

ЕВГЕНИЙ СТАНИСЛАВОВИЧ БОРОВИК. ВТОРАЯ КРИОГЕННАЯ ЛАБОРАТОРИЯ УФТИ

В.Б. Юферов

*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт",
г. Харьков, Украина; E-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua*

Описаны некоторые научные результаты и факты из жизни члена-корреспондента АН УССР, профессора, доктора физико-математических наук Евгения Станиславовича Боровика.

АВТОБИОГРАФИЯ Е.С. БОРОВИКА

"Родился в 1915 году в городе Ленинграде в семье научного работника. После окончания школы поступил в Ленинградский политехнический институт. Во время пребывания в институте параллельно учебе работал в лаборатории инженера Кубецкого.

В 1937 году окончил институт по специальности экспериментальная физика, получил диплом с отличием и направлен на работу в Опытную Станцию Глубокого Охлаждения (ОСГО) в городе Харькове. За время работы в ОСГО закончил три научные работы по теплопроводности жидкости при низких температурах.

В октябре 1941 года вместе с учреждением эвакуировался в город Кемерово. В Кемерово после ликвидации ОСГО был переведен на завод имени XVIII Партсъезда. На заводе в должности инженера ОКИП работал до августа 1945 года. За время работы на заводе был премирован за рационализаторские предложения и отличное проведение капитального ремонта.

В августе 1945 года по вызову ФТИ АН УССР был переведен на работу в город Харьков. В Физико-техническом институте работаю по настоящее время.

В феврале 1947 года защитил кандидатскую диссертацию на тему "Теплопроводность жидкостей". После защиты диссертации переведен на должность старшего научного сотрудника.

В мае 1953 года зачислен в докторантуру АН УССР. В октябре 1954 года защитил докторскую диссертацию на тему "Гальваномагнитные явления и свойства электронов проводимости в металлах". В 1957 году утвержден в звании профессора по кафедре физика твердого тела.

В 1958 году назначен на должность заведующий лабораторией. В 1961 году избран член-корреспондентом Академии Наук УССР.

С 1950 года параллельно основной работе работал по совместительству в Харьковском государственном университете, где организовал новую специальность "ферромагнетизм". С 1964 года заведую кафедрой ультравакуума.

К настоящему времени имею 80 законченных научных работ и изобретений. Большая часть работ связана с исследованиями при низких температурах в разных областях физики. С 1958 года начал работы по применению физики плазмы и проблеме

управляемых термоядерных реакций. Выполненные работы относятся к следующим областям физики.

1. Физика жидкостей. Свойства ожиженных газов. – 6 работ
2. Свойства электронов проводимости и гальваномагнитные явления в металлах. – 21 работа.
3. Магнетизм. – 14 работ (2 книги).
4. Физика и техника высокого вакуума. – 14 работ.
5. Техника получения низких температур. – 10 работ.
6. Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. – 16 работ".

Автобиография была составлена в 1965 г. До трагических событий 7 февраля 1966 г. было еще полтора года интенсивной работы...

Всего список работ Евгения Станиславовича насчитывает 120 работ; более 20-ти опубликовано после смерти. Лаконично написанная автобиография, подготовленная при оформлении документов для зарубежной командировки, не позволяет оценить истинную роль Боровика в развитии им перечисленных научно-технических направлений. Видна только удивительная многогранность и поразительная широта научных интересов. Нельзя не отметить еще и то обстоятельство, что начало научной деятельности Боровика проходило в ОСГО - организации, занимающейся сугубо практическими вопросами, и продолжалось в качестве инженера на химическом предприятии во время войны. Это вместе с прекрасной теоретической подготовкой в ЛПИ и привело к тому, что в нем удивительно сочетались качества ученого "фундаментальщика" и прикладника.

Вернемся к биографическим данным. "В августе 1945 г. по запросу УФТИ был переведен в Харьков..." "В это время УФТИ отзывал из действующей армии своих довоенных сотрудников, поскольку началось участие УФТИ в Курчатовском урановом проекте, где УФТИ выступал под кодом "Лаборатория №1". Вот как это описано в "Воспоминаниях" Б.Г. Лазарева [1]: "Возвращены были также Е.С. Боровик с Н.М. Цин, работавшие с 1938 г. в дочернем предприятии УФТИ-ОСГО, ...которая... в Харьков не вернулась. Потерялось очень ценное звено в цепи криогенная наука - криогенная -

технология". Однако, как раз Боровик и являлся этим звеном. В своем первом цикле работ по теплопроводности жидкостей вблизи фазового перехода и связи между теплопроводностью и вязкостью [2], он не только проявил себя скрупулезным аналитиком результатов предшественников, объяснив методические погрешности их экспериментов, неточности и "натяжки" при обработке результатов, но и прекрасным экспериментатором, сумевшим исключить конвективную теплопередачу, что не удавалось зарубежным предшественникам, и получившим новые данные, связав их с теорией жидкостей (рис. 1).

