atoms and the quantization axis on which the angular momentum projection for a transferring p -electron is zero denoted by θ , the exchange interaction potential of an ion and the parent atom is given by [29, 33, 36]

$$\Delta(R) = 3\Delta_0(R)\cos^2\theta, \quad (3.11)$$

where $\Delta_0(R)$ is the exchange interaction potential for a transferring s -electron with the same asymptotic parameters. Averaging over the angle θ and assuming the nearest neighbors to be located in different directions, we obtain

$$\Delta E = \frac{q}{4} \Delta_0(R_0). \quad (3.12)$$

where R_0 is the average distance between nearest neighbors. In the framework of the asymptotic theory [29, 33, 36], the expression for the exchange interaction potential for an ion with the parent atom is equal to

$$\Delta(R) = A^2 R^{2/\gamma-1} \exp(-R\gamma - 1/\gamma). \quad (3.13)$$

Correspondingly, the exchange interaction potential of a xenon atom and an ion is equal to

$$\Delta(R) = 1.4R^{1.12} \exp(-0.944R) \quad (3.14)$$

in atomic units.

Let R_* be the average distance between the nearest neighbors corresponding to the intersection of electron terms belonging to the ground state of repulsing atoms and to the ionized state. This value follows from the equation

$$J = \frac{q}{2} U(R_*) + \frac{q}{4} \Delta(R_*), \quad (3.15)$$

where J is the atom ionization potential, $U(R)$ is the repulsive interaction potential at a distance R for two atoms due to their exchange interaction, $\Delta(R)$ is the exchange interaction potential of an ion with its parent atom, and q is the number of nearest atoms. In principle, we should include the terms describing the interactions of the formed ion and the electron with xenon surroundings into this equation. The energy of the ion is determined by the displacement of Xe atoms in the direction to the ion as is shown in Fig. 3. This energy is negative and cannot be significant in the rigid matrix of compressed xenon. The energy of the electron inside compressed xenon at the pressure of interest is positive because the number density of atoms N then exceeds N_{cr} in Table 1. Hence, the contributions to the energy from the electron and the ion have different signs and compensate each other. Because each of them is less than 1 eV, their inclusion is not significant in any case because the sum of the two leading terms in (3.15) exceeds 10 eV.

The data in Table 3 are the results of using the parameters of the atom atom interaction in Table 1 and formulas (3.12) and (3.14) for the exchange ion atom interaction potential of xenon. In cases 1 and 2, we use the experimental data in [30] and [31, 32] for the pair interaction potential of two xenon atoms, and in case 3, we use formula (3.4) [33, 34]. As can be seen, the number density of atoms N_* for the dielectric metal transition is



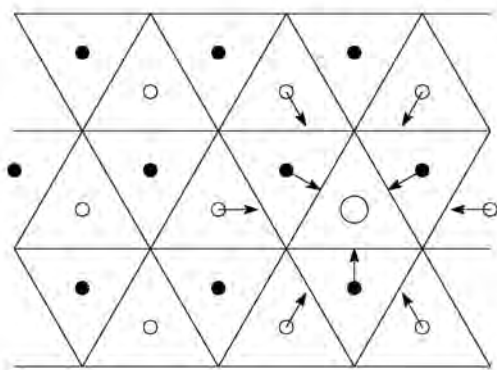


Fig.3. Displacement of atoms near a forming ion

approximately twice the critical atom number density N_{cr} for the Voronoi Delone mechanism of electron drift.

Table 3.

The distance R_* between nearest neighbors corresponding to the dielectric-metal transition in xenon, the atom number density N_* , and the molar volume V_*

	R_*, a_0	$N_*, 10^{22} \text{ cm}^{-3}$	$V_*, \text{ cm}^3 \text{ mol}$
Case 1	5.16	5.8	10
Case 2	5.15	5.8	10
Case 3	5.29	5.4	11

To pass from the molar volume V to the pressure p measured in experiment, we need the Xe equation of state valid at high pressure. Figure 4 gives the equation of state for compressed xenon measured up to the range of the dielectric metal transition. According to it, the molar volume at the dielectric metal transition for xenon $V_* = 10\text{--}11 \text{ cm}^3/\text{mol}$ corresponds to the pressure 120–140 GPa, which nicely fits the experimental results in [13, 14, 15].

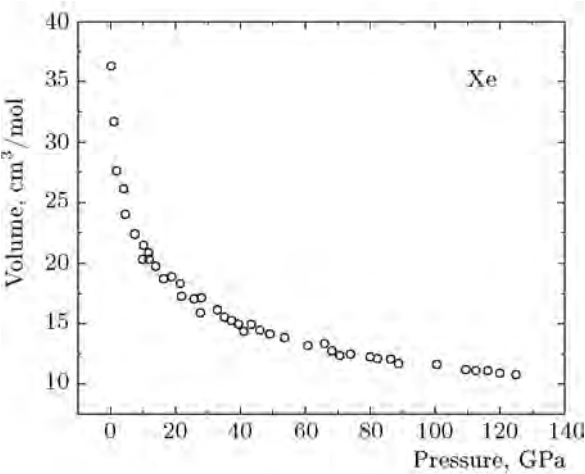


Fig. 4. The equation of state for xenon at high pressures according to the experiment in [37]



4. Conclusion

The aim of this analysis was to describe the changes in the behavior of a free electron embedded into condensed inert gases at high and extrahigh pressure, to reveal the connection of their characteristics with the structure of solids, and to develop the strategy for experimentally studying the mobility and conductivity of excess and intrinsic electrons in solid xenon. It was shown, in particular, that under the pressure exceeding 3 GPa, the slow electrons cannot be embedded into solid xenon from the gas. Thus, the approach has been proposed for the blasting experiments when the electrons are introduced into the xenon crystal at ambient pressure, and then the sample is subjected to a shock wave action. Because shock loading lasts less than 1 microsecond and the electron lifetime in a sample is 3 microseconds, there is enough time for measurements.

The special attention has been devoted to understanding the nature of xenon metallization at high pressure. As a matter of fact, the absolute value of xenon molar volume corresponding to the dielectric metal transition was predicted with good accuracy by exclusively using the characteristics of atom atom and electron atom interactions obtained theoretically or in the experimental study of elementary processes in the gas. If the proposed interpretation of the “ionization by pressure” is correct, the whole dependence of the forbidden electron band on pressure for any condensed heavy inert gas can be readily found, and, in particular, the pressures of the dielectric metal transition for at least argon and krypton can be predicted.

This work is supported in part by the RFBR (grant № 07-03-00393). The authors are thankful to P.V. Kashtanov for some numerical calculations.

References

1. B.M. Smirnov, *Uspekhi Fiz. Nauk* 172, 1411 (2002).
2. N.W. Ashcroft, and N.D. Mermin, *Solid State Physics*, Holt., Rinehart, and Winston, New York (1976).
3. Ch. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, Wiley, New York (1986).
4. P.M. Chaikin and T.C. Lubensky, *Principles of Condensed Matter Physics*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (1995).
5. E.B. Gordon and B.M. Smirnov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 128, 211 (2005).
6. E.B. Gordon, O.S. Rzhevsky, and V.V. Khmelenko, *Quant. Elect.* 21, 227 (1994).
7. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky, *Chem. Phys. Lett.* 217, 605 (1994).
8. E.B. Gordon and A.F. Shestakov, *Low Temp. Phys.* 27, 883 (2001).
9. E.B. Gordon and B.M. Smirnov, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 125, 1058 (2004).
10. E.B. Gordon, G. Frossati; and A. Usenko, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 123, 846 (2003).
11. A. Usenko, G. Frossati, and E.B. Gordon, *Phys. Rev. Lett.* 90, 153201 (2003).
12. E.B. Gordon, T. Kumada, M. Ishiguro, and Ya. Aratono, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 126, 898 (2004).
13. K.A. Goettel, J.H. Eggert., and I.F. Silvera, *Phys. Rev. Lett.* 62, 665 (1989).
14. R. Reichlin, K.E. Brister, A.K. McMahan et. al., *Phys. Rev. Lett.* 62, 669 (1989).
15. M.I. Eremets, E.A. Gregoryanz, V.V. Struzhkin et. al., *Phys. Rev. Lett.* 85, 2797 (2000).
16. J. Lekner, *Phys. Rev.* 158, 130 (1967).
17. M.H. Cohen and J. Lekner, *Phys. Rev.* 158, 305 (1967).
18. B.E. Springett, J. Jortner, and M.H. Cohen, *J. Chem. Phys.* 48, 2720 (1968).
19. V.M. Atrazhev and I.T. Iakubov, *J. Phys. C: Sol. St. Phys.* 14, 5139 (1981).
20. V.M. Atrazhev and E.G. Dmitriev, *J. Phys. C: Sol. St. Phys.* 18, 1205 (1985).
21. V.M. Atrazhev, I.V. Chernysheva, and T.D. Doke, *Jpn. J. Appl. Phys.* 41, 1572 (2002).
22. B.N. Delone, *Uspekhi Math. Nauk* №3, 16 (1937).



23. N.N. Medvedev, The Voronoi – Delone Method in Studies of Structures of Noncrystal Systems, Siberian Branch RAS Press, Novosibirsk (2000).
24. A.K. Al-Omari, K.N. Altmann, and R. Reiniger, J. Chem. Phys. 105, 1305 (1996).
25. R. Reiniger, U. Asaf, and I.T. Steinberg. Chem. Phys. Lett. 90, 287 (1982).
26. R. Reiniger, U. Asaf, and I.T. Steinberg, Phys. Rev. 6 28, 3193 (1983).
27. R. Reiniger, U. Asaf, I.T. Steinberger et. al., Phys. Rev. 6 28, 4426 (1983).
28. V.E. Fortov, V.Ya. Ternovoi, M.V. Zhernokletov et al., Zh. Eksp. Teor. Fiz. 124, 288 (2003).
29. B.M. Smirnov, Physics of Atoms and Ions, Springer, New York (2003).
30. I. Amdur and J.E. Jordan, Adv. Chem. Phys. 10, ch.2, 29 (1966).
31. V.B. Leonas, Uspekhi Fiz. Nauk 107, 29 (1972).
32. V.B. Leonas, in Review of Science and Technology: Atomic and Molecular Physics, ed. by S.A. Losev, VINITI, Moscow (1980), Vol.1, p.206.
33. B.M. Smirnov, Asymptotic Methods in the Theory of Atomic Collisions, Atomizdat, Moscow (1972) (in Russian).
34. B.M. Smirnov, Uspekhi Fiz. Nauk 162(12), 97 (1992).
35. R.S. Berry and B.M. Smirnov, Uspekhi Fiz. Nauk 175, 367 (2005); Phys. Rev. B 72, 051510-1 (2005).
36. B.M. Smirnov, Uspekhi Fiz. Nauk 171, 233 (2001).
37. H. Cynn, C.S. Yoo, B. Baer et. al., Phys. Rev. Lett. 86, 4552 (2001).

Received March 10, 2008



LOW-TEMPERATURE ELECTRICAL DISCHARGE THROUGH SOLID XENON

E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, B.M. Smirnov
Физика низких температур, 34 (2008) 1203–1211

The uniform self-sustained electrical discharge through solid xenon has been realized and studied. The multiplication of electrons proceeds in the noble gas above the xenon crystal interface whereas a positive feedback is realized at the account of multiple exciton formation by excess electrons drifted through the crystal: molecular excitons emit VUV photons which knocked out secondary electrons from photosensitive cathode. The discharge was stimulated by short electrical spark along the sample axes. The discharge electrical properties as well as the spectra of solid xenon electroluminescence in UV and visible have been studied. Electric discharge in solid xenon was proved to be an effective source of UV radiation and a convenient tool to study the processes involving excitons and electrons in solid xenon at high pressures.

1. Introduction

Electric discharge requires for its self-maintaining the reproduction of electrons and ions which go to electrodes [1]. In gases this reproduction results from atom ionization by electron impact. In contrast to gases where the energy distribution function of electrons has a long tail, in condensed heavy gases due to effective excitation of atoms the ionization of an atom occurred by impact with more fast electrons is absent. Nevertheless, the conditions of self-maintaining may be satisfied in solid inert gases if electrons are injected from outside where they are formed under the cathode bombardment by VUV photons which in turn are generated inside the condensed inert gas by these electrons drifted in an external electric field. This scheme was formulated [2, 3] and then was shown to be realized in [4, 5] for the solid xenon. The aim of present paper is to create the reproducible uniform electric discharge in solid xenon by brute force technique applicable in principle for solid xenon at high pressures. The brief results of the studying such a discharge through solid xenon at ambient pressure are reported.

2. Peculiarities of electron drift in solid xenon

The mean free path of an excess electron in liquid and solid heavy rare gases amounts to many meters [6, 7] and electron mobility exceeds that in a coin metal or in a gas of atmospheric pressure [8]. Meanwhile the absence of own free electrons makes possible there, unlike in metals and semiconductors, sustaining the electrical field inside a sample. Naturally the question appears [2, 3], is it possible to organize an electrical discharge in the solid to excite and to ionize a matrix as it takes place in a gas? The answer depends first of all on the fact to what extent the unique high mobility of electron and its unique low elastic losses save themselves at high electron energy, because the growth of electron kinetic energy should result in approaching the behavior of electron drifted in condensed media to that inherent to a gas [2, 9].

Nevertheless it has been proved experimentally that even at moderate (around kVs per cm) field the drifted electrons can be accelerated up to energy of several eV being sufficient for the matrix electronic excitation [10, 4, 5]. However this fact itself does not



facilitate the solution for the problem of electrical discharge creation. As the matter of fact the cross-section of electronic excitation as well as a cross-section of any nonelastic process has to be as high in a solid as in a gas. Thus at high densities typical for condensed matter the probability for drifting electron to excite a matrix just after the threshold overcoming is so large that at really accessible electric field the electron additional overheating up to the ionization threshold, i.e. 3 eV higher than the excitation threshold, is absolutely negligible. This fact is independent of the matrix temperature because the typical electron energy exceeds its thermal energy by two orders of magnitude. The probability of multi-step ionization is very low as well because the electronic excitation of a matrix immediately results in two-center trapped molecular-like exciton [11] formation which in turn decays emitting VUV photon, for short-living component the radiation time is as short as 30 ns even for Xe [12]. The feasibility of trapped exciton formation by electron impact in solid xenon has been experimentally proved previously [13, 14].

The absence of ionization in the course of electron drift in condensed rare gases means the absence of electron multiplication being necessary for a discharge self-maintaining. Moreover, positive ions are practically motionless in a solid rare gas, so any electrical current through a sample should quickly dump due to the compensation of electric field by the accumulative space charge. Such a problem may be bypassed by using the electrical cell with photosensitive cathode [4]. Each electron creates many excitons during its drift through solid rare gas, every of them decaying with VUV photon emitting. This photon is able to cause the photoelectron effect striking a cathode; these additional electrons entering the matrix create the positive feedback that itself without ionization could provide the multiplication of number of electrons passed the sample and consequently the self-sustained current through it [5].

In practice, the following approach [4, 5] is more convenient. In a three-electrode cell the xenon crystal is grown at the bottom, between the grid and anode. The gap between cathode and grid is filled by inert gas – xenon, argon or helium – at small pressure. In case of xenon the sample temperature has been kept equal to 115–132 K to have saturated vapor pressure in cathode-grid gap in the range 7–40 kPa; while using more light gases they put into cell at close pressure, the sample temperature was 77 K in the case. In electric field applied to the cathode-grid gap the electrons emitted from cathode enhance their energy and then ionize gas forming the electron avalanche propagated from cathode to the grid with a speed above 10^7 cm/s. The electron number multiplication factor as high as 10^3 could be achieved in a regime of exponential growth, the Townsend discharge occurs at higher voltage. Passing a grid and then entering the xenon crystal the electrons drift there in voltage applied to grid-anode gap. As it has been shown in experiment the drifting electron passed the voltage of 1 kV induces emission of 20 VUV photons (172 nm) [5]. The geometrical probability for this photon to bombard the photosensitive cathode could be estimate as 20% whereas the photoelectron emission yield for zinc at $\lambda = 172$ nm is $5 \cdot 10^{-4}$ [15]. These estimates demonstrate the possibility to achieve the conditions of chain-branched electron multiplication being the analog of self-sustaining electrical discharge regime. Unlike common discharge the charge carrier multiplication takes place in a gas whereas the positive feedback, being necessary for self-sustaining operation, occurs in a solid at the account of molecular-like exciton electroluminescence caused photoelectrical effect on the cathode.



In principle self-maintaining electrical current in xenon could be realized as it was proposed in Ref. 2 without any electron avalanche in a gas. However when metallic cathode contacts directly with solid xenon the effect of so-called back diffusion appears diminishing by orders of magnitude the probability for photoelectron to enter the crystal, CsI cathode is lucky exclusion because the probability of electron capturing by liquid xenon has shown to be as high as 0.1 there [16].

In experiment with three-electrode cell we really observed the transition to self-sustaining discharge (generation) that is characterized by appearance and subsequent growth of regenerative peak in electron current, with its maximum realized, as it follows from general considerations, at the moment of positive feedback termination [4,5]; the primary electrons were created by exposing the zinc cathode to short pulse of 4th harmonics of Nd:YAG laser irradiation (266 nm). The positive feedback duration was naturally equal to the time of excess electron drift through the xenon crystal. That time was known with good accuracy because in the field range 10^2 – 10^5 V/cm the electron drift velocity in condensed xenon did not depends on the field strength and was equal to $2 \cdot 10^5$ cm/s [8].

Regretfully, as in any experiment where electrons move through solid dielectrics, there is a limit for the total charge flowing through the sample that stops the current through the sample. That is due to molecular admixtures that capture electrons and create a motionless volume charge. Any purification method, including the effective electro-spark technique [17] we used, can not diminish the electronegative impurity (oxygen first of all) content below 0.2 ppb, that corresponds to molecular density in a solid of $6 \cdot 10^{12}$ cm⁻³. All these molecular traps capture the electrons provided the current exists enough long. In our geometry the corresponding charge density is sufficient to compensate the fields with the strength exceeding 100 kV/cm. That is why a scientist used to work with as low current as possible within the time when the current is still not terminated. Then, in order to continue the experiment one should remelt the sample. In our conditions the limiting time of “discharge” existence was only tens of seconds.

It is turned out however that provided all resistors restricting the current in electrical circuit were removed the compensation of electric field by accumulating space charge did not exist anymore and the discharge initially triggered by laser pulse may exist for ever. Such a behavior we explained hypothetically [4] by trapped electron blowout under impact with fast drifting electron. The electron affinity to molecular oxygen is only 0.43 eV, so the cross-section of the electron detrapping by impact of free electron having sufficient energy should be enough high [18]. Thus starting from some density of excess electrons the steady concentration of motionless negative charges (defined by equilibrium between free electron trapping to impurity and negative ion decomposition by the impact with free electron) may become to be less than that compensating the voltage which induces a drift.

This work is devoted to testing that hypothesis, to realization of steady bulk “discharge” in solid xenon, as well as to studying this phenomenon being peculiar and attractive for the applications, especially for revealing the xenon matrix transformation at very high pressure. The problem of the discharge initiation is to be cardinal because due to quadratic dependence of the detrapping rate on free electron density a steady discharge can not be achieved spontaneously.



Though the principal ability for excess electron to drift in nonpolar solid as it does it in a gas is obvious, the feasibility for an electron to acquire the energy sufficient for the new charge producing in reasonable electric field is the specificity of a condensed matter. In dense gas such a process will be simply impossible (as the experiments have shown [19] the discharge threshold starting from gas pressure of 100 bar rises to the electric field strength practically unattainable due to breakdown occurrence). Quite natural and important from viewpoint of possible application at high and ultrahigh pressure is the question what should happen at atomic densities higher than those characteristic for solid and liquid states at normal conditions. In other words, one should distinguish whether high mobility of excess electron is a consequence of accidental coincidence of the density of condensed heavy rare gases at normal conditions – about $3 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ – with the density when the compensation of an electron attraction and repulsion to atomic system provides the weakness of its interaction with media [20], or that high mobility has to last in wide range of densities, and consequently pressures. Of course, high pressures should induce the other effects as well and they will be analyzed in this work too.

3. Experimental setup

The design of the technique built up in IPCP RAS is shown in Fig. 1; it is close to that described in Ref. 4. Only the materials and tools destined for ultrahigh vacuum operation have been used in assembly. All tubes were from stainless steel, the Varian flanges and copper gaskets, as well as Swagelok ferrules, pipes and nuts were used for connectors. In construction of both discharge cell and xenon purification chamber any plastics, glues, and even silver soldering were avoided, last due to impossibility to remove the traces of flux; only indium (for sealing), sapphire, glass, Kovar, and Macor ceramics were applied as materials. Whole vacuum system could be degased by heating up to 200°C . The Varian Turbo-V70 turbomolecular pump supported by Varian SH-100 scroll pump were used, the stainless steel gas receivers had special fingers for xenon condensation by liquid nitrogen. Pressure was measured by the modification of Barocell pressure gauge compatible with high vacuum.

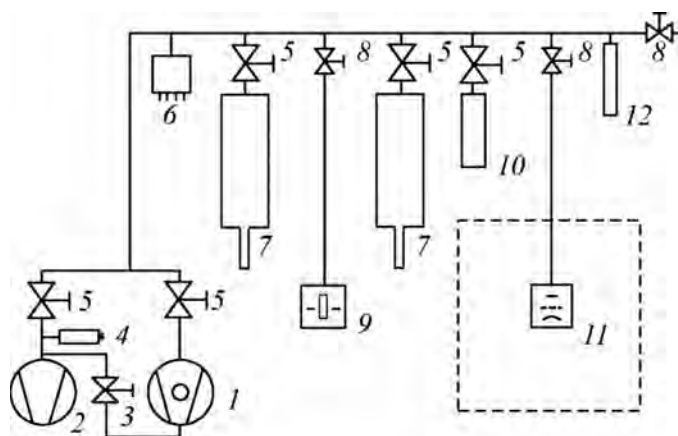


Fig. 1. Setup scheme: turbomolecular pump (1); scroll pump (2); vacuum valve (3); Pirani pressure gauge (4); ultrahigh vacuum valves (5); Barocell pressure gauge (6); stainless steel cylinders with finger (7); high vacuum valves (8); purification chamber (9); stainless steel cylinder (10); experimental cell located inside of cryostat (11)

Necessary efficiency of xenon purification from electronegative impurities – about 10^{-10} – can not be kept for a long time in separate cylinder. Thus the purification system periodically retrieved the necessary purity was an incorporated part of setup. The electrospark method of xenon purification has been used as previously [4]. The titanium blade-shaped ring served as cathode and steel cylinder was used as anode, interelectrode distance was 0.2 mm. Before operation the purification chamber has been submerged to the liquid ethyl alcohol permanently cooled down to porridge-like consistence by adding liquid nitrogen. Liquid xenon interface was 1 cm higher than cathode level. The homemade high voltage power supply had manipulated output from 1 to 10 kV. Because the frequency of 75 kHz has been rectified there the output capacitor intended for smoothing the signal had a low capacity and as a result the output energy was insufficient for the spark development – at high anode-cathode voltage an electric arc simply appeared inside liquid Xe. With the additional 0.1 mF outlet capacitor one or two sparks exist, moving around the interelectrode gap as metal sputtered, starting from some voltage applied – at 1.5 kV for nonpurified xenon and at 8 kV at the end of procedure. The spark current has been limited by powerful 1 M Ω resistor. The cavitation accompanied the electrical breakdown provided intensive intermixing of liquid xenon supplying the spark region with new portion of a liquid. Several hours of such a procedure were sufficient to diminish the contamination of Xe down to 0.2 ppb in a few cc of liquid.

Liquid nitrogen optical cryostat has been designed especially for this study in the Institute of Solid State Physics RAS. It possesses 4 arrays of sapphire optical windows suitable as for UV range where excitonic emission takes place as in visible and near IR ranges. The complexity of perfect xenon crystal growing consists of small, less than 2 K, gap between the temperatures of Xe melting and boiling. Due to large volume of the sample and consequently large heat releases under gas xenon condensation and then its solidification, the common technique of temperature stabilization with feedback was inapplicable. The system of stabilization we chosen acts as follow. The homemade controller kept the excess pressure of vapor in liquid nitrogen jacket constant and equal to 0.2 bar. The main bath of the cryostat where the experimental cell was situated has been connected to ambient air through a needle-valve controlled the rate of gas outflow and such a way the supply of liquid nitrogen from the jacket to main bath through a capillary, the necessary flow has been determined experimentally. The temperature of the cell was measured by copper-constantan thermocouple. At the moment when necessary amount of liquid xenon has been condensed to the cell it was sealed from the supply system by the valve and the outflow controlled by needle valve was strongly diminished (to compensate the sharp cessation of heat release at the end of condensation). When in a few minutes the temperature reached the Xe triple point $T = 161$ K the needle-valve has been closed at all, the crystallization proceeded isothermally and frontally from the down to the top during about 20 min. After the crystallization completion the cooling rate was quickly enhanced and after the temperature becomes to be 77 K whole cryostat bath was filled by liquid nitrogen. The quality of the crystals such grown was better then previously [4].

In this work the new design of three-electrode experimental cell has been used, the photo is presented in Fig. 2. Its body was the sapphire tube 1 with 28 mm inner diameter gripped through indium sealing between two steel flanges 2 and 3, the possibility of optical observation both in UV, visible and IR ranges has been achieved in such a way. To



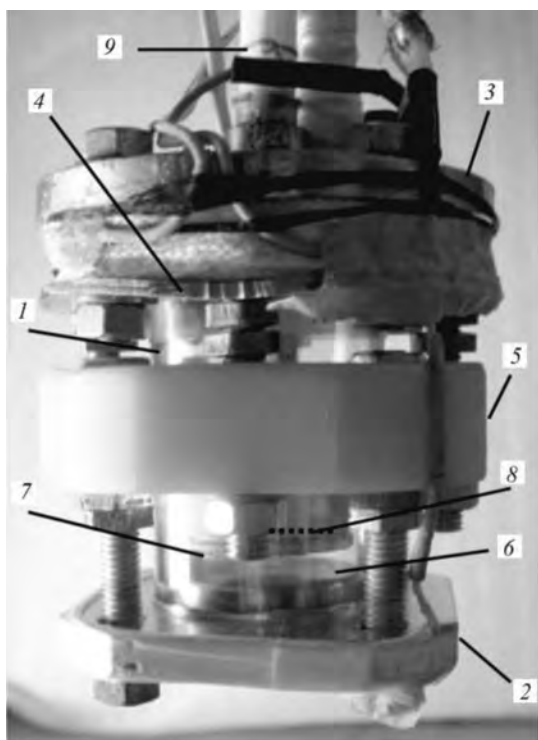


Fig. 2. Experimental cell:
sapphire tube (1); bottom flange (2); upper flange (3);
stainless steel flat spring for thermal expansion
compensation (4); Caprolan insulator (5); anode
surface (6); mesh grid (7); the position of zinc
cathode inside of Macor gasket (8);
high-voltage feedthrough (9)

compensate mechanical tension appeared under temperature changes and being large enough due to the diversity of materials applied in construction, the flanges were pressed to sapphire tube through flat spring 4 as it has been done in the cell meant for work with solid helium [21].

The bottom flange 2 served as anode and its working surface 6 was uplifted on 3 mm to avoid the electrical breakdown from indium spew, squeezed out inside the cell under sealing, to grid 8 along the side surface of a crystal. Two $40\ \mu\text{m}$ tungsten wires were installed at the center of anode; they rose on 0.5 mm above its surface. Their task was to give rise powerful spark initiated the main discharge.

The zinc cathode 10 mm in diameter was attached to upper flange. The distance between cathode and grid made of stainless steel mesh with 60% geometrical transparency was 2 mm and their electrical insulation has been attained by figured gasket made of Macor ceramics. By changing the length of cathode holders the distance between grid and anode determined the maximal sample thickness could be changed from 2 to 4 mm. The

cell was provided with electrical heater rolled around upper flange and with thermocouple.

Unless a discharge was terminated by space charge captured by the impurities presented inside a sample, its power was so large that it could melt whole crystal during few seconds. For this reason the 430 pF capacitor was used as voltage supply. It was charged by the power unit through 110 k Ω resistor; the discharge current has been restricted by 1 k Ω resistance. The same scheme was used for grid-anode feeding, 0.1 μF capacitor was charged through 10 M Ω resistor in the case. Owing to this the discharge represents the sequence of short pulses; the repetition rate dependent on power unit voltage was usually chosen about 1 Hz.

4. Experimental results

The different regimes of electric discharge through solid xenon are illustrated by Fig. 3. The visible glowing was extremely intensive – all photos were made at daylight and background looks like black in the presence of discharge only by contrast. The shape of xenon sample is shown in upper photo. Only spark breakdown takes place at small voltage U applied to gas gap, as it is seen from the next photo. The observation through the mutually perpendicular windows manifests the spark to be just at axes of the cell and



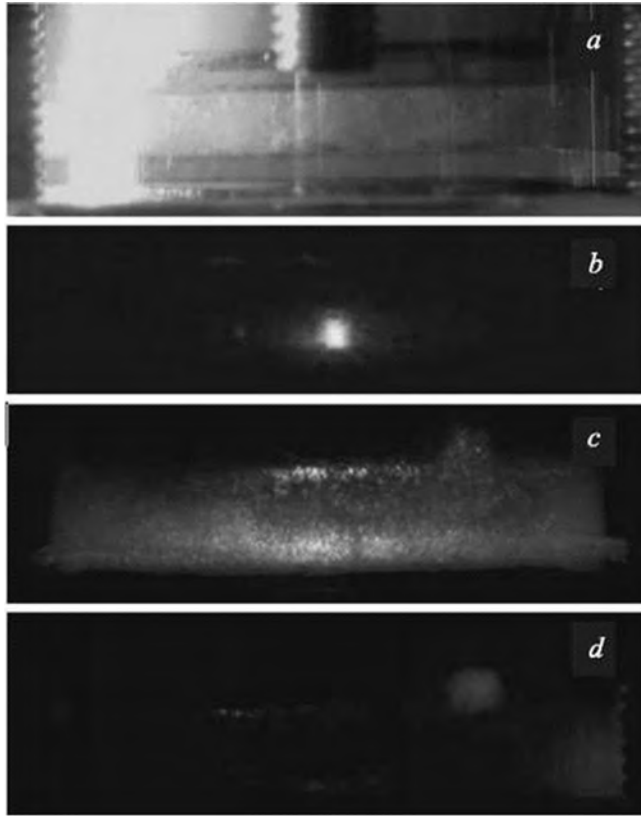


Fig. 3. The photos of different regimes of electron current through solid xenon at constant grid-anode voltage, $U_{ga} = 2.4$ kV, and different cathode-grid voltages, U_{cg} : a) $U_{cg} = 0$ (no current); b) $U_{cg} < 100$ V (only spark); c) $100 \text{ V} < U_{cg} < 200$ V (uniform discharge); d) and $U_{cg} > 200$ V (weak glow)

crystal. The temporal profile of the current in cathode-grid gap at such a condition is shown in Fig.4, and the “spark” duration equal to 300 ns together with its high brightness and comparably large for a spark radius indicate that is not simple breakdown; namely the noticeable part of its trace an electron does not moved in a crack but drifts through a crystal bulk nearby.

Beginning from some threshold voltage U , extremely bright uniform glow sharply appears in whole sample volume, the pulse repetition rate does not change at this moment. The pattern of this discharge shown at Fig. 3,c is the same being observed through the windows from all four sides of the cell, no extra intensity was found both at the center there the spark has been before and at the edges of crystal, last is the evidence for the absence of specific role of sample surface in emission. The durations of both light and current pulses were almost two orders of magnitude more long than those in the regime of spark breakdown (look at correspondent oscillogram in Fig. 4). The charge re-establishment time for the feeding capacitor in cathode-grid circuitis rather short $\tau_c = CR = 0.43 \cdot 10^{-9} \text{ F} \times 1.1 \cdot 10^4 \Omega = 50 \mu\text{s}$; thus the observed discharge repetition rate (about 1 Hz) is definitely controlled by the charge of capacitor in the grid-anode circuit, where re-establishment time



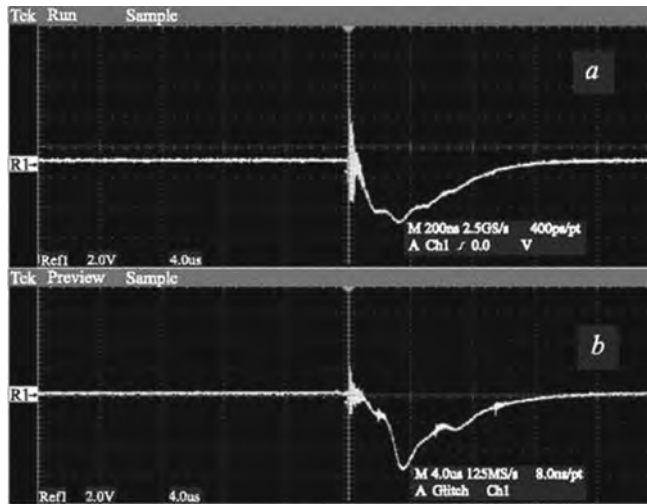


Fig. 4. Oscillograms of visible emission intensities in a) “spark” regime, time scale $0.2 \mu\text{s}/\text{div}$, and b) discharge regime, time scale $4 \mu\text{s}/\text{div}$

really is $\tau_c = CR = 1 \cdot 10^{-7} \text{ F} \times 1 \cdot 10^7 \Omega = 1 \text{ s}$. According to voltmeter readings the capacitor is loosing practically all its charge to the end of every discharge pulse; it means that the charge flowed through the grid-anode gap filled up with solid xenon $q = CU = 1 \cdot 10^{-7} \text{ F} \times 2.4 \cdot 10^3 \text{ V} = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ C}$ is much more than that flowing through the cathode-grid gap filled up with a gas $q = CU = 0.43 \cdot 10^{-9} \text{ F} \times 1 \cdot 10^2 \text{ V} = 43 \cdot 10^{-6} \text{ C}$. In other words, the additional charge carriers – electrons – in amount being 50 times more than that in a gas gap are formed in the grid-anode gap. Since only electrons escaping a cathode are then multiplied in a gas the effect hardly could be attributed to less efficient photoelectric effect on the grid surface. Most likely the reason is the additional electron multiplication in the narrow gap between the grid and upper surface of crystal: taking into account the high xenon dielectric constant equal to 1.8 the electric field there is 40 times more than in cathode-grid gap. For achieving the additional multiplication factor in electron avalanche equal to 50 it is sufficient to have a gas slit between a grid and upper crystal face only $0.10\text{--}0.15 \text{ mm}$.

Rather low electrical resistance of a crystal follows from discharge pulse parameters observed – since the discharge duration of $4 \mu\text{s}$ is sufficient for $0.1 \mu\text{F}$ capacitor depletion, the impedance should be less than 40Ω . In accordance with that estimate the introduction of $1.3 \text{ k}\Omega$ resistor into discharge circuit entirely kills the discharge through solid xenon. Meantime the gas gap impedance was not less than $15 \text{ k}\Omega$. The analysis of light emission pulse presented in Fig. 4 leads to the interesting conclusion: there are few successive electrical breakdowns of solid sample. The moments of sparks appearance are seen due to high-frequency noise they induce at the background of a signal detected by photodiode. Every spark gives birth to its own electron avalanche in a gas gap and then to its own “discharge” through solid xenon. Every discharge such induced represents the pulse having the maximum at the electron time-of-drift through the sample being equal in our case to $2 \mu\text{s}$. Such a behavior is typical for any generator: the additional pulsed excitation of a generator already working in a steady regime causes a perturbation existed during the



time of positive feedback action. The same shape had the regenerative peak of discharge current we have observed in vicinity of the threshold of self-sustained discharge through solid xenon [4, 5]. Such effects are quite naturally more significant near the vertical axes of a sample where initial breakdown takes place. Thus they are less indicative in current signal, that, contrary to emission collected by lens from the central part of a sample, represent total electron current through a sample.

The most convincing argument in favor of such interpretation of the experimental data is the discharge behavior under further growth of voltage applied to cathode-grid gas gap. Both current and light emission are practically invariable while voltage grows from 100 to 200 V, but then the crystal glowing intensity falls down step-wisely and becomes comparable with emission of gas discharge in cathode-grid gap (see Fig. 3,d). Due to the small discharge current at that stage it can be feed continuously through the 10 M Ω resistor – the glowing observed becomes continuous-wave indeed. Such a behavior saves at further voltage growth above 200 V. The threshold voltage values presented above are dependent of course on the sample thickness.

The unusual effect of discharge depression whereas the voltage applied to gas gap and consequently the factor of electron multiplication in avalanche both grow can be rationalized as follows. Beginning from cathode-grid gap voltage 200 V the continuous-wave discharge through gas gap appeared – it was observed at close voltage in absence of grid-anode voltage as well. It causes effective permanent bombardment of a crystal by electron escaping gas discharge area. Such pre-ionization of a crystal becomes to be high enough for suppressing the spark development. As a result, only weak discharge, controlled by the space charge of impurity negative ions, took place.

Beside VUV luminescence from excitons the intensive emission in UV and visible has been registered from uniform discharge through solid xenon. The overview spectrum is presented in Fig. 5. The main lines there belong to xenon, they are slightly broadened and (about 0.4 nm) shifted to the blue from their gas phase positions. It is very interesting that we observed all lines of ions Xe⁺ usually present in gas xenon discharge but no line of Xe atom has been registered including these possessed high intensity in both high and low pressure xenon gas discharges [22, 23]. As we already mentioned, the

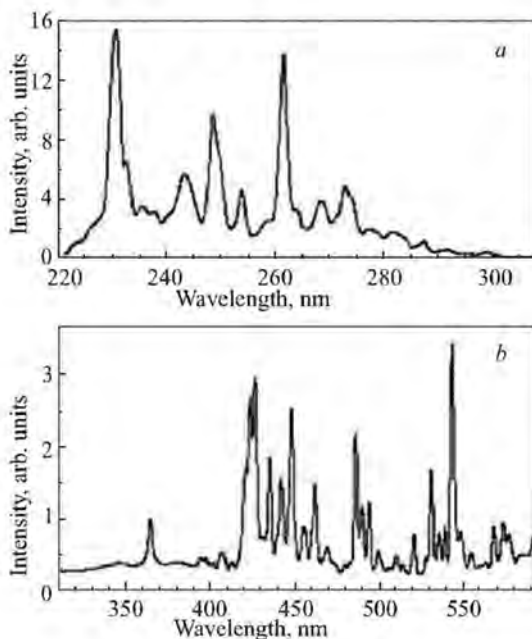
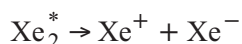


Fig. 5. Overall spectra of solid xenon in visible (a) and UV (b) regions. No correction for spectral sensitivity of photomultipliers has been made. Xe crystal was kept in equilibrium with its vapor at 132 K, thus the cathode-grid gap was filled by xenon with pressure around 4.5 kPa. The width of individual lines registered at low monochromator scanning rate was 0.4 nm

direct ionization of a matrix is impossible in our conditions, just preliminarily excited species could be the precursors of ions. Since only excited species are molecular-like excitons the process



should be rather effective under hot electron impact or VUV quantum absorption. Note that unlike gas phase where negative ions Xe^- do not exist, the excess electron potential energy is negative in solid xenon lattice.

Another peculiarity of solid xenon is the narrowness of the exciton emission band: while in a gas and in a liquid the intensive luminescence arises already at 200 nm we see no traces of emission at 190 nm.

Extra spectral lines and continuums presented in spectra of discharge in solid xenon may belong to impurities. Though they regretfully related to unknown centers, the high intensity of emission from trace species with relative content about 10^{-10} is good evidence for high probability of electroluminescence connected with the fact that real path of drifting electron in a sample is 10 times longer than the sample thickness [4].

That is especially interesting for spectroscopic and other physical and chemical applications that the method of organization of electric discharge through solid xenon is the brute force technique: no external factors are necessary for realization. One should only prepare the sample and apply the electric field of sufficient strength to it. If so the discharge can be developed without any optical access to a sample, in particular in the experiments with extra high pressure and in blasting operations [24].

Such a way the universal approach has been developed allowing, on the one hand, introducing excess electrons to solid xenon and, on the other hand, studying the interactions of hot electrons with practically any molecules isolated in inert matrix. The temperature can be arbitrary low provided the helium will be used as the gas in cathode-grid gap.

5. About the discharge through solid Xe at high and ultrahigh pressures

The method under consideration may be applied in principle to high-pressure studies of the behavior of excess electrons in solid xenon. As it was shown in Ref. 25, the current of excess electrons proceeds in a space along the tubes whose axes are Voronoi-Delone channels. This is additional to the classical description of the electron behavior in metals on the basis of the Fermi surfaces and exhibits that the metal conductivity is not a result of the crystal structure of metals only. That is of obvious interest to investigate the excess electron current at pressure being high enough to modify electron potential inside a solid. However, even the very feasibility to organize a discharge at high pressure is not quite clear and both theoretical and technical analysis is required.

Thus the simplest approach, applicable however only for blasting experiments, is the exposition to shock-wave compression of xenon crystal with preliminarily sustained electrical discharge. Because the duration of a discharge in a sample of 1 cm thickness is about 5 μs one has a time for pressing. The presence in a sample of excess electrons makes it possible to study the electron mobility far below the pressures provided effective ionization of a matrix.



The realization of the method in the condition of static compression looks much more problematic. First of all in the design of an experimental cell the gas gap above the crystal should be removed because the discharge through high pressure gas is impossible. However the experience of present experimental work shows that this difficulty may be bypassed by using two-electrode cell with CsI cathode. The effect of back diffusion is absent here, and the absence of electron multiplication in gas avalanche will be compensated by higher photocathode efficiency and removing the screening of electroluminescence by mesh grid.

In principle beginning from high enough pressure the chemical potential of excess electrons in solid rare gas becomes positive, so thermal electron could not enter the sample then. However our estimates show that it is important only for more light rare gases, for xenon such a pressure is about 130–150 GPa. Such a way this effect does not prevent a static operation, in particular in a frame of technique based on diamond anvils [26].

For the studies at static pressure the crucial question is the possibility for an excess electron to be accelerated in a solid at high pressure, the exciton and molecular ion structures and energies are of great importance in this case.

We now examine briefly the properties of compressed xenon which should be analyzed in future work. At very high pressures and consequently at very small distances between nearest neighbors, the electron band of valence electrons intersects the boundary of continuous spectrum, and then xenon becomes a metal. According to experimental study [27, 28], the dielectric-metal transition for xenon occurs at the pressure of 130–140 GPa. But considerably below this pressure the gap between the electron valence band and the boundary of continuous spectrum decreases to form a broad dielectric-semiconductor-metal transition.

The study of intermediate semiconductor state of xenon would give a more profound understanding the dielectric-metal transition. But in practice the conductivity in the semiconductor regime should be entirely defined by electronegative impurities and not by own matrix ionization. Only a deep ($< 10^{-7}\%$) xenon purification together with injection excess electrons into the matter would remove this trouble.

In principle, two types of the electron excitation, atomic and molecular, are possible in condensed inert gases at moderate pressures. In reality, only molecular exciton emission is observable in solid xenon with a spectral band position close to that of Xe_2^* excimer band in a gas. Meantime, the molecular spectral band should disappear at enough high pressure because small distances between the excited atom nearest neighbors exclude existence of its bound state with one atom. The corresponding pressure and the character of exciton band distortion and decay are of obvious interest.

We now enumerate the effects appeared in solid xenon as the pressure increases and revealed themselves as the changes in excess electrons mobility and excitonic luminescence characteristics.

First of these is a drop of the mobility of excess electrons when a pressure increases above atmospheric one at which the reduced mobility of excess electrons in solid xenon exceeds by three-four orders of magnitude that in gases of the same pressure [19]. That high electron mobility can be explained by existence of Voronoi–Delone channels between xenon atoms, where a slow electron propagate [20]; these regions will disappear at high pressures resulting in significant decrease of slow electrons mobility.



The next effect consists in strong distortion of excitonic luminescence band shape. At atmospheric pressure molecular-like exciton emission is close to that of Xe_2^* excimer molecule in a gas due to large difference between interatomic distance in two-center exciton and that in a matrix. But a pressure increase leads to a decrease in the distance between nearest neighbors of solid xenon, and at certain pressure the molecular-like spectrum will be replaced by the atomic-like one. All these effects are expected already in the kbar pressure range.

At higher pressure the effect of diminishing the energy necessary for atomic ionization in a matrix becomes important. That is the consequence of two effects. On the one hand, the system electronic ground state goes up due to exchange interaction between valence electrons, and on the other hand, the level of ionic state goes down. But last effect is of another nature than that for the ground state. Indeed, the electron term of the ionized state in average does not change but splits into many levels transformed to expanded band. Both effects lower the ionization energy and so-called "ionization by pressure proceeds of course via lower edge of ionization band. Of course, excitonic emission should disappear at that pressure as a result, and then the ionization of the matrix by excess electrons accelerated in electric field may proceed. This effect can display the threshold behavior and in this case it could be interpreted as insulator-semiconductor phase transition.

Beginning from such a pressure together with the current of excess electrons the conductivity of pure matrix should take place, especially in blasting experiments where the temperature of compressed matter is high enough and large amounts of intrinsic free electrons appear at pressures significantly lower than those corresponded to metallization, i.e. forbidden band disappearance. The mobility of the electrons may be at the same time still rather low, and only at high inner ionicity the character of bonds should vary from van der Waals binding to metallic one. New ordering such appeared will restore high mobility up to that inherent to a metal.

Probably in the same range of pressure the electron will loose its ability to penetrate inside solid xenon from gas phase because the electric potential inside solid xenon for a slow electron becomes higher than that outside it.

6. Conclusion

The experimental approach just elaborated allows the creation of stable uniform electrical discharge inside solid xenon. High energy electrons make it possible to excite the xenon matrix as well as the impurities stabilized inside solid xenon and to cause their chemical reactions in inert matrix at arbitrary low temperature. The method luckily can be realized at high and ultrahigh pressure as well. The feasibility of introducing large amounts of excess electron into compressed solid xenon assures the experimental observation of several pronounced effects. Their characteristics will be reliable base for detailed theoretical analysis and, that is especially important, for understanding the matter transformation at high pressure at all. The design of the technique allowing the excess electron introducing into solid xenon being compatible with conditions of blasting experiment is now in progress.

This work is supported partially by Russian Foundation for Basic Researches grant 07-03-00393.



References

1. J.S. Townsend, *Electrons in Gases*, London, Hutchinson'ssci. Techn. Publ. (1947).
2. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky, *Quantum Electronics* 21, 227 (1994).
3. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, and O.S. Rzhevsky, *Chem. Phys. Lett.* 217, 605 (1994).
4. E.B. Gordon, G. Frossati, and A. Usenko, *J. Exp. Theor. Phys.* 96, 846 (2003).
5. A. Usenko, G. Frossati, and E.B. Gordon, *Phys. Rev. Lett.* 90, 1532017 (2003).
6. E. Aprile, K.L. Giboni, and C. Rubbia, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*241, 62 (1985).
7. M. Ichige, E. Aprile, T. Doke, K. Hasuike, K. Itoh, J. Kikuchi, and K. Masuda, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*333, 355 (1993).
8. G. Ascarelli, *J. Phys. Chem.* 84, 1193 (1980).
9. B.M. Smirnov, *Phys. Uspekhi* 45, 1251 (2002).
10. A.S. Schussler, J. Burghoorn, P. Wyder, B.I. Lembrikov, and R. Baptist, *Appl. Phys. Lett.* 77, 2786 (2000).
11. N. Schwentner, E.E. Koch, and J. Jortner, *Electronic Excitations in Condensed Rare Gases*, Vol. 107 of Springer Tracts in Modern Physics, Springer-Verlag, Berlin (1985).
12. E.V. Savchenko and I.Ya. Fugol, in: *Kryokristalli*, B.I. Verkin and A.F. Prikhod'ko (eds.) (in Russian), Kiev, Naukova Dumka (1983).
13. I.Ya. Fugol, O.N. Grigorashchenko, and E.V. Savchenko, *Phys. Status Solidi B*111, 397 (1982).
14. I. Reimand, E. Gminder, M. Kirm, V. Kisand, B. Steeg, D. Varding, and G. Zimmer, *Phys. Status Solidi B*214, 81 (1999).
15. *Handbook of Chemistry and Physics*, Edition 86, D.R. Lide (ed.), London: CRC Press (2003–2004).
16. A. Breskin, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*371, 116 (1996).
17. S.G. Pokachalov, M.A. Kirsanov, A.A. Kruglov, and I.M. Obodovski, *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A*327, 159 (1993).
18. B.M. Smirnov, *Negative Ions*, McGraw-Hill, New York, London (1982).
19. E.B. Gordon and A.F. Shestakov, *Fiz. Nizk. Temp.* 27, 1192 (2001) [*Low Temp. Phys.* 27, 883 (2001)].
20. E.B. Gordon and B.M. Smirnov, *J. Exp. Theor. Phys.* 98, 924 (2004).
21. E.B. Gordon, T. Kumada, M. Ishiguro, and Ya. Aratono, *J. Exp. Theor. Phys.* 99, 776 (2004).
22. E.Kh. Baksht, M.I. Lomaev, D.V. Rybka, and V.F. Tarasenko, *Quantum Electronics* 36, 576 (2006).
23. A.K. Malik, P. Montarde, and M. G. Haines, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33, 2037(2000).
24. V.E. Fortov, V.Ya. Ternovoi, M.V. Zhernokletov, M.A. Mochalov, A.L. Mikhailov, A.S. Filimonov, A.A. Pyalling, V.B. Mintsev, V.K. Gryaznov, and I.L. Iosilevskii, *J. Exp. Theor. Phys.* 97, 259 (2003).
25. E.B. Gordon and B.M. Smirnov, *J. Exp. Theor. Phys.* 101, 186 (2005).
26. P.W. Bridgeman, *Proc. Am. Acad. Arts Sci.* 72, 207 (1938).
27. K.A. Goettel, J.H. Eggert, and I.F. Silvera, *Phys. Rev. Lett.* 62, 665 (1989).
28. R. Reichlin, K.E. Brister, A.K. McMahan, M. Ross, S. Martin, Yo.K. Vohra, and A.L. Ruoff, *Phys. Rev. Lett.* 62, 669 (1989).

Received February 15, 2008,
revised May 21, 2008



i) Нанопроволоки и нанокластеры в сверхтекучем гелии

CATALYSIS OF IMPURITIES COALESCENCE BY QUANTIZED VORTICES IN SUPERFLUID HELIUM WITH NANOFILAMENTS FORMATION

E.B. Gordon, Y. Okuda

Физика низких температур, 35 (2009) 278–283

The dramatic effect of quantized vortices in superfluid helium on the rate of coalescence of suspended impurities has been predicted; such catalytic process should result in formation of fiber-like structures having primarily nanothickness. That should be valid for any impurity and it may be used as a base for the universal method of nanowires and nanotubes producing. The experiments on molecular hydrogen imbedding into liquid helium supported these conclusions. They showed that: (i) in normal liquid He the coalescence led to formatting spherical microparticles carried by turbulent motion of a liquid; (ii) in the superfluid only very long filaments were observed, they behaved as quantized vortices should do. These filaments are fiber-like hydrogen crystals and they survived liquid helium transition to normal state. The promises for using this phenomenon in basic and applied sciences have been outlined.

1. Introduction

Liquid and solid helium are the quantum liquid and crystal correspondingly, thus all their characteristics are spatially delocalized. The important and surprising exclusion is the quantized vortices appeared in superfluid helium in response to its excitation. Though a vortex occupies whole liquid bulk its potential described by formula

$$U \approx \ln \frac{r}{r_0}$$

is noticeably distinguished from zero only in a vortex core, its characteristic size $r_0 = 0.7 \text{ \AA}$ is even less than the size of an atom. The quantized vortex length may be meantime rather long and comparable with a vessel size [1]. Any impurity including light helium isotope ^3He , from one side, and rather large clusters, from another side, tends to be placed in a vortex core because the energy for a particle possessed the finite viscosity is minimal at the axis of a vortex [2]. However the affinity of these impurities to the vortex is rather small amounting for atoms and small molecules to 3–10 K [1, 3]. It means that for the temperatures 1.5–2 K the probability to find them inside of vortices is only weekly larger than outside, though at $T = 0.1 \text{ K}$ practically all of them should be finally attached to vortices. There are still no calculated energies for binding larger features to a vortex in literature but the authors of Ref. 4 found experimentally that the preliminarily grown micron-size grains of molecular hydrogen were concentrated steadily in quantized vortices even in the very vicinity of λ point, i.e., at temperature around 2 K [4]. The problem the authors of this paper put for themselves consisted in revealing the possible role of quantized vortices not in alignment of already prepared clusters, as it was already done in Ref. 4 for visualization of quantized vortices in superfluid helium, but in the very process of impurity condensation into agglomerates and clusters.



A linear molecule of course tends to align along the vortex axis [3]; this evidently should be true for a dimer of atoms or molecules as well and the binding energy of a dimer with a vortex has to be approximately twice as more than for monomer. In general one could suppose that the energy of small cluster pinning to a vortex is defined by cluster length – for n links it will be n times more than for individual particle. If so for the clusters or chains having 5–10 links the preference of their finding inside vortices will be strongly dominant already at $T \approx 2$ K. Every guest particles in liquid helium excluding ^3He stick together practically at every collision, and the rate of condensation governs by the rate of mutual collisions. The last is proportional to square of impurity local density and thus it much higher inside of vortex. The motion of captured particles along the vortex core has no restriction; this additionally enhances the rate of collisions because inside of a vortex the particles can move only towards each other, contrary to the bulk liquid helium where the particle velocities are chaotically directed.

Such a way the presence of quantized vortices results in sudden effect of catalysis of sedimentation for the impurities – atoms, molecules and clusters – suspended in superfluid helium. Provided the number of vortices is sufficient the rate of the process as a whole should grow at many orders of magnitude, and filament-like structures should appear as a product of condensation.

2. Experimental evidences

These considerations were confirmed by our experiments on imbedding the molecular hydrogen significantly diluted by helium gas directly into superfluid helium; the powerful gas jet provided a short time of mixture transport to gas-liquid interface. This study has been performed in Tokyo Institute for Physics and Technology [5]. The ^4He cryostat has been equipped by two pairs of optical windows and the inner diameter of its central bath was 160 mm and the distance between the inner optical windows was 220 mm, the superfluid was achieved by pumping liquid helium in the bath. The use of so large cryostat allowed to be sure that both the vessel walls and liquid helium surface were enough far away. To provide the reliable and fast transport of impurity to liquid helium surface in the presence of large counterflow of evaporating helium we applied gas helium jet technique [6]. Since the nearly equimolecular mixture of hydrogen and deuterium formed the particles which levitate in liquid helium the preliminarily prepared gas mixture $\text{H}_2:\text{D}_2:\text{He} = 1:1:200$ was used in the most of our experiments, though some sets were performed for $\text{H}_2:\text{He} = 1:100$ and $\text{D}_2:\text{He} = 1:100$ mixtures. A mixture at pressure of 3–6 bar was allowed with using of electromagnetic valve to put into inlet capillary at pulses of 80 ms duration with repetition rate 6 Hz, 30–40 bursts in each injection series. The total number of hydrogen introduced into a fridge in sequence of pulses has been chosen not so high to restrict the overlapping the structures in the field of view. The molecular source was Dewar tube with central capillary of 1 mm inner diameter and a nozzle of about $300\ \mu\text{m}$ at its bottom. The distance between the nozzle and the surface of superfluid helium was 3–7 cm.

The sequence of pulsed jet entering liquid helium significantly distorted its interface; the height of surface waves was several mm and one could be positive that a lot of quantized vortices appeared in He II just in the place where density of guest particles was maximal. The optical technique has been chosen for registration from the consideration of



reliability of interpretation. We understood of course that because the spatial resolution of an optical method can not be better than $1\text{ }\mu\text{m}$, our observations would start only when the formed features became to be of this size and the most interesting initial stage of the condensation process would be hidden. It turns out anyway that even the last pages of scenario contained important and unambiguous information. Since hydrogen is transparent in optical range and absolute difference between refraction index of solid hydrogen and liquid helium is not large the method based on the schlieren photography [7] with the sensitive and high-resolution CCD camera has been used. The spatial resolution of the particle registration system was $20\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ and depth resolution was about 3 cm .

While liquid helium was in normal state even at temperatures close to λ point the spherical particles with diameter around $10\text{ }\mu\text{m}$ appeared in a field of view in several minutes after the injection termination. The particles were obviously made of hydrogen; for equimolecular hydrogen-deuterium mixture in average there were no definite direction of their motion, whereas for pure deuterium whole pattern moved temporarily to the bottom. As it is seen from Fig. 1 the particles move along slightly curved trajectories with lateral velocities projections of few tenths of cm per second. The particles were obviously entrained by convective flows in liquid helium. Sometimes they changed sharply the direction of their motion as if they jumped from one flow to another one. Such a behavior is the ready solution for the problem of making quantitative measurements of local flow velocities in turbulent liquid helium using tracer particles [8]. Indeed the space resolution of the observation technique and the size of the fringe windows are close. Thus by focusing the schlieren system to the cryostat axes and observing simultaneously the central area through reciprocally perpendicular pairs of windows one could restore the trajectories for all particles and such a way obtain the field of flow velocities in liquid helium.

Completely different behavior took place in the case when the hydrogen injection proceeded into superfluid helium even if the liquid temperature decreased only a little below 2.19 K . Almost just after termination of $\text{H}_2\text{:D}_2\text{:He}$ mixture injection the very long hairs often being longer than the window size appeared throughout the superfluid; this was proven by changing of the focusing area of the observation technique. Such filaments were observed for $\text{H}_2\text{:He}$ mixture as well, though they moved randomly but predominantly upward to the surface. In the case of $\text{H}_2\text{:D}_2$ equimolar mixture the motion was predominantly in horizontal direction without any sign of upflow. The example of the filament is shown in Fig. 2. Sometimes the filaments were rather short, only few mm long and practi-

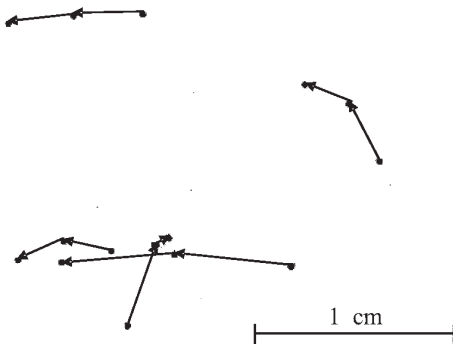


Fig. 1. The displacement of micron-size $\text{H}_2\text{--D}_2$ particles drifted with turbulent flows in normal liquid helium, background is subtracted. The time between successive frames is 0.5 s, the maximal projection of particle velocity to the plane perpendicular to the observation axis is 0.5 cm/s



cally linear. They had a predominantly vertical position and in the case of $\text{H}_2\text{:He}$ mixture they moved up with velocity about 0.5 cm/s. The number of hairs slowly decreased with time and in 20 min they disappeared from the field of view.

Surprising and important for applications property of quantized vortices is their ability of pinning to different protuberances in apparatus [9]. We used this property for fixing the formed in superfluid helium filament in a field of view in order to follow its evolution in time and under change of conditions. The registration system has been focused for that purpose to the spot where the low-temperature optical window's tube was connected with the inner wall of a cryostat LHe bath. The example of the filament "caught" by this way is shown in Fig. 3. This filament had the length around 3 cm and the diameter, being the same along whole thread, less than $50\text{ }\mu\text{m}$. The temporal behavior of the filament was the same as it has been theoretically predicted for quantized vortex [9]. Though the filament swung strongly in the flow of the normal component, its ends were immovable and perpendicular to the place of pinning. It was clearly seen that the filament was levitated in the liquid helium, i.e., it was consisted of hydrogen-deuterium mixture.

Nevertheless the dilemma still existed, whether the filaments observed were quantum vortices captured and kept together separate hydrogen grains as it was considered recently in Ref. 10, or the quantum vortices enveloped the fiber-like hydrogen crystals grown inside a vortex; the enveloping the $16\text{ }\mu\text{m}$ diameter wire by quantized vortex has been considered in Ref. 11. The solution was simply to heat liquid helium with filaments suspended in it by pulses of pure warm helium gas up to the temperatures above 2.2 K and to watch what happened with filaments. The transition to normal state of liquid helium was easily observed as the start of boiling. It was stated the hydrogen filaments already grown in superfluid helium didn't decay if quantum vortices disappeared, it allowed to consider them as one-piece fiber-like hydrogen crystals.

The aging both in superfluid and in normal states revealed a tendency to filament thickening and lengthening. However at temperatures higher than T_λ the ends of filaments were not pinned to some places anymore and they were moving in a liquid freely.

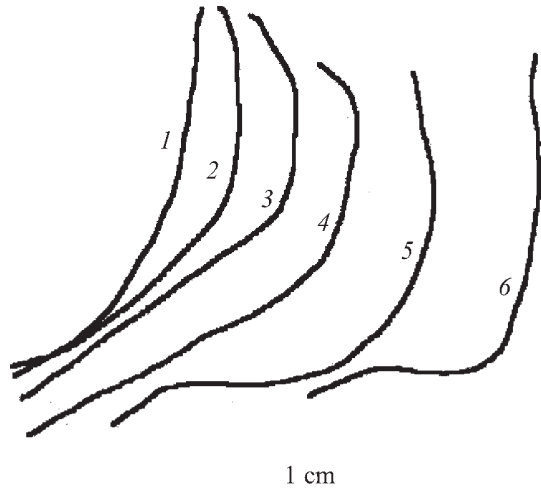


Fig. 2. The motion of $\text{H}_2\text{-D}_2$ long filamen in superfluid helium.

The time between successive frames is 1 s

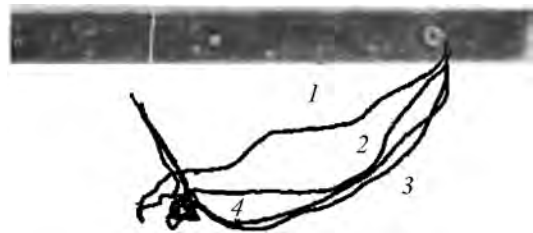


Fig. 3. The motion in superfluid helium of $\text{H}_2\text{-D}_2$ pinned to protuberance long filament.

The time between successive frames is 1 s



Eventually the fibers spliced to “rope” up to $150\ \mu\text{m}$ thick and it survives liquid helium evaporation being seen by unaided eye after that [5].

3. The peculiarities of fiber-like crystal growth in superfluid helium

According to considerations developed in colloidal chemistry and valid for every dispersed particles suspended in a liquid the maximal size of separate particles formed in a liquid is defined by balance between the coalescence forces in the spot of particles mutual contact and the fluctuations of liquid action to particles destroying such a contact (see Fig. 4a). The fluctuations which values are governed by the ratio of particle’s surface to its volume are responsible for Brownian motion in liquid. For nonspherical, prolonged particles the limiting volume of particle should be even less because the surface-to-volume ratio for them is more than for spherical ones (Fig. 4b). For this reason even dendrite crystals in normal liquid have to grow from the end appending step-by-step the short fragments (Fig. 4c). In quantum vortices the prolonged particles are kept directed along the vortex axes, i.e. coaxial to each other, thus even for the compounds of isotropic nature the formation of fiber-like structures from long enough fragments is quite possible (Fig. 4d).

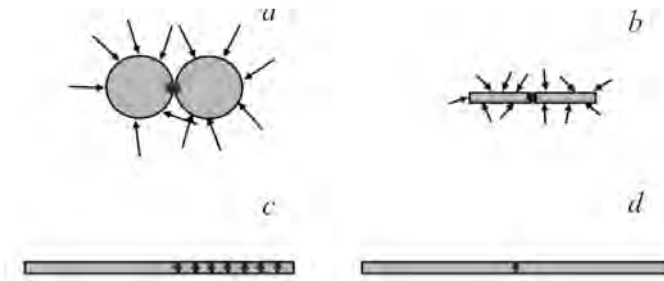


Fig. 4. To the explanation of mechanism of fiber-like crystals growth

As for the condensation of small particles – atoms, molecules and agglomerates – from liquid helium bulk on the surface of filaments, there are no specificity of helium here because the impurity-impurity interaction ever stronger than impurity-helium interaction. The same one may say about interaction of two filaments originated from different vortices, the crossing them is to be followed by their reciprocal rotation up to splicing along their total length because that will gain a lot of energy. That is the reason for appearance of more thick and more long (last is due to mismatching the fragments lengths) fibers.

It is worth to say that filament-like structures (worms) made of impurities have been already observed in superfluid helium [for instance, 12] but nobody connected their appearance with quantized vortices so far.

4. The promises

One of the declared promises for nanowires and nanotubes applications is the production of superstrong ropes from them. The idea is taken from silk and spider’s web and it is based upon as the practical absence of the crystal structure faults in nanoobjects as the strong, due to small radius of curvature, lattice squeezing by surface tension preventing dislocation exit to a surface, i.e. microcrack formation. In our experiments such a rope has been already produced. Though the rope described above was made of weakly bound



hydrogen in the absence of structural faults it should lift the weight of 50 g and its length is already sufficiently long both for study and for applications.

The creation of superstrong ropes is important but far from being only stimulus for nanowires study. Quantum wires and quantum dots are attractive objects for basic science [13]. From the viewpoint of applied science nanowires can be used to build the next generation of computing devices. Chemically doped semiconductor nanowires of *p* type and *n* type have already been created. The conducting nanowires offer the possibility of connecting molecular-scale entities in a molecular computer as well as in flexible flat-screen displays.

The progress in study and application of nanowires is restrained by their high price, low productivity of manufacturing and difficulties of manipulations. A suspended nanowire used to be produced by chemical etching of a bigger wire, or bombarding a bigger wire with some highly energetic particles (atoms or molecules). Another way to produce a suspended nanowire is to indent the tip of a scanning tunneling microscope in the surface of a metal near the melting point, and retract it. Of course, such a limited production can not be a base for industrial method.

Nanowire growth in quantized vortices makes it possible not only to do their production cheaper and more productive but due to its universality may substantially expand the variety of these promising objects of nanotechnology. The vortex ability of pinning to any protuberance allows growing the wires attached to the tips of needles intentionally installed in active zone; these needles would be served as pincers for manipulation by nanowires. Important advantage of given approach is the feasibility to grow a few cm long wires.

As it was already stated the quantized vortices play a specific role only at first stage of the impurity coalescence process. It is profitable at that stage to use small densities of source material – atoms, molecules and agglomerates in order to keep the rate of filaments growth inside quantum vortices much larger than the rate of filament thickening as at the account of an impurity sedimentation from the bulk of liquid on their surface as due to entangling the separate filaments into the rope. In this case up to the exhaust of initial material the filaments will remain thin. To realize what method one has to apply for supply the material for nanowire production into superfluid helium let estimate with what amounts of matter we should deal. Let we are going to grow 10 filaments of 3 cm length with 10^3 atoms in a cross-section, that corresponds to diameter about 10 nm. Thus, we should embed to superfluid helium about 10^{12} atoms; that amount can be ablate from solid target placed inside of liquid by laser pulse with the energy around 1 μ J. At any case that is no problem to create so small number of particles.

It is difficult to say something definite about the crystalline structure of thin filaments formed such a way, but one could expect the enhanced probability for amorphous structure appearance. Both low temperature of coalesced particles and abnormally high removal of coalescence heat by superfluid helium promote stabilization particles just at the place of primary contact.

The further thickening of filaments is convenient to carry out in normal liquid helium to prevent the new quantized vortices appearance. The particles necessary for that could be introduced either by embedding atoms and molecules from a gas as we did in Ref. 6 or by laser ablation from target submerged in liquid helium; in the case of metals the effective



method of cathode sputtering in the spark organized in liquid can be used. It is important that the material sedimented to filament primarily grown in a core of quantized vortex could be different from filament material, and multi-layer filament-like structure being one-dimensional analog of epitaxial film may be created. Besides the primary nanofiber could be built up from volatile material, hydrogen for example, in order to obtain, after the core evaporation, the nanotube made of given material.

Impurity particles stabilization in a core of quantized vortex lengthens the time of their possible contact, that facilitates low-temperature tunneling chemical reactions proceeding in case of chemically active species. If the impurity fragments captured to vortex have enough large length the time of contact may be indefinitely large. In principle an aligned polymer may be grown in quantized vortex such a way.

The experiments on nickel wires growth seems to be of top-priority. Nanowires made of nickel widely studied [13]; nickel ferromagnetism allows wire levitation in liquid helium with using magnetic field: as it follows from barometric formula at temperature 1.5 K the ensembles consisted of less than 10^4 atoms are insensitive to gravity, whereas bigger agglomerates of nickel display already ferromagnetism and can be suspended by magnetic field. Such experiments are in progress in Chernogolovka group. The fact of nickel nanowire formation at the top of each from four steel needles mounted near the zone of a spark disrupted from nickel cathode will be registered by leakage current from the needle.

5. Conclusion

Above suggestions and experimental results confirm the existence of new phenomenon of catalysis of impurities condensation in superfluid helium by quantized vortices. That phenomenon results in increasing by many orders of magnitude the rate of coalescence process and in formation of filament-like structures having primarily nano-thickness. Since that fact should be valid for any impurity the phenomenon may be used as a base for the universal method for nanowires and nanotubes producing. Due to small matter consumption – 1 cc of the material is sufficient for the production of nanowires with total length of 10^7 km – the usage of principally expensive low-temperature technique is competitive with other methods, especially if one keeps in mind that liquid helium gives itself deep cryogenic purification from any contamination, usually that is realizes by expensive high-vacuum chambers and pumps applications.

Apart from the possible applications in industry the phenomenon under consideration is of significant interest for basic problems of low temperature physics and chemistry. The possibility to rule the loaded by impurities quantized vortices by using outer fields – magnetic, gravitational, etc. – seems attractive. The feasibility to create in quantized vortex at very low temperature the linear chain of spin-aligned atoms, in particular hydrogen atoms, makes it possible to elongate the ensemble lifetime at the account of three-body recombination retardation. Nowadays there are many speculations on existence at very low temperature of liquid and even superfluid state in small hydrogen clusters [14]. The creation of thin but simultaneously long hydrogen fibers where such a phenomena should take place together with real mass transfer will give a chance to reveal real fingerprints of superfluidity or simply fluidity provided they will take place. The core of quantized vortices is unique nano-reactor for low-temperature tunneling chemical reactions.



This work was supported in part by Russian Foundation for Basic Researches grant #07-03-00393. The authors are grateful to A.V. Karabulin for technical assistance and to Profs. I. Silvera (Harvard University), A. Weis (Fribourg University), and Y. Kagan (Kurchatov Centre) for valuable discussions.

References

1. R.J. Donnelly, *Quantized Vortices in Helium II*, Cambridge University Press, UK (1991).
2. L.S. Reut and I.Z. Fisher, *Sov. Phys. JETP* 28, 3758 (1969).
3. F. Dalfovo, R. Mayol, M. Pi, and M. Barranco, *Phys. Rev. Lett.* 85, 1028 (2000).
4. G.P. Bewley, D.P. Lathrop, and K.R. Sreenivasan, *Nature* 441, 588 (2006).
5. E.B. Gordon, R. Nishida, R. Nomura, and Y. Okuda, *JETP Lett.* 85, 581 (2007).
6. E.B. Gordon, L.P. Mezhov-Deglin, and O.F. Pugachev, *JETP Lett.* 19, 63 (1974).
7. G.S. Settles, *Schlieren and Shadowgraph Techniques*, Springer, USA (2001).
8. G.P. Bewley, K.R. Sreenivasan, and D.P. Lathrop, *Experiments in Fluids* 44, 887 (2008).
9. G.E. Volovik, *The Universe in a Helium Droplet*, Clarendon Press, Oxford (2003).
10. D. Kivotides, C.F. Barenghi, and Y.A. Sergeev, *Phys. Rev. B* 77, 014527 (2008).
11. R.E. Packard, *Rev. Mod. Phys.* 70, 641 (1998).
12. I.F. Silvera, *Phys. Rev. B* 29, 3899 (2008).
13. H. He and N.J. Tao, *Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology*, Stephenson Ranch, CA: American Scientific Publishers (2004).
14. S. Grebenev, B. Sartakov, J.P. Toennies, and A.F. Vilesov, *Science* 289, 1532 (2000).

Received October 31, 2008



NANOWIRE FORMATION BY GOLD NANO-FRAGMENT COALESCENCE ON QUANTIZED VORTICES IN HE II

P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Grobety, C. Neururer, E.B. Gordon, A. Weis
EPL (Europhysics Letters), 90 (2010) 34002

We demonstrate that laser ablation of a gold target immersed in superfluid and normal fluid helium leads to the formation of elongated gold nano-fragments. In the superfluid phase these nano-fragments aggregate into filaments with extremely large aspect ratios displaying metallic electric conductivity. We attribute this unusual structure to the coalescence of gold particles trapped on quantized vortices. Our observations suggest new ways to visualize the structure of quantized vortex bundles and a new approach for producing centimeter-long metal nanowires.

Superfluid ^4He (HeII) exhibits the outstanding macroscopic quantum property of superfluidity when cooled below 2.172 K. Associated with this property is the appearance of one-dimensional structures around which the fluid motion has a circulation that is quantized in units of h / m_{He} . Such vortex lines have been studied in detail for more than 50 years as reported in the comprehensive review by Donnelly [1]. More recently the flow of superfluid and normal fluid helium has received renewed attention in the context of quantum turbulence [2, 3].

Because of the strong pressure gradient in the vicinity of their core, quantized vortices can bind foreign particles. This fact has been used for the visualization of vortex bundles by the electrostatic extraction and projection of vortex-attached electrons onto a phosphor screen [4]. The pressure gradients are strong enough to attract also heavier particles, such as ^3He or other guest atoms and clusters. Because of the one-dimensional structure of the vortex line one expects [5] the formation of monoatomic chains or high-aspect-ratio filaments following the coalescence of particles on the vortex core. The formation of macroscopic filament-like structures by impurity particles suspended in superfluid helium was indeed reported by several authors [6–9] as well as the lining-up of micron-sized solid hydrogen clusters injected into normal fluid He, followed by a transition to the superfluid phase [10, 11]. No such unidimensional structures appear in normal fluid helium. All previous studies were limited to *visual observations* in the He bath only, since the filament materials were either hydrogen or alkali metals which oxidize in contact with air. The experimental results presented below suggest a new approach to this problem. By doping liquid helium with a chemically inert material that keeps its shape and properties after the helium evaporation, we were able to form solid filaments and analyze them by means of optical and electron microscopy. In doped HeII we observe the production of centimeter-long gold filaments, whose analysis reveals a very rich substructure at the nanometer scale and the formation of metallic binding. On the other hand, when the doping is done in normal fluid helium we obtain only chaotically oriented gold nanonetworks which (because of their small size) escaped observation in previous studies. Our observations open new ways for visualizing the patterns of the superfluid and normal fluid helium motion (turbulence) and for producing nanowires with extreme aspect ratios.

The experiments were performed in the experimental setup used in our previous spectroscopic studies of alkali atoms and molecules in solid ^4He matrices [12]. Atoms are



introduced into superfluid or normal fluid helium by laser ablation with pulsed frequency-doubled Nd:YAG laser radiation focused on a gold target at the bottom of a copper cell filled with normal fluid or superfluid helium, and immersed in a He bath whose temperature could be varied from 1.5 to 2.7 K. The sample can be visually inspected through four side windows, with a top window used for admitting the ablation laser beam.

In order to detect the appearance of conductive gold wires, the cell contained two vertical flat electrodes made from polished copper foil, spaced by 4 cm. During laser ablation the electrical resistance between the electrodes and between the electrodes and the cell walls (kept at ground potential) was monitored. All wires produced during laser ablation in superfluid helium eventually fall onto 0.5 mm thick microscope slides and carbon-coated copper grids arranged at the bottom of the cell. In this way the wires could be removed after warming up the cryostat and investigated in detail by means of optical, scanning (SEM) and transmission (TEM) electron microscopy. For the SEM analysis the gold microstructures were stabilized on the glass slides by covering them with a 1.5 nm thick carbon film; for the TEM study we use the material collected directly on the carbon-coated copper grids. The chemical composition of the nanofibers was analyzed by energy-dispersive spectroscopy (EDS, EDAX attached to the SEM). X-ray spectra recorded at an acceleration voltage of 10 kV revealed a small copper contamination. The latter probably comes from the cell walls or the target holder occasionally hit by the ablation laser. All other impurities present in the cell or in the He gas at the temperature of the experiment were frozen at the cell walls and did not contaminate the sample.

A first indication for the appearance of nanowires was obtained by measuring the electric conductivity of gold-doped superfluid He. A typical measured time dependence of the electric conductance between an electrode and the cell wall is shown in fig. 1. The conductance was less than $100 \text{ M}\Omega^{-1}$ before firing the first laser pulse and starts to grow approximately 250 seconds after switching on the ablation laser (firing at a rate of 10 Hz). The unaided eye cannot observe any objects in the helium during that phase. Figure 1 also shows that the conductance increase comes to a halt within a few seconds after switching off the laser. We have applied several series of laser ablation pulses, each about one hour long ($T = 1.5\text{--}2.0 \text{ K}$, $p = 2\text{--}25 \text{ Bar}$). At the end of every series each electrode was found to

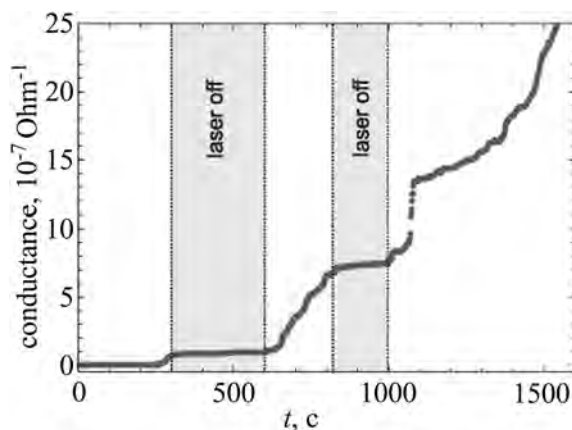


Fig. 1. (Colour on-line) Electric conductance of gold nanowires in superfluid helium ($T = 1.5 \text{ K}$, $p = 22 \text{ bar}$) during laser ablation, initiated at time $t = 0$



be electrically connected to the cell walls with a resistance R_f of 30–200 k Ω . Assuming that the filaments have no contact resistance with the electrodes and the cell walls, that the filament(s) has (have) a length of 1 cm (the shortest electrode-wall distance), and that the filament resistivity is that of bulk gold, the resistance R_f corresponds to a filament cross-section of 10–70 nm². In fact, at the end of the ablation process the gold filaments had a much larger thickness and could easily be seen by unmagnified visual inspection. It is therefore likely that the measured resistance represents mainly contact resistance(s).

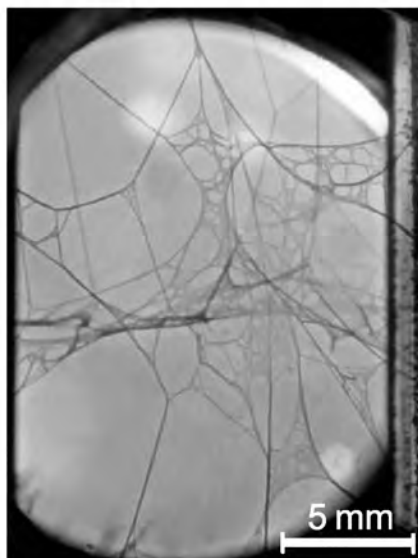


Fig. 2. (Colour on-line) Photograph taken through the 20 mm diameter side window of the pressure cell at the end of a laser ablation series with a copper target in superfluid helium

A photograph taken through a side window of the pressure cell at the end of the experimental run is shown in fig. 2. One clearly sees a spider-web-like structure made of several thick wires. The characteristic length of each wire is comparable to the cell dimensions. Changing the helium pressure in the cell and, in particular the He solidification at 26 Bar breaks the thinner wires or detaches them from the cell walls and the electrodes, as can be monitored by conductance measurements. However, the thicker wires in fig. 2 do survive several helium solidification-melting cycles and are detached/destroyed only by several pulsed admissions of He gas into the cell, which produce an abrupt pressure and temperature increase. We have obtained very similar web structures in a series of ablation experiments with gold, copper, barium, cesium, and rubidium. In particular, the web shown in fig. 2 is made of copper. The electron microscopy studies described below were carried out only on gold samples. One can expect that the nanostructures formed by different metals are very similar.

The filaments collected after the warming of the cryostat were analyzed by optical, secondary electron (SEM) and transmission electron (TEM) microscopy. A typical low-resolution optical microscope image of a thick wire is shown in fig. 3(a). Already at this low magnification it becomes apparent that the wires are in fact bundles formed by a large number of much thinner filaments. Typical SEM images recorded with electron energies of 10keV are shown in fig. 4. In the lowest-magnification image (fig. 4(a)) a very dense web-like structure is visible that is made from a large number of fibers containing inclusions of spherical particles with diameters of some 100 nm. Figures 4(b)–(d) show higher-resolution SEM images of different parts of this web structure. It is difficult to infer the diameter of individual fibers from these SEM images because of the carbon coating that was used to fix the sample onto the substrate. However, the nanowires are seen to be entangled and to form thicker ropes, as shown in fig. 4(b). The thickness of those ropes may be as large as 100 pm (fig. 2) and they become visible to the naked eye. The characteristic length of an individual nanowire is larger than the width of the scan in fig. 4(b), i.e., $> 3 \mu\text{m}$, whereas a rope typically has a length comparable to the cell dimensions,



Fig. 3. Optical microscope images of gold filaments and particles deposited during the laser ablation in superfluid He at 1.5 K (a) and in normal fluid He at 2.7 K (b)

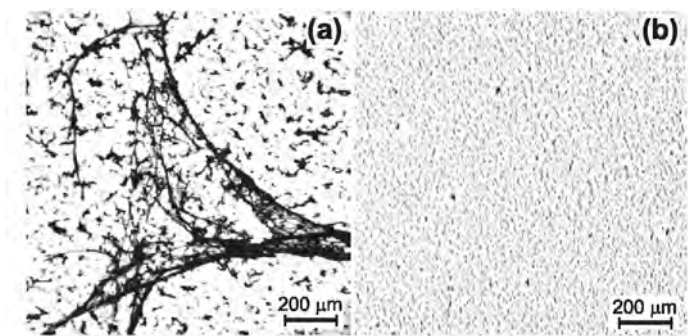


Fig. 4. (Colour on-line) SEM images of gold nanowires produced in superfluid He at 1.5K, removed from the pressure cell and stabilized on a glass surface by a carbon film

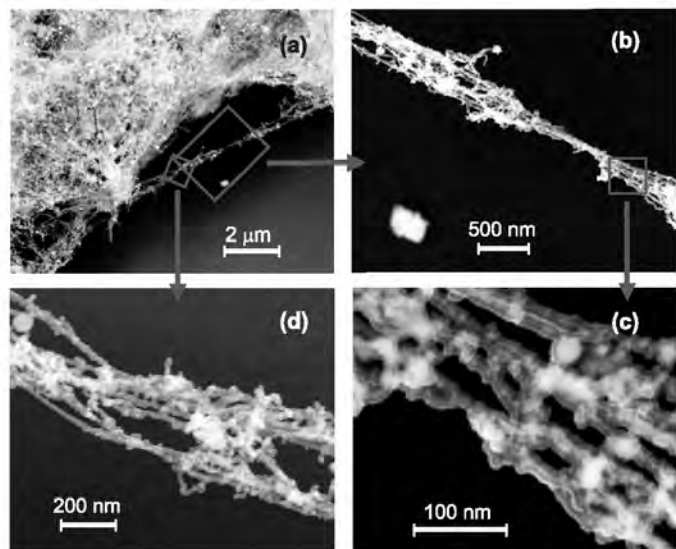
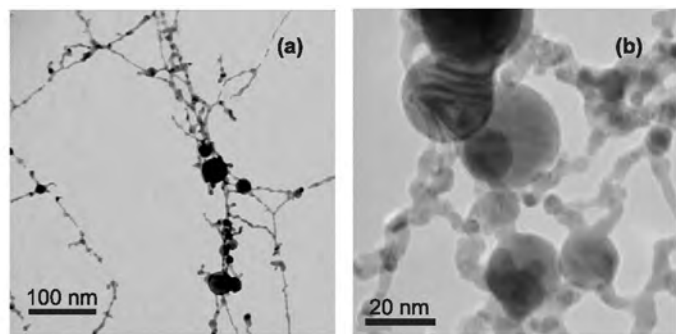


Fig. 5. Typical TEM BF images of gold nanowires and spherical nanoparticles deposited on a carbon-coated copper grid in superfluid helium



i.e., ≈ 6 cm. It is thus conceivable that the length of a nanowire – when produced under more controlled conditions – can reach several centimeters and will be limited only by the container size.

Typical bright-field (BF) TEM images are shown in fig. 5. Diameters of individual wires range from approximately 1.5 to 6 nm. The thinnest parts of the wires do not survive electron bombardment in the microscope. They are severed, leaving behind typical gaps along the wire (fig. 5(a)). Spherical gold nanoparticles are irregularly distributed along the



wires. Selected-area electron diffraction (SAED) patterns taken from a web-like part of the sample can be indexed for the fcc (face-centered cubic) crystalline structure of gold (fig. 6(a)). The diffraction rings are broad due to the very small size of the wires. SAED patterns taken from individual wires (fig. 6(b)) indicate that the crystallographic orientation may vary along the wire. It is well known that the crystalline structure of gold nanowires changes progressively with decreasing radius. For a wire with a 2 nm diameter, Kondo and Takayanagi have deduced [13] that the core has a fcc structure, whereas the surface layer is restructured in a hexagonal symmetry. Wires smaller than ≈ 1.5 nm have a two- or three-layer shell structure [14]. It is likely that such non-fcc structures also occur in the present experiment in the thinnest sections of the wires.

In order to elucidate the role of quantized vortices in the nanowire formation, we have carried out the same experimental protocol in normal fluid helium at 2.7 K. No quantized vortices exist under those conditions, however, it is likely that the thermal convection from the heat deposited by the ablation laser creates a strongly turbulent flow of liquid helium in the vicinity of the ablation target. In agreement with earlier experiments, no filament formation could be observed in normal fluid helium even after several hours of laser ablation. A typical optical microscope image of deposited material is shown in fig. 3(b) and supports the visual observations. The laser ablation in the normal fluid produces gold particles that are smaller than those obtained in the superfluid (fig. 3(a)) and more uniformly distributed on the substrate. However, the electron-microscopy analysis of the deposited material reveals a very interesting picture. A characteristic SEM image is shown in fig. 7(b). Rather than nanowires organized in thick ropes one observes a large number of relatively short elongated nanoscopic fragments randomly scattered on the substrate and forming a nano-network. For a comparison, another SEM image of the material deposited

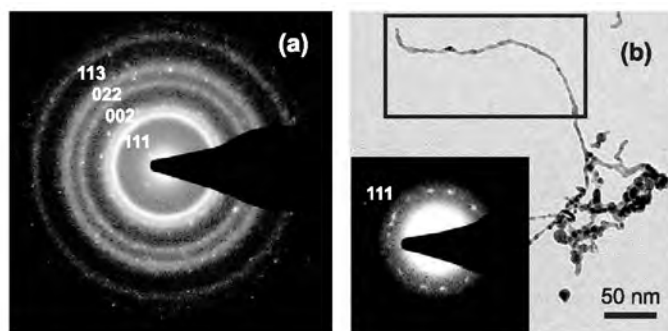


Fig. 6. (a) SAED pattern of a gold nanowire produced in superfluid helium; (b) individual gold nanowire (box) with corresponding SAED pattern (inset)

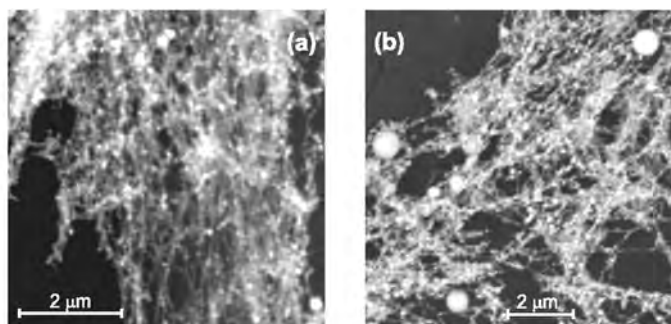


Fig. 7. Comparison of nano networks produced in superfluid helium at 1.5 K (a) and in normal fluid helium at 2.7 K (b)



in superfluid helium is shown in fig. 7(a). The characteristic thickness of individual nano-fragments produced in normal fluid He is quite similar to that of a nanowire produced in the superfluid. In fact, at a submicrometer scale one hardly can distinguish the structures produced in the two phases.

Laser ablation of metals in liquid helium produces a large number of metallic clusters [7, 15, 16] that dominate over the number of isolated atoms. We have determined earlier the diameters of metal clusters to lie in the range of 10–100 nm [16], comparable in size to the spherical gold nanoparticles shown in figs. 4 and 5.

The nanoparticles created by laser ablation can be dissociated into atoms and dimers by a second sputtering laser, a method that we have used for our spectroscopic studies of atomic and molecular impurities in liquid and solid He [12]. We have confirmed the presence of Au atoms and Au₂ molecules in our experimental cell via their laser-induced fluorescence spectra [17]. The typical diameters (≈ 5 nm) of the gold nanowires make us assume that they are formed from individual Au atoms and/or very small clusters extracted by the ablation laser either from the target surface or from larger nanoparticles in the superfluid matrix. The latter process should be particularly efficient since the wavelength of the ablation laser (532 nm) is very close to the plasmon resonance of gold nanoparticles [18].

Nano-fragments of comparable sizes are produced in large numbers both in the normal and superfluid phase of liquid helium. We therefore conclude that the microscopic mechanism of the nanowire formation is not specific for the superfluid phase, as it has been assumed before [5, 9–11].

Metal atoms in condensed He reside in nanometer-sized cavities, so-called atomic bubbles [12]. He atoms with their closed electronic shells are expelled from the volume occupied by valence electrons of the metal atom because of the Pauli principle. Similar bubbles are formed by free electrons in superfluid He. The ablated metal atoms, or rather the associated atomic bubbles can move together with the flow of liquid helium. In superfluid helium they can be trapped by a quantized vortex because of the radial pressure gradient

$$\frac{dp}{dr} = \frac{\rho_s v_s(r)^2}{r} = \frac{\rho_s \Gamma^2}{4\pi^2 r^3}, \quad (1)$$

produced by the motion of the superfluid around the vortex core [1, 19, 20], where ρ_s and $v_s(r)$ are the superfluid density and velocity, and $\Gamma = h/m_{\text{He}}$ is the quantum of circulation.

We suggest that in the normal fluid phase a similar mechanism may exist due to the presence of eddy currents in the turbulent flow around the ablation target that is strongly heated by the laser. The lifetimes of these eddies, their stability and their typical lengths are much smaller than those of quantized vortices in the superfluid. Nanofragments thus cannot aggregate into high-aspect-ratio ropes and macroscopic filaments. More experimental and theoretical work is needed in order to clarify the nanowire formation mechanism. We hope that our experimental findings will attract the attention of theoreticians and can advance the understanding of the motion of quantum fluids and in particular of quantum turbulence.



In conclusion, we have demonstrated that laser ablation from metal targets in superfluid and normal fluid ^4He results in the formation of spherical and elongated nanoparticles with very large aspect ratios. In the superfluid phase these nanowires reach particularly large lengths and become entangled to form macroscopically large filaments. We suggest that the nanowires are formed by the pressure-gradient-driven coalescence of the clusters and nano-fragments produced by the ablation onto quantized vortex lines and/or normal fluid eddies.

This work was supported by grant No. 200020-119786 of the Swiss National Science Foundation. EBG thanks the University of Fribourg for hospitality and the Light & Matter (LiMat) collaboration for financial support. We acknowledge stimulating discussions with J.P. Toennies and C.A. Stafford.

References

1. Donnelly R.J., *Quantized Vortices in Helium II* (Cambridge University Press, Cambridge) 1991.
2. Vinen W.F. and Niemela J.J., *J. Low Temp. Phys.*, 128 (2002) 167.
3. Niemela J.J. and Sreenivasan K.R., *J. Low Temp. Phys.*, 143 (2006) 163.
4. Yarmchuk E.J., Gordon M.J.V. and Packard R.E., *Phys. Rev. Lett.*, 43 (1979) 214.
5. Gordon E.B. and Okuda Y., *Low Temp. Phys.*, 35 (2009) 209.
6. Silvera I.F., *Phys. Rev. B*, 29 (1984) 3899.
7. Fujisaki A., Sano K., Kinoshita T., Takahashi Y. and Yabuzaki T., *Phys. Rev. Lett.*, 71 (1993) 1039.
8. Arndt M., PhD Thesis, Ludwig Maximilians Universität München, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching (MPQ-Report 197) 1995.
9. Gordon E.B., Nishida R., Nomura R. and Okuda Y., *J. Exp. Theor. Phys. Lett.*, 85 (2007) 581.
10. Bewley G.P., Lathrop D. and Sreenivasan K.R., *Nature*, 441 (2006) 588.
11. Paoletti M.S., Fiorito R.B., Sreenivasan K.R. and Lathrop D.P., *J. Phys. Soc. Jpn.*, 77 (2008) 111007.
12. Moroshkin P., Hofer A. and Weis A., *Phys. Rep.*, 469 (2008) 1.
13. Kondo Y. and Takayanagi K., *Phys. Rev. Lett.*, 79 (1997) 3455.
14. Kondo Y. and Takayanagi K., *Science*, 289 (2000) 606.
15. Beijersbergen J.H.M., Hui Q. and Takami M., *Phys. Lett. A*, 181 (1993) 393.
16. Moroshkin P., Hofer A., Ulzega S. and Weis A., *Nat. Phys.*, 3 (2007) 786.
17. Moroshkin P., Lebedev V., Gordon E.B., Toennies P. and Weis A., in preparation (2010).
18. Mafune F., Kohno J., Takeda Y. and Kondow T., *J. Phys. Chem. B*, 107 (2003) 12589.
19. Berloff N.G. and Roberts P.H., *Phys. Rev. B*, 63 (2000) 024510.
20. Kivotides D., Barengi C.F. and Sergeev Y.A., *Phys. Rev. B*, 77 (2008) 014527.

received 9 April 2010;
accepted 27 April 2010
published online 10 May 2010



STRUCTURE OF METALLIC NANOWIRES AND NANOCLUSTERS FORMED IN SUPERFLUID HELIUM

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos
ЖЭТФ, 112 (2011) 1061–1070

It is shown that metallic nanowires (5–8 nm in diameter) that form during laser ablation of Ni, Pb, In, and Sn targets embedded in HeII contain extended single-crystal segments, while spherical clusters (about 2 μm in diameter) that form under these conditions have a regular shape and an atomically smooth surface. Such structures are explained by melting of metal ablation products under their coalescence in HeII. The short-term action of a low-intensity beam of electrons with an energy of 200 keV initiates the explosion in metallic spheres preserved in the vacuum chamber of a transmission electron microscope, which is accompanied with the formation of thousands of clusters with a diameter of a few nanometers. This effect is due to metastability of internal mechanical stresses produced upon sharp cooling of molten spheres by liquid helium. A mechanism of condensation of atoms and nanoparticles in quantized vortices of superfluid helium is proposed.

Introduction

The formation of long crystal whiskers of hydrogen isotopes, which behave like quantized vortices, was detected in [1] using schlieren photography upon the introduction of a powerful gaseous helium jet containing traces of an equimolecular hydrogen–deuterium mixture into superfluid helium. In normal liquid helium at a temperature above $T_\lambda = 2.19$ K, only spherical hydrogen particles suspended in the liquid were observed. These observations led to the conclusion [1, 2] that the specific mechanism of fast bulk condensation of any microimpurities suspended in liquid superfluid helium should exist being a consequence of impurity capture into the core of quantized vortices. Nanoparticles trapped into a vortex can move freely along its core. This was demonstrated for the first time in experimental work [3], in which a quantized vortex in HeII captured ions. The ions moved in an electric field along the vortex to the surface of the liquid and ultimately reached a phosphorescent screen fixing the position of the vortex line owing to luminescence. For this reason, the particles that stabilized in the vortex core have a high probability of mutual collisions leading to coagulation, while the resultant increase in cluster size in turn increases its lifetime in the vortex and, hence, the local concentration. As a result of such selfacceleration, the entire process of condensation must ultimately be entirely concentrated in vortices. In view of the small transverse size of the vortex core (about 1 Å), extremely thin, long filaments must be the primary product of condensation. These filaments can be subsequently twisted into “ropes”; it is these micrometer-thick ropes that were observed in [1].

To confirm the hypothesis put forth in [1, 2], we performed experiments on growing metallic nanowires in superfluid helium. Such filaments could be preserved during heating to room temperature to be subsequently studied by electron microscopy. It was predicted in [2] that the filaments formed in HeII (as well as the vortices generating them) can be pinned to needle electrodes introduced into the reaction zone. In this case, the electric characteristics of the metallic nanowires just formed in superfluid helium can be measured.



In experiments, atoms and small clusters of metals were produced in the bulk of superfluid helium by laser ablation from the surface of metallic targets immersed in HeII, and vortices were generated due to cavitation in the region of focusing of the pulsed laser beam. Experiments were simultaneously performed at Fribourg University (Switzerland) on gold and copper as the objects [4] and at the Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (Chernogolovka), where nickel, indium, and lead wires were studied [5]. It was found that in all cases, long bundles of nanowires with diameters from 1.5 to 7 nm (depending on the type of metal) were formed in liquid helium. Some of these nanowires were in fact pinned to metallic point electrodes, thus closing the electric circuit [4, 5]. This enabled us to take electric measurements during the growth of nanowires in superfluid helium, as well as upon subsequent heating in liquid and then gaseous helium [5]. We observed size effects typical of thin metallic nanowires, i.e., a strong decrease in resistivity, a temperature shift of the superconducting transition for superconductors (downward shift for lead and upward shift for indium), and a high efficiency of field emission of electrons [5].

The structure of metallic nanowires shows that the process of their formation in superfluid helium differs from the formation of filamentary hydrogen crystals [1] and is more complicated than the simple mechanism proposed in [2]. Above all, in contrast to hydrogen, for which only filamentary crystals were observed below the λ point, metals in sediments were found to contain a large number of comparatively large spherical clusters [4]. In addition, individual nanowires do not resemble the weaving pattern of thinner nanowires as predicted in [2].

2. Experiment

To clarify the structure of metallic nanowires and nanospheres and to establish the possible mechanism of their formation in superfluid helium, we analyzed the products of condensation of various metals using optical and electron microscopy.

Experiments were performed on the setup described in [5]. The block diagram of the optical cryostat and experimental cell is shown in Fig. 1. Liquid helium was poured simultaneously into helium bath 2 and low-temperature vessel 1 connected by thin-walled capillary 4. Helium vapor was evacuated from the vessel and from the helium bath simultaneously or separately. The position of the liquid helium level in the vessel containing the cell could be varied at any pressure of helium vapor by manipulating evacuation and using (for HeII) a heater 5 installed near the bottom of the helium bath due to passing of the liquid from the vessel to the tank and back. We studied nanowires pinned to the vertical array of electrodes 7 separated from one another by 3 mm. Electric voltage was applied between even and odd electrodes. A part of the nanowires formed in experiments closed the electric circuit, while another part fell on the microscope slide 9 located at the bottom of the cell.

The temperature dependence of the sample resistance was measured by a graduated copper-copper-iron thermocouple. Microscopic studies were mainly performed on fragments of bunched wires that sank to the bottom, although electron-diffraction patterns were also obtained from fragments of nanowires pinned to one of the electrodes, which could be placed into a JEM-2000FX transmission electron microscope (TEM).

For ablation of metals, we used a low-power pulsed fiber ytterbium laser (wavelength 1.06 μm , pulse duration 25 ns, energy per pulse about 0.17 mJ, and pulse repetition rate up



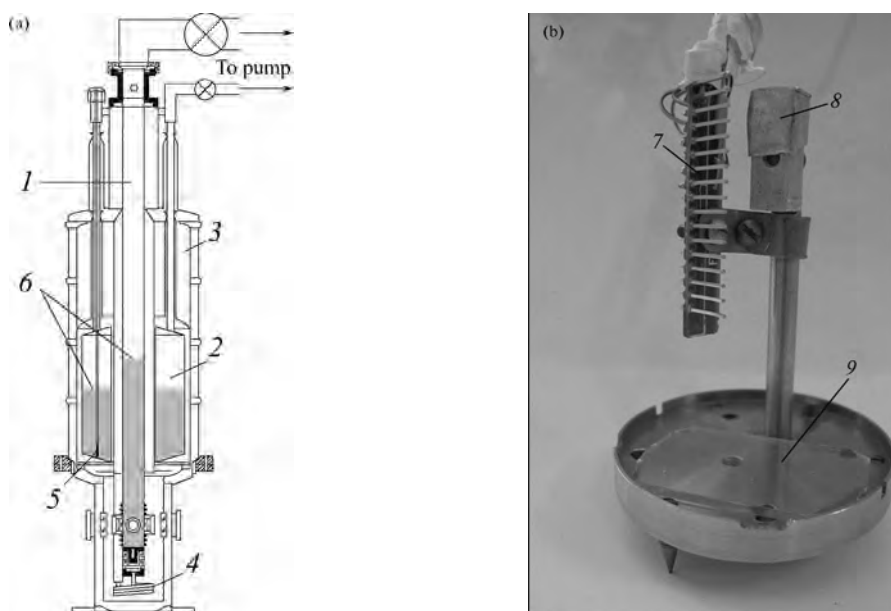


Fig. 1. (a) Optical cryostat and (b) experimental cell: 1 – inner vessel; 2 – helium bath; 3 – nitrogen tank; 4 – thin-walled capillary connecting the vessel with the helium bath; 5 – heater; 6 – liquid helium levels in the vessel and in the bath; 7 – vertical array of electrodes, 8 – target; and 9 – glass slide

to 2 kHz). Irradiation was carried out through the cryostat window; the laser beam was focused on the surface of target 8 (see Fig. 1), and focusing was performed visually from the plasma luminescence near the target surface.