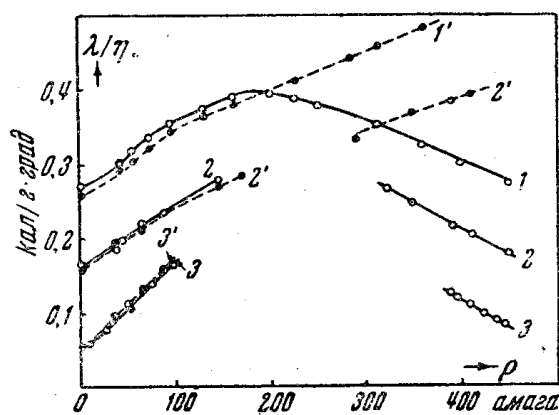


Рис. 1. Отношение теплопроводности углекислоты к ее вязкости λ/η . 1,2,3- экспериментальная величина λ/η для температур 40, 30, 20°C; 1',2',3'- теоретические зависимости для тех же температур, описываемые соотношением: $\lambda = (C_v + 9/4R)\eta/M$, предложенным в ранней работе Е.С. Боровика

Как видно из экспериментальных кривых 1,2,3, в критической точке изменяется характер зависимости, объясняющийся различием механизмов теплопередачи в газе и жидкости. "В жидкости молекулы уже не передвигаются свободно относительно друг друга, а некоторое время колеблются относительно фиксированного положения равновесия и затем переходят в новое положение равновесия. Такое изменение характера теплового движения вызовет, разумеется, резкое возрастание вязкости и в то же время, по-видимому, мало скажется на теплопроводности. Т.о., при переходе к жидкому состоянию нарушается зависимость между теплопроводностью и вязкостью, связанная с общностью их механизма у газов." Далее он предлагает для "технических расчетов" формулу, см. выше, объяснив возможные границы ее применения. Нужно ли говорить о том, что точные в экспериментальном плане и "физичные" по содержанию работы Боровика по физике жидкостей, фазовым переходам, криогенике, были замечены коллегами.

Естественно, работы по Курчатовскому проекту носили "закрытый" характер, отчеты уходили прямо в Москву и дубликаты не оставались... Небольшая часть этих работ, выполнявшаяся в отделе Н, которым руководил академик АН УССР Б.Г. Лазарев, стала известна после публикации [1]. Евгений Станиславович вместе с Федоровой и Цин занимались

проблемами газодиффузионного разделения изотопов урана, очистки UF_6 при заполнении газодиффузионных разделительных колонн. Важнейшим средством в этом случае был вакуум. И при их заполнении, и для очистки. Для перекачки нужны были безмасляные компрессоры. Заметим, что эти работы относятся к 1946–1951 гг. Только что закончилась война, и такого оборудования в СССР просто не было. Вначале для вакуумной откачки и серийного контроля алюминиевых оболочек твэлов применялись масляные диффузионные насосы, разработанные в ХФТИ в предвоенные годы под руководством К.Д. Синельникова [1]. Нужно заметить, что на то время эти диффузионные паромасляные насосы с фракционированием были лучшими в мире. (Именно их искали немцы в УФТИ в оккупированном Харькове). И для твэлов, и для газодиффузионных колонн надо было знать предельный вакуум насосов и состав продуктов термического разложения масла. В любом случае были нужны средства снижения их количества. Эти работы были выполнены коллективом: Боровик, Лазарев, Федорова, Цин. Для исследования продуктов термического разложения масла диффузионных насосов они использовали некую криогенную разновидность хроматографии, поскольку в то время вакуумные масс-спектрометры в СССР отсутствовали. При этом было установлено, что некоторые продукты разложения устраняются лишь при температурах, близких к температуре жидкого азота. Так появились на диффузионных насосах охлаждаемые жидким азотом ловушки, остальные с более высокими температурами, были не эффективны. Конструкция этих ловушек шевронного типа в течении длительного времени оставалась также наилучшей в мире, поскольку в них была решена проблема оптимизации теплопроводов (т.е. испарения хладагента) и их вакуумной проводимости, что в мировой практике произошло только через 15 лет. Проблема безмасляных компрессоров также была изыщана решена. Ими стали криокомпрессоры. Они использовались не только для перекачки UF_6 , но и для вакууммирования, т.е. они потом стали нести функцию крионасосов. Эти работы были частично рассекречены в 1957г. путем публикации статьи "Водородный конденсационный насос," Е.С. Боровик, Б.Г. Лазарев, М.Ф. Федорова, Н.М. Цин, УФЖ, 1957 г. Рождение нового класса вакуумных насосов – криогенных конденсационных - ведет начало именно от этой публикации, что в мире общепринято (рис.2), хотя реально эти работы были выполнены в 1949 г.