The objects of investigation were indium, tin, lead, and nickel. The features of the structure and the structure of the condensation products in HeII were found to be close for all metals. For this reason, we consider here only the data for indium, which exhibited the superconducting transition in a convenient range of helium temperatures and was not oxidized in air during its transportation to microscopes.

After heating of the cell to room temperature, the microscope slide was photographed with a magnification of up to $1000\times$ on the Imager.A1 transmission optical microscope (Zeiss) at the Institute of Problems of Chemical Physics. The highest density of sediments on the slide was observed in a region approximately 5–7 mm in diameter directly under the ablation zone of the target. As can be seen from Fig. 2a, the main product of the sediment on the bottom of the cell was formed by spherical particles of micrometer and submicrometer size. It can be seen that particles are located approximately equidistantly on certain smooth curves. At the periphery, where the condensation products preliminarily attached to the electrodes accumulated, the sediment density was lower and sediments mainly consisted of millimeter-long bunched nanowires. In visible light, these bundles are manifested as blurred low-contrast images typical of objects with a size smaller than the diffraction limit.

These results are close to a certain extent to the results obtained for hydrogen embedded in superfluid helium. When hydrogen molecules were introduced into HeII, they stuck together into long filaments [1, 2], while spherical hydrogen clusters were not formed at all [2]. If, however, liquid helium containing suspended hydrogen clusters



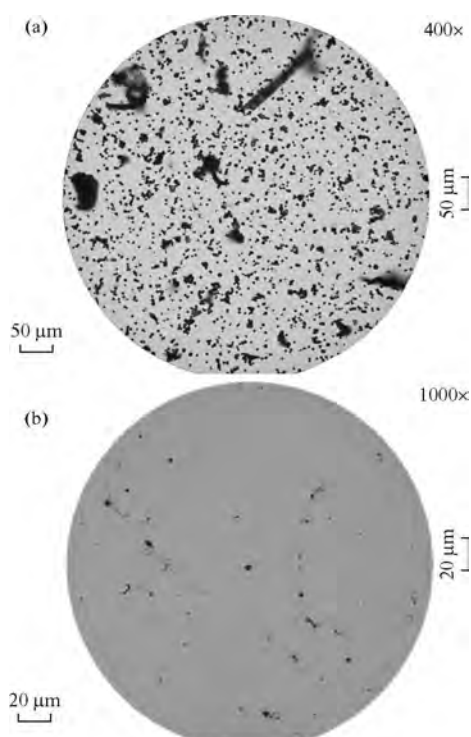


Fig. 2. Photographs of the slide: (a) region directly under the target; magnification 400 $\times$; (b) at a distance of 12 mm from the center, magnification 1000 $\times$. The photographs were made on the Imager.A1 transmission microscope (Zeiss) for indium

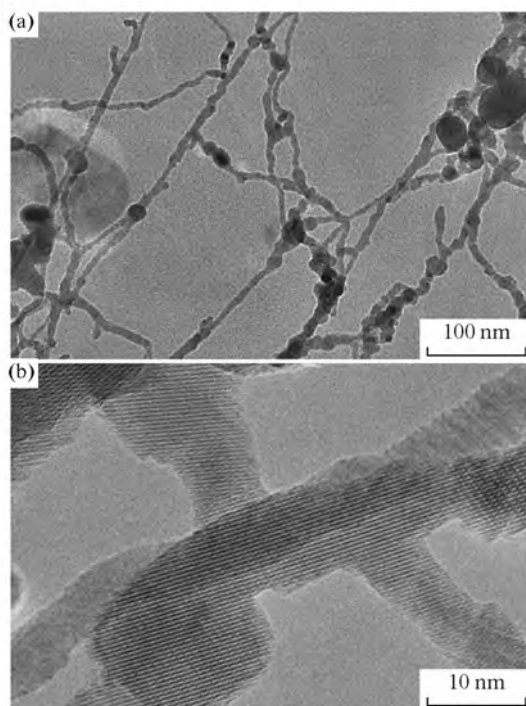


Fig. 3. TEM images of a bundle of indium nanowires: (a) general view; (b) view under a large magnification demonstrating the structure of assembly of nanoclusters

several micrometers in size was transformed to the superfluid state by cooling, these clusters did not coalesce, but were aligned along quantized vortices at the same distance from one another [6, 7]. In the case of metals, spherical micrometer-size clusters did not stick together either, but were aligned equidistantly. However, the separation between particles in the latter case was only 3 times as large as their diameter, while this distance for hydrogen was 20 times larger than the particle diameter [7].

For TEM observations, sediment fragments were transferred from the slide to the electron microscope grid by pressing it to the slide. Figure 3a shows a fragment of a bundle of indium nanowires. For gold [4] as well as for other metals under investigation [5], the bundle consisted of nanowires of a nearly cylindrical shape and approximately the same diameter; these wires were connected to one another to form a grid structure. Under high magnification, the image of the crystal lattice in the form of a system of fringes could be observed. The separation between the fringes and their direction were the same for each nanowire (i.e., each wire was a filamentary single crystal). Even in the case of “branching” of a wire, the direction of the interference fringes could be preserved as follows from Fig. 3b.

As regards spherical particles, it can be seen from Fig. 4a that they have a perfectly regular shape. Figure 4b shows the edge of an indium sphere under a high magnification.



Since the microscope resolution (0.19 nm between points) makes it possible to judge the shape of the surface at the atomic level, indium (including its nanowires [8]) at room temperature has a body-centered hexagonal packing with lattice parameters $a = 0.325$ nm and $b = 0.495$ nm [9]; we can conclude from Fig.4b that the surface of spherical clusters is atomically smooth.

Both the single-crystal structure of nanowires and the perfect spherical shape of micrometer metallic clusters can be explained if we assume that they are formed by molten metal. Under the action of nanosecond laser pulses on the metallic target, a gas bubble is formed in the liquid near the laser focus, so that evaporation of the metal and the first phase of its condensation occur in the gas. Experiments [10] and kinetic analysis [11] show that the characteristic size of primary clusters formed by laser ablation into gaseous helium is on the order of a nanometer with a tendency to decrease with the energy density of laser radiation. Therefore, the formation of micrometer-size liquid clusters just during laser ablation of a metal in liquidhelium should be ruled out. Further transformation of ablation products (now in liquid helium) was not considered in the literature; however, it was shown in experimental work [12] that laser ablation products in solid and liquid helium were atoms, molecules, and predominantly nanoclusters. It is impossible to obtain an ideal surface by simple adhesion of these solid clusters into a larger cluster, the more so that the X-ray diffraction pattern demonstrates that a micrometer-size spherical cluster is a single crystal.

In nanowires, the existence of strong deviation from equilibrium at low temperatures could be admitted, and their single-crystal structure could be formed not immediately, but as a result of spontaneous melting upon an increase in temperature and especially during evaporation of liquid helium. The behavior of the bundle of tin nanowires observed in our experiments is evidence against this hypothesis. We discovered that the transition from the superconducting to the normal state in these wires occurs near the boiling point of liquid helium ($T_c = 3.72$ K for a bulk sample).

Figure 5 shows the results of measuring the resistance of a bundle of nanowires closing the gap between neighboring electrodes with the help of the following procedure. The pumping of helium vapor was stopped, the vessel was slowly heated, and beginning from $T = 4.2$ K, the helium bath was connected to the gas helium system; liquid helium was ex-

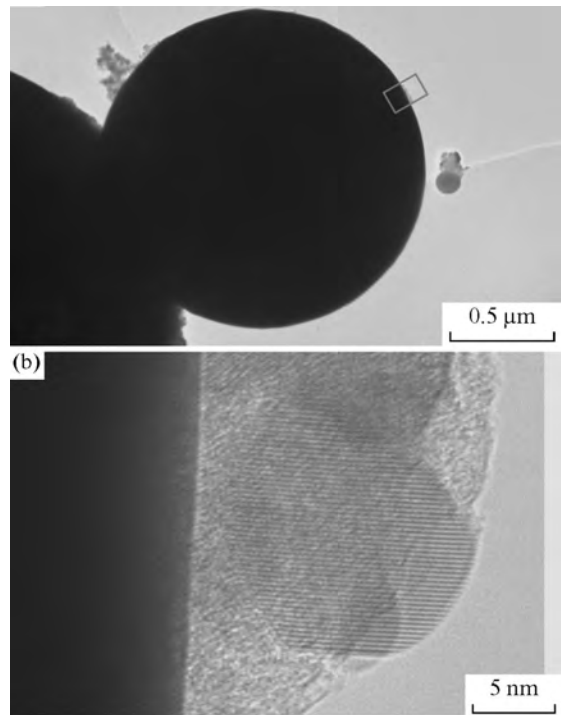


Fig. 4. (a) Spherical indium cluster 2 μm in diameter and (b) a part of its surface (shown by the rectangle) under a large magnification. The region with an indium crystal stuck to the sphere (right-hand side of the photograph) was chosen specially to demonstrate the microscope resolution (distance between interference fringes is 0.3 nm)



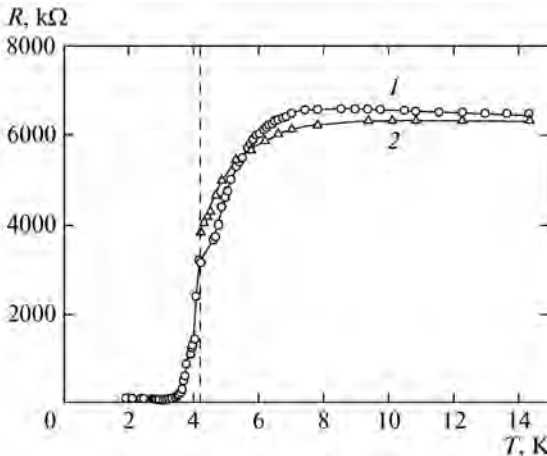


Fig. 5. Temperature dependence of the resistance of a bundle of 3-mm-long tin nanowires. Curve 1 was obtained during self-heating from 4.2 K in liquid helium and then in gaseous helium under atmospheric pressure. Curve 2 corresponds to self-heating of the same sample after its repeated immersion into liquid helium at $P = 1$ bar

pelled from the vessel containing the experimental cell to the bath by the excess pressure of helium vapor. The sample was heated in the gas to 15–20 K; then the helium bath was disconnected from the gas helium system and the vessel was connected to it. As a result, liquid helium returned to the vessel. After its level rose above the level of the sample, the procedure of slow self-heating was repeated. Satisfactory reproducibility of the strong temperature dependence of the resistance (determined by the passage through the phase-transition region from the superconducting state) indicates that after heating of the sample in the gas, its crystalline structure remained unchanged.

3. Melting of metal in HeII

It is well known that small metallic clusters in vacuum melt during merging, but the very possibility of melting of metals in liquid superfluid helium appears as paradoxical at first glance in view of the abnormally high thermal conductivity of superfluid helium [13]. Condensation of microscopic impurities occurring in superfluid helium has always been treated as an isothermal process, and the structure of the products was treated as amorphous because it was assumed that atoms and clusters remain at the sites to which they stuck [14]. The high quantum thermal conductivity of superfluid helium is observed, however, only for rather small values of heat fluxes (up to a few watts per square centimeter) [15]. It should be emphasized that only heat transfer through a macroscopic surface has been studied as yet; heat transfer from nanosize objects to surrounding liquid helium may have some peculiarities. In particular, the effect of total internal reflection of phonons from the metal-helium interface with a curvature comparable with the reciprocal lattice constant, which determines the Kapitza resistance, requires special investigation. The origin of thermal coupling between the object in the vortex core and the bulk of the liquid is not clear either.

A decrease in size should apparently worsen the heat transfer; for this reason, we will use in our estimates the results of experiments in which micrometer-thick wires in superfluid helium were heated electrically to high temperatures. In [16], a tungsten wire 10 μm in diameter had a temperature of about 1.5 K up to the consumed electric power corresponding to the heat flux of 10 W/cm^2 from its surface, and its current-voltage characteristic corresponded to a constant resistance of 2.5 Ω . A further increase in the applied voltage led to an abrupt increase in the temperature of the wire to 1100 K, and its resistance increased sharply. Beginning from this power, the wire in liquid helium was surrounded by an insulating gas jacket of evaporated helium. Radiation loss amounting at



1100 K to 7.3 W/cm in accordance with the Stefan-Boltzmann law constituted a considerable part of the steady-state heat flux to the surrounding helium, which was equal to the electric power $W = 8.5 \text{ W/cm}^2$ consumed under these conditions. Thus, we can assume that heat transfer from a heated body to surrounding superfluid helium for heat fluxes above 10 W/cm^2 is strongly hampered up to characteristic diameters of the body on the order of 10^{-3} cm .

We now estimate the scale of heating rates ensuring melting during adiabatic coalescence of two spherical metallic clusters consisting of 1000 atoms. If the required amount of heat is released due to the formation of new chemical bonds, the limiting factor is the time of propagation of a melting wave that has a velocity on the order of 10^4 cm/s under low superheating [17]. Considering that the melting point is $T_m \approx 500 \text{ K}$ and the cluster diameter is 3 nm, we find that the heat flux from the cluster surface to the surrounding liquid helium, which is required to prevent melting, must exceed 10^6 W/cm^2 . Naturally, superfluid helium surrounding the cluster cannot withstand such a flux and evaporates, forming an insulating gas envelope.

The substantial difference between the maximal power required for quantum heat conduction and the conventional heat release rate under chemical transformations indicates that superfluid as well as normal liquid helium is a reliable thermal insulator (especially under the low vapor pressure typical of HeII) for almost all exothermal chemical reactions in small clusters. Naturally, it is important that the energy stored in the cluster be sufficient for the formation of a thick gas envelope around it. In this respect, helium has an obvious advantage over other inert gases for which the evaporation energy is many times higher and the vapor density over the liquid cannot be as low as above superfluid helium. Such a thermal insulation of particles in the liquid state is possible in superfluid helium only for substances for which the saturated vapor pressure over the liquid is quite low; metals and oxides are obviously such substances. At the same time, intense evaporation from the liquid surface to the gas is an effective cooling mechanism for hydrogen, inert gases, organic substances, and water; this mechanism is analogous to a certain extent to heat transfer in superfluid helium.

We now estimate the maximal size of a metal cluster for which the energy released during coalescence of two cold spherical clusters is sufficient to form a product cluster in the molten state (in which it naturally assumes a spherical shape), reasonably disregarding heat losses. The table contains thermodynamic data for the following quantities for a number of substances of interest to our analysis:

(i) specific surface energy Δw_s defined (disregarding the curvature that makes a significant but not decisive contribution) as

$$\Delta w_s = \frac{1}{2} Q_b a, \quad (1)$$

where Q_b is the evaporation heat of the metal and a is the thickness of the monolayer ($a \approx 0.4 \text{ nm}$);

(ii) specific energy w_m that must be transferred to the metal for its heating from $T = 1.5 \text{ K}$ to melting point T_m and subsequent melting. This also concerns the condensation of inert gases containing small impurities of chemically active substances (atoms and free



radicals) in liquid helium. For their initial relative concentration of 0.1% in the solid condensate, the heat flux emerging during recombination of a pair of atoms for 100-nm clusters is 10^3 W/cm^2 . For this reason, the temperature at the cluster surface turns out to be substantially higher than the temperature of the surrounding liquid. This fact, which was disregarded in [18] in deriving the stability conditions for a power-consuming system, considerably facilitates thermal explosion and thus reduces the attainable concentrations of atoms stabilized in HeII.

$$w_m = C_p T_m + Q_m, \quad (2)$$

where Q_m is the heat of melting and C_p is the heat capacity of the solid. Generally speaking, the specific heat of melting as well as the melting point of the nanowire can be noticeably lower than for the bulk metal [19], but we disregard this effect. We also assume that the atomic density of the metal is independent of the temperature and the phase state.

Under the above assumptions, two cold spherical clusters of radius r merge into a spherical cluster of radius $R = 2^{1/3} r$ if

$$\begin{aligned} W_m &\equiv w_m V_R = \frac{4}{3} \pi R^3 (C_p T_m + Q_m) \leq \Delta W_s \\ &\equiv w_s \Delta S = 4\pi R^2 a \cdot 0.26 Q_b, \end{aligned} \quad (3)$$

where V_R is the volume of the resultant cluster and $\Delta S = 4\pi R^2 (2^{1/3} - 1)$ is the change in the surface area as a result of coalescence. Denoting

$$\alpha \equiv Q_b / (C_p T_m + Q_m), \quad (4)$$

we obtain from relation (3) the required estimate of the maximal radius of a spherical cluster formed as a result of coalescence of two cold spherical clusters:

$$R \leq R_s^{\max} \equiv 0.78 \alpha a. \quad (5)$$

Thermodynamic data for some chemical substances (ΔH_m and T_m are the melting heat and temperature, C_p is the heat capacity [21]) and values of dimensionless parameter α calculated on their basis by formula (4); $R_s^{\max}$ is calculated by formula (5), and $R_w^{\max}$ is calculated by formula (8)

Substance	ΔH_m , kJ/mol	T_m , K	C_p J/(mol K)	ΔH_b , kJ/mol	α	$R_s^{\max}$, nm	$R_w^{\max}$, nm
Indium	3.27	430	26.7	226	7.66	1.8	2.3
Nickel	17.8	1726	25.8	380.6	3.05	0.7	0.9
Tin	7.07	505	26.36	290.4	7.12	1.6	2.1
Lead	4.78	600	26.44	179.5	4.34	1.0	1.3
Copper	13.0	1356	24.52	304	3.28	0.78	1.0
Gold	12.8	1336	25.23	324.4	3.49	0.78	1.0
Tungsten	35.2	3653	24.8	799	3.18	0.74	0.95
Hydrogen	0.117	13.96	28.8	0.904	0.87	—	—
Water	6.03	273	75.15	40.7	0.77	—	—



The values of $R_s^{\max}$ for various substances are given in the table; the typical values of diameters for casting metals are from 2.0 to 3.5 nm, while the corresponding values for refractory metals are about 1.5 nm. The energy of affinity of such spheres to a vortex can be estimated as $E_a = 20$ to 40 K [2]; at experimental temperature $T \approx 1.5$ K, these spheres are noticeably concentrated at the cores of quantized vortices. Mutual collisions of cold spheres with a radius exceeding $R_s^{\max}$ cannot lead to the formation of a spherical cluster any longer; however, the spheres can merge together to form extended structures which, being subsequently captured into a vortex, tend to orient themselves along its axis. In the case illustrated in Fig. 6, the amount of metal molten in the vicinity of the contact is sufficient for transformation of spheres into a cylinder. Thus, sequential adhesion of cold spherical clusters inside a vortex leads to the formation of a nanowire with a regular cylindrical shape of radius R . It follows from the conservation of the volume that the distance between the centers of the merged spheres is $L = 4R/3$, and the decrease in the surface upon the coalescence per initial cluster is

$$\Delta S = \frac{4}{3} \pi R^2. \quad (6)$$

If we assume in addition that the energy released due to the decrease in the surface area is sufficient for melting of the whole of material,

$$W_m = \frac{4}{3} \pi R^2 a Q_b, \quad (7)$$

the wire will be entirely molten. It follows from Eq. (7) that the maximal radius of such a wire can be estimated as

$$R \leq R_m^{\max} \equiv \alpha a. \quad (8)$$

It can be seen from the table that the characteristic diameter of completely molted nanowire is 3.0–4.5 nm for casting metals and about 2 nm for refractory metals. When large spherical clusters stick together in vortices, only the regions near the contacts melt. In this case, the wire must have the shape of a “peapod” and must be noticeably thicker; it may probably have a polycrystalline structure. If at least one of the clusters sticking together is long enough, the heating of the entire wire cluster cannot lead to its departure from the vortex. At the same time, explosive evaporation of liquid helium in the heat

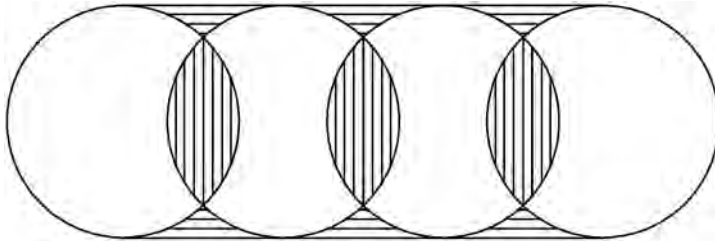


Fig. 6. Explanation of the formation of a completely molten wire from identical cold metal spheres. The volume of the vertically hatched regions is equal to the volume of the regions with horizontal hatching. In the limiting case (the largest diameter of the wire), the released energy is sufficient for melting of the entire volume



release region in the case of merging of metallic nanoparticles may be responsible for the formation of a new vortex at the merging point, which ultimately leads to branching of nanowires growing inside the vortices.

The simple analysis described above correctly reflects the main characteristics of nanowires obtained in superfluid helium. In particular, it predicts that, in accordance with experimental data [4, 5], the diameter of nanowires made of refractory metals (gold, copper and nickel) must be smaller than for casting metals (indium, tin, and lead). It follows from the table that melting during merging of cold clusters of hydrogen and water is ruled out at all ($\alpha < 1$). It can therefore be expected that such nanowires have amorphous or polycrystalline (if the initial clusters are large enough) structure.

We have considered so far the collisions of cold clusters, which can be observed for low ablation intensities when mutual collisions of particles suspended in liquid helium are so infrequent that condensation products have enough time to be cooled between successive collisions. It was mentioned above, however, that the time of cooling for metallic clusters in superfluid helium is quite long especially, for micrometer-size clusters. For this reason, the conditions in which hot clusters collide near the target can easily be created using laser ablation. The limitations imposed on the size of the spherical particle formed in this case become less stringent, and beginning from a certain collision frequency, no limitations exist such that large spheres which are liquid at the instant of their formation can appear as a result of coagulation.

Thus, in contrast to hydrogen for which the product of condensation at liquid helium temperature below the λ point are exceptionally long filaments, predominantly spherical particles are formed during ablation of metals in the focal region. A decrease in the density of the metal being evaporated due to, for example, an increase in the laser spot on the target must increase the effectiveness of the formation of nanowires due to suppression of formation of large spherical particles. Switching to compressed HeII must also lead to suppression of the formation of spherical particles; in this case, operation at $P = 25$ Bar is possible, which indicates a 3×10^3 -fold increase in the helium density in a gas bubble (and, hence, a corresponding increase in the energy spent on the formation of a gas envelope of a preset size) as compared to our experiments.

Reversible alignment of preliminarily prepared micrometer-size hydrogen clusters arranged equidistantly along the axis of quantized vortices was observed in [16]. Micrometer-size metallic clusters grown in HeII behave analogously: metal spheres have approximately the same size ($2 \mu\text{m}$), and many of them are aligned equidistantly along smooth curves. It is natural to attribute such a behavior of hydrogen as well as metals to the fact that beginning from a certain size, the particles in a vortex repel one another. This may be a consequence of distortion of the vortex by particles that are captured in it, the distortion being the stronger the larger the particle size. These distortions produce an energy barrier preventing the convergence of particles. If this barrier is high enough at distances for which the energy of attraction (e.g., of the Van der Waals type) is still lower than the temperature, the particles inside a vortex do not stick together beginning from this distance. This effect can explain the existence of the maximal size of spherical clusters.

If at least one cluster is outside the vortex, mutual repulsion does not take place; however, the collision frequency of such clusters is much lower than the frequency of collisions for clusters in the vortex. As a result, colliding clusters are cold and do not stick together on account of their large size.



Metal spheres of a regular shape, which are formed by cooling of liquid clusters in superfluid helium, exhibit a number of specific properties, which are preserved even after their holding in air at room temperature (at least, for several days). In particular, micrometer-size indium and tin spheres placed into the vacuum chamber of a TEM sometimes exploded a few seconds after focusing of an electron beam on these objects and they showered the surrounding space with many hundreds of clusters with a size on the order of 10 nm (Fig. 7a). These spheres, whose size slightly decreased with increasing distance from the exploding sphere, were single crystals with a smooth surface (Fig. 7b). For an electron density of 200 keV and a current density maintained at a level of 20 pA/cm^2 , the energy absorbed from the beam could increase the mean temperature of a ball $2 \mu\text{m}$ in diameter only by a few tenths of a kelvin; therefore, the beam in this case could exclusively play the part of the “trigger.”

The observed effect can be explained analogously to so-called Batavia’s tears, viz., solid glass drops obtained by dripping of molten glass into water. These drops can hardly be broken by a hammer, but a teardrop scatters with explosion into micrometer-size fragments when its tail is broken off. In our case, a hot molten metallic cluster has a volume much larger than in the cold solid state for most metals. The solidification of a cluster upon its cooling in superfluid helium is a frontal-type process that begins from the coolest region (i.e., the sphere surface). The solid envelope bounds the liquid interior part, which is still hot, in the volume noticeably exceeding the equilibrium volume for the cold solid metal. Therefore, further cooling and solidification in interior regions produces a stressed tensioned state (in this case, we can speak of a negative pressure); external layers in this cases experience a compression stresses.

However, centimeter-size Batavia’s tears can be prepared only from glass whose high threshold of stress ensures high elastic strains. For a plastic metal like indium or tin, high tensile stresses are generally eliminated by the formation of voids. However, yielding of metals is due to the presence of structural defects in them [20], and the small size of a ball and its spherically symmetric cooling prevents the formation of a directed flow of structural defects. For this reason, the threshold of stress of micrometer-size spheres made of plastic metals must be quite high. This means that an indium or tin ball obtained by condensation in liquid helium must behave as a steel ball.

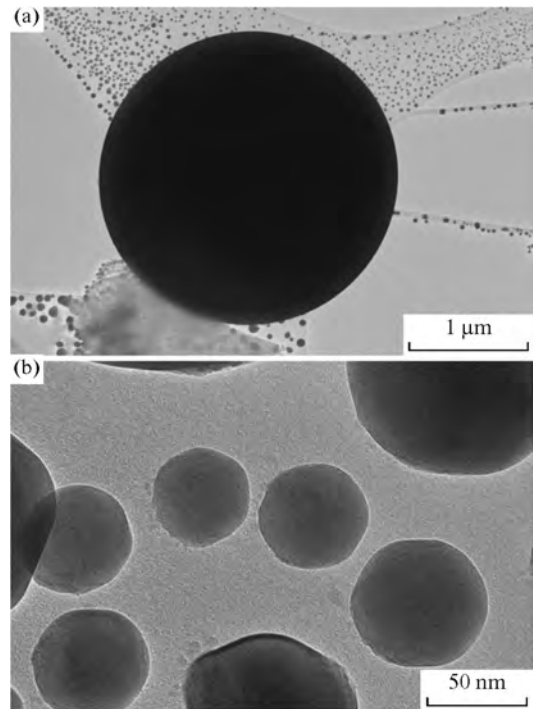


Fig. 7. Explosion of a spherical indium cluster initiated by an electron beam:

- (a) spherical cluster on the carbon substrate after the explosion; the regions with the substrate are covered with smaller spheres; (b) the same spheres under a larger magnification



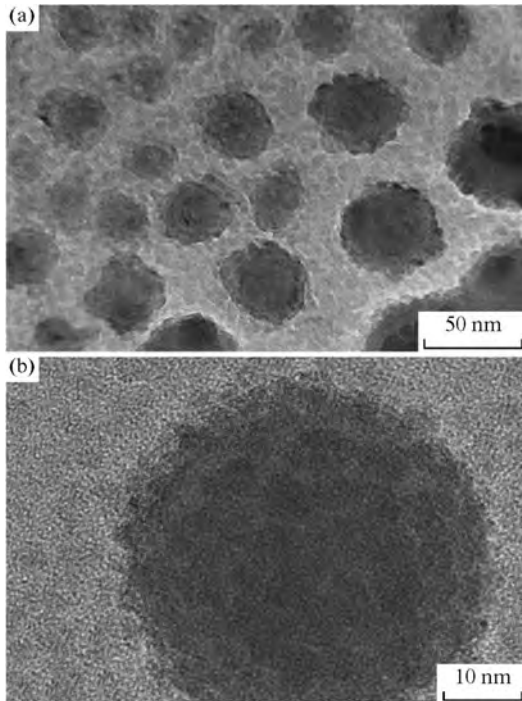


Fig. 8. (a) Products of explosion of an indium stressed ball 2 μm in diameter and (b) the fine structure of a bound but not fused nanocluster

At the same time, the radiation and chemical action of 200-keV electrons leads [22] to the formation of a cascade of defects which can be responsible for cracking of the metal. Small metallic clusters appearing after the initiated explosion of a ball must be in the solid state; if, however, their size is on the order of several nanometers, these clusters after collisions in vacuum may coagulate into larger spheres; this is demonstrated in Fig. 7b.

We have obtained experimental evidence of the correctness of these arguments. In two cases, the explosion of indium spheres under an electron beam resulted in the formation of hundreds of clusters with a diameter of about 30 nm, which consisted of bound together but not fused clusters a few nanometers in size (Fig. 8a). It can be seen from the photograph obtained with a large magnification (Fig. 8b) that the clusters were mechanically packed into a “golf ball,” as well as numerous clusters lying separately on the substrate, and they form a rather monodisperse ensemble consisting of nanometer-size single crystals with a nearly spherical shape.

In the latter case, the tensile potential energy accumulated in the ball is apparently sufficient only for the disintegration of the ball directly into clusters 6 nm in diameter, which cannot fuse during their sticking together in accordance with relation (5).

4. Discussion of results

Analyzing the above results, we can propose the following scenario of the formation of metallic nanowires and nanoclusters in quantized vortices of superfluid helium.

As a result of laser ablation of a metal in superfluid helium, small (less than 1 nm in diameter) clusters and metal atoms are formed. The mechanical impact at the instant of action of a laser pulse on the target generates a quantized vortex near the focus of the laser. Particles of the metal are reversibly captured into the vortex core.

Metal nanoparticles inside the vortex and in the remaining volume of the liquid stick together, forming molten spherical clusters. In all cases, superfluid helium boils around a cluster; subsequent cavitation of the gas bubble may lead to the formation of new vortices.

An increase in the cluster size increases its binding energy with the vortex and, accordingly, its lifetime in the vortex core. As a result of this effect together with the increase in the density of vortices themselves, condensation of impurities in vortices ultimately becomes the prevailing process.

At low concentrations of the initial particles (atoms, molecules, and subnanometer clusters) appearing near the ablation zone over large time spans and existing in peripheral



regions from the very outset, nanowires with a diameter defined by relation (8) grow in quantized vortices.

The increase in the size of spherical metal clusters surrounded by a gaseous envelope increases their cooling time. Therefore, the probability of their collision in the hot and then molten state increases. As a result, spherical clusters of a much larger size than that determined by relation (5) can be formed.

The probability of collision of hot clusters is many orders of magnitude higher inside a vortex, where their local concentration is much higher and the velocities are directed along the same straight line. For this reason, almost all spherical clusters have the same size, which is determined by the beginning of repulsion of particles in the vortex.

The spherical particles obtained by rapid cooling of molten metallic spheres are characterized by high internal stresses and are metastable to disintegration into smaller spheres with a diameter of a few nanometers. The latter can fuse together to form spherical clusters several tens of nanometers in diameter.

The understanding of the mechanism of condensation of metallic particles in superfluid helium makes it possible to change the conditions for the process aimed at obtaining the required product (viz., nanoparticles or nanospheres).

Among numerous methods developed for growing nanowires that have been worked out up to now, the method based on the condensation of impurity particles in superfluid helium is distinguished by its universality because nanowires can be grown from a large number of materials including multicomponent systems like metals, semiconductors, and insulators. The metallic nanowires grown in this way have a regular monocrystalline structure, which is important both for their theoretical analysis and for comparison with the available data and for possible applications. The ability of grown nanowires to form reliable metallic contacts with the electrodes introduced into the reaction zone makes it possible to begin electric measurements directly in liquid helium. The possibility of producing ensembles of micrometer-size metal particles strengthened due to negative pressure is also of interest for fundamental research as well as for applications.

Finally, the observed effect of the initiated explosion of such particles paves the way for the production of a large number of nanospheres.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 10-0300562).

The authors thank E.N. Kabachkov (Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences), who performed experiments on the optical microscope, and S.I. Anisomov (Institute of Theoretical Physics, Russian Academy of Sciences) for discussions.

References

1. E.B. Gordon, R. Nishida, R. Nomura, and Y. Okuda, *Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 85 (11), 710 (2007) [*JETP Lett.* 85 (11), 581 (2007)].
2. E.B. Gordon and Y. Okuda, *Fiz. Nizk. Temp. (Kharkov)* 35 (11), 278 (2009) [*Low Temp. Phys.* 35 (3), 209 (2009)].
3. G.A. Williams and R.E. Packard, *Phys. Rev. Lett.* 33, 280 (1974).
4. P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Groberty, G. Neururer, E.B. Gordon, and A. Weis, *Europhys. Lett.* 90, 34 002 (2010).



5. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, and I.I. Khodos, *Fiz. Nizk. Temp. (Kharkov)* 36 (7), 740 (2010) [*Low Temp. Phys.* 36 (7), 590 (2010)].
6. G.P. Bewley, D. Lathrop, and K. R. Sreenivasan, *Nature (London)* 441, 588 (2006).
7. G.P. Bewley, PhD Dissertation (Yale University, New Haven, Connecticut, United States, 2006).
8. Seung Soo Oh, Do Hyun Kim, Myoung-Woon Moon, A. Vaziri, Miyoung Kim, Euijoon Yoon, Kyu Hwan Oh, and J.W. Hutchinson, *Adv. Mater. (Weinheim)* 20, 1093 (2008).
9. Sang H. Yang, Michael J. Mehl, and D. A. Papacon-stantopoulos, *Phys. Rev. B: Condens. Matter* 57, 4 (1998).
10. W. Marine, B. Luk'yanchuk, and M. Sentis, *Vide: Sci., Tech. Appl.* 288, 440 (1998).
11. S.I. Anisimov and B.S. Luk'yanchuk, *Usp. Fiz. Nauk* 172 (3), 301 (2002) [*Phys.-Usp.* 45 (3), 293 (2002)].
12. P. Moroshkin, A. Hofer, and A. Weis, *Phys. Rep.* 469, 1 (2008).
13. J.G. Daunt and R.S. Smith, *Rev. Mod. Phys.* 26, 172 (1954).
14. E.B. Gordon, *Fiz. Nizk. Temp. (Kharkov)* 30 (10), 1009 (2004) [*Low Temp. Phys.* 30 (10), 756 (2004)].
15. S.W. Van Sciver, *Cryogenics* 19, 385 (1979).
16. J. Fang, A.E. Dementyev, J. Tempere, and I. F. Silvera, *Rev. Sci. Instrum.* 80, 043 901 (2009).
17. R. Merrill and F. Stefani, *IEEE Trans. Magn.* 39, 1 (2003).
18. E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin, O.F. Pugachev, and V.V. Khmelenko, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 73 (3), 952 (1977) [*Sov. Phys. JETP* 46 (3), 502 (1977)].
19. D.K. Sar and K.K. Nanda, *Nanotechnology* 21, 205701 (2010).
20. R. Honeycombe, *The Plastic Deformation of Metals* (Cambridge University Press, Cambridge, 1968; Mir, Moscow, 1972).
21. *Tables of Physical Quantities: A Reference Book*, Ed. by I.K. Kikoin (Atomizdat, Moscow, 1976) [in Russian].
22. A.K. Pikaev, *Modern Radiation Chemistry: Basic Principles, Experimental Technique, and Methods* (Nauka, Moscow, 1985) [in Russian].

Received September 15, 2010



ВЛИЯНИЕ СВЕРХТЕКУЧЕСТИ НА КОНДЕНСАЦИЮ ПРИМЕСЕЙ В ЖИДКОМ ГЕЛИИ

Е.Б. Гордон

Физика низких температур, 38 (2012) 1320–1328

Проанализированы все существенные проявления влияния сверхтекучести Не II на процессы конденсации взвешенных в нем примесей. Особое внимание уделено обнаруженному в последние годы явлению катализа коалесценции примесей, введенных в сверхтекучий гелий, возбуждаемыми в нем квантованными вихрями. Наличие вихрей не только во много раз ускоряет конденсацию любых введенных в гелий веществ, но приводит к образованию совершенно нового продукта – длинных и тонких нанонитей. Выявлена роль локальных перегревов, сопровождающих коалесценцию частиц внутри сверхтекучего гелия, в формировании морфологии и структуры примесь-гелиевых конденсатов, в том числе молекулярных кристаллов, содержащих стабилизированные активные атомы.

1. Введение

В литературе уже имеется несколько обзорных статей, посвященных проблеме введения примесей в сверхтекучий гелий [1–4]. Появление данной работы связано с тем, что в самое последнее время появились новые методики и был получен ряд результатов, требующих значительных изменений в принятых представлениях.

Идея о том, что уменьшением температуры можно сколь угодно сильно замедлить химические реакции периодически посещала исследователей, мечтающих о супервзрывчатке, содержащей большие концентрации стабилизированных при низкой температуре активных атомов. Мечтали они и о чудо-топливе для ракет – здесь стабилизированные атомы водорода вследствие своей малой массы были вне конкуренции. Первая волна экспериментальных работ, возникшая в 50-х годах прошлого столетия, была инициирована блестящими работами группы Бройда [5]. Последняя по времени началась совсем недавно и щедро подпитывается различными фондами. Наверняка, в данном номере журнала также найдется место для работ, развиваемых в этом направлении.

Научный отдел в Институте химической физики, в который я поступил на работу в 1968 г., назывался Отдел свободных и конденсированных радикалов и ионов и был создан как раз для развития работ по созданию энергоемких систем на основе стабилизированных при низкой температуре атомов, свободных радикалов и ионов. Активные частицы рождались в твердой холодной матрице при ее радиационно-химическом облучении или образовывались в газовом разряде, а потом намораживались на холодную подложку. По своей постановке эти эксперименты были близки к экспериментам Бройда, но за атомами и свободными радикалами стали наблюдать с помощью чувствительного и информативного метода электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), который был полностью адекватен поставленной задаче. Особое внимание, конечно, уделяли атомам водорода, для которых к тому же была предсказана возможность существования уникального метастабильного состояния – металлического водорода.



2. Конденсация газовой струи в сверхтекучем гелии

Моя аспирантская работа была посвящена использованию для исследования химических реакций мазера на пучке атомов водорода, и вследствие этого возникла идея, нельзя ли этот пучок использовать как источник атомов, но направить его не на холодную поверхность, а в глубь жидкого гелия. Чтобы пучок доходил до поверхности жидкости, нужно было существенно снизить давление паров гелия над его поверхностью, а жидкий гелий как раз и являлся единственным веществом, которое при охлаждении откачкой паров всегда остается жидким. Мой сосед по дому – Леонид Павлович Межов-Деглин, тогда молодой, но уже считавшийся авторитетом в области низких температур, сотрудник Института физики твердого тела поддержал эту идею. Более того, он заметил, что в этом случае жидкий гелий перейдет в сверхтекучее состояние, поэтому будет очень эффективно отводить тепло от места его выделения. Идея оказалась заманчивой, поскольку при введении внутрь жидкости область, в которой происходит взаимодействие частиц, гораздо больше, чем объем поверхностного слоя в случае твердой подложки, и вместо плохо проводящей тепло твердой матрицы, уже намерзшей на холодную поверхность хладопровода, можно приготовить «суп» из атомов в изотермической жидкости. После некоторой проработки мы явились за советом к А.И. Шальникову, который, к нашему удивлению, не проявил особенного энтузиазма и посоветовал использовать обычный подход намо-раживания на холодную подложку. Тем не менее мы, используя систему откачки и разрядный источник водородного мазера, а также предоставленную Межовым-Деглиным пару стеклянных дьюаров и высокоточный манометр, за несколько недель собрали экспериментальную установку. Помимо нас в ее создании принимали участие инженер С.И. Брусов и выпускник МФТИ О.Ф. Пугачев, для которого эта работа стала аспирантской темой. Помимо личного участия в экспериментах Леонид Павлович оказывал нам в это время неоценимую помощь в освоении техники и физики низких температур. Установка заработала в 1973 г. [6, 7], и уже в первых экспериментах стало понятно, что нам просто повезло – пессимизм непревзойденного специалиста в области низких температур А.И. Шальникова был вполне оправдан.

Суть проблемы состояла в следующем [1]. Для охлаждения одного атома от 300 К до нескольких кельвин требуется отвести от него энергию около 450 К, в то время как каждый испаряющийся из жидкости атом гелия уносит с собой максимум 7 К. Другими словами, если охлаждение гелия осуществляется откачкой его паров, противоток испаряющегося гелия должен более чем в 60 раз превышать поток теплого газа, направленный к жидкости. Поэтому для того, чтобы обеспечить стационарный газовый поток к поверхности жидкого гелия, необходимо пространственно отделить его от противотока испаряющегося гелия. В нашем случае малое отверстие в конце разрядной трубки, обеспечивающее высокую начальную скорость газа, послужило формирователем узкой струи, интенсивность потока внутри которой в определенных условиях могла быть выше интенсивности противотока испаряющегося гелия. При этом газовая струя упиралась в находящуюся в нескольких сантиметрах от отверстия поверхность сверхтекучего гелия, образуя в нем довольно глубокую лунку. Образование столь хорошо организованного потока при весьма высоких плотностях газа было объяснено газодинамическими особенностями распространения «теплого» разреженного газа в холодном и плотном гелии. В данной методике



время транспорта газа к поверхности жидкого гелия составляло несколько миллисекунд. Это позволяло, предварительно воздействуя на газовую смесь высокочастотным электрическим разрядом, довести до поверхности жидкого гелия и стабилизировать в нем энергоемкие лабильные продукты, такие как атомы, свободные радикалы и метастабильно возбужденные частицы. С другой стороны, наличие этих продуктов позволило подключить количественные средства исследования, такие как ЭПР, оптическая спектроскопия, термометрия и т.д. В течение многих лет этот метод использовался в нашей лаборатории в ИХФ РАН (с 1987 г. в ИНЭПХФ РАН), затем он был воспроизведен за границей уехавшими туда сотрудниками лаборатории В.В. Хмеленко в Корнельском университете США (1999) и Е.А. Поповым в Университете г.Ювескола, Финляндия (2003).

Можно повысить механический импульс струи за счет периодической подачи в криостат коротких импульсов содержащего исследуемые частицы теплого газа высокого давления – в этом случае необходимый для достижения стационарных условий противоток испаряющегося гелия реализуется в периоды отсутствия струи. Впервые эта методика была использована А. Апкарьяном [8], мы с Ю. Окудой использовали ее в наших совместных экспериментах [9]; с ее помощью можно доставлять атомы и молекулы внутрь не только сверхтекучего, но и нормального жидкого гелия.

Метод введения стационарной струи в жидкий гелий был модифицирован за счет физического разделения потока теплого газа в жидкость и противотока испаряющегося гелия [10]. В этом случае кювета, в которой происходит конденсация гелиевой струи, отделена от основной гелиевой ванны тонкой медной стенкой. Откачка паров осуществляется только из гелиевой ванны, а температура жидкости в ячейке за счет теплопроводности стенок поддерживается равной температуре жидкого гелия в ванне с точностью 0,01 К даже во время процесса конденсации примеси. В этой методике восходящий поток в кювете отсутствовал вообще и вся струя захватывалась жидким гелием. Кроме того, замкнутый цикл по гелию, используемый при конденсации, позволял работу со специально очищенным гелием и даже с ^3He . Во всем остальном условия конденсации были такими же, как и в методиках с открытым по отношению к гелию циклом.

Введение гелиевого пучка, содержащего примесь атомов водорода, дейтерия и азота, в сверхтекучий гелий привело к существенному увеличению концентрации стабилизированных внутри жидкости атомов, но не было до конца ясно, какую роль здесь играет, собственно, сверхтекучесть He II . Единственным экспериментальным указанием на влияние сверхтекучести был наблюдаемый при больших концентрациях атомов азота взрыв стабилизированного внутри жидкого гелия осадка в λ -точке при переходе гелия из сверхтекучего в нормальное состояние [6]. Этот эффект был объяснен тепловым взрывом энергоемкого образца, а затем была проанализирована общая проблема тепловой устойчивости низкотемпературных систем, содержащих стабилизированные реакционно-способные атомы и свободные радикалы [11]. Тепловой взрыв возникает в образце конечных размеров в том случае, когда тепло, выделяющееся в реакции спонтанной рекомбинации, не успевает рассеиваться, распространяясь по образцу до его поверхности и далее в термостат. Исчезновение сверхтекучести, обеспечивающей быстрый отвод тепла с поверхности зерен,



вызывает перегрев и далее тепловой взрыв зерна. Как следовало из [11], тепловые неустойчивости – тепловой и тепло-волновой взрывы – ограничивают возможные концентрации энергоемких частиц, стабилизированных в структурных ловушках, самым драматическим образом и практически ставят крест на идее создания низкотемпературной супервзрывчатки.

3. Строение и морфология конденсатов, полученных при введении газовой струи в сверхтекучий гелий

Самым неясным вопросом оставался вопрос о том, какова структура продукта конденсации атомов и молекул в сверхтекучем гелии. Не было никаких сомнений в том, что подход диффузионно-контролируемых процессов, развитый П. Дебаем для объяснения особенностей роста коллоидных частиц в жидкости [12], должен быть справедливым для коалесценции частиц в бесструктурном из-за квантово-механической делокализации жидком гелии. Поэтому считалось, что продуктом конденсации должны быть частицы близкой к сферической формы, внутренняя структура которых, из-за отсутствия в сверхтеплопроводящем сверхтекучем гелии локальных перегревов при слипании, должна была быть близкой к аморфной или даже фрактальной. Согласно кинетическому уравнению,

$$\frac{dn}{dt} = -k_D n^2; k_D = 4\pi DR,$$

где D – коэффициент диффузии частиц в жидкости, а R – эффективный радиус их взаимодействия, характерное время процесса коагуляции быстро падает с увеличением размера кластеров-продуктов и для содержащих 1000 атомов кластеров оно в 1000 раз выше, чем для слипания атомов. Это обстоятельство способствует образованию при коалесценции мелких крупинок. Размеры этих крупинок точно неизвестны, но проведенные на синхротроне исследования ширины линий в спектрах рентгеновской дифракции позволили оценить эти размеры как 3 нм [14]. Надо, конечно, учитывать, что ширина пиков определяется, вообще говоря, длиной когерентности, которая для дефектных структур существенно меньше размера зерен. Исходя из общих соображений морфология конденсата представлялась рыхлой структурой, состоящей из стохастически слипшихся сферических зерен [2, 13]. В спектрах рентгеновской дифракции помимо размера зерен имеется и информация об их внутренней структуре, а также о количестве и характере искажений кристаллической решетки. В рамках модельных представлений из анализа спектров рентгеновской дифракции были сделаны выводы о реализации в конденсате наиболее низкотемпературной кристаллической фазы с сильно дефектной решеткой [14], для неоновых нанокластеров в ней даже были найдены элементы модной в то время симметрии пятого порядка [15].

Необходимо сказать, что первые исследователи не использовали формирователь потока и сосуд с газом, содержащим примесь, просто соединялся с откаченным до нескольких миллибар жидкогелиевым криостатом [16]. В этих условиях стационарный поток отсутствует; за счет теплопроводности в газе устанавливается некий профиль температур, а коагуляция примеси начинается в тех местах, где температура близка к ее точке росы. К похожей постановке эксперимента обратились Л.П. Межов-Деглин с сотрудниками в 1999 г. [17]. При подобной постановке эксперимента анализ происходящих процессов провести достаточно просто. До некоторого кри-



тического размера образующиеся при коагуляции вблизи точки росы кластеры примесных молекул не «чувствуют» силу тяжести, но затем они приобретают преимущественное направление движения вниз в область более низких температур. Этот размер, который может быть оценен на основании Больцмановского распределения в гравитационном поле Земли, составляет около 30 нм [1]. Поскольку и после достижения критического размера оседание кластеров является достаточно медленным, они успевают смерзнуться в чешуйки задолго до попадания в область действительно низких температур, поэтому структура конденсата не сильно зависит от того, в жидкий азот или в жидкий гелий происходит конденсация. Естественно, что в этом случае из-за медленности транспорта в область гелиевых температур концентрации стабилизированных атомов и свободных радикалов заметно ниже, чем в методе введения активных частиц в сверхтекучий гелий в виде струи.

Но и в этой методике концентрация стабилизированных атомов оказывалась, хотя и высокой по сравнению с другими постановками экспериментов, но существенно ниже их содержания в газовой струе. Наибольшая разница имела место для атомов водорода, и это явилось стимулом для изучения туннельных реакций обмена между атомом и молекулой водорода. В это время благодаря работам В.И. Гольданского [18] были развиты представления о низкотемпературном пределе скорости химических реакций, который отождествлялся с существованием туннельного протекания химических реакций. Такое отождествление было не бесспорным, поскольку, с одной стороны, протекание реакции при низких температурах может быть связано не только с туннелированием, но и с локальными эффектами, в частности с образованием трещин [19]. С другой стороны, для реакций, в которых энергетический барьер на пути реакции имеет пологие «крылья», скорость туннельных реакций в широком температурном диапазоне может сильно зависеть от температуры, как это было предсказано для модельной реакции $H + H_2 \rightarrow H_2 + H$. Такие реакции действительно были нами обнаружены по преимущественному протеканию в водородно-дейтериевом конденсате обменных атомно-молекулярных реакций, в которых образовывалась более изотопнотяжелая молекула водорода и, соответственно, более легкий атом [20]. Одновременно подобные же доказательства были получены в работе группы Т. Миязаки [21]. В том же году появилась работа [22], в которой также сообщалось о наблюдении туннельной реакции обмена между атомом и молекулой водорода. Для проблемы стабилизации атомов водорода в матрице молекулярного водорода туннельная реакция представляет собой дополнительный к квантовой диффузии [21] механизм перемещения атомов по матрице, обеспечивающий их встречу друг с другом, сопровождающуюся взаимной рекомбинацией. Существование этого канала гибели дает объяснение низкой по сравнению с более тяжелыми атомами относительной концентрации атомов водорода. Однако и для атомов азота концентрация стабилизированных в сверхтекучем гелии атомов была меньше ожидаемой. К тому же наблюдалось значительное различие между измеренными методом ЭПР локальной и средней концентрациями атомов N, свидетельствующее о том, что даже при использовании струевой методики кластеризация атомов и молекул начинается в газовой фазе задолго до их попадания в жидкий гелий [7].

Предполагаемое строение конденсата в сверхтекучем гелии как нанометровых крупинок, окруженных слоем отвердевшего гелия [23], позволило предложить



простой способ оценки их размера, справедливый, по крайней мере, для обладающих высокой подвижностью атомов водорода [24]. В химически инертных средах единственным механизмом гибели стабилизированных атомов является их парная рекомбинация при диффузионном движении внутри кластера. Переход атома из одного изолированного гелиевой оболочкой кластера в соседний происходит гораздо медленнее. Это означает, что через некоторое время в кластерах, где первоначально содержалось нечетное число атомов, они исчезнут, но в кластерах, где исходно содержалось нечетное число атомов, надолго останется по одному атому. В этом случае концентрация кластеров N_{cl} связана с концентрацией атомов n_a простым соотношением

$$N_{cl} = 2n_a.$$

Если полагать диаметр кластеров равным 3 нм [15], то предельная относительная концентрация стабилизированных на продолжительное время атомов n_a / n_m , где n_m – концентрация молекул, должна быть близкой к $n_a / n_m = 0,1\%$. Эта величина удивительно близка к экспериментально измеренным относительным концентрациям стабилизированных в сверхтекучем гелии атомов водорода. Даже если экспериментаторы стартовали со смесей, содержащих практически нацело диссоциированный водород, в свежестабилизированном конденсате, образующемся за десятки секунд, атомов Н было уже около 0,1% [24], а дальнейшая их рекомбинация имела характерные времена порядка 10^4 с [25]. Для атомов азота и диффузия, и туннельные реакции гораздо медленнее, чем для атомов водорода, поэтому их выгорание до одного атома на кластер должно осуществляться при больших температурах.

Так или иначе, такое поведение может явиться, кроме того, основой специфического метода низкотемпературного синтеза: многие интересные реакции атомов Н, N и О при низких температурах идут весьма медленно, так что в гомогенной среде атомы скорее рекомбинируют друг с другом, чем вступят с этими молекулами в реакцию. В системе, состоящей из изолированных кластеров нанометрового размера, можно добиться эффективного использования атомов при приличном выходе продукта около 10^{-4} моль на моль «растворителя».

4. Введение примесных частиц в холодные гелиевые капли

Основным направлением исследований, выполненных с применением изящного метода захвата примесных частиц в малые холодные (0,4 К) капли гелия, была низкотемпературная спектроскопия атомов и молекул. Действительно, легко можно было добиться условий, когда в каплю попадала только одна молекула, а чувствительность метода «выжигания» (depletion) была достаточна для регистрации факта поглощения изолированной гелием молекулой кванта света заданной длины волны. Помимо спектров высокого разрешения, авторов [2] интересовало возможное проявление явления сверхтекучести на наноразмерах. Наблюдаемое ими изменение вращательной постоянной в спектрах введенных в холодные капли молекул, имеющее место для «сверхтекучих» капель ^4He и отсутствующее для еще более холодных, но не могущих быть сверхтекучими капель легкого изотопа ^3He , было интерпретировано ими как имеющее квантово-механическую природу проявление сверхтекучести в молекулярной спектроскопии.



В каплю можно захватывать и заданное количество атомов или молекул, и тем самым осуществлять их конденсацию в сверхтекучем гелии. Теоретически было предсказано некоторое влияние сверхтекучести на скорость конденсации частиц в HeII, но речь шла о сверхтекучести как таковой, поскольку в малых гелиевых каплях, в отличие от охлажденного до $T < T_\lambda$ жидкого гелия, образование стационарных вихрей невозможно [26].

5. Влияние вихрей на процесс коагуляции примесей в сверхтекучем гелии

Уже довольно давно было установлено, что любые примеси в сверхтекучем гелии, как более легкие, чем гелий, так и более тяжелые, заряженные частицы и нейтральные, имеют некоторое небольшое сродство к квантованным вихрям. Энергия связи между атомом или малой молекулой и вихрем составляет 3–10 К. При типичных для экспериментов со сверхтекучим ^4He температур $T = 1,5\text{ К}$ это дает лишь небольшое увеличение концентрации взвешенных частиц внутри вихря. По-видимому, по этой причине до наших работ о возможном влиянии вихрей на процесс конденсации примесей в HeII исследователи не задумывались. Поворотным пунктом можно считать появление работы [27], в которой было обнаружено, что введенные в жидкий гелий микронные пылинки водорода выстраиваются вдоль квантованных вихрей. Авторы [27] не принимали во внимание процесс коагуляции частиц, он был вреден для их цели визуализации квантованных вихрей в HeII, но, судя по всему, после перехода жидкого гелия в нормальное состояние цепочки пылинок рассыпались. Однако из статьи [27] можно было сделать вывод о том, что микронные частицы гораздо сильнее, чем атомы и молекулы, связаны с вихрями. В связи с этим мы [9] задались целью экспериментально исследовать, как себя поведут молекулы и очень малые кластеры водорода, если их с помощью мощной импульсной струи ввести в объем жидкого гелия. Оказалось, что, когда жидкость находилась в нормальном состоянии, то продуктами конденсации являлись исключительно круглые крупинки водорода, но если жидкий гелий был переведен в сверхтекучее состояние, то продуктами конденсации были исключительно длинные нити твердого водорода, ведущие себя подобно квантованным вихрям. Эти нити были достаточно прочны и сохранялись при переходе жидкого гелия в нормальное состояние, доказывая тем самым, что они представляют собой не цепочки отдельных частиц, захваченных и удерживаемых в сердцевине квантованного вихря, а цельную нить, изготовленную из твердого водорода.

Анализ полученных в [9] результатов позволил обосновать совершенно новый механизм быстрой конденсации любых примесей в сверхтекучем гелии, суть которого состоит в катализе процесса коагуляции квантованными вихрями, играющими роль своеобразных центров конденсации [28]. Действительно, любая посторонняя частица имеет положительное сродство к сердцевине квантованного вихря. Находясь в вихре, частицы двигаются вдоль его оси и, значит, навстречу друг другу, что делает частоту их столкновений гораздо выше, чем в объеме жидкости, где направления взаимных скоростей случайны. Удивительной особенностью квантованного вихря является его практическая одномерность: радиус сердцевины составляет меньше $1\text{ \AA}$, в то время как длина – многие сантиметры. Поэтому слипание частиц происходит преимущественно в направлении оси вихря, и образующиеся в результате его продолговатые



кластеры ориентируются вдоль этой оси. Из общефизических соображений энергия сродства продолговатого кластера к вихрю должна быть пропорциональна его длине. Тогда по мере роста кластера увеличивается время его жизни внутри вихря и, значит, возрастает концентрация кластеров в вихре. Концентрирование примеси внутри вихря прогрессивно увеличивает скорость ее конденсации, и при достаточной концентрации квантованных вихрей процесс конденсации в вихрях становится основным, а главным продуктом конденсации будут длинные тонкие нити. Следует особо подчеркнуть, что ввиду короткодействия потенциала взаимодействия квантованного вихря с частицей, которая пропорциональна $\ln(r/a)$, где $a = 0,7 \text{ \AA}$, не существует сколь-нибудь заметного притяжения между ними, можно просто считать, что вихри выметают от пыли объем сверхтекучей жидкости.

Дальнейшее развитие этих работ было связано с исследованиями конденсации атомов металлов, вводимых в объем He II посредством лазерной абляции погруженных в жидкость металлических мишеней. Эти экспериментальные работы были начаты одновременно в Швейцарии в группе проф. А. Вайса (Университет Фрайбурга) и в ИПХФ РАН (Россия, Черноголовка). Уже первые эксперименты [29, 30] показали, что для всех исследованных металлов в сверхтекучем гелии с высокой эффективностью образуются пучки длинных нанопроволок. Как было предсказано в [28], эти пучки вместе с вихрями, в которых они вырастают, присоединяются к введенным в область конденсации иглам-электродам. Сразу после своего образования уже в сверхтекучем гелии они демонстрируют металлическую электропроводность, что говорит о том, что составляющие проволоку нанокластеры соединены между собой металлическими связями. Помимо нанопроволок в седиментах обнаруживаются и сферические частицы, часть из которых встроена в нанопроволоки. Изучение строения этих сфер показало [21], что они имеют монокристаллическое строение, правильную форму и атомно-гладкую поверхность. Указанные особенности свидетельствуют о том, что образование металлических нанообъектов в жидком сверхтекучем гелии происходит через расплавленное состояние.

В отличие от молекул и малых кластеров, слипающихся друг с другом в вихрях, частицы микронного размера, по-видимому, взаимно отталкиваются внутри вихря [31, 32]. Экспериментальным подтверждением этой концепции может служить поведение микронных частиц молекулярного водорода, взвешенных в сверхтекучем гелии [33]. Они захватывались вихрями и, не слипаясь, стабилизировались на равных расстояниях друг от друга. Эксперименты, проведенные с металлами, представляют собой еще более сильное свидетельство в пользу приведенного выше утверждения. В оптический микроскоп видно, что непосредственно под металлической мишенью, вблизи которой плотность испаренных в жидкий гелий частиц металла наибольшая, осажденные на поверхность покровного стекла сферические кластеры имеют приблизительно один и тот же размер и явно расположены эквидистантно вдоль некоторых плавных кривых.

Следует подчеркнуть, что специфический механизм коагуляции примесей в сверхтекучем гелии, приводящий к громадному ускорению процесса и навязыванию продукту конденсации нитевидной формы, основан исключительно на строении квантованных вихрей и их способности стабилизировать в своей сердцевине любые примесные частицы. Одного этого обстоятельства уже достаточно для воз-



никновения больших эффектов. В принципе, и обычные вихри должны влиять на скорость конденсации частиц в жидкости. Естественно, что чем меньше температура жидкости, тем более сильно должен быть выражен эффект. Температура нормального жидкого гелия почти такая же, как у сверхтекучего; поэтому было целесообразно провести эти эксперименты в нормальном жидком гелии. Оказалось, что при абляции в нормальной жидкости действительно наблюдается образование коротких металлических нитей нанометровой толщины. Но они имеют не плавное, а зигзагообразное строение, и эффективность их образования при одинаковых условиях абляции почти на два порядка ниже.

Подтверждением тому факту, что именно существование квантованных вихрей определяет процесс конденсации атомов и малых кластеров в сверхтекучем гелии, служит совсем недавняя работа [34] по конденсации атомов серебра в сверхтекучем гелии (^4He , $T = 0,4\text{ K}$). Изучение с помощью электронного микроскопа образованных внутри капель и затем осажденных на подложке кластеров серебра показало, что, начиная с размеров капель около 300 нм, для которых образование вихрей уже считается возможным, кластеры серебра вместо сферической формы приобретают вид длинных нитей. Коагуляция в вихрях не может никак влиять на процесс обычной, диффузионно-контролируемой коагуляции, приводящей, естественно, к образованию сферических частиц. Поэтому скачкообразная смена строения продуктов коагуляции с шарообразной на нитеобразную при появлении (одного!) вихря показывает, что, как и было предсказано в [28], скорость коагуляции в вихрях намного выше, чем в объеме жидкого гелия.

6. Локальные перегревы при конденсации примесей в сверхтекучем гелии

Вплоть до самого последнего времени все вторичные процессы в сверхтекучем гелии, включая процессы коагуляции взвешенных в нем примесей, считались строго изотермическими. Основанием этому суждению являлась уникально высокая теплопроводность He II , реализуемая волнами второго звука. При этом упускалось из виду, что эта высокая теплопроводность существует лишь для потоков тепла, меньших нескольких Вт/см [35]. Для того чтобы представить себе, какие потоки тепла реализуются при конденсации малых кластеров и при рекомбинации в них реакционно-способных атомов, воспользуемся результатами выполненного в [31] анализа возможности плавления малых кластеров металла при их конденсации в He II . Сравнение внутренней энергии двух малых сферических кластеров металла и образованного их слиянием сферического кластера-продукта показывает, что в адиабатических условиях выделяющейся при конденсации энергии хватает на его плавление. Максимальный диаметр холодных шаров, столкновение которых может давать расплавленный продукт, различен для разных металлов и составляет несколько нанометров. Для того чтобы воспрепятствовать плавлению при столкновении двух холодных шаров с диаметром, равным одному нанометру, надо отводить порядка 10^5 Вт/см^2 [31]. Не имея возможности осуществить столь интенсивный поток тепла, жидкий гелий вокруг кластера испаряется, образуя теплоизолирующий пузырь. Это означает, что в He II , как в газе, малые кластеры металла образуются расплавленными. При больших размерах холодные кластеры могут только сплавляться, образуя нанопроволоку. Если же за время между столкновениями кластеры не успевают ос-



тыть, то металлические шары растут до тех пор, пока они не начинают отталкиваться друг от друга внутри вихря [31, 32]. Эта особенность коагуляции металлов в сверхтекучем гелии и обуславливает возможность образования довольно «толстых» (до 8 нм) нанопроволок с малым количеством в них структурных дефектов и сферических шаров с монокристаллическим строением и атомно-гладкой поверхностью. У неметаллов выделяющегося при конденсации тепла не хватает для плавления, но это тепло также должно играть важную роль в образовании и свойствах продукта. Вообще же для неметаллов в квантованных вихрях можно ожидать образования очень тонких нанопроводов, вплоть до моноатомных цепочек. Неизотермичность играет важную роль и в процессах формирования в He II вандер-ваальсовых конденсатов, содержащих стабилизированные атомы. В большинстве экспериментов исходные степени диссоциации молекул весьма высоки, поэтому велика и скорость рекомбинации атомов и мощность соответствующего тепловыделения. Поэтому исходно молекулярные кластеры окружены газовой прослойкой и имеют температуру гораздо выше температуры окружающего их жидкого гелия. В результате, не только в водороде, для которого туннельная подвижность атомов высока, но и для гораздо более стабильных атомов кислорода и азота рекомбинация идет быстро, пока в доступной для их перемещения области не остается в лучшем случае один атом. В этом, по-видимому, состоит причина того, что достигаемые при конденсации в сверхтекучий гелий концентрации тяжелых атомов не столь велики, как это следует из соображений их стабильности по отношению к тепловому взрыву [11]. Из этих соображений следует, что для повышения концентрации стабилизированных атомов, например азота и кислорода в родительской молекулярной матрице, следует *понизить* содержание атомов в исходной смеси.

7. Выводы

Важнейшую роль в конденсации примесных частиц в сверхтекучем гелии играют возбуждаемые в нем квантованные вихри, которые служат центрами конденсации, протекающей по каталитическому механизму.

В большинстве экспериментальных подходов за время транспорта частиц примеси к поверхности сверхтекучего гелия они успевают еще в газе слипнуться в кластеры. Поскольку слипание частиц происходит при достаточно высокой температуре, близкой к точке росы для каждого из компонентов смеси, при коагуляции многокомпонентной смеси происходит пространственное разделение компонентов в твердом кластере: наименее летучие концентрируются в ядре, а более летучие – на периферии. Атомы, даже химически активные, ввиду малых массы и поляризуемости концентрируются в отсутствие химического взаимодействия на поверхности зерен. Внутренняя структура зерен оказывается достаточно плотной за счет высокой подвижности частиц во время их слипания. Если размер зерен в момент их входа в жидкость порядка микрометра, то они, захватываясь в квантованные вихри, отталкиваются друг от друга, и дальнейшее слипание идет в основном при их столкновении с кластерами, находящимися не в вихрях, а в объеме He II (таковых мало, и потому скорость дальнейшей коагуляции мала). Если же размер зерен составляет доли миллиметра и менее, то, захватываясь в вихри, они за счет высокой концентрации и коллинеарности скоростей быстро растут до миллиметровых размеров. В этом случае из-за того, что слипание идет при низкой температуре, кластеры имеют рыхлую, фрактальную структуру. В



импульсной струевой методике или при введении примесных частиц прямо из жидкости, например методом лазерной абляции, удастся вводить в жидкость отдельные атомы и молекулы. В сверхтекучем гелии они быстро коагулируют, попадая в сердцевины квантованных вихрей. Для химически инертных частиц результатом коагуляции являются связанные вандерваальсовыми силами длинные нити нанометровой и менее толщины, которые в дальнейшем могут сплетаться в канаты. Для химически активных частиц, скажем атомов металла, на первых стадиях каталитической коагуляции в вихрях выделяющейся при слиянии энергии хватает на плавление продукта слияния. При этом тепло не успевает отводиться в объем He II волнами второго звука и кластер-продукт плавится, приобретая за счет сил поверхностного натяжения сферическую форму. При малых концентрациях взвешенных в He II частиц металла, начиная с диаметров в несколько нанометров, они уже не могут плавиться, сталкиваясь холодными, и лишь приплавляются друг к другу, образуя длинные нанопроволоки диаметром несколько нанометров. При больших концентрациях металла в He II, когда кластеры не успевают остыть за время между их столкновениями друг с другом, возможно самоплавление и для кластеров больших размеров вплоть до размеров около 1 мкм, начиная с которого сферические частицы начинают отталкиваться друг от друга в вихрях. Ввиду того, что эти кластеры первоначально являются жидкими, они приобретают идеально сферическую форму, атомно-гладкую поверхность и монокристаллическое строение. Внутренние части этих сферических частиц в результате быстрого последующего охлаждения находятся в состоянии сильного растяжения и при нарушении целостности оболочки извергают из себя тысячи наносфер [31]. Но при условии сохранности целостности оболочки эти микронные металлические шарики должны иметь, подобно батавским слезкам, повышенную твердость, что важно для возможных приложений. Для неметаллов ситуация должна быть в корне иной, и для них следует ожидать образования очень тонких нанопроволок, вплоть до атомных цепей.

Наиболее примечательной особенностью конденсации примесей в сверхтекучем гелии является образование в этом процессе нанонитей. Помимо естественного интереса с точки зрения фундаментальной науки, налицо практический интерес. Действительно, вырастить квазиодномерную структуру принципиально сложнее, чем структуру, имеющую наноразмеры в трех или одном измерении. Квазиодномерные, в частности сферические наночастицы, легко образуются методами жидкостной коллоидной химии, когда ограничения по диаметру достигаются использованием поверхностноактивных веществ или исчерпанием нерастворимого вещества вокруг центров конденсации за счет диффузионных ограничений. Пленки, имеющие нанотолщину, выращивают концентрированием необходимого вещества на поверхности раздела двух фаз; в простейшем случае из газа, его напылением на твердую поверхность. Для проволок, как правило, необходимо создать физические преграды на уровне нанометров, будь-то отверстие – фильера, через которую «волочат» материал для будущей нанопроволоки, или цилиндрическая полость, в которой вырастет наностержень. Квантованный вихрь представляет собой созданный природой универсальный template, имеющий диаметр меньше, а длину больше, чем в настоящее время можно создать искусственно.



Литература

1. Е.Б. Гордон, ФНТ 30, 1009 (2004) [Low Temp. Phys. 30, 756 (2004)].
2. L.P. Mezhov-Deglin, Phys. Usp. 48, 1061 (2005).
3. V.V. Khmelenko, H. Kunttu, and D.M. Lee, J. Low Temp. Phys. 148, 1 (2007).
4. J.P. Toennies and A.F. Vilesov, Angewandte Chemie Intern. Edition 43, 2622 (2004).
5. A.M. Bass and H.P. Broida, Formation and Trapping of Free Radicals, Academic Press, New York, London (1960).
6. E.B. Gordon, L.P. Mezhov-Deglin, and O.F. Pugachev, JETP Lett. 19, 63 (1974).
7. Е.Б. Гордон, Л.П. Межов-Деглин, О.Ф. Пугачев, В.В. Хмеленко, ПТЭ 6, 247 (1975); E.B. Gordon, L.P. Mezhov-Deglin, O.F. Pugachev, and V.V. Khmelenko, Cryogenics 16, 555 (1976).
8. V. Ghazarian, J. Eloranta, and V.A. Apkarian, Rev. Sci. Instrum. 73, 3606 (2002).
9. E.B. Gordon, R. Nishida, R. Nomura, and Y. Okuda, JETP Lett. 85, 581 (2007).
10. R.E. Boltnev, G. Frossati, E.B. Gordon, I.N. Krushinskaya, E.A. Popov, and A. Usenko, J. Low Temp. Phys. 127, 245 (2002).
11. E.B. Gordon, L.P. Mezhov-Deglin, O.F. Pugachev, and V.V. Khmelenko, Zh. Exp. Teor. Fiz. 73, 952 (1977).
12. P. Debye, Trans. Electrochem. Soc. 82, 265 (1942).
13. V.V. Khmelenko, S.I. Kiselev, D.M. Lee, and C.Y. Lee, Phys. Scripta 102, 118 (2002).
14. V. Kiryukhin, B. Keimer, R.E. Boltnev, V.V. Khmelenko, and E.B. Gordon, Phys. Rev. Lett. 79, 1774 (1997).
15. V. Kiryukhin, E.P. Bernard, V.V. Khmelenko, R.E. Boltnev, N.V. Krainyukova, and D.M. Lee, Phys. Rev. Lett. 98, 195506 (2007).
16. P. Savich and A.J. Shalnikov, J. Phys. 10, 299 (1946).
17. L.P. Mezhov-Deglin and A.M. Kokotin, J. Low Temp. Phys. 119, 385 (2000).
18. V.I. Goldanskii, Ann. Rev. Phys. Chem. 27, 85 (1976).
19. V.V. Barelko, I.M. Barkalov, V.I. Goldanskii, D.P. Kiryukhin, and A.M. Zanin, Adv. Chem. Phys. 74, 339 (1988).
20. E.B. Gordon, A.A. Pelmenev, O.F. Pugachev, and V.V. Khmelenko, JETP Lett. 37, 282 (1983).
21. H. Tsuruta, T. Miyazaki, K. Fueki, and N. Azuma, J. Phys. Chem. 87, 5422. (1983).
22. А.В. Ивлиев, А.С. Исковских, И.И. Лукашевич, В.В. Складчиков, В.В. Сураев, В.В. Филиппов, Н.И. Филиппов, В.А. Швецов, Письма в ЖЭТФ 38, 317 (1983).
23. Е.Б. Гордон, А.Ф. Шестаков, ФНТ 26, 5 (2000) [Low Temp. Phys. 26, 1 (2000)].
24. E.B. Gordon, Dokl. Phys. Chem. 378, 156 (2001).
25. S.I. Kiselev, V.V. Khmelenko, and D.M. Lee, Phys. Rev. Lett. 89, 175301 (2002).
26. S.G. Alves, A. F. Vilesov, and S.C. Ferreira, Jr., J. Chem. Phys. 130, 244506 (2009).
27. G.P. Bewley, D.P. Lathrop, and K.R. Sreenivasan, Nature 441, 588 (2006).
28. E.B. Gordon and Y. Okuda, Fiz. Nizk. Temp. 35, 279 (2009) [Low Temp. Phys. 35, 209 (2009)].
29. P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Groberty, G. Neururer, E.B. Gordon, and A. Weis, Europhys. Lett. 90, AN34002 (2010).
30. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, И.И. Ходос, ФНТ 36, 740 (2010) [Low Temp. Phys. 36, 590 (2010)].
31. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, and I.I. Khodos, JETP 112, 1061 (2011).
32. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, and I.I. Khodos, Chem. Phys. Lett. 519–520, 64 (2012).
33. G.P. Bewley, PhD Thesis, Yale University, New Haven, CT (2006).
34. L.F. Gomez, E. Loginov, and A.F. Vilesov, Phys. Rev. Lett. 108, AN155302 (2012).
35. S.W. Van Sciver, Cryogenics 19, 385 (1979).

Статья поступила в редакцию
5 июля 2012 г.



THE NANOWIRES GROWTH BY LASER ABLATION OF METALS INSIDE ROTATING SUPERFLUID HELIUM

*E.B. Gordon, M.E. Stepanov, M.I. Kulish
A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, I.I. Khodos*
Laser Physics Letters, 16 (2019) 026002

Under laser ablation of metals into superfluid helium (He II), in contrast to the widely used laser ablation in all other liquids, the main product of condensation is thin nanowires. In this case, however, the faults as the inclusions in the wire core of the spherical nanoparticles, similar to those which are condensation products in ordinary liquids, take place. It has been shown experimentally that the rotation of a reactor with He II, together with the replacement of laser target above the He II surface dramatically improves the structure of nanowires such produced and increases their length. Such behavior is explained both by the regularization of the array of vortices in the rotating He II and by the reducing the local density of the metal in liquid helium when the laser target is located in a gas.

1. Introduction

Laser ablation of metals into superfluid helium, unlike the widely used laser ablation into any other liquids, including normal liquid helium, does not lead to the production of spherical particles of nanometer size, but to the growth of thin nanowires.

Nanowires being one of the most important objects of nanotechnology acquire increasing significance in science and technology. The great interest to the nanowire research and application promoted the development of a variety of methods for their production [1–3]. However, in most cases, each method allows to produce only wires of a certain composition and a certain aspect ratio. Particularly difficult is to grow thin wires, which would have diameters of several nanometers. In addition, the rigid requirements are often imposed on the absence of impurities in nanowires, especially on their surface, while the relatively low thermal and chemical stability of such nanowires makes their post-cleaning difficult.

The universal method of super clean nanowire production in superfluid helium (He II) has been proposed in [4]. The idea was based on the presence in He II of quasi-1D quantized vortices (with diameter less than 1 Å whereas their length may be few centimeters) [5]. Any guest particles embedded into He II have some small affinity to vortex due to Bernoulli force [5]; being captured there they move towards each other and possess an enhanced chance of sticking with another trapped particle. At low temperature every collision leads to coalescence and hence to the particle size increasing. Since Bernoulli force that holds particles in a vortex is proportional to the particle size, their lifetime there gradually grows and eventually whole process of fusion proceeds predominantly inside vortices. In such a way the thin nanowires should be the main product of coagulation in He II. Because liquid helium is free of any contaminations, and any reagents are absent, high purity of the product should be surely achieved.

Experiments on the 10 micron grains of hydrogen introduction into superfluid helium showed that these particles were captured by quantized vortices [6], the stable filaments did not appear even when the concentration of grains was sufficiently large to completely



occupy the vortex core [7]. Thus provided liquid helium was heated above the lambda point these structures decay. However, if hydrogen was introduced into superfluid helium as separate molecules, the long stable filaments have grown, which survived even in normal helium [8].

The proposal of [4] was simultaneously implemented in Switzerland and Russia [9, 10]. In both cases, the metal was introduced in the bulk He II by laser ablation of metal targets immersed in liquid. In subsequent studies the nanowires was grown from many metals and alloys [11–14], as well as from germanium and silicon [15]. The product always was a web of electrically interconnected nanowires. The metallic nanowires in whole nanoweb had the same diameter, depending on the thermophysical properties of the corresponding metal and ranging from 8 nm for fusible indium to 1.6 nm for refractory tungsten. To summarize, we have no possibility to change the nanowire diameter, but all nanowires in nanoweb have the same diameter and dense-packing structure.

Despite its exotic nature, the method is quite productive: the amount of nanoweb produced in only low-temperature experiment is sufficient for its application as a catalyst of chemical reaction under typical experimental conditions with flow reactor. Our nanoweb of Au, Pt, Pd and Nb confirmed their high catalytic activity in the model reaction of CO oxidation by oxygen [16–18].

However, the nanoweb produced by laser ablation of a metal in He II included an appreciable amount of nanospheres with diameters much larger than the nanowire diameter [19]. For the nanoweb application as a catalyst this was not significant disadvantage. However, for studying the quantum size effects and possible application of the nanowires in various quantum devices, this was a serious defect.

In this paper we have tried to improve the quality of nanowires produced in superfluid helium. That is not necessary, if the quantum effects in nanowire are of main interest, to produce a large amount of wires to cover requirements of scientists all over the world. Therefore, now one could not care about the high productivity of the method.

The nanowires were grown also in experiments with cold helium droplets large enough to provide the existence of a steady quantized vortex inside them [20–22]. The catalytic applications of nanowires such produced was also noted [21], but the productivity of such technique is insufficient for real chemical applications. In addition, it is hard to produce nanowires from refractory metals by the droplet technique, whereas as it was shown by our catalytic experiments [16–18], such nanowires possess there the greatest prospects. The wires such grown are rather short and contained the same imperfectness as our ones (see figure 3(f) in [21]).

The presence in nanoweb of spherical clusters being similar to those formed in common liquids was associated with exceedingly high density of a metal introduced into liquid helium [19]. The hot clusters then have no time for cooling down between their successive mutual collisions and they could grow larger than the critical size, determined by the formula (5) of [23].

The process of coagulation in bulk He II consists of two stages. During the first one, the coagulation leads to the formation of spherical dense-packing nanoclusters of critical size that had passed through molten stage due to self-heating. At the second stage, surface energy released upon merging of two cold clusters begins to be insufficient for complete melting of the coagulation product, so the metal clusters of critical size can only stick



together in the core of vortex, thereby forming a nanowire. Under typical experimental conditions, the first stage, which subsequently determines the diameter of the nanowire produced at the second stage, lasts no more than $25 \mu\text{s}$ [24]. Because the ballistic motion of particles in superfluid helium is possible only at velocities not exceeding the critical velocity (about 50 m s^{-1}) [25] the formation of the wire occurs already at a distance of about one millimeter from the surface of the filled by plasma gas bubble existed around laser beam spot. At such small distances, firstly, too high densities of the metal are still existed, provoking the formation of large spherical particles; and secondly, it is impossible to avoid the influence of all kinds of hydrodynamic perturbations on the structure of nanowires formed there. In new design of the experiment we tried to eliminate all above-mentioned drawbacks.

The setup we commonly used to grow nanowires in superfluid helium has already been described elsewhere [23]. Reducing the density of a metal introduced into superfluid helium by laser ablation simply by lowering the energy of laser pulses or by defocusing the laser beam both led to the termination of ablation earlier than to revealing the noticeable effect on the structure of nanoobjects formed in He II [19]. In addition, in our routine experiments the vortex rings in He II were nucleated due to thermal and shock perturbations at the laser focus. On the one hand, this increased the efficiency of coagulation—vortices appeared at the right time in the right place, but the high uncontrollable vortex density also contributed to the high probability of mutual collisions between clusters captured by the vortices and, consequently, to the high probability of large spherical clusters producing. So, we have decided to perform radical changes. Modernization of our method of nanowires production in superfluid helium undertaken in this work completely solves these problems.

For crucial reducing the density of the metal suspended inside HeII we have placed the laser target above the surface of superfluid helium using experience of Moroshkin and co-authors [26]. In previous experiments with laser target immersed in liquid helium, all nanoparticles formed during ablation entered liquid helium through the surface of the gas bubble formed at the focus of the laser, which was about 0.03 mm^2 [11]. Now when the target is placed in a gas at the distance of 4 mm from the surface of liquid helium, the area of metal ‘cloud’ on the liquid surface can be estimated as 10 mm^2 . Thus, the density of the metal on the surface of liquid helium now indeed is less than 1% of that in the experiments with immersed target. The difference between these two approaches is schematically demonstrated in figure 1.

In addition, it is positive that in such experimental setting the ablation is located outside the liquid helium, and thus laser pulses could not create in the liquid neither shock waves [27], nor the powerful local overheating [24]. However, it becomes necessary now to ensure that the distance between the ablation point and He II level is remaining constant throughout the experiment. Besides we should now take care about nucleation of quantized vortices in superfluid helium. In order to simultaneously lengthen the individual nanowires in the net it is promising to regularize the arrangement of vortices, served as the centers of nanowire growth. The simplest way to achieve all that is to rotate vessel with liquid He II, because the array of parallel to the axis of rotation vortices with the density proportional to the speed of rotation has to appear in the case [5]. For such purposes the rotation of whole cryostats is usually organized [28–30]. However the speed of rotation of



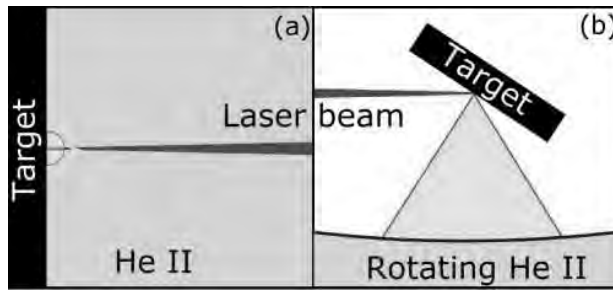


Figure 1. To the explanation of difference between the approach with submerged target (a) and the target lifted to gas above the surface of He II (b)

heavy and large helium cryostat could not exceed few revolutions per second. Meantime the background density of vortices in conditions close to ours is 10^5 cm^{-2} , the estimate of the vortices density in the bulk He II in vicinity of the operating laser focus gives the value of 10^7 cm^{-2} . According to the Feynman formula, the acceptable vortex density of 10^7 cm^{-2} is achieved by a rotation at rate of 20 revolutions per second [19]. But more fundamental difficulty is the necessity of continuous pumping helium vapor during the process of nanowire growth, which is demanded in view of continuous operation of the ablating laser. To keep the temperature of liquid helium below λ -point ($T_\lambda = 2.17 \text{ K}$) under permanent laser operation, one has to use powerful and heavy pumps, unable to be rotated together with the cryostat. Therefore, it was decided to organize the rotation of only the cell with liquid helium. The very idea of rotating a vessel with He II within a motionless cryostat is not new. Similar constructions were used in classical studies of superfluidity and in particular of quantized vortices where the rotation from the outer motor was transmitted into cryostat through a seal [31–33]. However, the recent successes in producing miniature efficient electric motors for various purposes allowed realizing the scheme with the inner electric motor.

2. Experimental

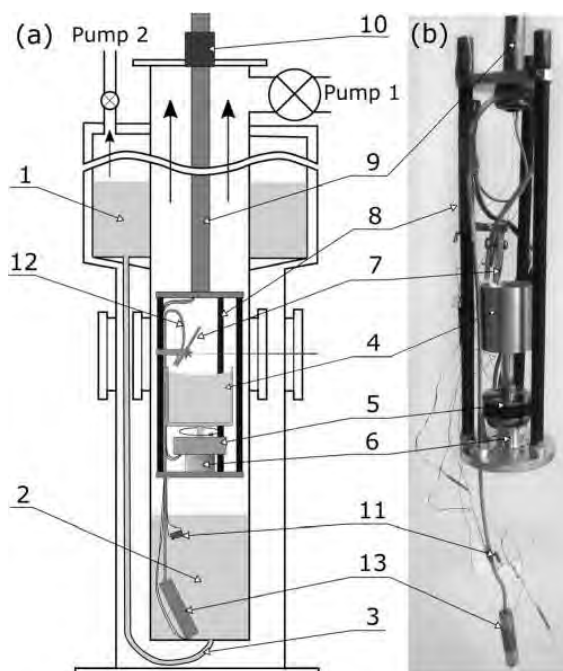
New apparatus was set in the LHe cryostat with an elongated central shaft, specially designed for us in the Institute of Solid State Physics RAS. The principal scheme of the modernized experimental setup is shown in figure 2. Liquid helium bath 1 was connected to the central shaft 2 by a tube 3 with an inner diameter of 3 mm, so liquid helium filled both vessels simultaneously. Helium vapor was then pumped out separately from the bath and the shaft to lower the temperature well below $T_\lambda = 2.17 \text{ K}$. The typical volume occupied by liquid helium after its transition to superfluid is shown in the figure in blue color.

The experimental cell was located in the middle part of the shaft opposite the optical windows. It included the metallic vessel 4 filled with superfluid helium, which was fixed strictly coaxial with the electric motor 5, rigidly connected with the support 6. The metal target 7 presents a foil of the explored metal, located at an angle of 30° – 45° to the vertical, its center was at the distance of 4 mm above the upper edge of the rotated vessel. Whole cell was connected by three fiberglass tubes 8 with stainless steel rod 9 which can be moved up and down through the Wilson seal 10 on the cryostat cap.

During experiment the level of superfluid helium in the shaft was kept below the cell bottom manually by adjusting the pressure difference in the shaft and the helium bath. The



Figure 2. The scheme of modernized low-temperature set-up (a) and the photo of low temperature cell (b).
 1 – Liquid helium bath, 2 – central shaft, 3 – tube, 4 – metallic vessel, 5 – electromotor, 6 – support, 7 – target for ablation, 8 – fiberglass tubes, 9 – steel rod, 10 – Wilson seal, 11 – carbon resistor, 12 – capillary, 13 – thermo-mechanical pump



position of this level was determined by home-made level detector based on measuring the impedance of the vertically installed carbon rod 11; because due to the difference in the heat-removal regimes in gaseous and liquid helium the temperature of submerged part of the rod was lower than of the rest [34]. The carbon resistor was located 10 cm below the position of the windows, to signalize that the liquid level is approaching the bottom of the cell. The rotating vessel was made of duralumin and had an internal diameter of 26 mm and a height of 40 mm. The superfluid helium permanently poured up to the vessel from the bottom of the shaft through a capillary 12 with a diameter of 1 mm by using the thermomechanical pump 13. The excess He II drained down from the vessel through the 1 mm grooves in the upper part of the cup.

The commercial brushless electric motor (Impact Brushless Outrunner Electric Motor 2205/22-1350) preliminarily purified from the factory liquid lubricant was used for rotation the vessel. The absence of brushes fundamentally eliminated the problem of ensuring the electrical contact between the rotor and collector at low temperatures [19]. The external controller provided a pulse-duration modulated alternate voltage on motor windings with given rate, which was tracked by oscillograph. Knowing the rate and keeping in mind that it is strictly connected with the rotation frequency (coefficient was found using high-speed camera) we were able to control rotational velocity with accuracy of 1 Hz at low frequencies. The rotation was stable at speeds up to 30 Hz, and the power consumption inside the helium liquid at 10 Hz did not exceed 0.4 ± 0.1 W. The estimation was based on the following considerations. Both the heat released by motor action and the heat brought by laser beam under permanent pumping cause corresponding pressure growths in the shaft. Knowing the laser power and the pressure growths, one can calculate the heat release of the motor. The supplies of superfluid helium in the cryostat were sufficient for the experiment duration of

45–60 min under both continuous laser action and motor rotation; under permanent pumping kept the temperature of liquid helium was kept about 1.4 K.

The pulse-repetition solid state diode-pumped Nd:LSB laser with wavelength $1.064\ \mu\text{m}$, pulse energy 0.1 mJ, pulse duration 0.4 ns and adjustable repetition rate (from 50 Hz to 4000 Hz) was used for ablation. Only small fraction of particles ablated by laser from target eventually penetrates into liquid helium, the rest is entrained by evaporating helium to the pump. In order to intensify ablation the laser was used at the highest repetition rate of 4000 Hz. The laser beam was focused by a spherecal long-focus ($f = 18\ \text{cm}$) lens on the surface the target to form 100 micron-sized spot surrounded by well-discernible plasma radiation. In order to prevent the formation of a deep crater on metal surface, which leads to the deterioration of laser ablation, and eventually to its complete termination, the focal spot continuously moved across the target surface using a motorized positioner 8smc1-rs232, manufactured by ‘Standa’ (Lithuania).

3. Results and discussion

The metal particles trapped in liquid then coagulate forming nanowires to be then precipitated on standard carbon-coated grids located at the bottom of cell. The nanowires morphology and structure were investigated by using the transmission electron microscope JEM-2100 (JEOL). Before placing to the vacuum chamber of microscope, the samples were heated to room temperature and then contacted with environmental air. Figures 3 and 4 show the morphology and structure of nanowires made of indium and platinum correspondingly. These metals were chosen because the elemental analysis of the nanowires demonstrated practical absence of their oxidation with air oxygen.

Figure 3 demonstrates the crucial success attained in present work: the spherical inclusions inherent to the common technique, are absolutely absent in modified method, and the length of individual nanowires is much larger (we were able to find wires with lengths up to 2 microns).

As can be seen from figure 4, nanowires for both metals have a crystalline structure. The scenario of nanowire growth suggests the spherical nanoclusters to be the ‘bricks’ of future wire. In this case, the direction of the crystalline axes in merged clusters must be random and, therefore, the regions of monocrystallinity in the grown wire should have

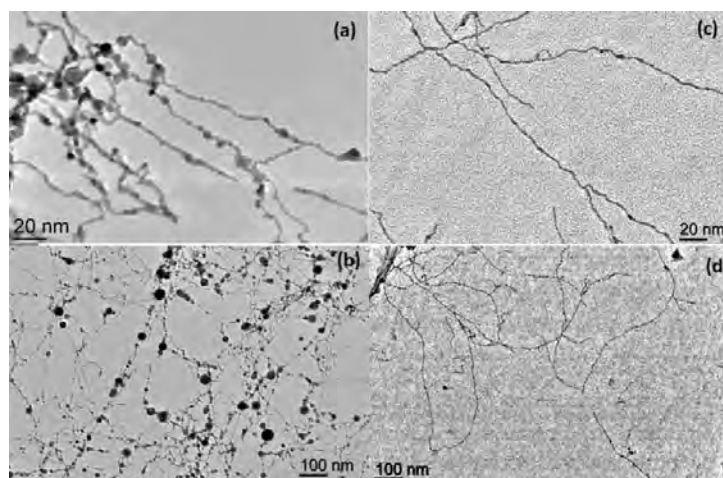
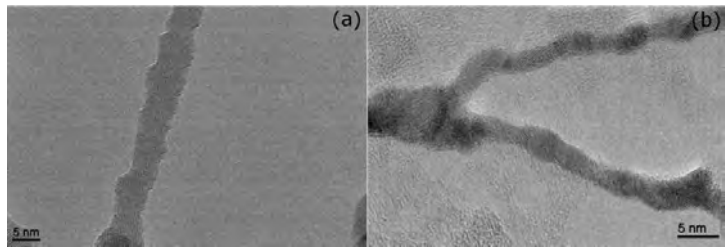


Figure 3. TEM images of platinum and indium nanowires; (a) and (b) – the morphology of nanowires produced by ablation of a target immersed in immobile superfluid helium for Platinum and Indium correspondingly; (c) and (d) – the same for an external target and a rotating vessel with superfluid helium



Figure 4. TEM images of the structure of individual nanowires of Indium (a) and of Platinum (b) grown by a modified technique



dimensions close to the wire caliber. For platinum, this does take place, but for indium, the areas of crystallinity are much longer than the caliber. That maybe the consequence of recrystallization of fusible indium at room temperature (melting temperature of indium is $T_m = 430$ K). Since the majority of nanowires' atoms are on the surface, processes related to surface atom mobility begin to play significant role at temperatures much lower than melting temperature of bulk metal. It happens near the Hüttig temperature $T_{\text{Hüttig}} = 1/3T_m$ [35]. For indium $T_{\text{Hüttig}}$ is about 110 K i.e. much lower than the room temperature. In thin nanowires mobility of surface atoms leads to the development of Rayleigh instability which induced the appearance of the bean-pod structure and then the breakdown of nanowires into a sequence of nanoclusters [13, 36, 37]. Even for refractory platinum, for which $T_{\text{Hüttig}} = 410$ K, it can be assumed that a noticeable 'pod-like' structure does not exist originally but can arose as the result of heating [36]. Anyway indiumnanowires were found to be more stable at room temperature than for instance silver nanowires, possibly because they are significantly more thick [36]. Nevertheless the appearance of crystalline facets for indium nanowires is indicative.

In the absence of spherical inclusions in the wires it is especially clearly seen that the diameters of individual nanowires for each of the metal are the same along whole sample. This means that nanowires are actually formed by coagulation of protocusters with very close sizes.

4. Conclusions

It still remains indefinite what is the main reason for cardinal improvement of nanowire quality—the rotation of the cell or replacement of the target out of liquid, further research is required here. But the very possibility of growing the uniquely clean thin nanowires with high quality from any metals and alloys has been clearly demonstrated in this paper.

Acknowledgments

This work was financially supported by Russian Science Foundation (grant № 18-19-00620).

References

1. Banerjee S, Dan A and Chakravorty D 2002 Review Synthesis of conducting nanowires J. Mater. Sci. 37 4261–71.
2. Wang N, Cai Y and Zhang R Q 2008 Growth of nanowires Mater. Sci. Eng. R 60 1–51.
3. Cao G and Liu D 2008 Template-based synthesis of nanorod, nanowire, and nanotube arrays Adv. Coll. Interface Sci. 136 45–64.
4. Gordon E B and Okuda Y 2009 Catalysis of impurities coalescence by quantized vortices in superfluid helium with nanofilament formation Low Temp. Phys. 35 209–13.
5. Donnelly R J 1991 Quantized Vortices in Helium II (Cambridge, NY: Cambridge University Press).



6. Bewley G P, Lathrop D P and Sreenivasan K R 2006 Visualization of quantized vortices *Nature* 441 588–8.
7. Paoletti M S, Fiorito R B, Sreenivasan K R and Lathrop D P 2008 Visualization of superfluid helium flow *J. Phys. Soc. Japan* 77 111007.
8. Gordon E B, Nishida R, Nomura R and Okuda Y 2007 Filament formation by impurities embedding into superfluid helium *JETP Lett.* 85 581–4.
9. Moroshkin P, Lebedev V, Grobety B, Neururer C, Gordon E B and Weis A 2010 Nanowire formation by gold nano-fragment coalescence on quantized vortices in He II *Europhys. Lett.* 90 34002.
10. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2010 Electric properties of metallic nanowires obtained in quantum vortices of superfluid helium *Low Temp. Phys.* 36 590–5.
11. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2013 The nanostructures produced by laser ablation of metals in superfluid helium *J. Low Temp. Phys.* 172 94–112.
12. Gordon E B, Karabulin A V, Morozov A A, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2014 Structure and properties of platinum, gold and mercury nanowires grown in superfluid helium *J. Phys. Chem. Lett.* 5 1072–6.
13. Gordon E, Karabulin A, Matyushenko V, Sizov V and Khodos I 2014 Stability and structure of nanowires grown from silver, copper and their alloys by laser ablation into superfluid helium *Phys. Chem. Chem. Phys.* 16 25229–33.
14. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2015 Production of ultrathin nanowires from refractory metals (Nb, Re, W, Mo) by laser ablation in superfluid helium *Laser Phys. Lett.* 12 096002.
15. Gordon E B, Karabulin A V, Krasnokutski S A, Matyushenko V I and Khodos I I 2017 Formation of nanostructures during coagulation of semiconductors in superfluid helium *High Energy Chem.* 51 245–9.
16. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Rostovshchikova T N, Nikolaev S A, Lokteva E S and Golubina E V 2015 Application of Au-Cu nanowires fabricated by laser ablation in superfluid helium as catalysts for CO oxidation *Gold Bull.* 48 119–25.
17. Gordon E B et al 2016 Catalysis of carbon monoxide oxidation with oxygen in the presence of palladium nanowires and nanoparticles *High Energy Chem.* 50 292–7.
18. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Rostovshchikova T N, Nikolaev S A and Lokteva E S 2016 Quasi-1D metals (Pd, Pt, Nb) as catalysts for oxidation of CO *Theor. Exp. Chem.* 52 75–84.
19. Gordon E B, Kulish M I, Karabulin A V, Matyushenko V I, Dyatlova E V, Gordienko A S and Stepanov M E 2017 Realization of mechanical rotation in superfluid helium *Low Temp. Phys.* 43 1055–61.
20. Gomez L F, Loginov E and Vilesov A F 2012 Traces of vortices in superfluid helium droplets *Phys. Rev. Lett.* 108 155302.
21. Latimer E, Spence D, Feng C, Boatwright A, Ellis A M and Yang S 2014 Preparation of Ultrathin Nanowires Using Superfluid Helium Droplets *Nano Lett.* 14 2902–6.
22. Thaler P, Volk A, Lackner F, Steurer J, Knez D, Grogger W, Hofer F and Ernst W E 2014 Formation of bimetallic coreshell nanowires along vortices in superfluid He nanodroplets *Phys. Rev. B* 90 155442.
23. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2011 Structure of metallic nanowires and nanoclusters formed in superfluid helium *J. Exp. Theor. Phys.* 112 1061–70.
24. Gordon E B, Karabulin A V, Kulish M I, Matyushenko V I and Stepanov M E 2017 Coagulation of metals in superfluid and normal liquid helium *J. Phys. Chem. A* 121 9185–90.
25. Varoquaux E 2006 Critical velocities in superfluids and the nucleation of vortices *C. R. Phys.* 7 1101–20.
26. Moroshkin P, Batulin R, Leiderer P and Kono K 2016 Metallic nanowires and mesoscopic networks on a free surface of superfluid helium and charge-shuttling across the liquid-gas interface *Phys. Chem. Chem. Phys.* 18 26444–55.
27. Garcia A, Buelna X, Popov E and Eloranta J 2016 Timeresolved study of laser initiated shock wave propagation in superfluid He *J. Chem. Phys.* 145 124504.
28. Hall H E, Hook J R, Wang S, Armstrong A J and Bevan T D 1994 Rotating millikelvin cryostat *Physica B* 194-6 41–2.
29. Kovacik V, Fukuda M, Igarashi T, Torizuka K, Zalalutdinov M K and Kubota M 1995 The ISSP Tokyo rotating cryostat *J. Low Temp. Phys.* 101 567–72.



30. Makiuchi T, Murakawa S and Shirahama K 2016 A compact rotating 1K cryostat for helium 4 studies J. Low Temp. Phys. 187 633–8.
31. Andronikashvili E L and Kaverkin I P 1955 Rotation of helium II at high speeds JETP 1 174–6.
32. Hall H E and Vinen W F 1956 The rotation of liquid helium II. I. Experiments on the propagation of second sound in uniformly rotating helium II Proc. R. Soc. A 238 204–14.
33. Bendt P J 1967 Attenuation of second sound in helium II between rotating cylinders Phys. Rev. 153 280–4.
34. Quine R W, Eaton S S and Eaton G R 1991 Liquid helium level detector Rev. Sci. Instrum. 62 1647–7.
35. Moulijn J A, van Diepen A E and Kapteijn F 2001 Catalyst deactivation: is it predictable? What to do? Appl. Catal. A: Gen. 212 3–16.
36. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I and Khodos I I 2015 Experimental study of thermal stability of thin nanowires J. Phys. Chem. A 119 2490–501.
37. Volk A, Thaler P, Knez D, Hauser A W, Steurer J, Grogger W, Hofer F and Ernst W E 2016 The impact of doping rates on the morphologies of silver and gold nanowires grown in helium nanodroplets Phys. Chem. Chem. Phys. 18 1451–9.

Received 6 November 2018,
revised 19 November 2018
Accepted for publication
21 November 2018
Published 21 December 2018



PREPARATION OF QUASI-ONE-DIMENSIONAL METAL HETEROSTRUCTURES BY SIMULTANEOUS ABLATION OF TWO TARGETS OVER SUPERFLUID HELIUM SURFACE

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, M.E. Stepanov, I.I. Khodos

High Energy Chemistry, 54 (2020) 164–169

The technique of simultaneous coagulation of two different materials in superfluid helium has been implemented, which allows one to create different ultrathin ($d < 8\text{ nm}$) heterostructures. A simultaneous ablation of two metal targets (indium and platinum) immersed in the volume of superfluid helium and targets carried out above the surface of the liquid has been performed. During the ablation of targets in the volume of helium, nanowires from individual metals are obtained. During the ablation of targets located above the surface, in addition to nanowires of individual metals, “combined” nanowires are formed when the wire from indium coaxially overlap the platinum wire.