В 1947 г. после успешной защиты кандидатской диссертации был определен план работ Боровика по защите докторской диссертации с названием "Гальваномагнитные явления и свойства электронов проводимости в металлах". Основная направленность - исследования эффекта Холла и магнитосопротивления металлов в сильных магнитных полях и при большой плотности тока [3,4]. В работе [3], посвященной электропроводности металлов при больших плотностях тока, Боровик предсказывает и экспериментально устанавливает отклонения от закона Ома,

объясняющееся концентрацией подвижных зарядов: "...можно констатировать, что для платины, вольфрама, меди до плотностей тока $5 \dots 8 \cdot 10^6$ А/см² не наблюдается отклонения от закона Ома, для висмута при плотности тока $0.5 \dots 1 \cdot 10^6$ А/см² отклонение достигает десятков процентов" (рис. 3).

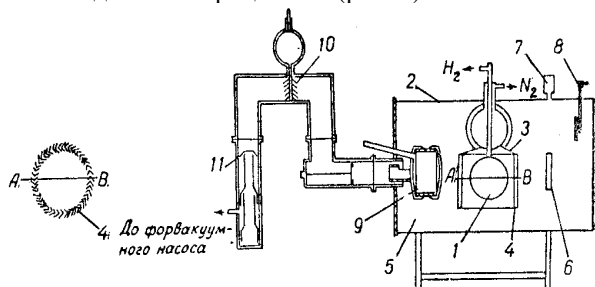


Рис. 2. Схема испытания водородного конденсационного насоса производительностью 14000 л/с. Позиция 9 названа авторами – ловушкой, но ловушка уже есть, это - 10. 9 - это криокомпрессор, включенный авторами, по-видимому, по недоразумению

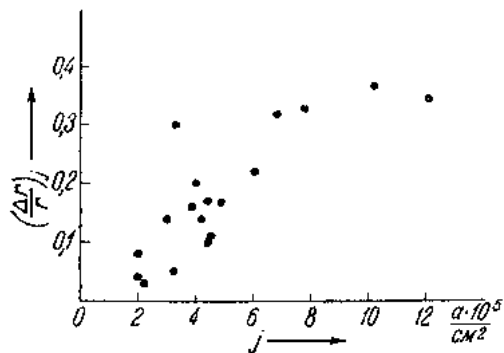


Рис. 3. Отклонение от закона Ома у висмута для отожженных образцов Vi-3, Vi-12 толщиной 2... 12мкм при T=78 и 20 К

В [4] "...комплексные исследования гальваномагнитных явлений на достаточно чистых металлах при низких температурах дают весьма подробные сведения об электронах проводимости в металлах..., необходимо предположить, что у всех исследованных металлов (кроме щелочных) имеется перекрытие зон, и проводимость осуществляется квази-частицами с двумя знаками заряда - дырками и электронами. У металлов первого класса число дырок равно числу электронов, а у второго... оно не одинаково..., необходимо привлечение модели с несколькими группами дырок и электронов, ...необходимо дальнейшее уточнение теории металлического состояния." Кроме того, им проведен большой цикл работ по измерению электросопротивления и эффекта Холла в ряде чистых металлов: цинке, индии, меди, вольфраме, алюминии и др. Таким образом, экспериментальные данные Боровика и его гипотезы встраивались и влияли на создаваемую в это время теорию металлов и металлического состояния.

В большинстве случаев подобные работы являются сугубо фундаментальными и, попав в "банк данных," ждут возможного дальнейшего примене-

ния, теоретического или экспериментального. Вряд ли это было простое "везение." Удивительно, но сам же Боровик их и использовал. Эти данные очень пригодились при выборе материалов обмоток криогенно охлаждаемых соленоидов, выборе технологий изготовления, их расчетов при работе с магнитными полями на уровне 1...50 Тл. Например, для магнитной ловушки ВГЛ-1, которая должна была работать в стационарном режиме при величинах магнитного поля около 4 Тл, была выбрана алюминиевая обмотка в виде шины - проволоки сечением 10 мм² с величиной d (отношение электросопротивлений при комнатной температуре к сопротивлению при жидководородной температуре $\rho_{300}/\rho_{20} \approx 800$) и транспортным током 550 А. Изготовление такой алюминиевой шины, сечением 10×1 мм, было начато в лаборатории в 1960 г. В качестве исходного материала использовался высокочистый алюминий марки АВ-0000, (Fe - 0,0015, Si - 0,0015, Cu - 0,0010%). Проволока получалась выдавливанием через фильеру на 100 т прессе при температуре 550°С. Параметры проволоки в зависимости от различных технологических операций приведены в табл.1.