Introduction

Metal nanowires are interesting objects for research both from the fundamental point of view (due to their unusual physical and chemical properties) and from the applied one because of the opening possibilities of using such objects in catalysis [1–4], electronics [5, 6], medicine [7], optics [8], etc. Of no less interest are metal nanowires of complex composition and structures (nanowires of alloys [9–11], core-shell wires [12], or wires with alternating sections [13]).

A universal method of growing ultrathin ($d < 10\text{ nm}$) nanowires by laser ablation in superfluid helium (He II), implemented by our group, allows one to obtain nanowires from pure metals and alloys and to study their properties [14–16]. The universality of the method allowed us to implement it for the synthesis of nanowires from any materials (even such refractory ones as tungsten [17]). It was found that in superfluid helium, networks of nanowires with a diameter of 2–8 nm are formed depending on the type of metal [18]. Since the entire growth process is carried out in inert helium at a liquid temperature below 2.17 K, the purity of the final products is determined by the purity of the starting target.

In our studies on the ablation of metal alloys in the He II volume, it was shown that this method can be used to obtain nanowires of various structures: homogeneous wires, heterostructures built of sections of various metals alternating with a period of 2–5 nm, and core-shell wires in which the core made of one metal is covered with a shell of another metal. The resulting structure depends on the nature of the solubility of the components of the initial alloy in each other [19].

The aim of this work was to obtain and study nanostructures formed during the simultaneous ablation of two targets from different materials.

Experimental

The experimental implementation of this idea was found to be a rather difficult task: the difficulty was that recent experiments on the coagulation of metal ablation products in He II showed that, apparently, the entire process of nanowire growth occurs at distances of no more than 1.5 mm from the target evaporation point [20]. In this case, the standard setup of our experiments, when ablation is carried out in the volume of superfluid helium, is not



suitable for growing heterostructures. Therefore, the solution to the problem may be the ablation of two targets located above the helium surface (as was shown in [21], metal nanowires are also formed upon ablation of targets above the surface of superfluid helium). In this case, expanding vapor clouds mix above the helium surface, and a mixture of two metal atoms penetrates into the volume of the superfluid liquid.

The work was carried out in two experimental setups: with the ablation of targets immersed in the volume of superfluid helium and with the ablation of targets carried out above the surface of the liquid (Fig. 1). In the first case, there should be an independent condensation of two different substances, and in the second, their joint condensation should be observed.

In this work, we used two optical pumped helium cryostats manufactured by RTI (Russia). The diameter of the central shaft of both cryostats was 60 mm; sapphire optical windows with a diameter of 40 mm were located in the lower part of the shaft. Helium vapor was pumped out using a fore-vacuum pump and a booster pump. The temperature at which the experiments were carried out was 1.2–1.4 K. A cryostat with an elongated lower part was used to ablate the target above the surface of liquid helium. The work in this setup was described in detail [21], where we successfully used this technique to obtain high-quality nanowires from individual metals.

Laser ablation was performed through a sapphire window using a solid-state Nd : LSB laser with the following characteristics: wavelength $\lambda = 1.062 \mu\text{m}$, pulse energy $E = 0.1 \text{ mJ}$, pulse duration $\tau = 0.4 \text{ ns}$, and pulse repetition rate $f = 4000 \text{ Hz}$. The laser beam using a BD27 beam displacer manufactured by Thorlabs (USA) was divided into two parallel beams of approximately equal intensity and separated by 2.7 mm in the vertical plane. The diameter of the spot at the laser focus was about $100 \mu\text{m}$. The duration of ablation in both settings was 30 min. Plates of chemically pure materials were used as targets. As a result, their condensation products settled to the bottom of the experimental cell, where copper or gold grids 3 mm in diameter coated with a perforated carbon film usually used in transmission electron microscopy (TEM) were placed. After warming the cryostat to room temperature, the samples were examined using a JEOL JEM-2100 electron microscope.

Choice of target materials

We selected platinum (Pt) and indium (In) as the first materials for studying the possibility of creating heterostructures with laser beam splitting. The choice is explained by the fact that these metals differ in the lattice parameters and are resistant to oxidation by atmospheric oxygen. Nanowires of these metals differ significantly in diameters, which

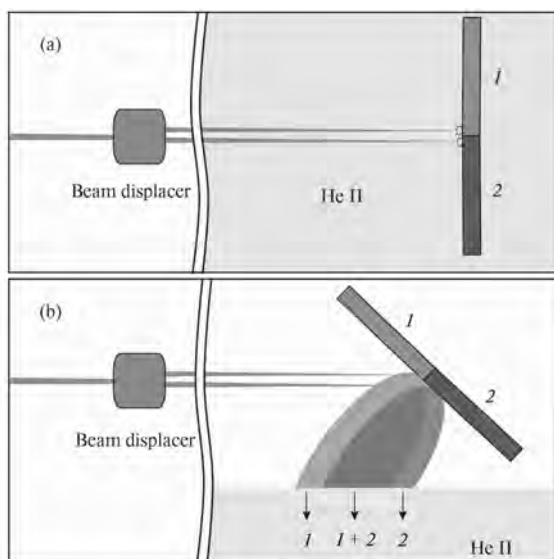


Fig. 1. Experimental setup with targets
(a) immersed in a liquid volume and
(b) carried out above its surface



depend on the thermophysical properties of materials [18], and in contrast in electron microscopic images (^{78}Pt is visible better than ^{49}In), which makes it easy to identify wires of these materials.

Figure 2 shows the images and electron diffraction patterns of individual Pt and In wires obtained separately during ablation in a volume of He II by a nonsplit beam. It can be seen that the diameter of the Pt wires is 3–4 nm, the polycrystalline wires have an fcc lattice, and the crystallite size is approximately equal to the diameter of the wires. The diameter of In nanowires is 8–10 nm, they also have an fcc structure and consist of clusters approximately 2–3 nm in size, which is reflected by diffuse diffraction rings in the electron diffraction pattern shown in Fig. 2d. Separate bright spots on electron diffraction patterns correspond to single-crystal balls, which also form in the described process and fall into the studied region. It should be noted that In nanowires have an fcc lattice, in contrast to the bulk indium lattice, which, according to [22], is tetragonal.

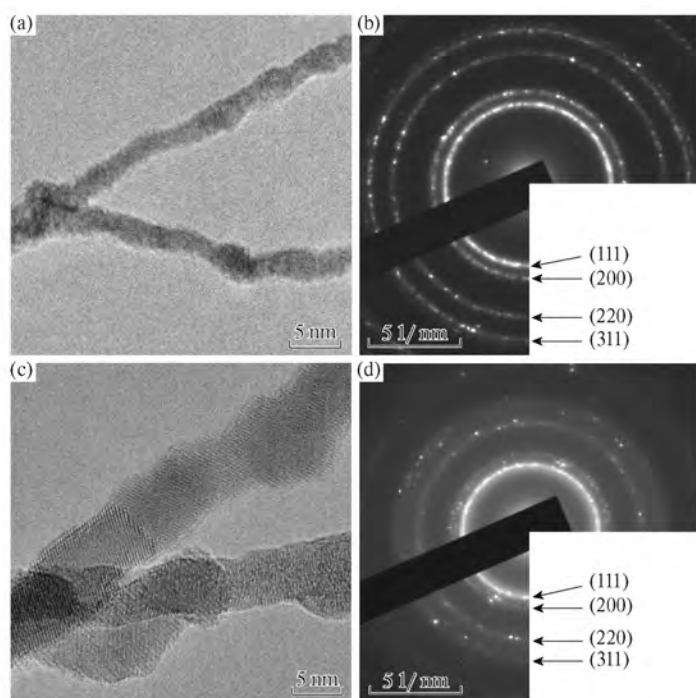


Fig. 2 TEM images of wires obtained by ablation with non-bifurcated beam: (a, b) platinum, (c, d) indium

Results and discussion

Electron microscopic images of nanowires obtained by ablation of targets by a splitted beam in the volume of helium and above its surface are shown in Fig. 3.

In both cases of the location of the targets in microphotographs, two different types of nanowires can be distinguished, namely thin and thick ones. It can be seen that the Pt wires obtained by individual ablation are significantly thinner as compared to indium wires, and the contrast in their image is stronger due to the significantly higher atomic number of platinum in comparison with indium. It should also be noted that the concentration of wires obtained by sputtering targets in vacuum is lower, which is primarily due to the fact that the ascending vapor flow of cooled helium carries away most of the vaporized metal and does not reach the surface of the liquid.



The main difference between the samples obtained by ablation above the surface of superfluid helium (Fig. 3b) and the samples obtained by ablation in volume (Fig. 3a) is the presence of sections of the transition of indium nanowires to platinum in the first case. Figure 4 shows that in some cases the ends of a wire of one metal overlap the ends of wires of another metal. An analysis of the diffraction patterns of individual wires (Fig. 2) shows that the interplanar distances of the (200) and (311) planes of indium practically coincide with the interplanar distances of the (111) and (220) planes of platinum, respectively. This coincidence indicates that, when In and Pt sections are overlapped, no significant elastic misfit stresses should occur, i.e. joining of such sections should lead to no significant increase in elastic energy and can be generally energetically favorable, taking into account a decrease in the surface energy of the boundary of these sections when they are joined. This suggests that the contact between such sections can be quite strong, and with careful selection of conditions (geometry, laser beam intensities), a significant part of the joint situations, i.e. heterostructures with sequential alternation of sections, may form in all cases.

Despite the fact that, as was shown above, the amount of products formed during ablation in the volume of superfluid helium is much higher, such structures were not found in them. This additionally indicates that in the volume of He II, the condensation of products occurs in the immediate vicinity of the ablation site, and the finished condensation products are mixed already at the stage of sedimentation on the substrate.

From the images obtained, it can be concluded that the wires consist of either indium or platinum. Images that would indicate the presence of wires of mixed composition, in which the second element would be present in significant quantities, were not found. Elect-

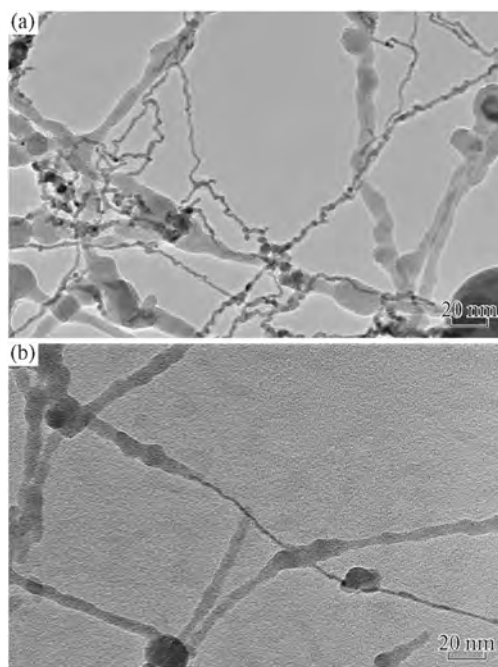


Fig. 3. Nanowires obtained by simultaneous but spatially separated sputtering of Pt and In targets by bifurcated laser beam. Targets are located (a) in the volume of HeII or (b) above the surface of HeII

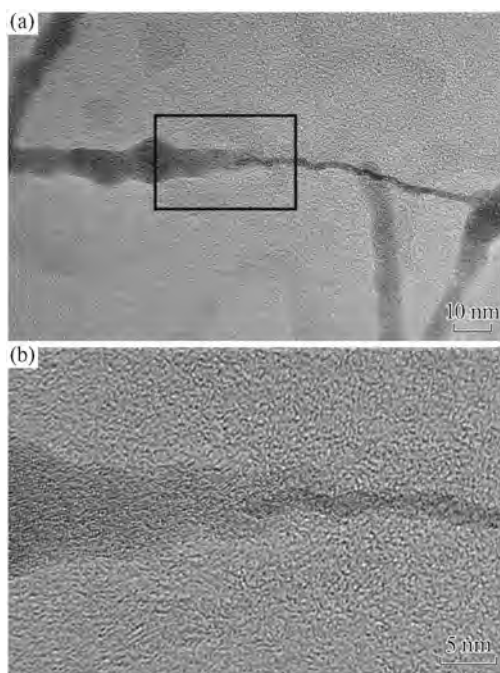


Fig. 4. Joining of indium and platinum nanowires



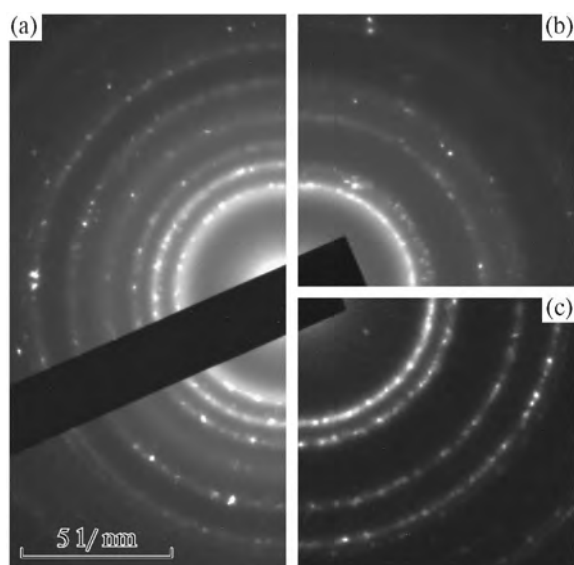


Fig. 5. Comparison of electron diffraction patterns of nanowires obtained by simultaneous sputtering of Pt and In targets by bifurcated laser beam over HeII surface (a) with electron diffraction patterns of (b) pure In and (c) Pt nanowires obtained by ablation in the volume of HeII

ron diffraction patterns may be more sensitive to the presence of impurities of the second element. Therefore, we attempted to find out whether platinum and indium fuse with each other to form homogeneous nanowires of mixed composition when the clouds of evaporated targets overlap while platinum and indium are simultaneously ablated. To make this, we compared electron diffraction patterns of wires obtained by simultaneous ablation of two targets above the HeII surface with electron diffraction patterns of pure Pt and In wires (Fig. 5). It is clear from Fig. 5a that the electron diffraction pattern of the sample obtained by ablation of two targets consists of a set of lines characteristic of pure indium nanowires (Fig. 5b) and platinum (Fig. 5c) that are not shifted from each other. This allows us to conclude that during joint ablation of Pt and In, the wires consist of one element: thinner ones are made of platinum, and thicker ones are made of indium (Fig. 4). Nanowires with alternating sections consisting of “elementary” clusters, from which nanowires are formed in He II vortices and which approximately correspond to the diameter of the wires, were not found in the resulting structures.

Conclusions

Simultaneous ablation of two metal targets (made of indium and platinum) has been performed both in the volume of superfluid helium and above its surface. During ablation in the volume of helium, nanowires of individual metals have been obtained, the pairs of which do not interact with each other at a given distance between the points of incidence of the splitted beam on the target. During ablation above the surface, in addition to nanowires of individual metals, a certain number of “combined” nanowires are formed, when the wire from indium coaxially joins the wire from platinum. No mixed wires were found.

The described technique for producing “combined” nanowires from various materials can be used to create other pairs of conductors, for example, superconductor–metal, superconductor–semiconductor, superconductor–ferromagnet, and metal–semiconductor in order to study the corresponding proximity effects, as well as from refractory metals.

The length of such a wire (100–200 nm) makes it possible to include it in the measuring circuit.



Acknowledgments

The authors are grateful to the Shared Research Center in Chernogolovka for using the JEM-2100 electron microscope.

Funding

This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 18-19-00620.

References

1. Wang, H., Xu, C., Cheng, F., and Jiang, S., *Electrochem. Commun.*, 2007, vol.9, no.5, p.1212.
2. Wang, S., Jiang, S.P., Wang, X., and Guo, J., *Electrochim. Acta*, 2011, vol.56, no.3, p.1563.
3. Percival, S.J. and Zhang, B., *J. Phys. Chem. C*, 2013, vol.117, no.27, p.13928.
4. Gordon, E.B., Karabulin, A.V., Matyushenko, V.I., Sizov, V.D., Rostovshchikova, T.N., Nikolaev, S.A., Lokteva, E.S., Golubina, E.V., Maslakov, K.I., Krotova, I.N., Gurevich, S.A., Kozhevnikov, V.M., and Yavsin, D.A., *High Energy Chem.*, 2016, vol.50, no.4, p.292.
5. Li, Y., Qian, F., Xiang, J., and Lieber, C.M., *Mater. Today*, 2006, vol.9, no.10, p.18.
6. Thelander, C., Agarwal, P., Brongersma, S., Eymery, J., Feiner, L.F., Forchel, A., Scheffler, M., Riess, W., Ohlsson, B.J., Gosele, U., and Samuelson, L., *Mater. Today*, 2006, vol.9, no.10, p.28.
7. Mirvakili, S.M., Pazukha, A., Sikkema, W., Sinclair, C.W., Spinks, G.M., Baughman, R.H., and Madden, J.D.W., *Adv. Funct. Mater.*, 2013, vol.23, no.35, p.4311.
8. Dittlbacher, H., Hohenau, A., Wagner, D., Kreibitz, U., Rogers, M., Hofer, F., Aussenegg, F.R., and Krenn, J.R., *Phys. Rev. Lett.*, 2005, vol.95, no.25.
9. Cao, X., Wang, N., Han, Y., Gao, C., Xu, Y., Li, M., and Shao, Y., *Nano Energy*, 2015, vol.12, p.105.
10. Wang, X., Wang, R., Shi, L., and Sun, J., *Small*, 2015, vol.11, no.36, p.4737.
11. Wang, Y., Niu, C., and Zhu, Y., *Nanomaterials*, 2019, vol.9, no.2, p.173.
12. Lauhon, L.J., Gudiksen, M.S., Wang, D., and Lieber, C.M., *Nature*, 2002, vol.420, no.6911, p.57.
13. Fu, H., Yang, X., Jiang, X., and Yu, A., *Langmuir*, 2013, vol.29, no.23, p.7134.
14. Gordon, E.B., Karabulin, A.V., Matyushenko, V.I., Sizov, V.D., and Khodos, I.I., *Low Temp.Phys.*, 2010, vol.36, no.7, p.590.
15. Moroshkin, P., Lebedev, V., Grobety, B., Neururer, C., Gordon, E.B., and Weis, A., *Europhys. Lett.*, 2010, vol.90, no.3, p.34002.
16. Gordon, E.B., Karabulin, A.V., Matyushenko, V.I., Sizov, V.D., and Khodos, I.I., *J. Low Temp.Phys.*, 2013, vol.172, nos.1–2, p.94.
17. Gordon, E.B., Karabulin, A.V., Matyushenko, V.I., Sizov, V.D., and Khodos, I.I., *Laser Phys. Lett.*, 2015, vol.12, no.9, p.096002.
18. Gordon, E.B., Karabulin, A.V., Matyushenko, V.I., Sizov, V.D., and Khodos, I.I., *J. Exp.Theor. Phys.*, 2011, vol.112, no.6, p.1061.
19. Gordon, E.B., Karabulin, A.V., Matyushenko, V.I., Nikolaev, S.A., and Khodose, I.I., *Mendeleev Commun.*, 2017, vol.27, p.385.
20. Gordon, E.B., Kulish, M.I., Karabulin, A.V., and Matyushenko, V.I., *Low Temp.Phys.*, 2017, vol.43, no.9, p.1086.
21. Gordon, E.B., Stepanov, M.E., Kulish, M.I., Karabulin, A.V., Matyushenko, V.I., and Khodos, I.I., *Laser Phys. Lett.*, 2019, vol.16, no.2, p.026002.
22. Balamurugan, B., Kruis, F.E., Shivaprasad, S.M., Dmitrieva, O., and Zahres, H., *Appl. Phys. Lett.*, 2005, vol.86, no.8, p.083102.

Received December 5, 2019;
revised December 5, 2019;
accepted December 27, 2019



j) Нанокатализ

APPLICATION OF Au – Cu NANOWIRES FABRICATED BY LASER ABLATION IN SUPERFLUID HELIUM AS CATALYSTS FOR CO OXIDATION

*E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, T.N. Rostovshchikova
S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva, E.V. Golubina
Gold Bulletin, 48 (2015) 119–125*

The copper-doped gold nanowires (4 nm in diameter) were produced by the novel technique based on laser ablation of Au–Cu alloy inside superfluid helium. The principle of the method is using the quantized vortices as the 1D template for the condensation of the ablation products into thin threads. The nanowires were applied as the catalyst in CO oxidation with oxygen. The activity of Au–Cu nanowires deposited on glass filters was compared with that for monometallic and bimetallic Au and Cu particles (3–8 nm in diameter) deposited on alumina by traditional deposition-precipitation and impregnation techniques. The apparent activation energies of the reaction (E_a) were 95 and 98, 150, and 147 kJ/mol for Au–Cu nanowires and Au–Cu, Au, and Cu particles, respectively. During running-in of the Au–Cu nanowirebased catalyst, E_a decreased to 20 kJ/mol and retained at this level in the subsequent cycles of lowering and raising the reactor temperature.

Introduction

For a long time, gold had been regarded as a very stable and catalytically inert metal until Haruta et al. found the surprisingly high activity of supported gold nanoparticles (NPs) for the low-temperature CO oxidation [1]. The recent progress in heterogeneous catalysis by gold resulted in remarkable investigations that demonstrated the high activity of 3–10-nm gold particles in the conversion of bioethanol to synthetic hydrocarbons [2], water gas shift reaction [3, 4], selective hydrogenation of alkynes [5–8], hydrodechlorination of organic molecules [9, 10], and CO oxidation [11–13]. Numerous data on gold catalysis indicate that, apart from the critical particle size (3–5 nm) [1, 14], significant roles for catalytic activity are played by particle shape [13, 15], particle surface chemistry [16, 17], the support nature [10, 18], mutual arrangement of particles, the sign and quantity of the electric charge on the nanoparticle surface [19, 20]. However, the activity of gold nanoparticles is mainly attributed to the high surface curvature [1, 13]. This is supported by the fact that high catalytic activity is exhibited also by gold films provided that they have surface defects with nanometer lateral dimensions [15, 16].

Quasi-one-dimensional (1D) structures, nanowires (NWs) [21, 22], also have a high surface curvature; therefore, it can be expected that gold wires with diameters close to the critical diameter of gold particles (3–5 nm) would also be catalytically active. However, the structural characteristics of nanowires such as the shape and the state of the surface obviously differ from those for particles. Therefore, it appeared of interest to verify the possibility of using nanowires in catalysis in relation to CO oxidation as the test process and to compare the action of nanowires and gold nanoparticles of a similar diameter under the same conditions. Nanowires have not been virtually used as catalysts [23, 24], as it is



difficult to manufacture nanowires of small diameter in amounts sufficient for direct measurement of the catalytic action. From this standpoint, unique opportunities are provided by the recently developed method for the synthesis of metal nanowires by laser ablation in superfluid helium (LA) [25, 26], which allows preparation from different metals in exceptionally pure conditions of considerable amounts of nanoweb consisting of single nanowires, interconnected via metallic bonding.

The nanowire thickness and thermal stability depend on the metal thermochemical properties [25, 26]. In particular, the gold wires have diameter of 4 nm and, despite the high melting point of bulk gold (1336 K), decayed into chains of separate nanoclusters already at room temperature [27]. Since this decay is induced by unfreezing the surface atom mobility, the nanowire temperature stability can be improved by doping the major metal by another metal that is readily oxidized in air, as was demonstrated by copper doping of silver [25, 26]. In addition, as compared with other metals, copper seems to be a promising additive to gold due to the synergistic effects detected for supported Au–Cu catalysts in the CO oxidation [28–30].

The purpose of this study was to test the Au–Cu(NW) nanowires as a catalyst and to compare its activity for CO oxidation with that of Au–Cu(NP), Au(NP), and Cu(NP) nanoparticles produced by traditional deposition-precipitation and impregnation methods.

Experimental

Synthesis of catalysts

Au–Cu(NW) were produced by LA method inside of liquid helium optical cryostat (Institute of Problems of Chemical Physics of the RAS) pumped out to achieve liquid helium transition to superfluid state. The nanowires were grown from the metal atoms and small clusters embedded into superfluid helium at 1.7 K by laser ablation from the surface of metal targets immersed into liquid helium [25, 26]. The solid-state Nd:LSB diode-pumped (the wavelength is 1.06 μm , the pulse repetition frequency is from 1 to 4 kHz, the pulse energy is 10^{-4} J, and the pulse duration is 0.4 ns) was used for ablation. A gold-copper alloy (1:1) plate was used as a precursor for the Au–Cu(NW). Carbon-coated grid (CCG) was used as a support in the preparation of the Au–Cu(NW)/CCG samples for transmission electron microscope (TEM) measurements. A glass microporous filter, 0.1 cm thick and 2.1 cm in diameter, was used as a support in the preparation of the Au–Cu(NW)/glass samples for catalytic experiments. In the preparation of Au–Cu(NW)/glass samples, the ablation time was about 30 min. During this period, about 1×10^{-6} mol of the metal was deposited to give a 20–30-nm thick web layer containing Au–Cu nanowires.

Since whole ablated substance was captured to the quantized vortices, eventually forming nanowires, the integral metal ratio in nanowire coincided with that in the alloy being equal to 1:1 in our case. However, the first stage of the metal particles coagulation of leads to their melting. Because the element composition does not correspond to existence of Au/Cu solid solution, the metal in the resulting cluster is separated under cooling into two phases – one, enriched by gold, and second, enriched by copper. It takes place up to the nanocluster size equal approximately to 4 nm. Then, the clusters stuck together by the partial melting at the contact point to form a nanowire. Besides, unlike the large pieces of metal, the contribution of the surface energy to the free energy is very significant in a



nanoscale, which leads to additional enrichment of nanowire surface by lighter copper atoms. As a result, in addition to quasi-periodic heterogeneity of the elemental composition along the axis of nanowire, there is heterogeneity in transversal direction. In more detail, this effect has been considered by us for Ag/Cu nanowires with different elemental compositions [22].

Au–Cu (NP), Au(NP), and Cu(NP) nanoparticles were prepared by impregnation and deposition-precipitation as described in [29]. Gamma alumina (Catalyst LLC, $S = 160 \text{ m}^2/\text{g}$, 2-mm grains) was used as a support for particles. $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ and HAuCl_4 (Sigma-Aldrich, 98–99% pure) were used as precursors. The actual metal content in $\text{M}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ samples was measured by atomic absorption spectroscopy using a ThermoCE 3000 AA spectrometer. The gold and copper contents of $\text{Au}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Cu}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ samples were 0.1 and 0.05 wt%, respectively. The gold and copper contents of $\text{Au–Cu}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ were 0.08 and 0.03 wt%, respectively.

TEM measurements

TEM measurements were carried out on a JEOL JEM 2100 F/UHR microscope with 0.1-nm resolution. Au–Cu(NW)/CCG samples were analyzed without any treatment. $\text{M}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ specimens for TEM analysis were prepared by ultrasonic dispersion of $\text{M}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ sample in ethanol followed by deposition of a drop of the suspension on a CCG. The assignment of dark spots visible in the images of the $\text{M}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ specimens to the metal particles was performed by means of electron diffraction X-ray analysis with application of a JED-2300 X-ray spectrometer. The size of particles was calculated as maximum linear size. For each $\text{M}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ sample, 300 to 380 particles were processed to determine the average particles diameter.

CO oxidation

The pulsed microcatalytic method commonly used, in particular by us, for the catalysts testing [29] was applied for the comparative study of nanoparticle and nanowire catalytic activity. The oxidation of CO with molecular oxygen was performed in a tubular quartz reactor in a pulsed regime. An Au–Cu(NW)/glass sample (one piece, $[\text{Au}] + [\text{Cu}] \approx 1 \times 10^{-6} \text{ mol}$) or $\text{M}(\text{NP})/\text{Al}_2\text{O}_3$ sample (0.2 g, $[\text{M}] \approx 1 \times 10^{-6} \text{ mol}$) was placed into the reactor on a Schott filter ($S = 0.785 \text{ cm}^2$) in such a way as to prevent as fully as possible the gas mixture from bypassing the catalyst. Helium was continuously passed through the reactor under atmospheric pressure at a flow rate of 60 mL/min. In experiments with nanoparticles, the reactor containing the catalyst was maintained at 573 K for 1 h to clean the catalyst surface from the impurities adsorbed from air. The nanowires because of their low thermal stability were not preliminarily heated. Then, the required reactor temperature was established and 1 mL of the gas mixture was injected pulse-wise into the helium flow under atmospheric pressure ($\text{CO} / \text{O}_2 / \text{He} = 2 : 1 : 97 \text{ vol}\%$). The quantitative composition of the flow at the reactor outlet was determined by GC on an LHM-80 gas chromatograph equipped with a thermal conductivity detector and a packed column (Porapak Q, 1 m, id 2 mm). CO conversion was calculated from CO and CO_2 peak areas using pre-constructed calibration curves. Ten to 30 successive pulses of the reactant were introduced into the flow every 20 min in order to obtain steady state CO conversion value (α) at each reaction temperature. The thus-measured temperature dependence of the



steady state CO conversion far from its limiting value achieved at high temperature reflects the temperature dependence of the catalytic reaction rate [31]. The catalyst performance was determined based on the apparent activation energy [31]. The value of the activation energy was estimated as the slope of the dependence of $\ln(a)$ on the $1/RT$, where $[a]$ is the steady state CO conversion in 1–40% range as described in [32].

Results and discussion

Catalyst characterization

Figure 1 shows typical TEM photomicrographs of the CCG-supported Au–Cu(NW) sample. It can be seen that nanowires as placed on the carbon surface as were hanging as a web in 2- μm CCG holes. According to TEM data, the single Au–Cu(NW) wire diameter is 4 nm, while the average length of a nanowire is about 200 nm. The copper stabilizing influence on gold can be traced in Fig. 2, which shows a TEM image of neat gold nanowires, which, unlike the Au–Cu analogues, decay into the chains of nanoclusters even at 300 K. Considering the nanowires' temporary contact with the air, the most probable chemical composition for them is (Au–Cu)core-(CuO)shell as it is for nanoparticles of the same composition. The TEM image of Au(NP)/Al₂O₃ and Cu(NP)/Al₂O₃ is presented in Figs. 3 and 4, respectively. The gold particle size in the Au(NP)/Al₂O₃ sample is in the 1- to 11-nm range, the average gold particles size being 5 nm. The copper particle size in a Cu(NP)/Al₂O₃ sample varies from 1 to 7 nm, the average particles size being 3 nm. The TEM image of the bimetallic Au–Cu(NP)/Al₂O₃ reference sample is presented in Fig. 5. The average particles size in the bimetallic sample is 8 nm. A study of the surface chemistry for Au(NP)/Al₂O₃, Cu(NP)/Al₂O₃, and Au–Cu(NP)/Al₂O₃ was reported previously [29]. It follows from the XPS and DRIFTS data [29] that copper in Cu(NP)/Al₂O₃ occurs as CuO; gold in Au(NP)/Al₂O₃ occurs as Au⁰; and in Au–Cu(NP)/Al₂O₃, a large portion of Cu-containing particles are located on the surface of gold particles.

CO oxidation

Figure 6 shows the plot for CO conversion versus the number of reaction mixture pulses for the Au–Cu(NW)/glass sample. It can be seen that during reactor heating, the CO conversion on Au–Cu(NW) does not depend on the pulse number. The invariable conversion of CO irrespective of the pulse number is also retained during the reactor

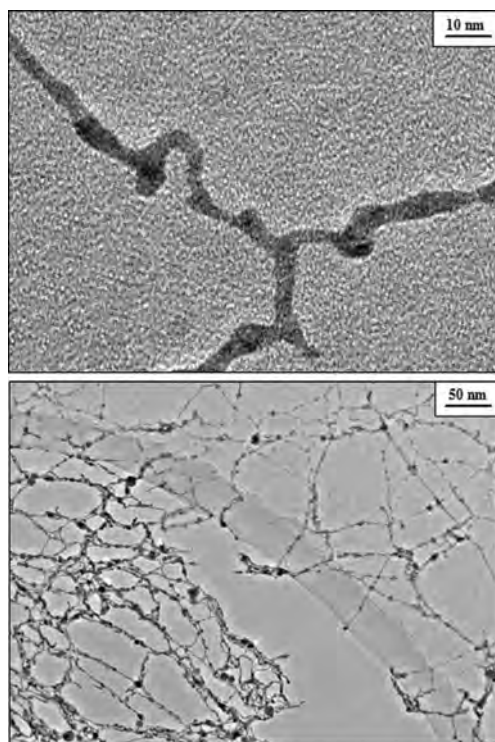


Fig. 1. TEM image of the Au–Cu nanowires on CCG support at 300 K



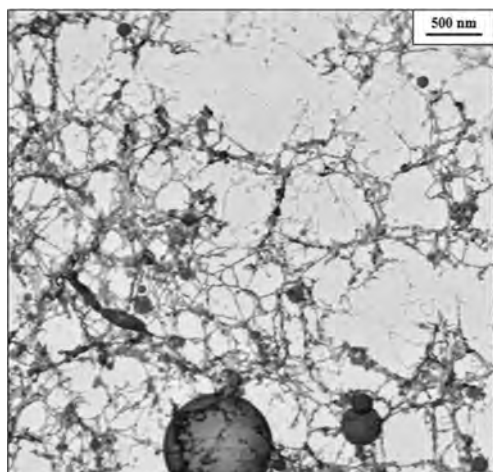


Fig. 2. TEM image of the Au nanowires on CCG support at 300 K (unpublished data from our previous study; ref. [27])

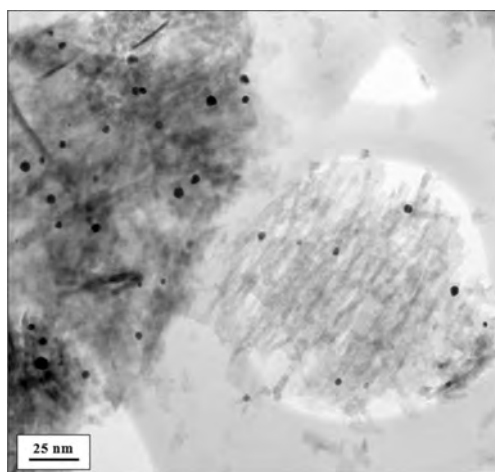


Fig. 3. TEM image of the nanoparticles in the Au/Al₂O₃ catalyst at 300 K

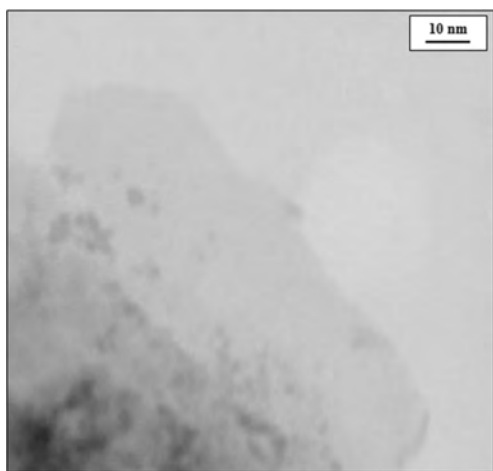


Fig. 4. TEM image of the nanoparticles in the Cu/Al₂O₃ catalyst at 300 K

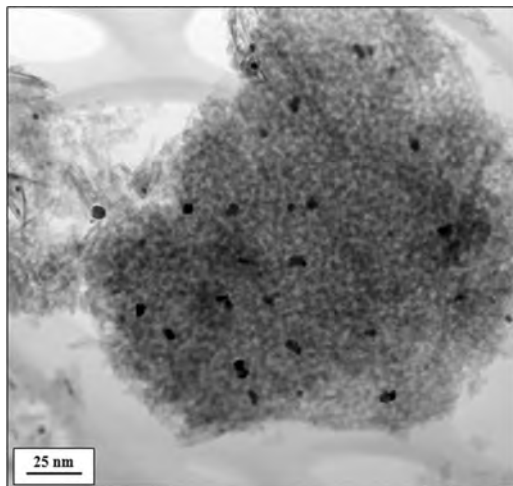


Fig. 5. TEM image of the nanoparticles in the Au–Cu/Al₂O₃ catalyst at 300 K

cooling. A similar behavior was demonstrated by NP-based reference catalysts. Note that in all experiments, the limiting conversion of CO was $53 \pm 5\%$ and did not change as the reaction temperature was raised. This result implies that during the catalytic experiment, some invariable part of the flow permanently bypasses the catalyst and does not participate in the reaction. However, since this contribution does not depend on temperature, it does not affect the activation energy values.

The curves for the steady state CO conversion versus temperature in the presence of NW- and NP-based catalysts are shown in Fig. 7. During the first heating of the reactor, the efficiency of CO oxidation varies in the following sequence: Au(NP) < Cu(NP) < Au–Cu(NP) < Au–Cu(NW) (Fig. 7, 1 (H)). The activation energy calculated from Fig. 8 is 98, 95, 147, and 150 kJ/mol for Au–Cu(NW), Au–Cu(NP),



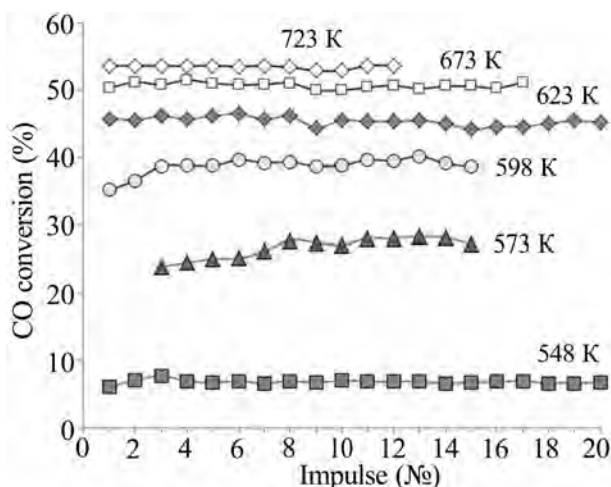


Fig. 6. CO conversion as a function of the pulse number over Au–Cu(NW)/glass catalyst, the first cycle; heating mode

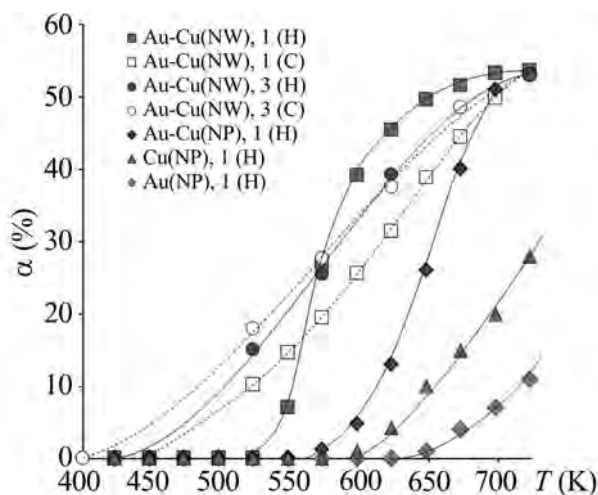


Fig. 7. Steady state CO conversion (α) as a function of reaction temperature (T) over monometallic and bimetallic catalysts. 1 and 3 are the first and the third cycle, respectively; H is heating from 298 to 723 K; C is cooling from 723 to 523 K

Cu(NP), and Au(NP), respectively. The dependence of α on T for the Au–Cu(NW) sample after the first heating is shown in Fig. 7 (Au–Cu(NW), 1 (C)). This dependence was recorded during cooling and is characterized by low activation energy of about 30 kJ/mol. The last demonstrates the catalyst's running-in during the first heating. In the course of Au–Cu(NW) catalyst subsequent heating and cooling cycles, the changes in temperature dependences become weaker (Fig. 7, cf. Au–Cu(NW), 1 (H), 3 (H), and 3 (C)), and in the third cycle, Au–Cu(NW) catalyst reaches the stable operation mode, which has an activation energy of about 20 kJ/mol.

The decrease in the activation energy with time during the catalytic process is usually associated with the modification of the catalyst surface in the reaction. Chemical modification of supported catalysts during CO oxidation was investigated in detail recently [29, 33–35]. It was found that CuO on the surface of copper phase is reduced with CO to give Cu₂O. Jernigan and Somorjai reported [35] that the activation energy for CO oxidation in the presence of Cu₂O species is lower in comparison with CuO species. The same chemical modification under the influence of reaction conditions can play an

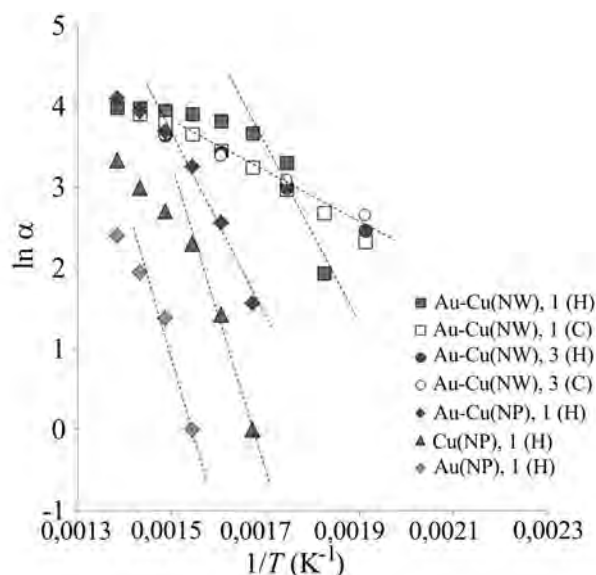


Fig. 8. Logarithmic plots of steady state CO conversion (a) versus $1/T$ (markers). The data linearization for low α values is represented by dashed lines

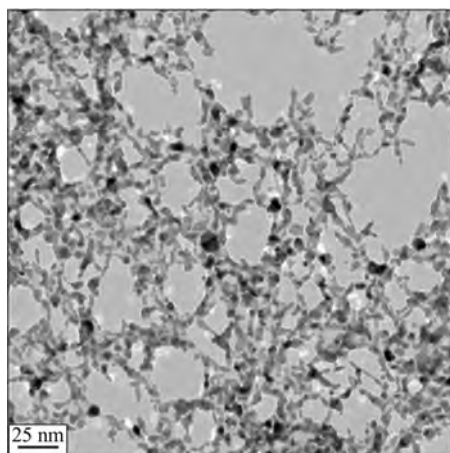


Fig. 9. TEM image of the Au-Cu(NW)/CCG sample after heating at 723 K

important role providing the high catalytic activity of Au-Cu(NW) catalyst, because the surface of the initial Au-Cu(NW) should be covered with CuO. The running-in of the Au-Cu catalyst can also be related to structural changes. According to TEM data, on heating to 723 K, the Au-Cu nanowires are transformed into chains composed of nanoparticles (Fig. 9). Unlike the reference catalysts (Figs. 3, 4, and 5), all the particles in these chains are as close as possible to one another, which facilitate the positive role in the reaction of different particles mutual interaction already observed in [36].

Conclusion

A web consisting of Au-Cu nanowires 4 nm in diameter was synthesized by laser ablation of a gold-copper alloy in the superfluid helium medium. The activity of the Au-Cu nanowires for the CO oxidation with molecular oxygen was detected for the first time. The efficiency of catalytic oxidation of CO varies in the series: Au(NP) < Cu(NP) < Au-Cu(NP) < Au-Cu(NW), in accordance with the apparent activation energies: $150 < 147 < 98 < 95$ kJ/mol. During the successive heating-cooling cycles, Au-Cu(NW) nanowires are rapidly run-in and reach an operation mode characterized by a constant and low (about 20 kJ/mol) activation energy. The running-in of Au-Cu(NW) nanowires during catalytic operation may be due to both chemical modification of the active surface and decomposition of nanowires into separate nanoparticles occurring in close contact with one another. The possible problem solution is to use the more stable nanowebbs made of more refractory metals, e.g., palladium, platinum, and niobium. Subsequently, it is planned to study their catalytic activity in nearest future.



However, there is another possibility. It is shown recently [37] that by using iron-containing platinum nanowires deposited on TiO_2 as a catalyst for the reaction of CO oxidation by air, the complete 100% conversion is achieved already at room temperature. In combination with the results of [38] where 100% conversion at room temperature for the same reaction has been achieved by using Au nanoparticles on $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ support as a catalyst, this indicates that for the oxidation of CO by air, the successful catalysis by gold nanoweb can be carried out just at room temperature, when the gold nanowires are quite stable against their decay into a chain of nanoclusters. This means that in reaction of CO oxidation by air catalyzed by nanowires, the temperature of complete conversion may be so low that the nanoweb of most metals would be stable for a long time.

Acknowledgments

This work was financially supported by Russian Science Foundation (grant № 14-13-00574) and used the equipment of Lomonosov Moscow State University (Program of MSU Development). Nikolaev S.A. expresses his gratitude to RFBR (grant № 13-03-00320, 16-03-00073) for the support in synthesis and characterization of the Au/ Al_2O_3 , Au–Cu/ Al_2O_3 , and Cu/ Al_2O_3 catalysts.

Open Access

This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.

References

1. Haruta M, Kobayashi T, Sano H, Yamada N (1987) Novel gold catalysts for the oxidation of carbon monoxide at a temperature far below 0°C. *Chem Lett* 16:405–408.
2. Nikolaev SA, Chistyakov AV, Chudakova MV, Kriventsov VV, Yakimchuk EP, Tsodikov MV (2013) Novel gold catalysts for the direct conversion of ethanol into C_{3+} hydrocarbons. *J Catal* 297: 296–305.
3. Tabakova T, Ilieva L, Ivanov I, Zanella R, Sobczak JW, Lisowski W, Kaszkur Z, Andreeva D (2013) Influence of the preparation method and dopants nature on the WGS activity of gold catalysts supported on doped by transition metals ceria. *Appl Catal B Environ* 136–137:70–80.
4. Castaño MG, Reina TR, Ivanova S, Centeno MA, Odriozola JA (2014) Pt vs. Au in water-gas shift reaction. *J Catal* 314:1–9.
5. McEwan L, Julius M, Roberts S, Fletcher JCQ (2010) A review of the use of gold catalysts in selective hydrogenation reactions. *Gold Bull* 43:298–306.
6. Hugon A, Delannoy L, Louis C (2008) Supported gold catalysts for selective hydrogenation of 1,3-butadiene in the presence of an excess of alkenes. *Gold Bull* 41:127–138.
7. Nikolaev SA, Permyakov NA, Smirnov VV, Vasil'kov AY, Lanin SN (2010) Selective hydrogenation of phenylacetylene into styrene on gold nanoparticles. *Kinet Catal* 51:288–292.
8. Nikolaev SA, Smirnov VV, Podshibikhin VL, Vasil'kov AY (2010) Synergism of the catalytic effect of nanosized gold-nickel catalysts in the reaction of selective acetylene hydrogenation to ethylene. *Kinet Catal* 51:375–379.
9. Gómez-Quero S, Cárdenas-Lizana F, Keane MA (2013) Unique selectivity in the hydrodechlorination of 2,4-dichlorophenol over hematite-supported Au. *J Catal* 303:41–49.
10. Smirnov VV, Nikolaev SA, Tyurina LA, Vasil'kov AY (2006) Catalysis of olefin hydrogenation and allylic isomerization by immobilized gold nanoclusters. *Pet Chem* 46:289–290.
11. Grisel R, Weststrate K-J, Gluhoi A, Nieuwenhuys BE (2002) Catalysis by gold nanoparticles. *Gold Bull* 35:39–45.



12. Nikolaev SA, Golubina EV, Kustov LM, Tarasov AL, Tkachenko OP (2014) Activity of Au, Ni, and Au-Ni catalysts in the water-gas shift reaction and carbon monoxide oxidation. *Kinet Catal* 55:311–318.
13. Takei T, Akita T, Nakamura I, Fujitani T, Okumura M, Okazaki K, Huang J, Ishida T, Haruta M (2012) Heterogeneous catalysis by gold. *Adv Catal* 55:1–126.
14. Cárdenas-Lizana F, Keane MA (2013) The development of gold catalysts for use in hydrogenation reactions. *J Mater Sci* 48:543–564.
15. Chen M, Goodman DW (2008) Catalytically active gold on ordered titania supports. *Chem Soc Rev* 37:1860–1870.
16. Chen MS, Goodman DW (2004) The structure of catalytically active gold on titania. *Science* 306:252–255.
17. Ellert OG, Tsodikov MV, Nikolaev SA, Novotortsev VM (2014) Bimetallic nanoalloys in heterogeneous catalysis of industrially important reactions: synergistic effects and structural organization of active components. *Russ Chem Rev* 83:718–732.
18. Shi J (2013) On the synergetic catalytic effect in heterogeneous nanocomposite catalysts. *Chem Rev* 113:2139–2181.
19. Kustov LM (2013) Catalytic properties of supported gold nanoparticles in organic syntheses. *Russ Chem Bull* 62:869–877.
20. Rostovshchikova TN, Smirnov VV, Kozhevnikov VM, Yavsin DA, Zabelin MA, Yassievich IN, Gurevich SA (2005) New size effect in the catalysis by interacting copper nanoparticles. *Appl Catal A Gen* 296:70–79.
21. Messing ME, Hillerich K, Johansson J, Deppert K, Dick KA (2009) The use of gold for fabrication of nanowire structures. *Gold Bull* 42: 172–181.
22. Gordon E, Karabulin A, Matyushenko V, Sizov V, Khodos I (2014) Stability and structure of nanowires grown from silver, copper and their alloys by laser ablation into superfluid helium. *Phys Chem Chem Phys* 16:25229–25233.
23. Alia SM, Duong K, Liu T, Jensen K, Yan Y (2012) Supportless silver nanowires as oxygen reduction reaction catalysts for hydroxide-exchange membrane fuel cells. *ChemSusChem* 5: 1619–1624.
24. Guo S, Li D, Zhu H, Zhang S, Markovic NM, Stamenkovic VR, Sun S (2013) FePt and CoPt nanowires as efficient catalysts for the oxygen reduction reaction. *Angew Chem Int Ed* 52:3465–3468.
25. Gordon EB, Karabulin AV, Morozov AA, Matyushenko VI, Sizov VD, Khodos II (2014) Structure and properties of platinum, gold and mercury nanowires grown in superfluid helium. *J Phys Chem Lett* 5:1072–1076.
26. Gordon EB, Karabulin AV, Matyushenko VI, Sizov VD, Khodos II (2012) The electrical conductivity of bundles of superconducting nanowires produced by laser ablation of metals in superfluid helium. *Appl Phys Lett* 101:052605(1)–052605(5).
27. Lebedev V, Moroshkin P, Grobety B, Gordon E, Weis A (2011) Formation of metallic nanowires by laser ablation in liquid helium. *J Low Temp Phys* 165:166–176.
28. Liu X, Wang A, Wang X, Mou C-Y, Zhang T (2008) Au-Cu alloy nanoparticles confined in SBA-15 as a highly efficient catalyst for CO oxidation. *Chem Commun* 27:3187–3189.
29. Nikolaev SA, Golubina EV, Krotova IN, Shilina MI, Chistyakov AV, Kriventsov VV (2015) The effect of metal deposition order on the synergistic activity of Au-Cu and Au-Ce metal oxide catalysts for CO oxidation. *Appl Catal B Environ* 168–169:303–312.
30. Zhang L, Kim HY, Henkelman G (2013) CO oxidation at the Au-Cu interface of bimetallic nanoclusters supported on CeO₂ (111). *J Phys Chem Lett* 4:2943–2947.
31. Chorkendorff I, Niemantsverdriet JW (2007) Concepts of modern catalysis and kinetics. Weinheim, Wiley-VCH, 477 p.
32. Kibis LS, Stadnichenko AI, Koscheev SV, Zaikovskii VI, Boronin AI (2012) Highly oxidized palladium nanoparticles comprising Pd⁴⁺ species: spectroscopic and structural aspects, thermal stability, and reactivity. *J Phys Chem C* 116:19342–19348.
33. Duh F-C, Lee D-S, Chen Y-W (2013) Au/CuO_x-TiO₂ catalysts for CO oxidation at low temperature. *Mod Res Catal* 2:1–8.



34. Sugano Y, Shiraishi Y, Tsukamoto D, Ichikawa S, Tanaka S, Hirai T (2013) Supported Au–Cu bimetallic alloy nanoparticles: an aerobic oxidation catalyst with regenerable activity by visible-light irradiation. *Angew Chem Int Ed* 52:5295–5299.
35. Jernigan GG, Somojai GA (1994) Carbon Monoxide oxidation over three different oxidation states of copper: metallic copper, copper (I) oxide, and copper (II) oxide—a surface science and kinetic study. *J Catal* 147:567–577.
36. Nesselberger M, Roefzaad M, Hamou RF, Biedermann PU, Schweinberger FF, Kunz S, Schloegl K, Wiberg GKH, Ashton S, Heiz U, Mayrhofer KJJ, Arenz M (2013) The effect of particle proximity on the oxygen reduction rate of size-selected platinum clusters. *Nat Mater* 12:919–924.
37. Zhu H, Wu Z, Su D, Veith GM, Lu H, Zhang P, Chai S-H, Dai S (2015) Constructing hierarchical interfaces: TiO₂-supported PtFe–FeOx nanowires for room temperature CO oxidation. *J Am Chem Soc* 137:10156–10159.
38. Akita T, Maeda Y, Kohyama M (2015) Low-temperature CO oxidation properties and TEM/STEM observation of Au/ γ -Fe₂O₃ catalysts. *J Catal* 324:127–132.

Published online:
29 October 2015



PRODUCTION OF ULTRATHIN NANOWIRES FROM REFRACTORY METALS (NB, RE, W, MO) BY LASER ABLATION IN SUPERFLUID HELIUM

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos
Laser Phys. Lett. 12 (2015) 096002

The ablation of targets in superfluid helium with a short-pulse laser allows introducing into liquid the atoms and small clusters of any metal. The metal is then concentrated in the core of 1D quantized vortices nucleating in the laser focus and expanding into the liquid. Subsequent metal coagulation within the vortex results in the formation of thin nanowires with perfect shape and structure. For refractory metals these wires are expected to be especially thin. The diameters of nanowires grown from niobium, molybdenum and tungsten are indeed 4.0, 2.0 and 2.5 nm, respectively. Unfortunately, under ablation of unannealed rhenium the main product is flat ‘flakes’ having irregular shape and 20–50 nm size. Short nanowires (with a 1.5 nm diameter) were present in small amounts.

The wires produced by this method contain no additional impurities and have a free lateral surface. By using a diode-pumped Nd:LSB microlaser (1.06 μm wavelength, 0.4 ns pulse duration, 100 μJ pulse energy and 4 kHz repetition rate) the amounts of nanowire sufficient for many physical and chemical applications could be produced in a single low-temperature experiment. Ultrathin wires of molybdenum and tungsten show promise for creating ‘cold’ cathodes whereas a niobium nanowire should be an excellent catalyst.

Keywords: laser ablation in liquids, ultrathin nanowires, superfluid helium

1. Introduction

One-dimensional (1D) metal nanostructures, nanowires, have attracted considerable interest because of their unusual physical properties as well as their possible applications in nanoscience and nanotechnology. Examples of nanowires’ possible applications include wiring in nanocomputers [1, 2], promising catalysts of chemical reactions [3, 4], and high-performance cold cathodes [5, 6]. For many potential applications thin nanowires with diameters less than 5 nm are of particular interest (in cold cathodes it is required to achieve the effective field emission of electrons from the side surface of the threads; also in catalysis nanoparticles with diameters of 3–5 nm are the most effective). However the production of such thin wires represents a challenging task. Furthermore, as it has been recently shown, thin nanowires exhibit low thermal stability. If nanowires with diameters of 7–8 nm are stable up to a temperature of more than 90% of the melting temperature of the metal (T_m) from which they are made, wires having diameters less than 5 nm decay into chains of nanoclusters at temperatures two to three times lower than T_m [7, 8]. In our method of growing nanowires in quantized vortices of superfluid helium [9, 10] the temperature is so low (≈ 2 K) that thermal instability cannot develop there, and nanowires can be grown from almost any material. However, for most applications the nanowires should survive heating up to ambient temperature, and for their use as a cathode or a catalyst they should be safe even at elevated temperatures. The application of nanowires made of refractory metals ought to solve the problems at least for the most practically interesting temperatures not exceeding 1000 K. In addition, according to the model



proposed by us in [11], the more refractory the metal is, the thinner the wire grown from it should be in quantized vortices of superfluid helium.

There are only few papers in the literature devoted to producing nanowires from refractory metals, possibly due to the difficulties of working with them. Especially difficult is the growth of nanowires with a free side surface, which is required for their use as cathodes or nanocatalysts. To some extent this is also true of nanoparticles, and that is why in catalysis by metals like palladium, rhenium, and niobium, their chemical compounds but not the pure metals are mostly used. For nanoparticles the problem can be solved by the ablation of the metal by lasers or ion beams. Laser ablation is commonly used for targets immersed in liquid. Lasers, particularly pulsed ones, provide intensive ablation even of very refractory metals, because the ablation threshold is limited by the rate of heat removal inside the target rather than by the value of its melting point. The thermal conductivity of refractory metals is usually quite low, and by using short-pulse lasers the ablation threshold for these metals may be overcome at relatively low pulse energy. Laser ablation in liquids is often a more convenient way of nanomaterial production than traditional chemical methods owing to its simplicity and versatility. It allows the preparation of the particles of almost any material – metal alloys, semiconductors, ceramics – all possessing high chemical purity. Liquid helium also possesses the important advantage of a complete lack of any impurity during the process of product formation, so that the purity of the product is determined only by the purity of the parent metal. But the use of liquid helium in its superfluid state opens up entirely new promise for nanoscience. Firstly, the condensation of particles in superfluid helium occurs mainly in the core of the quantized vortices [10, 12] and therefore it proceeds very fast allowing the application of lasers with a high pulse repetition rate. But, more importantly, the quantized vortices impose the growth of condensation products exclusively in one direction and instead of spherical particles, which are the condensation products in all other liquids, long nanowires are the main product of coagulation in superfluid helium [10]. Two more groups recently started to use the laser ablation of metals in superfluid helium with the same goal as ours [13, 14].

The goals of this paper are the preparation of ultrathin nanowires of niobium, molybdenum, tungsten and rhenium by laser ablation of the metals in superfluid helium and a study of these nanowires.

2. Experimental

The details of the experimental technique were described elsewhere [11]. The base of the experimental setup is a helium optical cryostat. The transition of liquid helium into its superfluid state (HeII) was carried out through its cooling below 2.17 K by pumping out its vapor. Atoms and small metal clusters were embedded into superfluid helium by laser ablation of immersed-in-HeII targets and quantized vortices nucleated as a result of heating in the focal spot of the pulsed laser beam. The laser beam was passed into the cryostat through a pair of sapphire windows and focused on a surface of the metal target in HeII bulk. The targets were manufactured from foils or plates of the metals under study. A typical design of the experimental cell is shown in figure 1.

A solid-state Nd:LSB diode-pumped microlaser STA-01, manufactured by ‘Standa’ (Lithuania), was used for the ablation. The main characteristics of the laser are as follows: the wavelength is $1.06\text{ }\mu\text{m}$, the pulse repetition frequency is from 1 to 4 kHz, the pulse energy is 10^{-4} J , and the pulse duration is 0.4 ns. The laser beam is focused by a lens on a



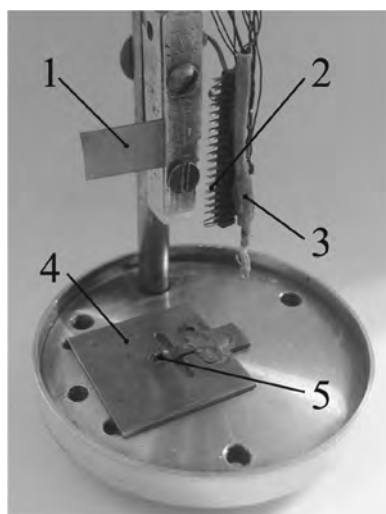


Figure 1. Photograph of the experimental cell.

1 – target, 2 – electrode system, 3 – calibrated carbon thermistor used as a thermometer, 4 – holder of TEM grid, 5 – carbon-coated copper grid

target in a spot with a diameter of about 100 microns (see figure 2); thus, the energy density in the focus is $\sim 1 \text{ J} \times \text{cm}^{-2}$ per pulse. During the laser irradiation a crater was formed at the target surface, the energy density of the incident light then fell due to an increase in the irradiated surface and consequently the amount of vaporized metal per pulse was reduced. Therefore, as is accepted in laser ablation, the focal spot was continuously moved over the target surface. The lowering of the laser pulse repetition rate from 4 to 0.5 kHz, as well as the two fold diminishing of the pulse energy, did not result in significant changes in nanoweb morphology or structure. Apparently the processes of nanowire growth proceed faster than $250 \mu\text{s}$. It is worth mentioning that in laser ablation in ordinary liquids the impact of subsequent pulses on the composition and structure of the products under pulse-periodic irradiation has already been observed at a pulse repetition rate of 100 Hz [15].

Due to its relatively short pulses the STA-01 laser makes it possible to achieve effective ablation at low energy per pulse for both refractory metals and metals having high thermal conductivity. Depending on the type of metal and the goal of the given experiment the laser irradiation lasted from 2 to 60 min.

As shown in [16], the nanowires grown by condensation in superfluid helium were interconnected by metallic contacts forming a 3D web displaying ohmic electrical conductivity. Due to some peculiarity of the quantized vortices within which the nanowires have grown, this web grew mainly between the tips of gilded electrodes intentionally introduced in the experimental cell, thus closing the electrical circuit and allowing the investigation of the electrical properties of the nanowires directly in the cryostat. Measurements of the nanoweb resistance were carried out by using a digital Keithley 2000 multimeter. The

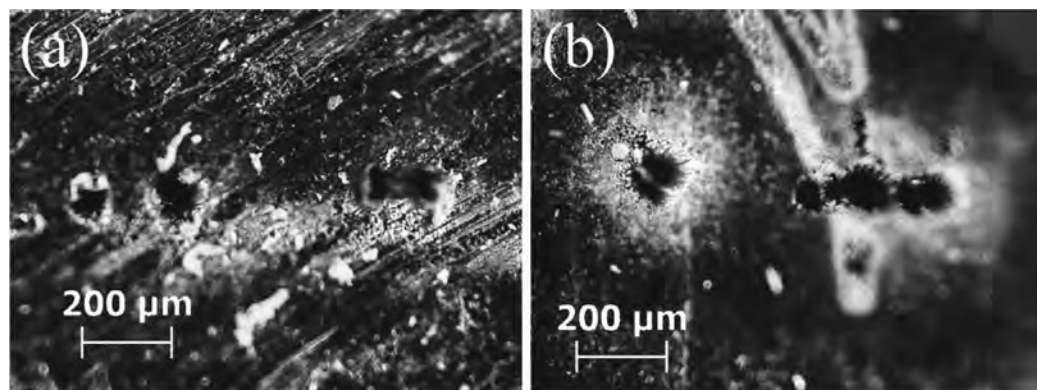


Figure 2. Micrograph of the surface of niobium (a) and rhenium (b) targets upon the action of laser radiation



registration system allowed the simultaneous study of three bundles of nanowires, closing various electrodes. It was possible to perform automatic registration in a few days in order to record resistance at a very slow rate of temperature change by the whole cryostat's self-heating up to ambient temperature. The specimen was first immersed in liquid helium, and after helium evaporation, in its vapor at atmospheric pressure.

The part of the nanoweb formed by condensation in liquid helium fell to the bottom of the cell on the surface of the carbon-coated metal grid with a 3 mm diameter. After the cryostat's warming to room temperature, the grid was examined with a transmission electron microscope (JEM-2100 of JEOL company production).

3. Selection of the objects of research

According to the model we proposed in [11] the refractory metal should form very thin nanowires. Therefore, one of the goals of this study was to confirm this conclusion for a few metals. Another, more practical goal was to grow very thin nanowires for their investigation. Laser ablation was the most appropriate method for introducing such metals into the reaction zone, because in this case we have no additional problems with the refractory metal's vaporization.

However Rhenium, Niobium, Tungsten and Molybdenum were chosen among others due to the real problems to be solved in our group. Rhenium and niobium are in general good catalysts and their high melting points should promote the stability of nanoweb made from them at enhanced temperatures. Such stability is necessary for catalytic reactions' occurrence. The nanowires of tungsten and molybdenum were intended as a material to create highly efficient cold cathodes. Niobium is also of interest in revealing the mechanism of superconductivity suppression in thin nanowires [17].

Some characteristics of the metals selected as the objects under study are given in table 1.

Table 1.

Thermodynamic data on the refractory metals are taken from [18]: Q_m and T_m are the melting heat and temperature, C_p is the heat capacity, Q_b is the heat of evaporation, λ -thermal conductivity. D_w and $\langle D_w \rangle$ are the nanowire diameters calculated using formula (5) of [11] and measured experimentally, respectively

Metal	Q_m , kJ mol ⁻¹	T_m , K	C_p , J mol ⁻¹ · K ⁻¹	Q_b , kJ mol ⁻¹	λ , W m ⁻¹ · K ⁻¹	D_w , calc., nm	$\langle D_w \rangle$, exp., nm
Niobium	26.8	2741	24.44	680	53.5	2.90	4.2
Tungsten	35.2	3653	24.8	799	174	2.54	2
Rhenium	34	3459	28.43	704	49.4	2.13	1.6
Molybdenum	28	2890	23.93	590	138	2.43	2.5

Nanowires made of the metals of interest had already been grown by different methods. We will mention here only the methods of preparation of nanowires with a free lateral surface.

In [16] Niobium nanowires have been fabricated by sputtering the Nb film (thickness of 4–10 nm) over freely suspended carbon nanotubes. The wires were polycrystalline and consisted of randomly oriented 3–7 nm grains. In another work [19] 'nanowires' were fabricated by a focused ion beam technique. The Ga ion-beam milled quite thick Nb films, of 100 nm thickness. The fabricated nanorods had physical widths of at least 70 nm and



lengths of up to several micrometres. But the wire bulk was contaminated with Ga, introduced by the ion-beam processing. The size of the central ‘pure’ Nb region was 20–40 nm. This central part was accepted as a niobium ‘nanowire’ responsible for the transition to the superconducting state observed through transport measurements. In [20] the authors examined bundles of 30 interconnected nanowires, grown through a porous silicon substrate. The authors estimated the diameters of the individual nanowires to be 17–20 nm.

Several methods were proposed to produce Tungsten nanowires. In [6] nanowires were fabricated simply by thermal treatment of W films. The nanowires obtained this way have diameters ranging from 10 to 50 nm; they show perfect straightness and neat appearance. The length of individual nanowires was approximately 1 μm . The authors of [21] examined the field-emission properties of individual ultrathin tungsten nanowires. The nanowires were grown by the field-emission-induced growth (FEIG) technique in the presence of the vapor of tungsten hexacarbonyl. This method allowed growing individual amorphous tungsten nanowires 5 nm in diameter and up to 600 nm in length. However, they were overcoated by 1 nm thick carbon along their length. In [22] the authors report the vapor-solid-solid growth of metallic tungsten nanowires induced by alloy catalysts (Fe-Ni) at a temperature of 850°C. The synthesized tungsten nanowires have bottom diameters of 100 to 400 nm and tip diameters of < 80 nm, and show a well-defined single-crystalline structure. On the tip of the nanowires the Fe-Ni-W nanoparticle remains. The authors of [23] proposed a large-scale method of synthesis from NiAl-W alloy of single-crystalline tungsten nanowires with extremely high aspect ratios. When the alloy is cooled with a well defined constant speed, the segregation of the phases during solidification is diffusion controlled and yields single-crystalline nanoscopic metal wires embedded in a single-crystalline metal matrix. To access the nanowires the matrix phase was then dissolved. The nanowires fabricated in such a way were 300 μm long and 200 nm in diameter (aspect ratios > 1000). However, they were covered with a thin oxide layer with an estimated thickness of ~ 6 nm.

There is much less information on the preparation of Rhenium nanowires. In [24] the method described above for Tungsten nanowires [22] was used for Rhenium; the nanowires had diameters of about 400–450 nm and lengths of up to 100 μm . The authors of [25] grew nanowires of Rhenium-Tin alloy by electrodeposition. The nanowires were formed over a wide range of Sn-to-Re ratios (0.67–2). The diameter of the nanowires varied in different samples (typically, within the range of 40–130 nm). The nanowires had a core/shell structure where Tin was the core and Rhenium was the shell.

The author of [26] used the step-decoration method to prepare Molybdenum nanowires 15 nm to 1.0 μm in diameter that were removable from the graphite surfaces on which they were synthesized. Molybdenum oxides were electrodeposited at step edges on a graphite surface and then reduced in gaseous hydrogen at 500°C to metallic Mo. After that the metal nanowires could be embedded in a polystyrene film and lifted off the graphite electrode surface. By the method of synthesis described in [27] arrays of Molybdenum nanowires can be produced. The diameter of the nanowires was 50–120 nm, and their length was about 4 μm .

From the above it can be concluded that the existing methods are not able to grow sufficiently thin nanowires of refractory metals, especially those having a free surface.



4. The results of the experiments

A typical view of the reaction zone during the laser irradiation is presented in figure 3(a). A luminous area with a size of about 1 mm is seen near the target surface. It probably belongs to a gas bubble filled with plasma usually observed near the focus of laser ablation in a liquid [13, 28]. During the ablation the luminescence intensity gradually decreased, due to the difficulty of ablation from a deep crater [29]. In the experiments, where thin (100–200 microns) film was used as the target, the through hole burned in it for 30–60 s of laser action. This meant that about 10^{13} atoms were evaporated per laser pulse. This corresponds to about 10^{20} atoms (or more than 100 micromoles) for the whole experiment. Provided nanowires with a diameter of 3 nm are the only product, we estimate the total length of the nanowires to be about 10^4 km.

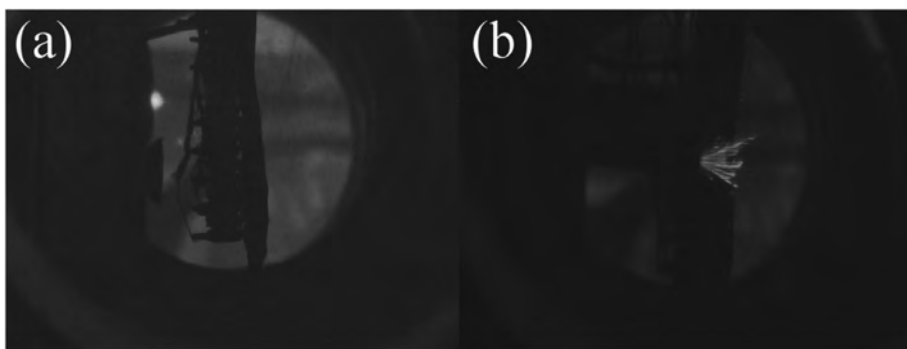


Figure 3. Photos of the experimental cell made through the side windows of a cryostat during the laser ablation of a target: (a) molybdenum and (b) rhenium.

Figure 4 is a collection of TEM photographs presenting the morphology of the bundles of nanowires made of niobium, molybdenum, tungsten and rhenium, all deposited on carbon-coated copper grids with $2\ \mu\text{m}$ holes, and then warmed up to room temperature. It can be seen that the niobium, molybdenum and tungsten nanowires saved their integrity up to room temperature, because they still existed in the holes of the grids as well. Rhenium was an exception: the main products deposited on the grid were flat metal flakes with a size of 20–50 nm displaying a crystalline structure. Nanowires were present only as short fragments; webs inside of holes are also absent.

The TEM photos in figure 5 present the products deposited on the grids at high magnification. They demonstrate the structure of the nanowires made of the metals under study. As can be seen the nanowires of refractory metals are very thin indeed; their diameters are 4.2, 2.5 and 2 nm for niobium, molybdenum and tungsten, respectively. The thickness of the wire fragments of rhenium could be estimated to be 1.6 nm. The last two columns in table 1 show that these data agree satisfactorily with those calculated according to the model proposed in [11].

For most applications just the nanowires and nanowebs that survive after heating are of main interest. But from the viewpoint of elucidating the mechanism of nanostructure formation it is very interesting to discover their state at the time of their nucleation and development.



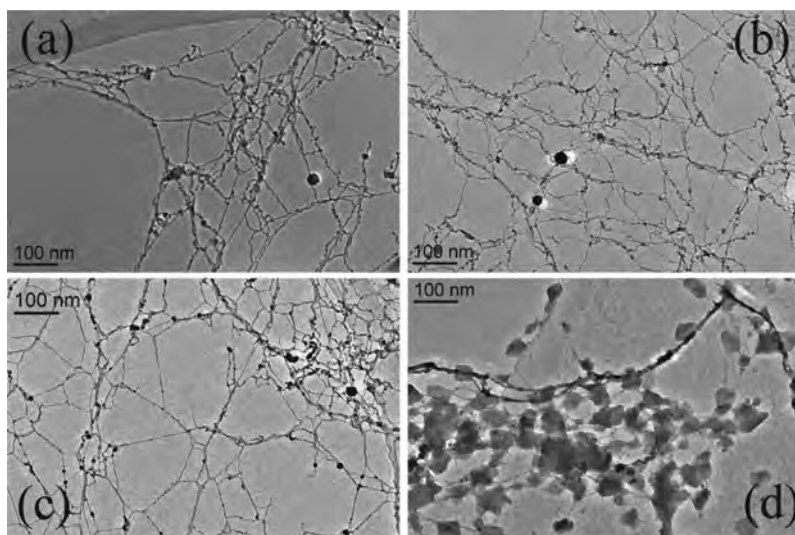


Figure 4. Morphology of bundles of niobium (a), molybdenum (b), tungsten (c) and rhenium (d)

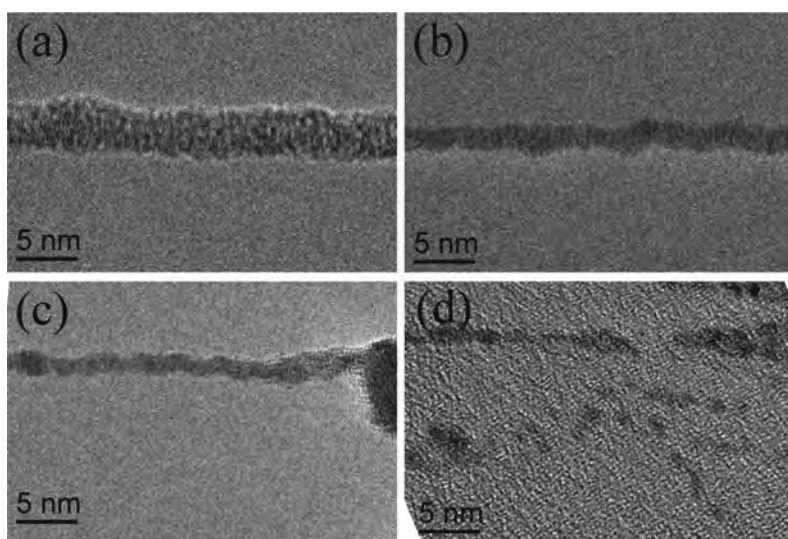


Figure 5. Structure of bundles of niobium (a), (b), tungsten (c) and rhenium (d).

First of all, it is not entirely clear what the primary products of the laser ablation were – whether they were atoms, small clusters or large enough ones. For the majority of investigated metals, this question has no special importance. The diameters of the nanowires produced by our method, and their dependence on T_m indicate that even if the precursors of the condensation process were clusters, their size should be small. At the same time, even though condensation started from separate atoms the small clusters formed at the initial stage passed through molten state, when surface tension resulted in their spherical shape.

Rhenium is known to be sufficiently flexible only when being annealed [30] and its ablation indeed represents a notable exception. Figure 2(b) shows the presence of cracks



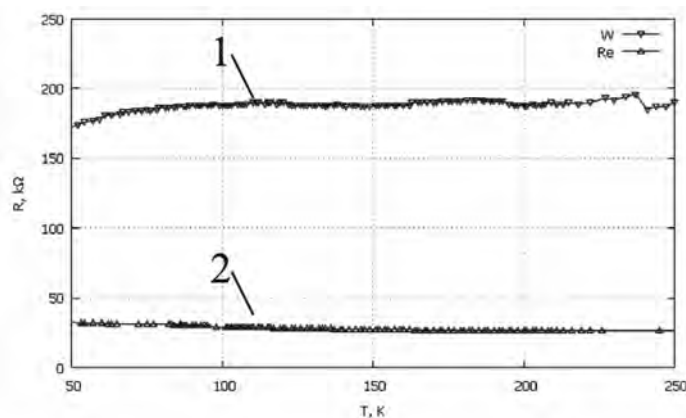


Figure 6. Temperature dependence of the resistance of tungsten (1) and rhenium (2) nanowire bundles having a length of 1.4 mm

around the crater formed in the laser focus during niobium ablation; no crack was observed in all the other metals studied. Figure 3(b), which is a result of the imposition of 120 consecutive laser pulses, demonstrates ‘sparks’ reflecting the linear motion of relatively large microparticles. Judging by the increasing brightness at the end of the track path they emitted from the focus area with a sufficiently high speed, and then decelerated in the fluid. This explains the presence of a large number of crystallites in the sediment.

As already mentioned, the nanoweb produced by our technique possesses electrical conductivity. This is important for a number of applications, but in addition it allows us to investigate the electrical properties of nanowires without removing them from the cryostat. During the growth of the nanowires and under the specimen’s further heating, we always register the overall resistance of the nanowire bundle, closing gaps between the electrodes introduced in the condensation zone (see figure 6). As with any other metal the resistance of thin nanowires of refractory metals is almost independent of temperature during their heating up to room temperature. This is the consequence of the fact that the scattering of conduction electrons in thin wires mainly occurs on the surface and not on phonons [31]. Interestingly, rhenium does not stand out here among the other studied metals. This means that both in liquid helium and at much higher temperatures rhenium nanowires have electrical conductivity. At the present time we cannot definitely pinpoint the reason why after warming the specimen up to room temperature and its contact with air, we see only short whiskers of nanowires. Perhaps the chains of the webs primarily included flake crystals and thus the webs were mechanically unstable. However, we cannot exclude that the nanowires of rhenium, being the thinnest ones among all grown, are simply unstable at room temperature. In previous studies [7, 8] we have found that the thinner the nanowires, the less stable they were against heating, and possibly the effect of reducing the diameter overrides the positive effect of the high temperature for rhenium melting. To answer this question it is necessary to use as the target annealed rhenium and/or use a femtosecond laser for ablation.

5. Conclusion

The method of laser ablation in superfluid helium can be used to produce nanowires made of any refractory metal. Happily their thicknesses turn out to be a record low, namely



about 2 nm or even less. By using this technique of synthesis we do not introduce any contamination to the material and the surface of the wires remains clean and unoxidized. The quantity of nanowires grown by condensation in quantized vortices of superfluid helium is high enough for all kinds of basic research as well as for testing applied research.

In addition to this basic conclusion, we should mention the following practically important fact. The material of the target for laser ablation must be sufficiently ductile at low temperatures—cracks lead to the formation of fairly large nano- and microparticles instead of nanowires. Perhaps this explains the failure of our attempts to grow a number of nanowires from quasi-eutectic alloys. Using a femtosecond laser will possibly help in overcoming this problem.

Particular attention should be paid to the thermal stability of refractory-metal nanowires—they are so thin that the size effect of thermal instability can neutralize the influence of the positive effect of a high melting point.

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Science Foundation (RSF), Project #14-13-00574. VDS is grateful to the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), Project #13-03-00788.

References

1. Huang Y, Duan X, Cui Y, Lauhon L J, Kim K-H and Lieber C M 2001 Logic gates and computation from assembled nanowire building blocks *Science* **294** 1313-7
2. Beckman R, Johnston-Halperin E, Luo Y, Green J E and Heath J R 2005 *Science* **310** 465-8
3. Kolmakov A and Moskovits M 2004 Chemical sensing and catalysis by 1D metal-oxide nanostructures *Annu. Rev. Mater. Res.* **34** 151-80
4. Yan X-M, Kwon S, Contreras A M, Koebel M M, Bokor J and Somorjai G A 2005 *Catal. Lett.* **105** 127-32
5. Davydov D N, Sattari P A, Al Mawlawi D, Osika A and Haslett T L 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 3983-7
6. Lee Y-H, Choi C-H, Jang Y-T, Kim E-K, Ju B-K, Min N-K and Ahn J-H 2002 Tungsten nanowires and their field electron emission properties *Appl. Phys. Lett.* **81** 745
7. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2014 Stability and structure of nanowires grown from silver, copper and their alloys by laser ablation into superfluid helium *Phys. Chem. Chem. Phys.* **16** 25229-33
8. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I and Khodos I I 2015 Experimental study of thermal stability of thin nanowires *J. Phys. Chem. A* **119** 2490-501
9. Gordon E B, Nishida R, Nomura R and Okuda Y 2007 The filament formation by impurities embedding into superfluid helium *JETP Lett.* **85** 581-4
10. Gordon E B and Okuda Y 2009 Catalysis of impurities coalescence by quantized vortices in superfluid helium with nanofilament formation *Low Temp. Phys.* **35** 209-13
11. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2011 Structure of metallic nanowires and nanoclusters formed in superfluid helium *JETP* **112** 1061-70
12. Mateo D, Eloranta J and Williams G A 2015 Interaction of ions, atoms, and small molecules with quantized vortex lines in superfluid ^4He *J. Chem. Phys.* **142** 064510
13. Popov E, Mammetkuliyeu M and Eloranta J 2013 Dynamics of vortex assisted metal condensation in superfluid helium *J. Chem. Phys.* **138** 204307
14. Latimer E, Spence D, Feng C, Boatwright A, Ellis A M and Yang S 2014 Preparation of ultrathin nanowires using superfluid helium droplets *Nano Lett.* **14** 2902-6
15. Amendola V, Meneghetti M 2013 What controls the composition and the structure of nanomaterials generated by laser ablation in liquid solution? *Phys. Chem. Chem. Phys.* **15** 3027-46



16. Gordon E B, Karabulin A V, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2010 Electric properties of metallic nanowires obtained in quantum vortices of superfluid helium *Low Temp. Phys.* **36** 590-5
17. Rogachev A and Bezryadin A 2003 Superconducting properties of polycrystalline Nb nanowires templated by carbon nanotubes *Appl. Phys. Lett.* **3** 512-4
18. Kikoin I K (ed) 1976 *Tables of Physical Quantities: a Reference Book* (Moscow: Atomizdat) [in Russian]
19. Tettamanzi G C, Pakes C I, Potenza A, Rubanov S, Marrows C H and Prawer S 2009 Superconducting transition in Nb nanowires fabricated using focused ion beam *Nanotechnology* **20** 465302
20. Trezza M, Cirillo C, Sabatino P, Carapella G, Prischepa S L and Attanasio C 2013 Nonlinear current-voltage characteristics due to quantum tunneling of phase slips in superconducting Nb nanowire networks *J. Appl. Phys. Lett.* **103** 252601
21. Yeong K S and Thong J T L 2006 Field-emission properties of ultrathin 5 nm tungsten nanowire *J. Appl. Phys.* **100** 114325
22. Wang S, He Y, Xu J, Jiang Y, Huang B, Zou J, Wang Y, Liu C T and Liaw P K 2007 Growth of single-crystalline tungsten nanowires by an alloy-catalyzed method at 850°C *J. Mater. Res.* **23** 72-7
23. Hassel A W, Milenkovic S and Smith A J 2010 Large scale synthesis of single crystalline tungsten nanowires with extreme aspect ratios *Phys. Status Solidi a* **207** 858-63
24. Hassel A W, Rodriguez B B, Milenkovic S and Schneider A 2005 Fabrication of rhenium nanowires by selective etching of eutectic alloys *Electrochim. Acta* **51** 795-801
25. Naor-Pomerantz A, Eliaz N and Gileadib E 2011 Electrodeposition of rhenium-tin nanowires *Electrochim. Acta* **56** 6361-70
26. Zach M P, Ng K H and Penner R M 2000 Molybdenum nanowires by electrodeposition *Science* **290** 2120-3
27. Zhou J, Xu N-S, Deng S-Z, Chen J, She J-C and Wang Z-L 2003 Large-area nanowire arrays of molybdenum and molybdenum oxides: synthesis and field emission properties *Adv. Mater.* **15** 1835-40
28. Makarov G N 2013 Laser applications in nanotechnology: Nanofabrication using laser ablation and laser nanolithography *Phys.-Usp.* **56** 643-82
29. Wynne A E and Stuart B C 2003 Rate dependence of short- pulse laser ablation of metals in air and vacuum *Appl. Phys. A* **76** 373-8
30. Hammond C R 2004 *The Elements. Handbook of Chemistry and Physics* 81st edn (Boca Raton, FL: CRC press)
31. Gordon E B, Karabulin A V, Morozov A A, Matyushenko V I, Sizov V D and Khodos I I 2014 Structure and properties of platinum, gold and mercury nanowires grown in superfluid helium *J. Phys. Chem. Lett.* **5** 1072-6

Institute of Problems of Chemical Physics RAS,
National Research Nuclear University MEPhI
(Moscow Engineering Physics Institute),
The Branch of Talrose Institute for Energy
Problems of Chemical Physics RAS,
Institute of Microelectronics Technology
and High Purity Materials RAS

Received 6 April 2015,
revised 8 July 2015
Accepted for publication
10 July 2015
Published 5 August 2015



QUASI-1D METALS (PD, PT, NB) AS CATALYSTS FOR OXIDATION OF CO

E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko

T.N. Rostovshchikova, S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva

Теоретическая и экспериментальная химия, 52 (2016) 75–83

Nanowebs of palladium, platinum, and niobium consisting of nanowires 3–4 nm in diameter with average length of about 200 nm were produced by laser ablation of metallic targets in superfluid helium. When the nanowebs were tested in the oxidation of CO by oxygen at 573 K, an appreciable yield of CO₂ was observed for all the catalysts. According to TEM, palladium and platinum nanowires at this temperature in air disintegrate into chains consisting of individual nanoparticles; the nanowires of niobium remain intact. According to XPS contact between niobium wires and oxygen leads to oxidation of the niobium to Nb₂O₅, the palladium nanowires are partially oxidized, while the platinum nanowires remain in the metallic state. Despite the substantial differences in the morphology and structure the activity of the investigated metal nanowires in the oxidation of CO is fairly close.

Quasi-1D metals or fine unidimensional wires (NW) are attracting increasing interest in connection with their unique properties such as high surface/volume ratio, high surface curvature, mechanical elasticity, and conductivity [1–3]. These characteristics open up the possibility of new applications, including nanocatalysis [4–7]. The surface curvature of the active phase is an important parameter that determines the efficiency of nanocatalysts. Therefore, with other conditions (chemical composition, specific surface area, etc.) equal, nanowires of transition metals, like nanoparticles (NP) and nanofilms with nanodimensional folds, are active in catalysis [8].

Oxidation of CO is widely used as a test reaction for solving fundamental problems of heterogeneous catalysis associated with size-dependent characteristics of the nanoparticles, the effect of synthesis procedures, the methods of stabilization and structurization of their surface, and the role of metal-support interaction [9]. Finally, the specific catalytic activity (related to unit surface area) of NWs should not correspond fully to the activity of NPs of similar diameter. The degree of oxidation of the metal, the shape, the roughness, and even the electric charge of the nanostructure can differ for NWs and NPs, and these characteristics can have a considerable effect on the catalytic activity [10–12]. Study of fine wires (quasi-1D metals) produced by laser ablation in superfluid He [13] can be of particular interest for catalysis because their use makes it possible, in principle, to reduce to a minimum the effect of metal-support interaction on the catalytic process by isolating the reaction stage relating directly to the metal in the nanodimensional state.

An important advantage of laser ablation in superfluid helium is the unique possibility of growing fine wires of any metals and alloys having a compact structure and regular form. Strictly speaking, the product of our method is a nanoweb representing a three-dimensional network of nanowires of the same (but different for the various metals) thickness linked to each other by electric contacts. The nanowires can subsequently be deposited on various surfaces, including the metal gauzes coated with carbon with apertures of micrometer size that are used in transmission electron microscopes. The web is stretched over these apertures, which in principle makes it possible to study its catalytic



activity in the absence of any support. Here the total surface of such a web is large enough when it is used as catalyst to analyze the concentration of the reaction products by the traditional procedures of gas chromatography.

In the present work the oxidation of CO by oxygen with the reagents in the stoichiometric ratio (2% CO, 1% O₂ in He) was chosen as a model catalytic reaction. This choice was based mainly on the fact that we had previously studied this reaction on nanowires and nanoparticles of gold and copper [7] with similar diameters. It was shown that considerable heating (to 550 and 600 K in the case of NW and NP respectively) was required when the stoichiometric amount of oxygen was used. These temperatures are of course significantly lower than the melting points T_m of the metals usually employed as catalysts, but they are significantly higher than the temperature for unfreezing the mobility of the surface atoms (the Hittig temperature), which is close to $0.3T_m$ and amounts to approximately to 450 K for gold and copper. For very thin NWs (with diameter of less than 5 nm) this leads to disintegration into chains of individual nanoclusters [13–15] on account of Rayleigh instability.

In [7], therefore, we were possibly dealing with NWs that had already disintegrated into chains of nanoparticles before the reaction began. In any case this investigation showed that Au–Cu(NW) deposited on aluminum oxide is more effective in the catalytic oxidation of CO than Au–Cu(NP) with similar diameter. In the course of successive heating-cooling cycles the Au–Cu(NW) nanowires quickly went on to a stationary regime characterized by an unusually low activation energy (about 20 kJ/mol).

In the present work we decided to compare both the thermal stability and the catalytic activity of palladium, platinum, and niobium produced by laser ablation in superfluid helium. These metals have melting points of 1828, 2041, and 2742 K respectively. The Hittig temperature for Nb amounts to about 900 K, which gives hope of maintaining the initial morphology of the Nb NWs during catalysis at temperatures right up to 900 K. The Hittig temperature for Pd and Pt is 550 and 612 K respectively. During the oxidation of CO at temperatures higher than 600 K, therefore, the nanowires from these metals will most likely disintegrate into short fragments (Pt) or even individual particles of the metal (Pd). Thus, the subjects that we selected for investigation should help to mark the differences in catalysis on individual particles of palladium, disconnected short fragments of nanoweb from platinum, and a whole nanoweb of niobium.

Experimental

The Pd, Pt, and Nb wires were produced in an optical liquid-helium cryostat (Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences) with vapor pumping to transfer liquid helium during cooling to the superfluid state. The detailed procedure was described earlier [1]. The nanowires were grown from atoms and small clusters of the metals placed in superfluid helium at 1.7 K by laser ablation from the surface of metal targets immersed in liquid helium as described in [17]. For ablation we used a solid-state waveguide Nd : LSB laser with diode pumping (wavelength 1.06 μm , pulse repetition frequency between 1 and 4 kHz, energy and duration of pulse 10^{-4} J and 0.4 ns respectively). Plates of Pd, Pt, and Nb (99.999% purity) were used as ablation targets. Quantized vortices were formed as a result of the perturbing action of the laser at its focal point, i.e., at the place and time required for them to be templates for coagulation of the metallic particles



Standard carbon-coated copper grids (CCG) were used as supports during preparation of the samples for measurements by transmission electron microscopy (TEM). The morphology of the NW/CCG samples without any previous treatment was investigated on a JEOL JEM-2100/UHR transmission electron microscope with resolution of 0.1 nm. The structures of the metals were interpreted by energy-dispersive X-ray analysis using a JED-2300 X-ray spectrometer.

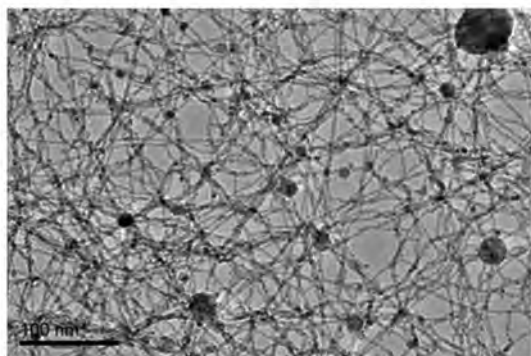


Fig. 1. Typical form of the metallic wires placed on the surface of the glass filter

In order to create the NW catalysts the nanoweb was placed on the surface of a thin microporous glass filter 0.1 cm thick and 2.1 cm in diameter. The duration of laser ablation during the formation of the catalyst was about 30 min. In this time about $1 \cdot 10^{-6}$ mol of the metal was deposited on the glass filter, forming a layer of nanoweb 20–30 nm thick. A typical TEM microphotograph of the nanoweb is presented in Fig. 1. The glass filters coated with the NW were used to analyze the degree of oxidation of the deposited metals by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) on an

Axis Ultra DLD spectrometer (Kratos Analytical Ltd.) using AlK_{α} radiation (1486.6 eV). The electron binding energy scales were calibrated using an external standard (gold foil, $Au4f_{7/2}$ 83.96 eV).

In order to study the activity of the Pd, Pt, and Nb nanowires we used the pulsed microcatalytic method normally used for testing catalysts [7, 18, 19]. Oxidation of CO by molecular oxygen was conducted under pulsed mode in a tubular quartz reactor. In typical experiments the NW/glass filter sample was placed in the reactor on a Schott filter ($S = 0.785 \text{ cm}^2$). Helium was passed through the reactor constantly at atmospheric pressure at a rate of 60 mL/min. When the required temperature had been established in reactor a pulse of 1 mL of the gas mixture ($\text{CO}:\text{O}_2:\text{He} = 2:1:97$ vol.%) was injected into the helium flow at atmospheric pressure. The composition of the gas at the outlet from the reactor was determined quantitatively by gas chromatography on an LKhM-80 chromatograph with a thermal conductivity detector and a column filled with Porapak Q (length 1 m, internal diameter 2 mm). The conversion of the CO was calculated from the areas of the CO and CO_2 peaks by means of calibration curves. Between 10 and 30 reagent pulses were used to determine the steady-state conversion rate of CO at a given temperature (α). The temperature dependence of the conversion of CO, far from its limiting value, reflects the temperature dependence of the rate of the catalytic reaction.

Results and discussion

Morphology of Pd, Pt, and Nb Nanowires

In order to understand how the structure of the NW varies at temperatures typical of those at which the catalytic reaction was conducted the morphology of the initial NW/CCG samples and of samples heated to 623 K in air and held at this temperature for 1 h was



investigated. The results are presented in Fig. 2. The left part of Fig. 2 illustrates the morphology of the palladium, platinum, and niobium NWs immediately after their synthesis, and the right part shows the morphology of the same NWs after calcination.

As seen from Fig. 2a, the Pd NWs represent a three-dimensional web cross-linked from individual nanowires. According to the TEM measurements, the palladium wires have a diameter of 4 nm. The average length of the nanowires is about 200 nm. The sample also contains a small number of spherical particles with the size of 30–60 nm (about five particles on an area of 1000×1000 nm). The simultaneous formation of wires and particles is a common phenomenon in the laser ablation of metals [20]. Heating of the Pd NWs leads to disintegration of the metal wires and to aggregation of the disintegrated products to particles with the size of 13–25 nm (Fig. 2b). Here some of the particles are sintered into “enormous” agglomerates measuring 100–200 nm (Fig. 2b). The diameter of the initial platinum wires is 3 nm, and the size of the spherical particles in the NW amounts to 8–20 nm (Fig. 2c). When the Pt NWs are heated the wires 200 nm in length disintegrate into short fragments, and this is followed by aggregation of the individual fragments into clusters measuring 10–16 nm (Fig. 2d).

The niobium wires have a diameter of 3 nm, and the size of the spherical particles in the Nb NWs is 11–25 nm (Fig. 2e). In contrast to palladium and platinum, heating of nanowires from the high-melting niobium does not lead to appreciable changes in its morphology. This conclusion follows from Fig. 2f. It is seen that heating does not lead either to disintegration of the nanowires or to their aggregation.

Thus, the morphology of the metal nanowires studied in the present work changes after heating in air. At 623 K, which as will be shown later is the characteristic temperature for catalytic oxidation of CO by oxygen, the palladium nanoweb disintegrates completely into chains of clusters, the platinum nanoweb disintegrates into chains of short isolated fragments, while the niobium nanoweb does not undergo any visible changes.

These results are fully understandable since the Hittig temperature for Pd is lower in comparison with the characteristic reaction temperature of 623 K, for Pt it is only a little

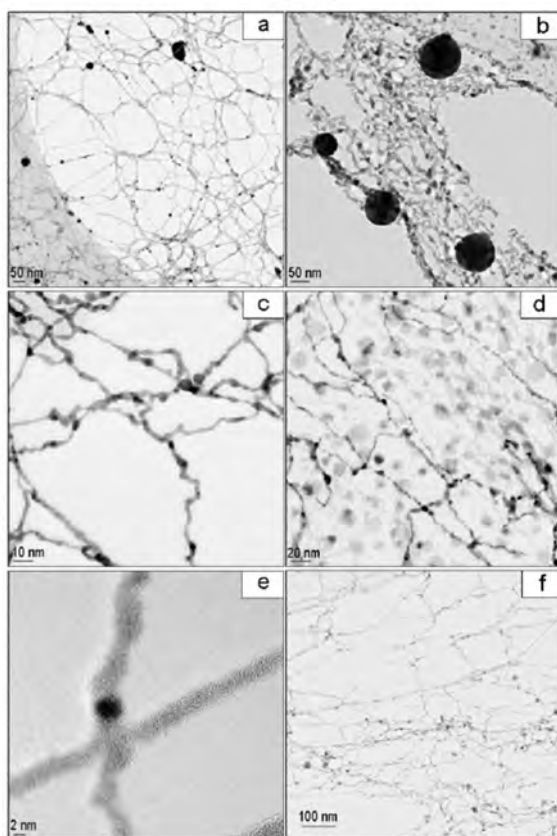


Fig. 2. TEM microphotographs of Pd (a, b), Pt (c, d), and Nb (e, f): a), c), e) wires at room temperature; b), d), f) previously heated to 623 K in air



higher than 623 K, while for Nb it is almost 300 K higher than the characteristic temperature. It can therefore be expected that, unlike Pt and particularly Pd, disintegration should not occur for the Nb nanoweb. Indeed, the heat treatment of the sample for analysis on the electron microscope was conducted in air, and this differed significantly from the heat treatment in the catalytic tests conducted in a mixture containing only 1% of O_2 , which was consumed just as quickly in the oxidation of CO. In our opinion, however, these conditions may not be crucial.

Electronic Characteristics of Pd, Pt, and Nb Nanowires

At low temperatures in the absence of contact with oxygen nanowires of any of the metals have through electric conductivity [13]. In order to make sure that presence of the nanoweb in air does not destroy electric contact between the individual wires a nanoweb of platinum was grown between two gold-coated electrodes. After the synthesis the cryostat was heated up to room temperature, and all the gaseous helium in it was replaced with undried air. After holding under these conditions for three months the resistance of the platinum web to electric current remained practically unchanged. The niobium web was subjected to a similar test. As shown in Fig. 3, on heating to room temperature in helium the electric resistance of the niobium nanoweb was finite and small in value; replacement of the helium in the cryostat by air led at once to complete disappearance of conductivity, and this was clearly due to oxidation of the niobium.

Strictly speaking, the catalytic activity can depend on the degree of oxidation of the metal deposited on the surface of the catalyst [8–11]. We note that after heating to room temperature and removal from the cryostat for analysis and/or further use as catalysts the nanowires were in contact with air for a considerable time. Moreover, under the conditions of the catalytic experiments the reactor was heated to fairly high temperatures, and the reaction mixture contained oxygen. The degree of oxidation of the metal in the initial wires and in the wires having contact with oxygen could therefore differ. In order to check this hypothesis the nanowires of the metals were studied by XPS after a long time spent in air at room temperature and after realization of the catalytic reaction.

The XPS spectra of the samples of Pd, Pt, and Nb after contact with air at room temperature are presented in Fig. 4a, b, and c respectively. Note, that the most stable oxides of palladium are PdO and PdO_2 . Thus, three forms of palladium (PdO , PdO_2 , and Pd^0) can exist in the Pd nanowires that were taken out into the air. According to [21–23], the binding energy (E_b) of $Pd3d_{5/2}$ electrons is 335.1–335.4 eV for Pd^0 , 336.8–337.2 eV for PdO, and

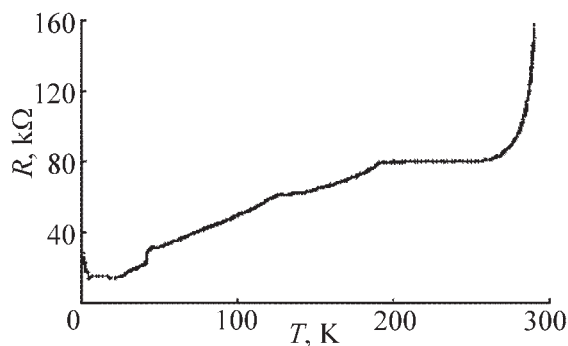


Fig. 3. Dependence of the electric resistance of Nb wire on temperature



337.8–339.3 eV for PdO_2 . The E_b value for $\text{Pd}3d_{5/2}$ of the Pd nanowires is 335.7 eV (Fig. 4a), which most likely indicates that Pd^0 and the oxide PdO are present in the Pd nanowires. According to [23–25], E_b of $\text{Pt}4f_{7/2}$ is 71.2–71.5 eV for Pt, 72.3–73.9 eV for PtO, and 74.1–74.9 eV for PtO_2 . The E_b value of $\text{Pt}4f_{7/2}$ for Pt nanowires was 71.2 eV (Fig. 4b), and there is therefore every reason to suppose that the Pt nanowires contain zerovalent platinum. The E_b value of $\text{Nb}3d_{5/2}$ for Nb nanowires is 207.1 eV (Fig. 4c), which is close to the value of 207.2 eV for Nb_2O_5 [23]. It is particularly important to note that niobium is not oxidized to NbO, which has metallic conductivity (and even superconductivity at low temperatures). Instead Nb_2O_5 , which is an insulator, is formed during oxidation.

To our surprise the XPS spectra of the Pd, Pt, and Nb samples after catalysis were identical with the XPS spectra that were recorded for the samples before catalysis (Fig. 4). In our opinion this result indicates that the redox processes occurring during contact between the NW and the reagents (O_2 and CO) are reversible. In this case, the electronic state of the metals in the NW returns to the initial state when the NWs are removed from the reactor to record the XPS spectra.

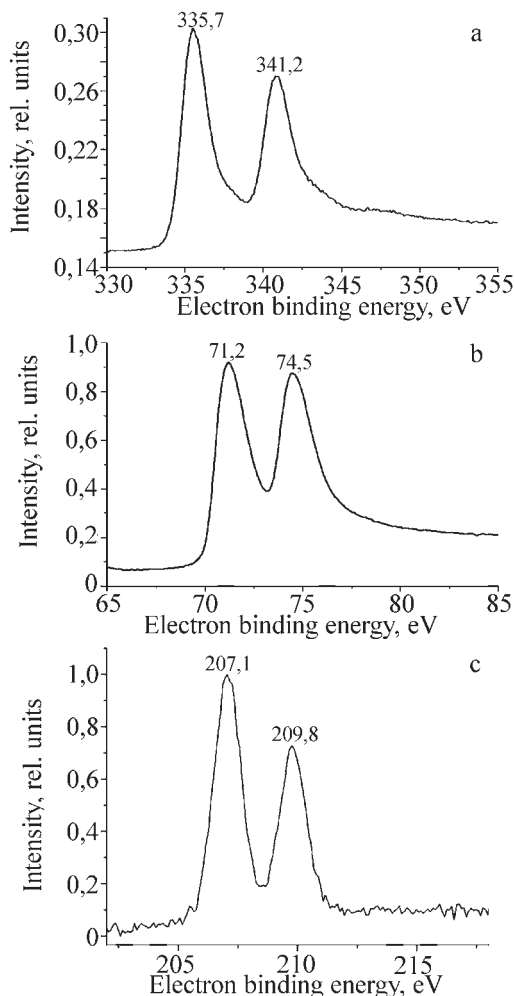


Fig. 4. XPS spectra of $\text{Pd}3d$ (a), $\text{Pt}4f$ (b), and $\text{Nb}3d$ (c) wires before catalysis

Catalytic Oxidation of CO in the Presence of Pd, Pt, and Nb Nanowires

Figure 5 shows the temperature dependence of the conversion of CO in the presence of palladium, platinum, and niobium NWs on the number of pulses introduced into the reaction mixture. Figure 5a,c,e corresponds to successive increase of the reactor temperature, while Fig. 5b,d,f shows the results obtained with successive decrease of temperature.

For all the metals it is seen that appreciable catalytic activity of their nanowires only appears after heating to 523 K. In the region of 573–623 K at fixed temperature the conversion of CO in the case of palladium increases from pulse to pulse, reaching $95\% \pm 5\%$ after 7–15 pulses (Fig. 5a). A similar situation arises in the nanowires from Pt and Nb (Fig. 5c,e). More detailed investigations are needed in order to understand such unusual behavior. At present we can only list a few of the possible reasons. According to the TEM data for Pd and Pt NWs their running-in during heating may arise from

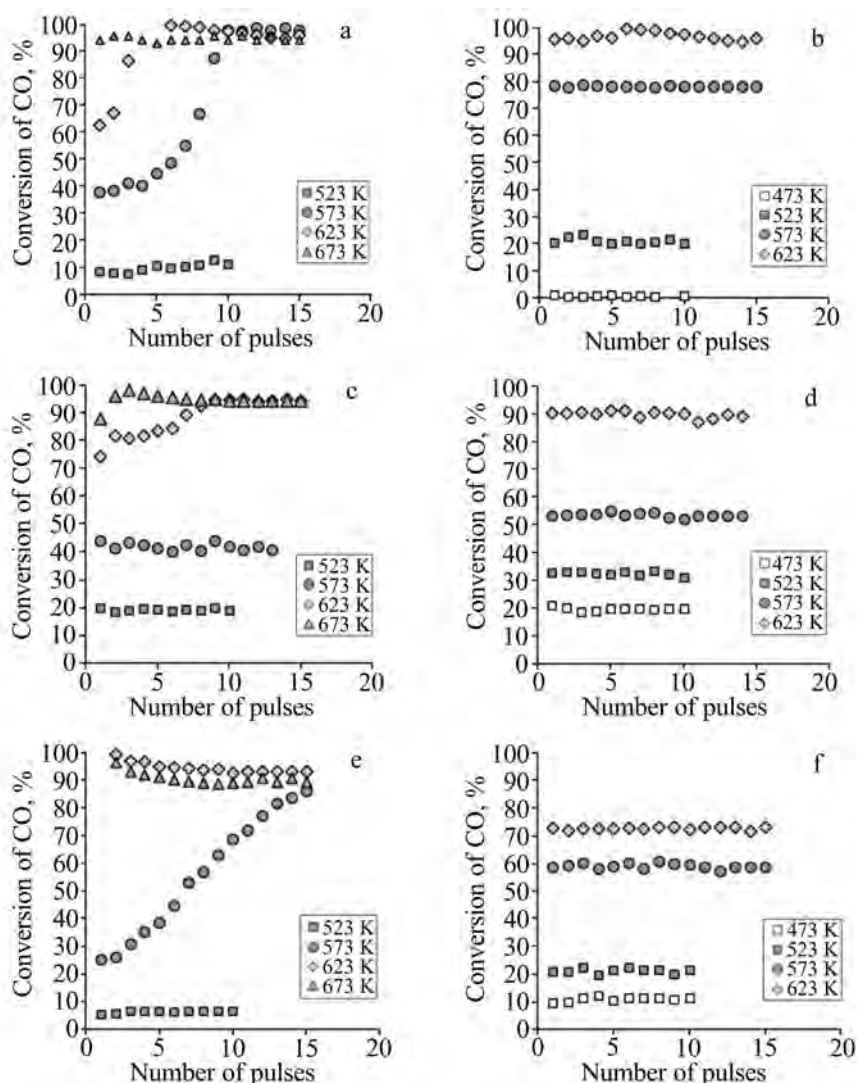


Fig. 5. Conversion of CO on Pd (a, b), Pt (c, d), and Nb (e, f) as a function of the number of reaction pulses: a), c), e) heating regime; b), d), f) cooling regime

disintegration of the initial NW at 623 K (Fig. 2a-d). However, as follows already from Fig. 2e, f, the running-in of niobium wires resistant to disintegration cannot be explained by this hypothesis. From [8–10, 21] it is known that the activity of catalysts for the oxidation of CO is strongly affected by the $M(0)/M(+n)$ ratio. Accordingly, the reason for the running-in of the NWs could be the different rates for oxidation of Pd, Pt, and Nb by oxygen and reduction of their oxides by CO. It is not possible also to rule out the possibility that the surface characteristics of the various NWs that determine the strength of adsorption and activation of the reaction substrates and, consequently, the catalytic characteristics of the NW may be modified during contact with the molecules of the reagents and products. Effects of such a type were discussed in [8–10].

Steady-state CO conversion rate of $95\% \pm 5\%$ after the first pulse is realized for each of the investigated NWs that were heated above 623 K. Essentially it corresponds to a state of thermodynamic equilibrium and, as seen from Fig. 5a,c,e and Fig. 6a, does not depend either on the nature of the metal or on further heating of the catalysts to 723 K. If the temperature is reduced from 723 to 623 K the steady-state conversion of CO is reached likewise after the first addition of the reagents (Fig. 5b,d,f). Further reduction of temperature from 673 to 498 K leads to a decrease of the steady-state CO conversion rate (Fig. 6b). It is worth mentioning that the catalytic activity in the low-temperature region increases when the nanowires of all the metals are cooled (Fig. 6a,b). Thus, during the cooling regime the CO conversion rate at the Pd, Pt, and Nb nanowires at 523 K is 15%, 15%, and 23% respectively, while the conversion rate during the heating regime is 5%, 6%, and 13% respectively. Further investigations are needed to explain such unusual behavior.

The most important practical result of the present work is the fact that the amount of nanowires produced by the exotic low-temperature method is sufficient for them to be tested as nanocatalysts under standard conditions by the usual methods of analytical chemistry. The main and unexpected result from the scientific standpoint is the fact that the catalytic activity of Pd, Pt, and Nb nanowires in the oxidation of CO by oxygen is similar and appeared in an identical temperature range. It is necessary to mention that the metals selected as subjects for investigation in the present work are interesting in that their work function differs significantly, amounting to 4.37, 4.98, and 5.42 eV for Nb, Pd, and Pt respectively. However, we did not detect a large difference in the catalytic activity of metallic Pt and Pd. Moreover, Nb cannot be considered in this series because according to the data from XPS niobium is fully oxidized to Nb_2O_5 under the reaction conditions. Consequently, the mechanism of oxidation of CO at Pt and Pd must differ from the mechanism for Nb_2O_5 [26].

If we take note of the considerations presented here it seems surprising that the behavior of the NWs in the oxidation of CO is so close both for chains of nanoparticles on the surface of the glass filter, formed during disintegration of the palladium wire, and chains of individual fragments of the fibers (the products from disintegration of the platinum wire) and for the stable long wires of niobium oxide. Such behavior was so unexpected that we repeated blank tests time and again, and they showed that oxidation of CO to

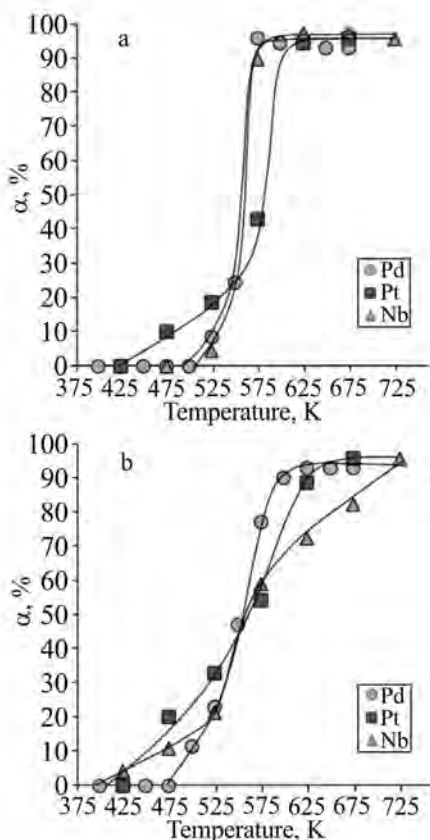


Fig. 6. Steady-state conversion of CO (α) on Pd, Pt, and Nb wires as a function of reaction temperature (T): a) heating regime; b) cooling regime

CO₂ in the reactor in the absence of the nanoweb on the filter did not occur over the whole accessible temperature range. Thus, the catalytic nonspecificity found in the present work is not an artifact. It may be that fundamental causes that we have yet to discover in future investigations are responsible for it.

Nevertheless, there are certain important conclusions that can be made even now about the nature of the high catalytic activity in the nanostructured metals. In particular, the proximity effect, discussed in [27], cannot play a significant role in the efficiency of nanocatalysts. In fact, in contrast to the stochastic distribution of individual nanoparticles immobilized on the support, in the case of the disintegrating nanowires there are always two very close neighbors containing the catalyst. Nevertheless, the oxidation characteristics of stochastically arranged nanoparticles and ordered chains of nanoparticles (the products from disintegration of the nanowires) hardly differ at all.

A most interesting further application of NWs in catalysis is the possibility of controlling the catalytic process in an external electric field by using electrically connected nanowires in place of individual nanoparticles. The influence of the electric field effect may be significant in so far as redox processes contain stages involving exchange of electrons between catalyst and reagents. Theoretical grounds for this effect were presented in [28]. However, we did not find papers in which such an effect would be detected experimentally. The nearest theoretical work was devoted to *ab initio* calculations of the effect of an electric field on the catalytic oxidation of CO on gold nanoparticles immobilized on graphene [29]. In particular, it was demonstrated in this work that an electric field has effects differing in sign on the adsorption of the reagents and desorption of the products. This means that for a given catalytic reaction and a given transition metal there must exist a value and sign of electric field corresponding to the maximum rate for the process as a whole.

We note in any case that in order to influence the reaction rate the electric field must be too large for use in ordinary chemical reactors. Only in nanocatalysis, on account of the small size of the nanoparticles, can a large value for the force of the electric field be created close to a surface with moderate applied voltage U . Already in the first experiments [7] it had been shown that the nanowebs produced by our method make it possible in principle to create large electric fields during the realization of the catalytic reaction. Actually, as a result of its through conductivity, confirmed by direct measurements [2, 30], an electric potential applied to the edges of the nanoweb must appear at its center even in the absence of a conducting base. This is important since a conducting support weakens the field close to the surface of a web lying on the support by an order of magnitude. Moreover, by using a freely suspended web as cathode, we observed significant field emission of electrons during application of a potential of only 30 V to the anode at a distance of 4 mm [2].

Thus, laser ablation of metallic targets in superfluid helium at 1.7 K gave nanowebs consisting of electrically connected nanowires of Pd, Pt, and Nb. The TEM data show that the diameter of all the nanowires is equal to 3–4 nm, while the average length of the individual nanowires in the nanowebs here amounts to about 200 nm. The webs produced from Pd and Pt disintegrate when heated to 623 K in air with the formation of chains of nanoparticles or fragments of threads 10–40 nm long. The structure of the Nb web remains unchanged when heated from 1.7 to 573 K. According to XPS data the Pd nanowires consist of metal coated with a thin layer of oxide. The Pt nanowires consist entirely of



metallic platinum. When the niobium nanowires are heated the metal is oxidized completely to Nb_2O_5 . (During the catalytic reaction partial reduction can occur on account of the low partial pressure of oxygen.)

The catalysts based on Pd, Pt, and Nb exhibit appreciable activity in the oxidation of CO, beginning at 523 K. In the heating regime the running-in of all three catalysts is observed, depending on the number of pulses of the $\text{CO} + \text{O}_2$ mixture. Thus, in the region of 573–623 K at fixed temperature the conversion of CO increases from pulse to pulse, reaching a steady-state value of $95\% \pm 5\%$. Further heating to 723 K does not lead to decrease in the steady-state conversion of CO, which is realized immediately after the first injection of reagents. In the subsequent cooling regime all the catalysts acquire enhanced activity at low temperatures.

An important aim of the work was to determine the direction of future investigations. As found, the main obstacle to the use of nanowires of transition metals in catalysis is their insufficient thermal stability. Promising, therefore, is the use of nanowires of platinum but not at very high temperatures in the catalytic oxidation of CO with air for example. In this case, as shown in [5], the activity of short platinum wires produced by the usual methods is high even at room temperature. An alternative path involves the use of nanowires made from very high-melting metals such as rhenium or rhenium-tungsten alloy [17].

The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 14-13-00574). The catalytic investigations were carried out on apparatus at Moscow State University (Program of MSU development). The authors thank K.I. Maslakov and A.V. Egorov for the XPS and TEM analyses.

References

1. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *J. Exp. Theor. Phys.*, 112, 1061–1070 (2010).
2. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 101, 052605-1-052605-5 (2012).
3. A. Loubat, L.-M. Lacroix, A. Robert, et al., *J. Phys. Chem. C*, 119, 4422–4430 (2015).
4. S.M. Alia, K. Duong, T. Liu, et al., *ChemSusChem*, 5, 1619–1624 (2012).
5. H. Zhu, Z. Wu, D. Su, et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 137, 10156–10159 (2015).
6. Sh. Guo, D. Li, H. Zhu, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 52, 3465–3468 (2013).
7. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *Gold Bull.*, 48, 119–125 (2015).
8. M.S. Chen and D.W. Goodman, *Science*, 306, 252–255 (2004).
9. H.-J. Freund, G. Meijer, M. Scheffler, et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, 50, 10064–10094 (2011).
10. B.R. Cuenya, *Thin Solid Films*, 518, 3127–3150 (2010).
11. O.G. Ellert, M.V. Tsodikov, S.A. Nikolaev, and V.M. Novotortsev, *Russ. Chem. Rev.*, 83, 718–732 (2014).
12. T.N. Rostovshchikova, E.S. Lokteva, N.E. Kavalerskaya, et al., *Teor. Eksp. Khim.*, 49, No.1, 37–42 (2013). [*Theor. Exp. Chem.*, 49, No.1, 40–45 (2013) (English translation).]
13. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, A.A. Morozov, et al., *J. Phys. Chem. Lett.*, 5, 1072–1076 (2014).
14. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 16, 25229–25233 (2014).
15. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *J. Phys. Chem. A*, 119, 2490–2501 (2015).
16. A. Volk, D. Knez, P. Thaler, et al., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17, 24570–24575 (2015).
17. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *Laser Phys. Lett.*, 12, 096002-1-096002-7 (2015).
18. S.A. Nikolaev, E.V. Golubina, L.M. Kustov, et al., *Kinet. Catal.*, 55, 311–318 (2014).
19. S.A. Nikolaev, E.V. Golubina, I.N. Krotova, et al., *Appl. Catal. B*, 168/169, 303–312 (2015).



20. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *High Energ. Chem.*, 48, 206–212 (2014).
21. A.S. Ivanova, E.M. Slavinskaya, R.V. Gulyaev, et al., *Appl. Catal. B*, 97, 57–71 (2010).
22. M. Brun, A. Berthet, J.C. Bertolini, *J. Electron. Spectrosc. Relat. Phenom.*, 104, 55–60 (1999).
23. J.F. Moulder, W.F. Stickle, and P.E. Sobol (eds.), *Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy*, Perkin-Elmer Corporation, Physical Electronics Division, Eden Prairie, MN (1992).
24. C.R. Parkinson, M. Walker, and C.F. McConville, *Surface Sci.*, 545, 19–33 (2003).
25. L.K. Ono, J.R. Croy, H. Heinrich, and B.R. Cuenya, *J. Phys. Chem. C*, 115, 16856–16866 (2011).
26. S. Royer and D. Duprez, *ChemCatChem*, 3, 24–65 (2011).
27. M. Nesselberger, M. Roefzaad, R.F. Hamou, et al., *Nat. Mater.*, 12, 919–924 (2013).
28. A. Wieckowski, E.R. Savinova, and C.G. Vayenas (eds.), *Catalysis and Electrocatalysis at Nanoparticle Surfaces*, Marcel Dekker, New York (2003), DOI: 10.1201/9780203912713.
29. Y.H. Lu and Y.P. Feng, *Sci. China. Phys. Mech. Astron.*, 54, 804–808 (2011).
30. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, et al., *Low Temp. Phys.*, 36, 590–595 (2010).



к) Криокристаллы в космосе

CRYOCRYSTALS IN THE SPACE: LOW TEMPERATURE EVOLUTION OF INTERSTELLAR DUST

E.B. Gordon

12th International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals.
August 26–31, 2018: Wrocław, Poland

The main information about astrophysical processes is revealed from electromagnetic radiation that comes to us from the Space. But preliminarily this radiation is substantially modified by absorption and scattering on the dust present in interstellar space. Interstellar dust (ID) cannot be the “heritage” of Big Bang, which occurred more than 10^{10} years ago, since ID lifetime does not exceed 10^7 years. The typical ID consists of nanoparticles of silicates of different metals (simply, they are the pieces of glass) covered with “dirty ice”. Their absorption spectra evidence a pre-molten, dense-packing partially crystallized structure.

The processes of ID disintegration are known – this is the destruction in shock waves induced by Supernova explosions. Thus, the ID further recovery should proceed already at low temperatures and at low densities. In other words, ID represents typical cryocrystals and they are present in the Universe in fantastic quantities. The goal of this report is to understand to what extent our knowledge about cryocrystals is useful for astrophysics, and also to what extent an astrophysical reactor may be approximated by a laboratory reactor of modest size.

First of all, the shock waves that destroy ID particles are ordinary shock waves, similar to these occur by explosions in low-density gases, and the destruction takes place, as usual, not in the wave front, but at the unloading stage. Provided the composition and morphology of the ID are known, these processes are quite accessible to laboratory modeling. It was accepted that shock wave destroys ID particles into very small clusters and even into individual molecules. The reverse ID recovery should occur in binary collisions by gradual gluing with radiative stabilization. This may proceed via either coagulation, namely the coalescence of two nanoclusters of a similar size, which in vacuum can lead to product melting, or accretion, that is the precipitation of small particles to a larger center, when melting is impossible simply from energetic considerations. Real ID structure may be reproduced only in acts of mutual coagulation, not in accretion.

Our experiments on the condensation of guest particles in quantized vortices of superfluid helium make it possible to carry out selectively their low-temperature coagulation under adiabatic conditions, which models rather well the conditions in the Space.

We have found already that the coagulation of nanoclusters accompanied by pre-melting leads to appearance of “Prince Rupert drop” effect characterized by high internal negative pressure existence in the center of product. This effect induced their instability under weak violation of their surface integrity, which may explain the high sensitivity of the ID to the impact of shock waves.

In addition to formulating the problems of astrophysical modeling, the first results of our experimental studies will be presented in the report.

The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 18-19-00620.



Список публикаций Е.Б. Гордона

Книга¹, патенты^{2,3} и статьи^{4–176}

1. Б.М. Андреев и др. *Изотопы: свойства, получение, применение*, под ред. В.Ю. Баранова. Т.1, 2. Москва: Физматлит, 2005.

2. Е.Б. Гордон, Ю.А. Колесников, А.Г. Чернов, *Способ восстановления гексафторида урана. Патент на изобретение RU 2204529 C2, 20.05.2003. Заявка № 2001108186/12 от 28.03.2001.*

3. Е.Б. Гордон, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко, А.А. Пельменев, *Способ регенерации дейтерий-третиевой топливной смеси термоядерного реактора и устройство для его осуществления. Патент на изобретение RU 1619492 C, 30.05.1994. Заявка № 4710719/26 от 13.07.1983.*

4. Е.Б. Гордон, А.Н. Пономарёв, В.Л. Тальрозе. Изучение вероятности рекомбинации атомарного водорода на различных поверхностях при низких концентрациях в газовой фазе. *Кинетика и катализ*, **7** (1966) 577–582.

5. Е.Б. Гордон, А.Н. Пономарёв. Расчёт молекулярных потоков по длинным каналам. *Журнал технической физики*, **37** (1967) 953–959 [English edition: E.B. Gordon, A.N. Ponomarev. Molecular flow in long tubes. *Soviet Physics Technical Physics-USSR*, **12** (1967) 685].

6. Е.Б. Гордон, А.Н. Пономарёв. Определение времени жизни адсорбированных молекул и атомов на поверхности твёрдых тел. I. Метод определения времени жизни по измерению времени прохождения частицами длинного канала. *Химическая физика*, **8** (1967) 663–670.

7. Е.Б. Гордон, А.Н. Пономарёв, В.Л. Тальрозе. Применение квантового генератора на атомарном водороде для изучения элементарных процессов с участием атомов H в газовой фазе и на поверхности твёрдых тел. *Химия высоких энергий*, **2** (1968) 512–518.

8. J.R. Airey. Report on the International Symposium on Chemical Lasers, Moscow, September 2–4, 1969. *International Journal of Chemical Kinetics*, **II** (1970) 65–68 [«A third paper from the Chemical Physical Institute, by A.F. Dodonov, E.B. Gordon, G.K. Lavrovskaya, I.I. Morosov, A.N. Ponomarev, and V.L. Tal'roze, presented rate data for the hydrogen-halogen reactions. Two experimental methods were discussed. One involved the mass-spectrometric probing of a diffusion cloud in an inert-gas flow. The following reactions were studied, and the results are summarized in the Table...»].

9. Е.Б. Гордон, А.Н. Пономарёв. Выбор оптимальных параметров многоканальных формирователей атомных пучков. *Журнал технической физики*, **40** (1970) 1120–1127 [English edition: E.B. Gordon, A.N. Ponomarev. Optimum parameters for multiple-channel collimators for atomic beams. *Soviet Physics Technical Physics-USSR*, **15** (1970) 866].



10. В.Д. Шатров, Е.Б. Гордон, А.Н. Пономарёв, В.Л. Тальрозе. Люминесценция, вызванная взаимодействием атомов водорода с поверхностями твёрдых органических веществ. *ДАН СССР*, **197** (1971) 400–402.

11. В.Д. Шатров, Е.Б. Гордон, А.Н. Пономарёв, В.Л. Тальрозе. Люминесценция твёрдых органических красителей при бомбардировке тепловыми атомами водорода. *Письма в ЖЭТФ*, **13** (1971) 344–346 [English edition: V.D. Shatrov, E.B. Gordon, A.N. Ponomarev, V.L. Tal'roze. Luminescence of solid organic dyes bombarded by thermal hydrogen atoms. *JETP Letters-USSR*, **13** (1971) 243–245].

12. Е.Б. Гордон, В.С. Павленко, Ю.Л. Москвин, М.С. Дроздов, П.С. Виноградов, В.Л. Тальрозе. Кинетика импульсного химического СО-лазера с фотоиницированием на реакции окисления сероуглерода. *ЖЭТФ*, **63** (1972) 1159–1172 [English edition: E.B. Gordon, V.S. Pavlenko, Yu.L. Moskvina, M.S. Drozdov, P.S. Vinogradov, V.L. Tal'roze. Kinetics of a pulsed chemical carbon monoxide laser with photoinitiated oxidation of carbon disulfide. *Sov. Phys. JETP*, **36** (1973) 611–617].

13. Е.Б. Гордон, А.П. Перминов, Б.И. Иванов, В.И. Матюшенко, А.Н. Пономарёв, В.Л. Тальрозе. Изменение сверхтонкого состояния атома водорода при его столкновениях с молекулами непредельных углеводородов в газовой фазе. *ЖЭТФ*, **63** (1972) 401–406 [English edition: E.B. Gordon, A.P. Perminov, B.I. Ivanov, V.I. Matyushenko, A.N. Ponomarev, V.L. Tal'roze. Variation of hyperfine state of hydrogen atom in collisions with unsaturated hydrocarbon molecules in gaseous phase. *JETP*, **36** (1973) 212–215].

14. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, Ю.Л. Москвин, В.Л. Тальрозе. Сверхравновесное УФ излучение при самовоспламенении смеси $C_2 + 4O_2$ атмосферного давления. *Письма в ЖЭТФ*, **18** (1973) 560–563 [English edition: E.B. Gordon, M.S. Drozdov, Yu.L. Moskvina, V.L. Tal'roze. Superequilibrium UV radiation in self-ignition of a $CS_2 + 4O_2$ mixture at atmospheric pressure. *JETP Lett.* **18** (1973) 330–332].

15. Е.Б. Гордон, Б.И. Иванов, А.П. Перминов. Влияние индуцированного излучения на форму сигнала водородного квантового генератора, работающего в импульсном режиме. *Квантовая электроника*, **6** (1973) 121–124 [English edition: E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov. Influence of stimulated emission on the form of the signal emitted by a pulsed hydrogen maser. *Sov. J. Quantum Electron.*, **3** (1974) 529–530].

16. Е.Б. Гордон, Б.И. Иванов, А.П. Перминов, А.Н. Пономарёв, В.Л. Тальрозе, С.Г. Хидиров. Измерение сечений спинного обмена атомов H ($F=1, m_F=0$) на парамагнитных молекулах O_2 , NO и NO_2 в температурном интервале 310–390 К. *Письма в ЖЭТФ*, **17** (1973) 548–551 [English edition: E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, A.N. Ponomarev, V.L. Tal'roze, S.G. Khidirov. Measurement of cross-sections of spin exchange of H-atoms ($F=1, m_F=0$) on paramagnetic O_2 , NO, and NO_2 molecules in temperature interval 310–390 K. *JETP Lett.* **17** (1973) 395–397].

17. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, Ю.Л. Москвин, В.Л. Тальрозе. Природа УФ излучения при самовоспламенении смесей CS_2 с O_2 . *ДАН СССР*, **214** (1974) 846–849.

18. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, В.Д. Шатров, В.Л. Тальрозе. Спектроскопическое изучение взрыва смесей $CS_2 + O_2$. *Физика горения и взрыва*, **№ 1** (1974) 15–22 [English edition: E.B. Gordon, M.S. Drozdov, V.D. Shatrov, V.L. Tal'roze. Spectroscopic study of explosion of mixtures of $CS_2 + O_2$. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **10** (1974) 11–16]. doi: 10.1007/bf01463778.



19. Е.Б. Гордон, Л.П. Межов-Деглин, О.Ф. Пугачёв. Стабилизация атомов азота в сверхтекучем гелии. *Письма в ЖЭТФ*, **19** (1974) 103–106 [English edition: E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin, O.F. Pugachev. Stabilization of nitrogen atoms in superfluid helium. *JETP Lett.* **19** (1974) 63–65].
20. В.Л. Тальрозе, Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин, А.П. Харитонов. Фоторекомбинационные лазеры с термическим иницированием. *ДАН СССР*, **216** (1974) 146–149.
21. В.Д. Шатров, О.Ф. Пугачёв, Е.Б. Гордон. Люминесценция твёрдых ароматических веществ в активном азоте. *Оптика и спектроскопия*, **36** (1974) 712–716.
22. E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, E.S. Medvedev, A.N. Ponomarev, V.L. Tal'roze. Investigation of chemical reactions $H + H_2$ and $H + D_2$ by a hydrogen maser. *Chemical Physics*, **8** (1975) 147–157. doi: 10.1016/0301-0104(75)80101-7.
23. Е.Б. Гордон, Б.И. Иванов, А.П. Перминов, В.Е. Балалаев, Ф.Ф. Датченко, А.Н. Пономарёв. Сдвиг частоты сверхтонкого перехода $\Delta m_F = 0$ основного состояния атома Н при его химическом взаимодействии с молекулами в газовой фазе. *Письма в ЖЭТФ*, **21** (1975) 653–656 [English edition: E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, V.E. Balalaev, F.F. Datchenko, A.N. Ponomarev. Frequency shift of hyperfine transition $\Delta m_F = 0$ of the ground state of an H atom chemically interacting with molecules in the gas phase. *JETP Lett.* **21** (1975) 309–310].
24. Е.Б. Гордон, Л.П. Межов-Деглин, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. Конденсация атомного пучка на холодных (ниже 2 К) поверхностях. *Приборы и техника эксперимента*, **6** (1975) 247–250 [English version was published as: E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin, O.F. Pugachev, V.V. Khmelenko. Condensation of an atomic beam on a cold (< 2 K) surface. *Cryogenics*, **9** (1976) 555–557]. doi: 10.1016/0011-2275(76)90309-X.
25. Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин. Фотоиницирование цепных химических реакций в оптически плотных средах. *ЖЭТФ*, **68** (1975) 1252–1264 [English edition: E.B. Gordon, Yu.L. Moskvina. Photo-initiation of chain chemical reactions in optically dense media. *Sov. Phys. JETP*, **41** (1976) 622–627].
26. Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин, В.С. Павленко. Параметрическое исследование импульсного химического CS_2/O_2 -лазера с фотоиницированием. *Квантовая электроника*, **2** (1975) 2607–2610 [English edition: E.B. Gordon, Yu.L. Moskvina, V.S. Pavlenko. Parametric investigation of a pulse photoinitiated chemical CS_2-O_2 laser. *Sov. J. Quantum Electron.*, **5** (1975) 1422–1424]. doi: 10.1070/QE1975v005n12ABEH012159.
27. Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин, В.С. Павленко, В.Л. Тальрозе. Характер влияния давления смеси на генерацию импульсного химического лазера на окиси углерода. *Квантовая электроника*, **2** (1975) 327–331 [English edition: E.B. Gordon, Yu.L. Moskvina, V.S. Pavlenko, V.L. Tal'roze. Nature of the influence of the pressure in a mixture on the stimulated emission of a chemical carbon monoxide pulse laser. *Sov. J. Quantum Electron.*, **5** (1975) 185–187].
28. E.B. Gordon, Y.L. Moskvina. Two-photon laser amplifiers. *ЖЭТФ*, **70** (1976) 1729–1741 [English edition: *Sov. Phys. JETP*, **43** (1976) 901–907].
29. E.B. Gordon, Y.L. Moskvina, V.S. Pavlenko, V.L. Tal'roze. Extent of carbon disulphide photodissociation and the kinetic length of its oxidation chain estimated by means of a CS_2/O_2 laser. *Journal of Photochemistry*, **5** (1976) 401–408. doi: 10.1016/0047-2670(76)85038-1.



30. Е.Б. Гордон, Л.П. Межов-Деглин, О.Ф. Пугачёв. Влияние газодинамического охлаждения на спектральные характеристики послесвечения гелиевого разряда. *Оптика и спектроскопия*, **40** (1976) 398–399.

31. Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин, В.С. Павленко, В.Л. Тальрозе. Влияние акустических колебаний среды на генерацию импульсного CS_2/O_2 лазера. *Квантовая электроника*, **3** (1976) 625–627 [English edition: E.B. Gordon, Yu.L. Moskvin, V.S. Pavlenko, V.L. Tal'roze. Influence of acoustic perturbations of the active medium on the stimulated emission from a pulse CS_2/O_2 laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **6** (1976) 339–341]. doi: 10.1070/QE1976v006n03ABEH011068.

32. Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин, С.А. Сотниченко. Газообразный N_2O_3 как возможная рабочая среда фоторекомбинационного лазера. *Квантовая электроника*, **3** (1976) 2591–2595 [English edition: E.B. Gordon, Yu.L. Moskvin, S.A. Sotnichenko. Gaseous N_2O_3 as a possible active medium of a photorecombination laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **6** (1976) 1425–1428]. doi: 10.1070/QE1976v006n12ABEH012544.

33. В.Л. Тальрозе, Е.Б. Гордон, Б.И. Иванов, А.П. Перминов, А.Н. Пономарёв. Изменение сверхтонкого состояния атома водорода при его взаимодействии с молекулами CO , SO_2 , CO_2 и N_2O в газовой фазе. *ДАН СССР*, **227** (1976) 407–410.

34. E.B. Gordon, Y.L. Moskvin, V.S. Pavlenko, S.E. Nalivaiko. A method for measuring the maximal among the transitions gain coefficient for a cascade laser. *Chemical Physics Letters*, **46** (1977) 323–326. doi: 10.1016/0009-2614(77)85272-x.

35. Е.Б. Гордон, Л.П. Межов-Деглин, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. Тепловая устойчивость конденсированных систем, содержащих стабилизированные атомы. *ЖЭТФ*, **73** (1977) 952–960 [English edition: E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin, O.F. Pugachev, V.V. Khmelenko. Thermal stability of condensed systems containing stabilized atoms. *Sov. Phys. JETP*, **46** (1977) 502–509].

36. E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, V.E. Balalaev. A measurement of formation rates and lifetimes of intermediate complexes in reversible chemical reactions involving hydrogen atoms. *Chemical Physics*, **35** (1978) 79–89. doi: 10.1016/0301-0104(78)85194-5.

37. E.B. Gordon, B.I. Ivanov, A.P. Perminov, V.E. Balalaev, A.N. Ponomarev, V.V. Filatov. Measurement of rate constants of hydrogen atom exchange with vibrationally excited H_2 , HD , and D_2 molecules. *Chemical Physics Letters*, **58** (1978) 425–430. doi: 10.1016/0009-2614(78)85067-2.

38. E.B. Gordon, L.P. Mezhev-Deglin, O.F. Pugachev, V.V. Khmelenko. Gas-phase spectra of the radiative recombination of nitrogen atoms at helium temperatures. *Chemical Physics Letters*, **54** (1978) 282–285. doi: 10.1016/0009-2614(78)80101-8.

39. Е.Б. Гордон, В.Г. Егоров, В.С. Павленко. Возбуждение лазеров на парах металлов цугами импульсов. *Квантовая электроника*, **5** (1978) 452–454 [English edition: E.B. Gordon, V.G. Egorov, V.S. Pavlenko. Excitation of metal vapor lasers by pulse trains. *Sov. J. Quantum Electron*, **8** (1978) 266–268].

40. Е.Б. Гордон, А.К. Курносов, С.А. Сотниченко. Генерация ИК излучения при фотолизе BrCN излучением с $\lambda > 180$ нм. *Квантовая электроника*, **5** (1978) 1144–1147 [English edition: E.B. Gordon, A.K. Kurnosov, S.A. Sotnichenko. Stimulated



emission of infrared radiation as a result of photolysis of BrCN by $\lambda > 180$ nm radiation. *Sov. J. Quantum Electron*, **8** (1978) 653–655].

41. Е.Б. Гордон, С.Е. Наливайко, В.С. Павленко. Нижний предел самовоспламенения смесей дицианоацетилена ($\text{N}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{N}$) с кислородом. *Кинетика и катализ*, **19** (1978) 813–813 [English edition: E.B. Gordon, S.E. Nalivaiko, V.S. Pavlenko. Lower ignition limits of mixtures of dicyanoacetylene ($\text{N}=\text{C}-\text{C}=\text{C}-\text{C}=\text{N}$) and oxygen. *Kinetics and Catalysis*, **19** (1978) 643–643].

42. Е.Б. Гордон, В.Д. Сизов, С.А. Сотниченко. Br_2-CO_2 -лазер с химической накачкой. *Квантовая электроника*, **5** (1978) 1578–1580 [English edition: E.B. Gordon, V.D. Sizov, S.A. Sotnichenko. Chemically pumped Br_2-CO_2 laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **8** (1978) 899–900].

43. Л.В. Дорофеева, Е.Б. Гордон, Ю.Л. Москвин. Излучательная способность продуктов взрывного окисления сероуглерода. *Физика горения и взрыва*, **№5** (1978) 108–114 [English edition: L.V. Dorofeeva, E.B. Gordon, Yu.L. Moskvin. Emissivity of carbon disulfide explosive combustion products. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **14** (1978) 639–643. doi: 10.1007/bf00789725].

44. E.B. Gordon, A.I. Nadkhin, S.A. Sotnichenko. Can the strong collisionally induced spin-orbital relaxation of halogen atoms be accounted for by quencher paramagnetism? *Chemical Physics Letters*, **68** (1979) 97–100. doi: 10.1016/0009-2614(79)80077-9.

45. Е.Б. Гордон, В.Г. Егоров, В.С. Павленко. Лазер на парах CuCl. Процессы, лимитирующие мощность генерации. *Квантовая электроника*, **6** (1979) 2579–2589 [English edition: E.B. Gordon, V.G. Egorov, V.S. Pavlenko, Copper chloride vapor laser. Processes limiting the output power. *Sov. J. Quantum Electron*, **9** (1979) 1526–1532]. doi: 10.1070/QE1979v009n12ABEH009886.

46. Е.Б. Гордон, В.Г. Егоров, В.С. Павленко. Мелкодисперсные частицы металла как активная среда в лазерах на атомах металлов. *Квантовая электроника*, **6** (1979) 2633–2636 [English edition: E.B. Gordon, V.G. Egorov, V.S. Pavlenko. Finely dispersed metal particles as the active medium of metal atom lasers. *Sov. J. Quantum Electron*, **9** (1979) 1562–1564].

47. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов. О природе самоускорения цепной разветвлённой реакции окисления сероуглерода. *Физика горения и взрыва*, **№2** (1980) 62–66 [English edition: E.B. Gordon, M.S. Drozdov. Nature of the self-acceleration of a chain-type branched reaction of the oxidation of carbon disulfide. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **16** (1980) 185–189. doi: 10.1007/bf00740199].

48. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, В.С. Павленко. Импульсное фотоиницирование взрывной реакции окисления сероуглерода. *Кинетика и катализ*, **21** (1980) 1406–1411 [English edition: E.B. Gordon, M.S. Drozdov, V.S. Pavlenko. Flash photoinitiation of the explosive oxidation of carbon disulfide. *Kinetics and Catalysis*, **21** (1980) 1000–1004].

49. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, С.И. Светличный, Ю.Б. Шекк, В.М. Васильев, В.Л. Тальрозе. О максимальных температурах, достижимых в химических реакциях. *Физика горения и взрыва*, **№2** (1980) 66–73 [English edition: E.B. Gordon, M.S. Drozdov, S.I. Svetlichnyi, Yu.B. Shekk, V.M. Vasilev, V.L. Tal'roze. Maximum temperatures reached in chemical reactions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **16** (1980) 189–195. doi: 10.1007/bf00740200].



50. Е.Б. Гордон, С.Е. Наливайко. Импульсный химический CS_2/O_2 -лазер с фотоиницированием на обертоновых переходах ($\Delta\nu = 2$) молекулы CO . *Квантовая электроника*, **7** (1980) 2330–2336 [E.B. Gordon, S.E. Nalivai'ko, V.S. Pavlenko. Pulsed chemical CS_2/O_2 photoinitiation laser utilizing overtone transitions ($\Delta\nu = 2$) of the CO molecule. *Sov. J. Quantum Electron*, **10** (1980) 1358–1362].

51. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, A.A. Pelmenov, O.F. Pugachev. Emission from nitrogen atoms trapped in superfluid helium. *Physica B+C*, **108** (1981) 1311–1312. doi: 10.1016/0378-4363(81)90954-2.

52. E.B. Gordon, A.A. Pelmenov, O.F. Pugachev, V.V. Khmelenko. Active nitrogen luminescence studies at liquid helium temperatures. *Chemical Physics*, **61**(1981) 35–41. doi: 10.1016/0301-0104(81)85046-x.

53. А.А. Бобышев, И.А. Бориев, А.И. Надхин, С.А. Сотниченко, Е.Б. Гордон. Исследование спектральных и релаксационных характеристик атома йода с помощью фотодиссоционного лазера. *Оптика и спектроскопия*, **51** (1981) 882–891.

54. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, В.Ч. Бокун. Экспериментальное исследование самовоспламенения смесей сероуглерода с кислородом. *Физика горения и взрыва*, № **2** (1981) 22–27 [English edition: E.B. Gordon, M.S. Drozdov, V.C. Bokun. Self-ignition in mixtures of carbon disulfide with oxygen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **17** (1981) 130–134. doi: 10.1007/bf00770820].

55. Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, Ю.Л. Москвин. Механизм цепного воспламенения смесей сероуглерода с кислородом. *Кинетика и катализ*, **22** (1981) 1115–1123 [English edition: E.B. Gordon, M.S. Drozdov, Yu.L. Moskvina. Mechanism of the chain ignition of mixtures of carbon disulfide with oxygen. *Kinetics and Catalysis*, **22** (1981) 868–875].

56. E.B. Gordon, A.I. Nadkhin, S.A. Sotnichenko, I.A. Boriev. Transformation of spin-orbit excited states of halogen atoms in the chemical reactions $\text{F} + \text{BR}_2 \rightarrow \text{BRF} + \text{BR}$, $\text{I}^* + \text{BR}_2 \rightarrow \text{IBR} + \text{BR}$, and $\text{BR} + \text{IBR} \rightarrow \text{BR}_2 + \text{I}$. *Chemical Physics Letters*, **86** (1982) 209–213. doi: 10.1016/0009-2614(82)83271-5.

57. В.М. Борисов, Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, О.Б. Христофоров. Химический HF -лазер, инициируемый эксимерным XeCl -лазером. *Квантовая электроника*, **9** (1982) 434–436 [English edition: V.M. Borisov, E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, O.B. Khristoforov. Chemical HF laser initiated by an excimer XeCl laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **12** (1982) 256–258].

58. В.С. Босамыкин, Е.Б. Гордон, В.В. Горохов, В.И. Карелин, В.И. Матюшенко, П.Б. Репин, В.Д. Сизов. Импульсный химический HF -лазер высокого давления с электроразрядным инициированием. *Квантовая электроника*, **9** (1982) 1489–1491 [English edition: V.S. Bosamykin, E.B. Gordon, V.V. Gorokhov, V.I. Karelin, V.I. Matyushenko, P.B. Repin, V.D. Sizov. Pulsed high-pressure chemical HF laser with electric discharge initiation. *Sov. J. Quantum Electron*, **12** (1982) 951–953]. doi: 10.1070/QE1982v012n07ABEH005712.

59. Л.И. Бубнова, Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, С.И. Светличный, В.Л. Тальрозе, С.Г. Хидиров, Ю.Б. Шекк. Спектральные характеристики и природа излучения при взрывах в замкнутом объеме. I. Взрывное окисление дициана. *Физика горения и взрыва*, № **5** (1982) 121–126 [English edition: L.I. Bubnova, E.B. Gordon, M.S. Drozdov, S.I. Svetlichnyi,



V.L. Tal'roze, S.G. Khidirov, Yu.B. Shekk. Spectral characteristics and nature of the emission in closed-volume explosions. Part 1. Explosive oxidation of cyanogen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, **18** (1982) 600–604]. doi: 10.1007/bf00800633.

60. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов. Характеристики импульсного химического лазера на смеси $\text{H}_2\text{--F}_2$, инициируемого излучением эксимерного XeCl-лазера. *Квантовая электроника*, **9** (1982) 2186–2192 [E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov. Characteristics of a pulsed chemical laser utilizing an $\text{H}_2\text{--F}_2$ mixture and initiated by radiation from an XeCl excimer laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **12** (1982) 1420–1424].

61. Е.Б. Гордон, С.Е. Наливайко, В.С. Павленко. Химический лазер на разветленно-цепной стадии реакции окисления сероуглерода. *Квантовая электроника*, **9** (1982) 171–174 [English edition: E.B. Gordon, S.E. Nalivai'ko, V.S. Pavlenko. Chemical laser utilizing the branched-chain stage of the oxidation of carbon disulfide. *Sov. J. Quantum Electron*, **12** (1982) 112–114]. doi: 10.1070/QE1982v012n01ABEH005427.

62. Е.Б. Гордон, А.А. Пельменев, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. ЭПР исследования атомов, стабилизированных в сверхтекучем гелии. I. Методика. Спектры ЭПР атомов азота. *Физика низких температур*, **8** (1982) 601–607.

63. I.A. Boriev, E.B. Gordon, A.A. Nadeikin, A.I. Nikitin, V.L. Tal'roze, A.M. Velichko. Direct measurement of CF_3I multiphoton dissociation yield by iodine-laser detection of iodine atoms. *Chemical Physics Letters*, **96** (1983) 407–409. doi: 10.1016/0009-2614(83)80718-0.

64. I.A. Boriev, A.M. Velichko, E.B. Gordon, A.A. Nadeikin, A.I. Nikitin, V.L. Tal'roze. Direct yeild measurement in multiphoton dissociation of CF_3I and $(\text{CF}_3)_3\text{Cl}$ by recording the iodine atoms with an iodine laser. *High Energy Chemistry*, **17** (1983) 428–431.

65. И.А. Бориев, А.М. Величко, Е.Б. Гордон, А.А. Надейкин, А.И. Никитин, В.Л. Тальрозе. О выходе возбужденных атомов йода при многофотонной диссоциации CF_3I и $(\text{CF}_3)_3\text{Cl}$. *Письма в ЖЭТФ*, **37** (1983) 218–220 [English edition: I.A. Boriev, A.M. Velichko, E.B. Gordon, A.A. Nadeikin, A.I. Nikitin, V.L. Tal'roze. Yield of excited iodine atoms during many-photon dissociation of CF_3I and $(\text{CF}_3)_3\text{Cl}$. *JETP Lett.* **37** (1983) 259–261].

66. И.А. Бориев, Е.Б. Гордон, А.И. Надхин, С.А. Сотниченко. Определение сечения излучения на переходе $^2\text{P}_{1/2}\text{--}^2\text{P}_{3/2}$ атома брома. *Оптика и спектроскопия*, **54** (1983) 397–403.

67. Л.И. Бубнова, Е.Б. Гордон, А.И. Надхин, С.И. Светличный, С.А. Сотниченко. О возможности создания инверсии при диссоциации йодистого брома солнечным светом. *Квантовая электроника*, **10** (1983) 883–886 [English edition: L.I. Bubnova, E.B. Gordon, A.I. Nadkhin, S.I. Svetlichnyi', S.A. Sotnichenko. Possibility of population inversion as a result of dissociation of bromine iodide by solar radiation. *Sov. J. Quantum Electron*, **13** (1983) 554–556]. doi: 10.1070/QE1983v013n04ABEH004221.

68. Е.Б. Гордон, А.А. Пельменев, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. Атомы водорода и дейтерия, стабилизированные конденсацией атомного пучка в сверхтекучем гелии. *Письма в ЖЭТФ*, **37** (1983) 237–239 [English edition: E.B. Gordon, A.A. Pel'me-



nev, O.F. Pugachev, V.V. Khmelenko. Hydrogen and deuterium atoms, stabilized by condensation of an atomic beam in superfluid helium. *JETP Lett.* **37** (1983) 282–285].

69. I.A. Boriev, E.B. Gordon, A.A. Nadeikin, A.I. Nikitin, V.L. Talrose, A.M. Velichko. Multiphoton infrared laser photochemistry of polyatomic molecules: $(\text{CF}_3)_3\text{Cl}$. *Chemical Physics Letters*, **105** (1984) 555–558. doi: 10.1016/0009-2614(84)80111-6.

70. I.A. Boriev, E.B. Gordon, A.A. Efimenko. Kinetic study of the $\text{H} + \text{IBr}$ reaction: rate constants, branching ratio and yields of excited halogen atoms. *Chemical Physics Letters*, **120** (1985) 486–490. doi: 10.1016/0009-2614(85)85646-3.

71. И.А. Бориев, Е.Б. Гордон, А.А. Ефименко, С.М. Чернин. Изучение особенностей фотодиссоциации I_2 методом лазерной атомно-резонансной спектроскопии с использованием многопроходной оптической системы. *Оптика и спектроскопия*, **59** (1985) 277–282.

72. И.В. Быхало, Е.Б. Гордон, А.П. Перминов, В.В. Филатов. Исследование реакций возбуждённых атомов методом ЭПР. Реакции $\text{H} + \text{BR}_2 \rightarrow \text{HBR} + \text{BR}(^2\text{P}_{1/2}, ^2\text{P}_{3/2})$ и $\text{D} + \text{BR}_2 \rightarrow \text{DBR} + \text{BR}(^2\text{P}_{1/2}, ^2\text{P}_{3/2})$. *Химическая физика*, **4** (1985) 1096–1101.

73. И.В. Быхало, Е.Б. Гордон, А.П. Перминов, В.В. Филатов. Исследование реакций возбуждённых атомов методом ЭПР. Реакция $\text{O} + \text{BR}_2 \rightarrow \text{BRO} + \text{BR}(^2\text{P}_{1/2}; ^2\text{P}_{3/2})$. Образование $\text{BR}(^2\text{P}_{1/2})$ при взаимодействии атомов H , D и F с BR_2 . *Химическая физика*, **4** (1985) 770–778.

74. А.М. Величко, Е.Б. Гордон, А.А. Надейкин, А.И. Никитин, В.Л. Тальрозе. Роль вторичных химических реакций при многофотонной диссоциации молекул CF_3I . *Химия высоких энергий*, **19** (1985) 73–78 [English edition: A.M. Velichko, E.B. Gordon, A.A. Nadeikin, A.I. Nikitin, V.L. Tal'roze. Role of secondary chemical reactions in the multiphoton dissociation of CF_3I . *High Energy Chemistry*, **19** (1985) 58–62].

75. А.М. Величко, Е.Б. Гордон, А.А. Надейкин, А.И. Никитин, В.Л. Тальрозе. Многофотонная диссоциация молекул CF_3I в присутствии Br_2 и NO . *Химия высоких энергий*, **19** (1985) 171–175 [English edition: A.M. Velichko, E.B. Gordon, A.A. Nadeikin, A.I. Nikitin, V.L. Tal'roze. Multiphoton dissociation of CF_3I molecules in the presence of Br_2 and NO . *High Energy Chemistry*, **19** (1985) 138–142].

76. Е.Б. Гордон, А.А. Ефименко, И.А. Бориев. Экспериментальное исследование элементарных процессов $\text{F} + \text{I}_2 \rightarrow \text{IF} + \text{I}(^2\text{P}_{1/2}; ^2\text{P}_{3/2})$ и $\text{H} + \text{I}_2 \rightarrow \text{HI} + \text{I}(^2\text{P}_{1/2}; ^2\text{P}_{3/2})$. *Химическая физика*, **4** (1985) 1231–1236.

77. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.С. Павленко, В.Д. Сизов. Химический H_2/F_2 -лазер, инициируемый эксимерной лампой. *Квантовая электроника*, **12** (1985) 220–223 [English edition: E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.S. Pavlenko, V.D. Sizov. Chemical H_2/F_2 laser initiated by an excimer lamp. *Sov. J. Quantum Electron*, **15** (1985) 142–144].

78. Е.Б. Гордон, А.И. Надхин, С.А. Сотниченко. Фотодиссоциативно-химический бромный лазер. *Квантовая электроника*, **12** (1985) 1914–1920 [English edition: E.B. Gordon, A.I. Nadkhin, S.A. Sotnichenko. Bromine photodissociation chemical laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **15** (1985) 1263–1267].



79. Е.Б. Гордон, А.А. Пельменев, О.Ф. Пугачёв, В.Л. Тальрозе, В.В. Хмеленко. Предельные концентрации атомов, стабилизированных в сверхтекучем гелии. *ДАН СССР*, **280** (1985) 1174–1176.

80. Е.Б. Гордон, А.А. Пельменев, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. ЭПР исследования атомов, стабилизированных в сверхтекучем гелии. II. Спектры атомов водорода и дейтерия. *Физика низких температур*, **11** (1985) 563–571.

81. А.А. Ефименко, И.А. Бories, Е.Б. Гордон. Измерения сечений перехода $^2P_{1/2} - ^2P_{3/2}$ атомов йода и брома. *Квантовая электроника*, **12** (1985) 1711–1714 [English edition: A.A. Efimenko, I.A. Boriev, E.B. Gordon, Determination of the cross sections of the $^2P_{1/2} - ^2P_{3/2}$ transition in iodine and bromine atoms. *Sov. J. Quantum Electron*, **15** (1985) 1127–1129]. doi: 10.1070/QE1985v015n08ABEH007599.

82. В.Ч. Бокун, Е.Б. Гордон, Л.Н. Красноперов, С.А. Сотниченко, А.И. Чичинин. Фотодиссоциативный лазер на электронном переходе тонкой структуры $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ атома хлора. *Квантовая электроника*, **13** (1986) 1319–1320 [English edition: V.Ch. Bokun, E.B. Gordon, L.N. Krasnoperov, S.A. Sotnichenko, A.I. Chichinin. Photodissociation laser utilizing the fine-structure $^2P_{1/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ electronic transition in the chlorine atom. *Sov. J. Quantum Electron*, **16** (1986) 866–867].

83. И.В. Быхало, Е.Б. Гордон, А.П. Перминов, В.В. Филатов. Исследование реакций возбуждённых атомов методом ЭПР. Реакции $H(D) + HBR(DBR) \rightarrow H_2(ND, D_2) + BR(^2P_{1/2}, ^2P_{3/2})$. *Химическая физика*, **5** (1986) 1025–1030.

84. А.М. Величко, Е.Б. Гордон, А.А. Надежкин, А.И. Никитин, В.Л. Тальрозе. Многофотонная диссоциация и фрагментация молекул C_2F_5I . *Химия высоких энергий*, **20** (1986) 468–471 [English edition: A.M. Velichko, E.B. Gordon, A.A. Nadeikin, A.I. Nikitin, V.L. Tal'roze. Multiphoton dissociation and fragmentation of C_2F_5I . *High Energy Chemistry*, **20** (1986) 364–367].

85. Е.Б. Гордон, В.В. Горохов, В.И. Матюшенко, В.И. Карелин, А.И. Павловский, П.Б. Репин, В.Д. Сизов. Электроразрядный химический $H_2 - F_2$ -лазер с высоким КПД. *Квантовая электроника*, **13** (1986) 2534–2535 [English edition: E.B. Gordon, V.V. Gorokhov, V.I. Matyushenko, V.I. Karelin, A.I. Pavlovskii, P.B. Repin, V.D. Sizov. High-efficiency electric-discharge chemical $H_2 - F_2$ laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **16** (1986) 1676–1677].

86. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов. Химический H_2/F_2 -лазер, накачиваемый излучением эксимерного лазера. Расчёт и сравнение с экспериментом. *Химическая физика*, **5** (1986) 196–201.

87. E.B. Gordon, I.A. Boriev. Elementary chemical processes of atomic iodine and bromine as initiated by emission from iodine ($\lambda = 1.3 \mu m$) and bromine ($\lambda = 2.7 \mu m$) lasers. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular Spectroscopy*, **43** (1987) 281–283. doi: 10.1016/0584-8539(87)80103-4.

88. Е.Б. Гордон, В.Г. Егоров, В.Т. Михельсоо, С.Е. Наливайко, В.С. Павленко, В.Э. Пезт, А.Б. Трещалов. О гарпунном канале образования эксимерных молекул в электроразрядном $HeCl$ -лазере. *Квантовая электроника*, **15** (1988) 285–288 [English edition: E.B. Gordon, V.G. Egorov, V.T. Mikhkel'soo, S.E. Nalivai'ko, V.S. Pavlenko,



V.E. Peet, A.B. Treshchalov. Harpoon mechanism of formation of excimer molecules in an electric-discharge XeCl laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **18** (1988) 180–182].

89. Е.Б. Гордон, В.В. Хмеленко, А.А. Пельменев, Е.А. Попов, О.Ф. Пугачев. Impurity-helium van der Waals crystals. *Chemical Physics Letters*, **155** (1989) 301–304. doi: 10.1016/0009-2614(89)85329-1.

90. М.Г. Галушкин, Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, К.А. Свиридов. Вырожденное четырехволновое взаимодействие на основе фотодиссоциации в химически-активных средах. *Квантовая электроника*, **16** (1989) 367–372 [English edition: M.G. Galushkin, E.B. Gordon, M.S. Drozdov, K.A. Sviridov. Degenerate four-wave interaction based on photodissociation in chemically active media. *Sov. J. Quantum Electron*, **19** (1989) 246–250].

91. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, П.Б. Репин, В.Д. Сизов. Энергетическая цена образования атомов фтора в импульсном электрическом разряде в молекулярных газах. *Химическая физика*, **8** (1989) 1212–1218.

92. Е.Б. Гордон, А.А. Пельменев, Е.А. Попов, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. О возможности существования примесь-гелиевых вандерваальсовских кристаллов. *Физика низких температур*, **15** (1989) 86–88.

93. С.С. Алимпиев, С.И. Брусов, Е.Б. Гордон, А.А. Маляренко, С.М. Никифоров, Г.Л. Одабашян, А.П. Перминов, Б.Г. Сартаков. Исследование многофотонной диссоциации молекул CF_3I в поле импульсного CO_2 -лазера методом ЭПР-спектроскопии высокого временного разрешения. *Химическая физика*, **9** (1990) 888–894.

94. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, П.Б. Репин, В.Д. Сизов. Эффективный электроразрядный химический XeCl-лазер. *Квантовая электроника*, **17** (1990) 554–555 [English edition: E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, P.B. Repin, V.D. Sizov. Efficient electric-discharge HCl chemical laser. *Sov. J. Quantum Electron*, **20** (1990) 485–487].

95. M.G. Galushkin, E.B. Gordon, M.S. Drozdov, K.A. Sviridov. Chemical intensification of nonlinear multi-wave interactions. *Laser Chemistry*, **12** (1992) 199–209. doi: 10.1155/lc.12.199.

96. Р.Е. Болтнев, Е.Б. Гордон, И.Н. Крушинская, А.А. Пельменев, Е.А. Попов, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. Определение элементного состава примесь-гелиевой твердой фазы. *Физика низких температур*, **18** (1992) 819–825.

97. И.В. Быхало, Е.Б. Гордон, А.П. Перминов, В.В. Филатов. Изучение кинетики двухканальных реакций атомов водорода и дейтерия с молекулами интергалогенов. *Химическая физика*, **11** (1992) 1086–1096.

98. И.В. Быхало, Е.Б. Гордон, А.П. Перминов, В.В. Филатов. Изучение процессов релаксации возбуждённых атомов $\text{Cl}(^2\text{P}_{1/2})$ методом ЭПР в потоке. Экспериментальная методика. *Химическая физика*, **11** (1992) 1097–1105.

99. Е.Б. Гордон, А.А. Пельменев, Е.А. Попов, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко, А.Ф. Шестаков. Анализ образования и стабильности примесь-гелиевой фазы в кластерном приближении. *Физика низких температур*, **18** (1992) 1365–1374.

100. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, A.A. Pelmenev, E.A. Popov, O.F. Pugachev, A.F. Shestakov. Metastable impurity-helium solid phase. Experimental and theoretical evidence. *Chemical Physics*, **170** (1993) 411–426. doi: 10.1016/0301-0104(93)85122-o.



101. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, А.И. Надхин, В.Д. Сизов, И.В. Сулименков. Управление спектральным составом излучения мощного импульсного химического HF-лазера. *Химическая физика*, **12** (1993) 1359–1365.

102. Е.Б. Гордон, О.С. Ржевский. Расчёт констант равновесия процессов взаимодействия Cl и F с Xe на основе экспериментальных потенциальных кривых. *Химическая физика*, **12** (1993) 1571–1580.

103. R.E. Boltnev, E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, I.N. Krushinskaya, M.V. Martynenko, A.A. Pelmenev, E.A. Popov, A.F. Shestakov. Luminescence of nitrogen and neon atoms isolated in solid helium. *Chemical Physics*, **189** (1994) 367–382. doi: 10.1016/0301-0104(94)00337-8.

104. E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, O.S. Rzhnevsky. Critical phenomena in electron drift through condensed rare gases. *Chemical Physics Letters*, **217** (1994) 605–612. doi: 10.1016/0009-2614(93)e1446-n.

105. Р.Е. Болтнев, И.В. Быхало, Е.Б. Гордон, В.В. Филатов. Спин-орбитальная релаксация и уширение ЭПР-переходов в атомах $F(^2P_{1/2})$ и $Cl(^2P_{1/2})$. *Химическая физика*, **13** (1994) 3–8.

106. И.В. Быхало, В.В. Филатов, Е.Б. Гордон, А.П. Перминов. Изучение кинетики двухканальных реакций атомов водорода и дейтерия с молекулами интергалогенов. *Известия АН, сер. хим.*, **20** (1994) 1733–1740 [English edition: I.B. Bykhalo, V.V. Filatov, E.B. Gordon, A.P. Perminov. Kinetics study of two-channel hydrogen and deuterium atom reactions with interhalogen molecules. *Russian Chemical Bulletin*, **43** (1994) 1637–1645]. doi: 10.1007/bf00703477.

107. М.Г. Галушкин, Е.Б. Гордон, М.С. Дроздов, Е.В. Поляков. Активная среда эксимерного лазера как ОВД-зеркало УФ-диапазона. *Известия АН, сер. физ.*, **58** (1994) 125–132.

108. Е.Б. Гордон, М.В. Мартыненко, А.А. Пельменев, О.Ф. Пугачёв, В.В. Хмеленко. Особенности индуцированного столкновениями внутримолекулярного Е-Е обмена при низких температурах (20 К), наблюдаемые по люминесценции: 1^+ -система N_2 , 1^- -система N_2^+ , красная система CN. *Химическая физика*, **13** (1994) 15–28.

109. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, А.И. Надхин, В.Д. Сизов, И.В. Сулименков. О возможности управления спектральным составом излучения мощного импульсного химического HF-лазера. *Химия высоких энергий*, **28** (1994) 551–553 [English edition: E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, A.I. Nadkhin, V.D. Sizov, I.V. Sulimenkov. On the feasibility of controlling the spectral composition of emission of a high-power pulsed HF chemical laser. *High Energy Chemistry*, **28** (1994) 492–494].

110. Е.Б. Гордон, О.С. Ржевский, В.В. Хмеленко. О возможности создания электроразрядного эксимерного лазера на конденсированных благородных газах. *Квантовая электроника*, **21** (1994) 227–233 [English edition: E.B. Gordon, O.S. Rzhnevskii, V.V. Khmelenko. Feasibility of the construction of an electric-discharge excimer laser with a condensed rare gas as the active medium. *Sov. J. Quantum Electron*, **24** (1994) 209–215].



111. А.И. Надхин, Е.Б. Гордон. Механизм генерации фотодиссоциативного лазера на электронном переходе тонкой структуры $^2P_{1/2} - ^2P_{3/2}$ атома хлора. *Химическая физика*, **13** (1994) 3–13.

112. А.И. Надхин, Е.Б. Гордон. Спин-орбитальное возбуждение в газофазных химических реакциях. I. Реакция $I(^2P_{1/2}) + ICl-I_2 + Cl(^2P_{1/2})$. *Химическая физика*, **13** (1994) 3–10.

113. В.С. Павленко, С.Е. Наливайко, В.Г. Егоров, О.С. Ржевский, Е.Б. Гордон. Спектроскопическое исследование эксимерных молекул методами фотопоглощения и фотоассоциации. I. XeCl. *Квантовая электроника*, **21** (1994) 217–224 [English edition: V.S. Pavlenko, S.E. Nalivai'ko, V.G. Egorov, O.S. Rzhetskii, E.B. Gordon. Spectroscopic investigation of excimer molecules by photoabsorption and photoassociation methods. I. XeCl. *Sov. J. Quantum Electron*, **24** (1994) 199–206].

114. R.E. Boltnev, E.B. Gordon, V.V. Khmelenko, M.V. Martynenko, A.A. Pelme-nev, E.A. Popov, A.F. Shestakov. The metastable $Ne(^3P_2)$ and $N(^2D)$ atoms in cores of solitary and sticking helium clusters/helium surrounding and heavy neighbor influence. *Journal de Chimie Physique et de Physico-Chimie Biologique*, **92** (1995) 362–383. doi: 10.1051/jcp/1995920362.

115. E.B. Gordon, V.G. Egorov, S.E. Nalivaiko, V.S. Pavlenko, O.S. Rzhetsky. The theoretical and experimental distinguishing of photoassociation into the XeCl(B) state. *Chemical Physics Letters*, **242** (1995) 75–82. doi: 10.1016/0009-2614(95)00721-f.

116. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов. Импульсный химический H_2/F_2 -лазер с пониженной начальной температурой смеси. *Квантовая электроника*, **22** (1995) 5–8 [English edition: E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov. Pulsed H_2/F_2 chemical laser with a reduced initial mixture temperature. *Sov. J. Quantum Electron*, **25** (1995) 1–4].

117. Е.Б. Гордон, О.С. Ржевский. Расчёт спектра возбуждения XeCl(B), включающего процессы фотовозбуждения и фотоассоциации. *Оптика и спектроскопия*, **78** (1995) 360–366.

118. V.S. Pavlenko, S.E. Nalivaiko, V.G. Egorov, O.S. Rzhetsky, E.B. Gordon. Photoabsorption and photoassociation into the XeF(B) excimer state. *Chemical Physics Letters*, **259** (1996) 204–212. doi: 10.1016/0009-2614(96)00737-3.

119. И.А. Бориев, Е.Б. Гордон. Особенности кинетики гибели возбуждённых атомов $Br^*(^2P_{1/2})$, образующихся при фотолизе IBr. *Химическая физика*, **15** (1996) 87–94 [English edition: I.A. Boriev, E.B. Gordon. Kinetic peculiarities of decay of excited $BR^*(^2P_{1/2})$ atoms formed in IBr photolysis. *Chemical Physics Reports*, **15** (1996) 715–722].

120. В.С. Павленко, С.Е. Наливайко, В.Г. Егоров, Е.Б. Гордон. Исследование кинетики рекомбинации атомов хлора и фтора в инертных газах методом наведённой эксимерной люминесценции. *Кинетика и катализ*, **37** (1996) 326–338 [English edition: V.S. Pavlenko, S.E. Nalivaiko, V.G. Egorov, E.B. Gordon. Laser-induced excimer fluorescence kinetic study of the recombination of chlorine and fluorine atoms in inert gases. *Kinetics and Catalysis*, **37** (1996) 304–314].



121. V. Kiryukhin, B. Keimer, R.E. Boltnev, V.V. Khmelenko, E.B. Gordon. Inert-gas solids with nanoscale porosity. *Physical Review Letters*, **79** (1997) 1774–1777. doi: 10.1103/PhysRevLett.79.1774.

122. Р.Е. Болтнев, Е.Б. Гордон, И.Н. Крушинская, М.В. Мартыненко, А.А. Пельменев, Е.А. Попов, В.В. Хмеленко. Исследование разрушения примесь-гелиевой твёрдой фазы. *Физика низких температур*, **23** (1997) 753–766 [English edition: R.E. Boltnev, E.B. Gordon, I.N. Krushinskaya, M.V. Martynenko, A.A. Pel'menev, E.A. Popov, V.V. Khmelenko, A.F. Shestakov. Analysis of decomposition of impurity-helium solid phase. *Low Temperature Physics*, **23** (1997) 567–577]. doi: 10.1063/1.593424.

123. И.А. Бориев, Е.Б. Гордон. Аномально быстрая гибель атомов йода $I(^2P_{3/2})$ при фотолизе $n\text{-C}_3\text{F}_7\text{I}$ в присутствии O_2 . *Химическая физика*, **17** (1998) 3–9 [English edition: I.A. Boriev, E.B. Gordon. Abnormally fast decay of iodine atoms $I(^2P_{3/2})$ during $n\text{-C}_3\text{F}_7\text{I}$ photolysis in the presence of O_2 . *Chemical Physics Reports*, **17** (1998) 1257–1265].

124. В.С. Павленко, С.Е. Наливайко, В.Г. Егоров, О.С. Ржевский, Е.Б. Гордон. Кинетика фотоиницированного фторирования ксенона. *Химическая физика*, **17** (1998) 23–26 [English edition: V.S. Pavlenko, S.E. Nalivaiko, V.G. Egorov, O.S. Rzhetskii, E.B. Gordon. Kinetics of photoinitiated fluorination of xenon. *Chemical Physics Reports*, **17** (1998) 1621–1642].

125. Е.А. Попов, А.А. Пельменев, Е.Б. Гордон. Measurements of thermal diffusivity of impurity-helium solids. *Journal of Low Temperature Physics*, **119** (2000) 367–376. doi: 10.1023/a:1004669803704.

126. Е.Б. Гордон, А.Ф. Шестаков. Локализация гелия вокруг микроскопических примесей в жидком гелии. *Физика низких температур*, **26** (2000) 5–33 [English edition: E.B. Gordon, A.F. Shestakov, Localization of helium around microscopic impurities in liquid helium. *Low Temperature Physics*, **26** (2000) 1–23]. doi: 10.1063/1.593856.

127. E.B. Gordon, O.S. Rzhetsky. Optical spectroscopy of negative ions based on laser assisted electron attachment. *Molecular Physics*, **99** (2001) 1209–1214. doi: 10.1080/00268970110043388.

128. Е.Б. Гордон. Криохимия в матрично изолированных кластерах. *ДАН*, **378** (2001) 650–652 [English edition: E.B. Gordon. Cryochemistry in matrix-isolated clusters. *Doklady Physical Chemistry*, **378** (2001) 156–158]. doi: 10.1023/a:1019222409053.

129. Е.Б. Гордон, А.Ф. Шестаков. Экситонная люминесценция при дрейфе избыточных электронов через жидкие и твёрдые инертные газы. *Физика низких температур*, **21** (2001) 1192–1201 [English edition: E.B. Gordon, A.F. Shestakov. Excitonic luminescence in the drift of excess electrons through liquid and solid rare gases. *Low Temperature Physics*, **27** (2001) 883–889]. doi: 10.1063/1.1414582.

130. R.E. Boltnev, G. Frossati, E.B. Gordon, I.N. Krushinskaya, E.A. Popov, A. Usenko. Embedding impurities into liquid helium. *Journal of Low Temperature Physics*, **127** (2002) 245–258. doi: 10.1023/a:1015286903409.

131. S.I. Kiselev, V.V. Khmelenko, D.M. Lee, V. Kiryukhin, R.E. Boltnev, E.B. Gordon, B. Keimer. X-ray studies of structural changes of impurity-helium solids. *Journal of Low Temperature Physics*, **126** (2002) 235–240. doi: 10.1023/a:1013716312026.



132. S.I. Kiselev, V.V. Khmelenko, D.M. Lee, V. Kiryukhin, R.E. Boltnev, E.B. Gordon, B. Keimer. Structural studies of impurity-helium solids. *Physical Review B*, **65** (2002). doi: 10.1103/PhysRevB.65.024517.
133. Е.Б. Гордон, А.Ф. Шестаков. Спектроскопия атомов и молекул, изолированных гелием. *Химическая физика*, **21** (2002) 16–31.
134. E.B. Gordon, G. Frossati, A. Usenko, Y. Aratono, T. Kumada. Matrix isolation by solid helium. *Physica B – Condensed Matter*, **329** (2003) 404–405. doi: 10.1016/s0921-4526(02)02167-1.
135. E.B. Gordon, A. Usenko, G. Frossati. Embedding impurities into solid helium. *Journal of Low Temperature Physics*, **130** (2003) 15–23. doi: 10.1023/a:1021841217179.
136. A. Usenko, G. Frossati, E.B. Gordon. Ultrahot electron formation under excess electron drift through solid Xe. *Physical Review Letters*, **90** (2003). doi: 10.1103/PhysRevLett.90.153201.
137. Е.Б. Гордон, Д. Фроссати, А. Усенко. Электронное возбуждение матрицы при дрейфе избыточных электронов через твёрдый ксенон. *ЖЭТФ*, **123** (2003) 962–974 [English edition: E.B. Gordon, G. Frossati, A. Usenko. Electronic excitation of the matrix during drift of excess electrons through solid xenon. *JETP*, **96** (2003) 846–856]. doi: 10.1134/1.1581938.
138. E.B. Gordon, T. Kumada, M. Ishiguro, Y. Aratono. CARS study of deuterium clusters stabilized in solid helium. *ЖЭТФ*, **126** (2004) 898–906 [English edition: *Sov. Phys. JETP*, **99** (2004) 776–783]. doi: 10.1134/1.1826169.
139. E.B. Gordon, B.M. Smirnov. Processes in condensed inert gases involving excess electrons. *ЖЭТФ*, **125** (2004) 1058–1070 [English edition: *Sov. Phys. JETP*, **98** (2004) 924–935]. doi: 10.1134/1.1767559.
140. Е.Б. Гордон. Конденсация примесей в жидком и твердом гелии. *Физика низких температур*, **30** (2004) 1009–1018 [English edition: E.B. Gordon. Impurity condensation in liquid and solid helium. *Low Temperature Physics*, **30** (2004) 756–762]. doi: 10.1063/1.1808152.
141. E.B. Gordon, T. Kumada, M. Ishiguro, Y. Aratono, T. Momose, N. Nakashima. Doped helium crystals growth and study. *Journal of Low Temperature Physics*, **138** (2005) 805–810. doi: 10.1007/s10909-005-2306-z.
142. E.B. Gordon, B.M. Smirnov. The tube character of electron drift in condensed inert gases. *ЖЭТФ*, **128** (2005) 211–221 [English edition: *Sov. Phys. JETP*, **101** (2005) 186–195]. doi: 10.1134/1.2010675.
143. Е.Б. Гордон, В.А. Дубовицкий, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, Ю.А. Колесников. Восстановление гексафторида урана атомарным водородом. *Кинетика и катализ*, **47** (2006) 151–160 [English edition: E.B. Gordon, V.A. Dubovitskii, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, Y.A. Kolesnikov. Uranium hexafluoride reduction with hydrogen atoms. *Kinetics and Catalysis*, **47** (2006) 148–156]. doi: 10.1134/s0023158406010204.
144. E.B. Gordon, R. Nishida, R. Nomura, Y. Okuda. Filament formation by impurities embedding into superfluid helium. *Письма в ЖЭТФ/JETP Lett.*, **85** (2007) 581–584. doi: 10.1134/s0021364007110112.



145. E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, B.M. Smirnov. Low-temperature electrical discharge through solid xenon. *Физика низких температур*, **34** (2008) 1203–1211 [English edition: *Low Temperature Physics*, **34** (2008) 952–959]. doi: 10.1063/1.3009594.

146. E.B. Gordon, B.M. Smirnov. Free electron in compressed inert gases. *ЖЭТФ*, **134** (2008) 322–329 [English edition: *Sov. Phys. JETP*, **107** (2008) 274–280]. doi: 10.1134/s1063776108080116.

147. E.B. Gordon, Y. Okuda. Catalysis of impurities coalescence by quantized vortices in superfluid helium with nanofilament formation. *Физика низких температур*, **35** (2009) 278–283 [English edition: *Low Temperature Physics*, **35** (2009) 209–213]. doi: 10.1063/1.3081156.

148. Е.Б. Гордон, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, В.Б. Фокин. Спектры люминесценции твёрдого ксенона, возбуждаемой объёмным электрическим разрядом. *Оптика и спектроскопия*, **106** (2009) 785–792 [English edition: E.B. Gordon, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, V.B. Fokin. Luminescence spectra of solid xenon excited by volume discharge. *Optics and Spectroscopy*, **106** (2009) 706–712]. doi: 10.1134/s0030400x09050142.

149. P. Moroshkin, V. Lebedev, B. Grobety, C. Neururer, E.B. Gordon, A. Weis. Nanowire formation by gold nano-fragment coalescence on quantized vortices in He II. *EPL (Europhysics Letters)*, **90** (2010) 34002. doi: 10.1209/0295-5075/90/34002.

150. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, И.И. Ходос. Ответ на комментарий к статье «Электрические свойства металлических нанопроволок, полученных в квантовых вихрях сверхтекучего гелия, ФНТ 36 (2010) 740». *Физика низких температур*, **36** (2010) 1373 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Reply to the comments to «Electrical properties of metallic nanowires grown in quantized vortices of superfluid helium. LTP 36 (2010) 590», *Low Temperature Physics*, **36** (2010) 1108]. doi: 10.1063/1.3539783.

151. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, И.И. Ходос. Электрические свойства металлических нанопроволок, полученных в квантовых вихрях сверхтекучего гелия. *Физика низких температур*, **36** (2010) 740–747 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Electric properties of metallic nanowires obtained in quantum vortices of superfluid helium. *Low Temperature Physics*, **36** (2010) 590–595]. doi: 10.1063/1.3481303.

152. V. Lebedev, P. Moroshkin, A. Weis, B. Grobety, E.B. Gordon. Formation of Metallic Nanowires by Laser Ablation in Liquid Helium. *Journal of Low Temperature Physics*, **165** (2011) 166–176. doi: 10.1007/s10909-011-0384-7.

153. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, И.И. Ходос. Строение металлических нанопроволок и нанокластеров, образующихся в сверхтекучем гелии. *ЖЭТФ*, **139** (2011) 1209–1220 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Structure of metallic nanowires and nanoclusters formed in superfluid helium. *JETP*, **112** (2011) 1061–1070]. doi: 10.1134/s1063776111040182.

154. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. The electrical conductivity of bundles of superconducting nanowires produced by laser ablati-



on of metals in superfluid helium. *Applied Physics Letters*, **101** (2012). doi: 10.1063/1.4742330.

155. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. The role of vortices in the process of impurity nanoparticles coalescence in liquid helium. *Chemical Physics Letters*, **519-20** (2012) 64–68. doi: 10.1016/j.cplett.2011.11.020.

156. Е.Б. Гордон. Влияние сверхтекучести на конденсацию примесей в жидком гелии. *Физика низких температур*, **38** (2012) 1320–1328 [English edition: *Low Temperature Physics*, **38** (2012) 1043–1048]. doi: 10.1063/1.4766584.

157. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. The nanostructures produced by laser ablation of metals in superfluid helium. *Journal of Low Temperature Physics*, **172** (2013) 94–112. doi: 10.1007/s10909-012-0849-3.

158. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, A.A. Morozov, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Structure and properties of platinum, gold and mercury nanowires grown in superfluid helium. *Journal of Physical Chemistry Letters*, **5** (2014) 1072–1076. doi: 10.1021/jz5003583.

159. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, И.И. Ходос. Стабильность микронных сфер, образующихся при импульсной лазерной абляции металлов в сверхтекучем гелии и воде. *Химия высоких энергий*, **48** (2014) 245–252 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Stability of micron-sized spheres formed by pulsed laser ablation of metals in superfluid helium and water. *High Energy Chemistry*, **48** (2014) 206–212]. doi: 10.1134/s0018143914030060.

160. E.B. Gordon, A.V. Bezryadin, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, I.I. Khodos. Suppression of superconductivity in thin Nb nanowires fabricated in the vortex cores of superfluid helium. *Physica C – Superconductivity and its Applications*, **516** (2015) 44–49. doi: 10.1016/j.physc.2015.06.010.

161. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, I.I. Khodos. Experimental study of thermal stability of thin nanowires. *Journal of Physical Chemistry A*, **119** (2015) 2490–2501. doi: 10.1021/jp5087834.

162. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, T.N. Rostovshchikova, S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva, E.V. Golubina. Application of Au-Cu nanowires fabricated by laser ablation in superfluid helium as catalysts for CO oxidation. *Gold Bulletin*, **48** (2015) 119–125. doi: 10.1007/s13404-015-0168-y.

163. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, I.I. Khodos. Production of ultrathin nanowires from refractory metals (Nb, Re, W, Mo) by laser ablation in superfluid helium. *Laser Physics Letters*, **12** (2015) 096002. doi: 10.1088/1612-2011/12/9/096002.

164. Р.Л. Волков, Н.И. Боргардт, В.Л. Гуртовой, А.И. Ильин, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, И.И. Ходос, Е.Б. Гордон. Мобильная микроячейка для измерения электрических характеристик индивидуальных нанотрубок и нанопроволок. *Приборы и техника эксперимента*, **№6** (2016) 77–86 [English edition: R.L. Volkov, N.I. Borgardt, A.I. Il'in, V.L. Gurtovoi, I.I. Khodos, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, E.B. Gordon. A mobile microcell for measuring the electrical characteristics of individual nanowires and nanotubes. *Instruments and Experimental Techniques*, **59** (2016) 848–856]. doi: 10.7868/S0032816216060124.



165. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, Т.Н. Ростовщикова, С.А. Николаев, Е.С. Локтева. Квази-1D металлы (Pd, Pt, Nb) как катализаторы окисления СО. *Теоретическая и экспериментальная химия*, **52** (2016) 75–83 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, T.N. Rostovshchikova, S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva. Quasi-1D metals (Pd, Pt, Nb) as catalysts for oxidation of CO. *Theoretical and Experimental Chemistry*, **52** (2016) 75–84]. doi: 10.1007/s11237-016-9453-y.

166. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, В.Д. Сизов, Т.Н. Ростовщикова, С.А. Николаев, Е.С. Локтева, Е.В. Голубина, К.И. Маслаков, И.Н. Кротова, С.А. Гуревич, В.М. Кожевин, Д.А. Явсин. Катализ окисления монооксида углерода кислородом в присутствии нанопроволок и наночастиц палладия. *Химия высоких энергий*, **50** (2016) 305–310 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Kaabulin, V.I. Matyushenko, V.D. Sizov, T.N. Rostovshchikova, S.A. Nikolaev, E.S. Lokteva, E.V. Golubina, K.I. Maslakov, I.N. Krotova, S.A. Gurevich, V.M. Kozhevin, D.A. Yavsin. Catalysis of carbon monoxide oxidation with oxygen in the presence of palladium nanowires and nanoparticles. *High Energy Chemistry*, **50** (2016) 292–297]. doi: 10.1134/s0018143916040068.

167. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, M.I. Kulish, V.I. Matyushenko, M.E. Stepanov. Coagulation of metals in superfluid and normal liquid helium. *Journal of Physical Chemistry A*, **121** (2017) 9185–9190. doi: 10.1021/acs.jpca.7b08645.

168. E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, S.A. Nikolaev, I.I. Khodos. Nanowires produced by laser ablation of binary metal alloys in superfluid helium. *Mendeleev Communications*, **27** (2017) 385–386. doi: 10.1016/j.mencom.2017.07.022.

169. E.B. Gordon, M.I. Kulish, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko. Non-isothermal physical and chemical processes in superfluid helium. *Физика низких температур*, **43** (2017) 1354–1362 [English edition: *Low Temperature Physics*, **43** (2017) 1086–1093]. doi: 10.1063/1.5004454.

170. E.B. Gordon, M.I. Kulish, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, E.V. Dyatlova, A.S. Gordienko, M.E. Stepanov. Realization of mechanical rotation in superfluid helium. *Физика низких температур*, **43** (2017) 1316–1323 [English edition: *Low Temperature Physics*, **43** (2017) 1055–1061]. doi: 10.1063/1.5004447.

171. S.A. Krasnokutski, M. Goulart, E. B. Gordon, A. Ritsch, C. Jager, M. Rastogi, W. Salvenmoser, T. Henning, P. Scheier. Low-temperature condensation of carbon. *Astrophysical Journal*, **847** (2017) 89. doi: 10.3847/1538-4357/aa88a4.

172. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, С.А. Краснокутский, В.И. Матюшенко, И.И. Ходос. Образование наноструктур при коагуляции полупроводников в сверхтекучем гелии. *Химия высоких энергий*, **51** (2017) 261–265 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, S.A. Krasnokutski, V.I. Matyushenko, I.I. Khodos. Formation of nanostructures during coagulation of semiconductors in superfluid helium. *High Energy Chemistry*, **51** (2017) 245–249]. doi: 10.1134/s001814391704004x.

173. E.B. Gordon, M.I. Kulish, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, M.E. Stepanov. Optical radiation accompanying metal nanoparticles coagulation in superfluid helium. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, **222** (2019) 180–185. doi: 10.1016/j.jqsrt.2018.10.015.



174. E.B. Gordon, M.E. Stepanov, M.I. Kulish, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, I.I. Khodos. The nanowires growth by laser ablation of metals inside rotating superfluid helium. *Laser Physics Letters*, **16** (2019). doi: 10.1088/1612-202X/aaf6a1.

175. Е.Б. Гордон, А.В. Карабулин, В.И. Матюшенко, М.Е. Степанов, И.И. Ходос. Получение квазиодномерных металлических гетероструктур одновременной абляцией двух мишеней над поверхностью сверхтекучего гелия. *Химия высоких энергий*, **54** (2020) 180–185 [English edition: E.B. Gordon, A.V. Karabulin, V.I. Matyushenko, M.E. Stepanov, I.I. Khodos. Preparation of quasi-one-dimensional metal heterostructures by simultaneous ablation of two targets over superfluid helium surface. *High Energy Chemistry*, **54** (2020) 164–169]. doi: 10.1134/S0018143920030054.

176. E.B. Gordon, *Cryocrystals in the space: Low temperature evolution of interstellar dust*, in 12th *International Conference on Cryocrystals and Quantum Crystals*. August 26–31, 2018: Wrocław, Poland.



International virtual symposium in memory of Eugene B. Gordon

September 8–9, 2020

Organizer: **Iouli E. Gordon**

(*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA*)

Scientific program:

1. **Edouard Son** (*Joint Institute for High Temperatures, Russia*). Gordon's experiments in superfluid He and quantum turbulence.

2. **Takayuki Kumada** (*Materials Sciences Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Japan*). H_6^+ ion in irradiated solid para-hydrogen.

3. **Maxim Stepanov** (*Institute of Problems of Chemical Physics, Russia*). Processes of non-isothermal condensation of metals in superfluid helium leading to nanowire formation.

4. **Isaac Silvera** (*Harvard University, USA*). Eugene & Me and a talk on Metallic Hydrogen.

5. **Leonid Mezhev-Deglin** (*Institute of Solid State Physics, Russia*). Preparation of the high-porous impurity-helium condensate samples in superfluid He-II by the liquid seal method.

6. **Vladimir Khmelenko** (*Texas A & M University, USA*). Discovery of tunneling reactions between atoms and molecules of hydrogen isotopes in the solid phase.

7. **David Lee, Nobel laureate** (*Texas A & M University, USA*). Recent Studies of Impurity Helium Condensates at Low Temperatures.

8. **Eugene Gordon** (*Institute of Problems of Chemical Physics, Russia*) and **Vladimir Fortov** (*Joint Institute for High Temperatures, Russia*). Strongly coupled plasmas: Non-ideality and degeneracy.

9. **Genri Norman** (*National Research University Higher School of Economics, Russia*). What connected me with Eugene and who.

10. **Boris Smirnov** (*Joint Institute for High Temperatures, Russia*). Electron transport in condensed xenon and Gordon lamp.

11. **Oksana Koplak** (*Institute of Problems of Chemical Physics, Russia*). Evolution of Ni nanowires and nanoballs system grown in superfluid helium visualized by its magnetic properties.

12. **Yuri Freiman** (*Verkin Institute for Low Temperature Physics, Ukraine*). Negative thermal expansion in solid methane and deuteromethane.

13. **Sergey Gubin** (*Moscow Engineering Physics Institute, Russia*). The history (beginning) of the synthesis of metal nanowires by Evgeny Gordon.



14. **Wolfgang Ernst** (*Graz University of Technology, Austria*). Metals in helium droplets – From atoms to cluster aggregation.

15. **Andrei Vilesov** (*University of Southern California, USA*). Quantum vortices in helium droplets.

List of participants

1.	Aleksandr Shestakov	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
2.	Alexander Schiffmann	Graz University of Technology, Austria
3.	Alexey Khrapak	Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia
4.	Aleksandr Karabulin	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
5.	Andreas Hauserm	Graz University of Technology, Austria
6.	Andrei Vilesov	University of Southern California, USA
7.	Andrzej Jezowski	Institute of Low Temperature & Structure Research, PAS, Wroclaw, Poland
8.	Antoine Weiss	Université de Fribourg, Switzerland
9.	Assir Melamed	Edmonton, Canada
10.	Bernhard Thaler	Graz University of Technology, Austria
11.	Boris Smirnov	Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia
12.	David Lee	Texas A & M University, USA
13.	David T.	Anderson University of Wyoming, USA
14.	Diliara Gordon	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
15.	Edouard Son	Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia
16.	Emile Medvedev	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
17.	Evgeny Markin	University of Waterloo, Canada
18.	Florian Lackner	Graz University of Technology, Austria
19.	Genri Norman	National Research University Higher School of Economics, Russia
20.	Ilia Mikhailov	Industrial University of Santander, Bucaramanga, Columbia
21.	Iouli Gordon	Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA
22.	Isaac Silvera	Harvard University, USA
23.	Grigorii Karnaukh	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
24.	Anna Karnaukh	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
25.	Dmitry Kiryukhin	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
26.	Laura RISHINA	N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow, Russia
27.	Laurence Rothman	Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, USA
28.	Leonid Mezhev-Deglin	Institute of Solid State Physics, Russia
29.	Maxim Stepanov	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia



30.	Michael Heaven	Emory University, USA
31.	Nadezhda Serebryanaya	Technological Institute for Superhard and Novel Carbon Materials
32.	Anatoly Nikitin	N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Moscow
33.	Oksana Koplak	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
34.	Pascal Heim	Graz University of Technology, Austria
35.	Paul Raston	James Maddison University, USA
36.	Peter MacGahan	Washington, USA
37.	Robert di Vora	Graz University of Technology, Austria
38.	Roman Boltnev	Chernogolovka Branch of the N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics
39.	Sergey Gubin	Moscow Engineering Physics Institute, Russia
40.	Sergey Vasiliev	University of Turku, Finland
41.	Sergiy Krasnokutskiy	Jena University, Germany
42.	Takayuki Kumada	Japan Atomic Energy Agency, Japan
43.	Tomonari Wakabayashi	Kindai University, Japan
44.	Valery Kiryukhin	Rutgers University, USA
45.	Valery Sultanov	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
46.	Veniamin Prut	Moscow Institute of Physics and Technology
47.	Vladimir Fedotov	N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Moscow, Russia
48.	Vladimir Gak	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
49.	Vladimir Khmelenko	Texas A & M University, USA
50.	Vladimir Matyushenko	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
51.	Vladimir Fortov	Joint Institute for High Temperatures RAS, Russia
52.	Wolfgang Ernst	Graz University of Technology, Austria
53.	Yuri Freiman	B.I. Verkin Institute for Low Temperature Physics, Ukraine
54.	Vladimir Dubovitskii	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
55.	Marianna Voevodskaya	Division of Mathematical Sciences of RAS
56.	Elena Fedotova	N.N. Semenov Institute of Chemical Physics RAS, Moscow, Russia
57.	Marina Raznikova	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia
58.	Tatiana Rostovschikova	M.V. Lomonosov Moscow State University
59.	Ekaterina Kunitsyna	Institute of Problems of Chemical Physics RAS, Russia



Краткие сведения об авторах

Вакабаяши Томонари, профессор, декан химического факультета, университет Киндай, Япония

Гомон Владимир Ильич, киевский друг детства Е.Б. Гордона, Саарбрюккен, Германия

Гордиенко Артур Сергеевич, инженер-конструктор НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала

Гордон Диляра Ахметовна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института проблем химической физики РАН

Гордон Лев Сергеевич, внук Е.Б. Гордона, спортсмен, тренер, чемпион Москвы по комплексному единоборству, кандидат в мастера по 3м видам спорта.

Гордон Марина Викторовна, мама внука Левы, журналист

Гордон Сергей Евгеньевич, сын Е.Б. Гордона, бывший сотрудник «Руси сидящей», Москва

Гордон Юлий Евгеньевич, сын Е.Б. Гордона, директор проекта HITRAN, Гарвард, США

Губина Татьяна Валентиновна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Конструирования приборов и установок» НИЯУ МИФИ

Губин Сергей Александрович, доктор физико-математических наук, зав. кафедрой «Химическая физика», профессор НИЯУ МИФИ

Ефимов Виктор Борисович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Института физики твёрдого тела РАН, профессор отдела аспирантуры и магистратуры ИФТТ РАН и кафедры общей физики Астраханского государственного университета

Иванова Авигея Николаевна, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института проблем химической физики РАН

Иванова-Провоторова Альбина Владимировна, кандидат физ.-мат. наук, физик-теоретик, работала в Институте химической физики РАН

Карабулин Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Химическая физика» НИЯУ МИФИ

Карнаух Анна Ароновна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института проблем химической физики РАН



Карнаух Григорий Ефимович, старший научный сотрудник Института проблем химической физики РАН

Класен Николай Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник института физики твёрдого тела РАН

Копелевич Олег Викторович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова

Кузнецов Евгений Александрович, академик РАН, Физический институт Российской академии наук им. П.Н. Лебедева и Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау

Кумада Такаюки, Японское агентство по атомной энергии, Япония

Леонтьева Антонина Владимировна, доктор физико-математических наук, работала в харьковском Физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина, затем заведующей лабораторией в Донецком физико-техническом институте им. А.А. Галкина

Лехциер Вадим Соломонович, киевский друг детства Е.Б. Гордона, Филадельфия, США

Малышкина Ольга Витальевна, доктор физико-математических наук, профессор, Тверской государственный университет

Медведев Эмиль Самуилович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института проблем химической физики РАН

Михайлов Илья Давидович, профессор, Индустриальный университет Сантандера, Букараманга, Колумбия

Никитин Анатолий Ильич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН.

Никитина Вера Анатольевна, подруга семьи Гордонов

Прут Вениамин Вениаминович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Российского научного центра «Курчатовский институт», профессор МФТИ

Рашба Эмануил Иосифович, профессор, Гарвард, США

Ржевский Олег Спартакович, кандидат физико-математических наук, работал в лаборатории Евгения Борисовича

Ростовщикова Татьяна Николаевна, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.



Смирнов Борис Михайлович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Объединённого института высоких температур РАН

Сон Эдуард Евгеньевич, академик РАН, заведующий Отделом электрофизики и теплофизики Объединённого института высоких температур РАН (ОИВТ РАН), заведующий кафедрой физической механики Московского физико-технического института (МФТИ)

Степанов Максим Евгеньевич, аспирант Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Тоеннис Ян Питер, профессор, бывший директор Института Макса Планка по динамике и самоорганизации, Гёттинген, Германия

Тугушева Лариса, подруга семьи, жена Вадима Лехциера, Филадельфия, США

Федотова Елена Яковлевна, двоюродная сестра Е.Б. Гордона, кандидат физико-математических наук, работала в Институте химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

Фортов Владимир Евгеньевич, академик РАН, академик-секретарь Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, научный руководитель Объединённого института высоких температур РАН

Ходос Игорь Иванович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН

Энман Владимир Карлович, главный инженер производственного отдела Института проблем химической физики РАН



ЕВГЕНИЙ БОРИСОВИЧ ГОРДОН
Воспоминания и избранные статьи

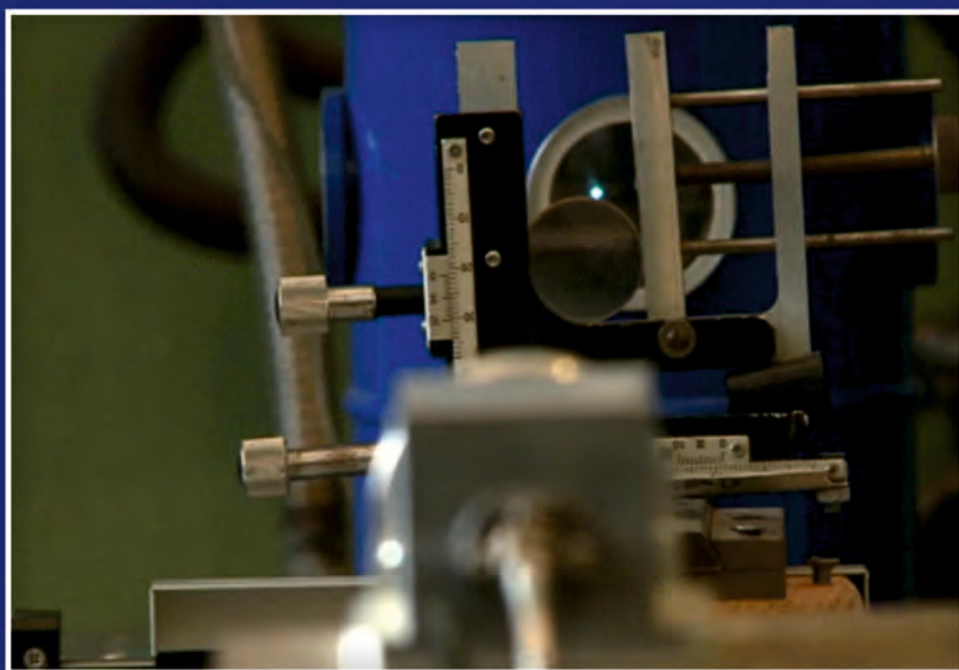
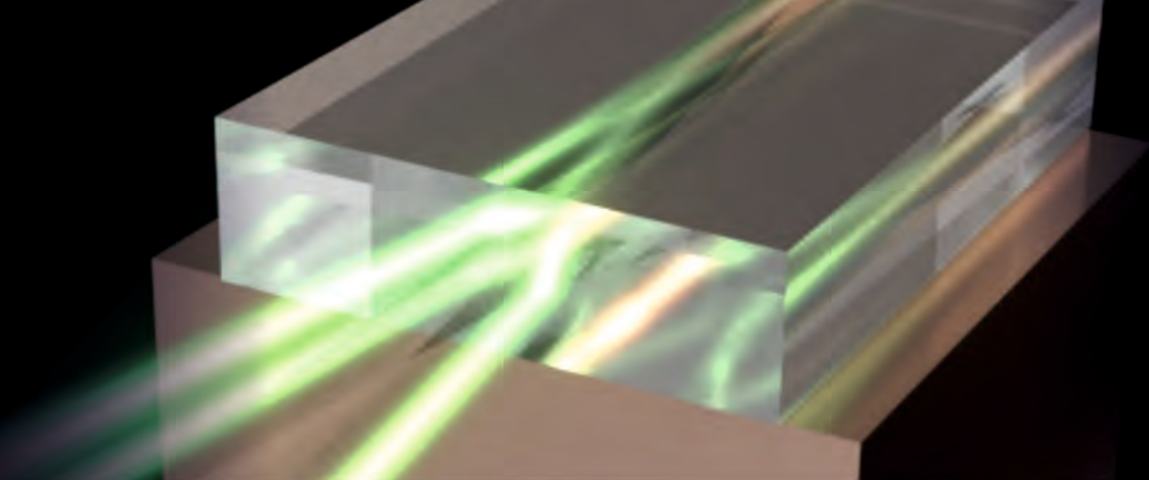
Составители: академик Э.Е. Сон, к.х.н. Д.А. Гордон
Ответственные редакторы: Э.С. Медведев, Э.Е. Сон, Я.П. Тоеennis

Сдано в набор 12.11.2020. Подписано в печать 18.03.2021
Формат 70х100 1/16. Бумага офсетная №1
Уч.-изд. л. 46. Физ. п.л. 33. Тираж 300. Заказ № 890

ООО «Издательство Янус-К».
127411, Москва, Учинская ул., д.1

Отпечатано в ООО «ИНФОРМ-СОФТ»
119034, Москва, Еропкинский пер., д.16





В воспоминаниях российских и иностранных коллег, сотрудников, учеников, друзей и близких выдающегося ученого доктора физико-математических наук профессора Евгения Борисовича Гордона (1940-2019) рассказывается о его жизненном пути, о его научной и научно-организационной деятельности. В книге приведены избранные оригинальные статьи в различных областях науки, в которых работал Евгений Борисович.