Таблица 1

Изменение величины d - отношения электросопротивлений материала алюминиевой проволоки при комнатной (300 К) и криогенной (78 и 20,4 К) температурах

Исходные условия	Температура испытаний, К	d
Исходный материал, Al марки АВ-0000	300	1
Исходный материал, Al марки АВ-0000	78	12
Исходный материал, Al марки АВ-0000	20.4	660
Переплав в никелесодержащих тиглях	20.4	300... 350
Переплав в железосодержащих тиглях	20.4	290
Переплав в графитовых тиглях	20.4	800... 850
Вакуумный переплав в графитовых тиглях	20.4	930... 975
Деформация образцов (изгиб)	20.4	520
Деформация образцов (без изгиба)	20.4	830

К фундаментальным данным по импульсной магнитной технологии необходимо отнести работу Боровика и Лимаря [7] "Получение импульсных полей большой длительности", где рационально связаны отношения теплоемкостей металлов и их электропроводности (величина c/ρ) в зависимости от температуры в широком диапазоне температур для наиболее подходящих материалов: меди и алюминия (рис. 4). Любопытно, что внедрение этих данных в практику при создании плазменной магнитной ловушки ВГЛ-2 произошло незамедлительно; одновременно с первой фундаментальной публикацией вы-

шла и вторая прикладная - "Магнитная ловушка с применением криогенной техники", Боровик, Бусол, Коваленко, Скибенко, Юферов [8].

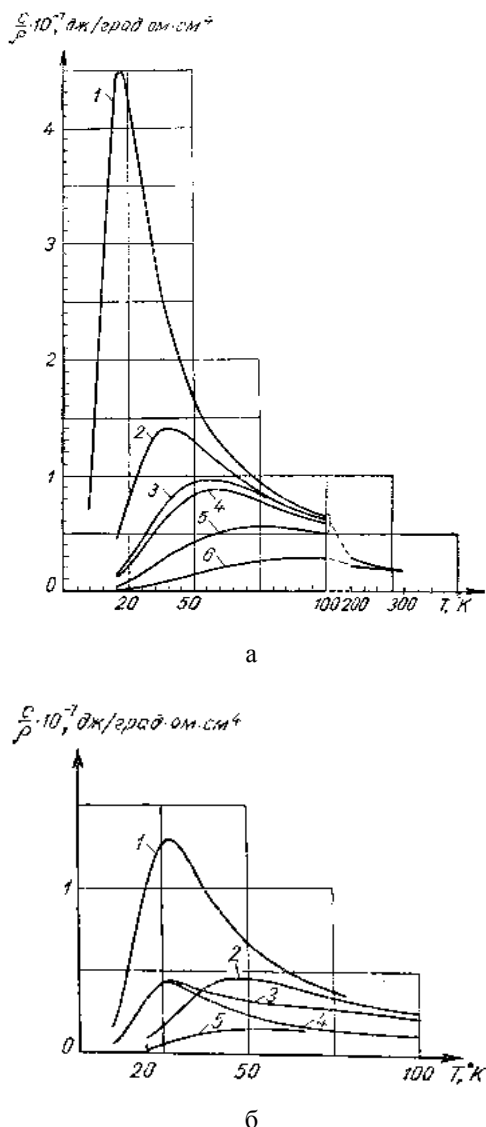


Рис. 4. Зависимость c/ρ от температуры для меди (а) и для алюминия (б)

Анализируя публикации 50-х годов складывается ощущение, что интенсивно работая сразу в нескольких направлениях, принимая участие в Урановом проекте, занимаясь физикой криовакуума, гальваномагнитными явлениями, Боровик целенаправленно готовил будущие термоядерные применения. Все эти исследования 50-х годов в основном являются пионерскими и носят фундаментальный характер.

В начале 50-х годов возникли новые научно – технические направления - управляемый термоядерный синтез (УТС), и несколько позднее – имитация условий космического пространства (ИКП). В обоих этих приложениях требовалось создание особых вакуумных условий; в случае УТС - для тепловой изоляции высокотемпературной плазмы от стенок, в ИКП - вакуум – основное свойство и средство. В обоих случаях и величина вакуумных объемов, и глубина требуемого вакуума, и производитель-

ность откачных средств ранее не имели аналогов. В УТС ситуация усложнялась еще и тем, что термоизоляция плазмы требовала сочетания и вакуума, и высокого магнитного поля, величина которого, объем и энергозатраты находились за гранью достижимого на имеющемся научно-техническом уровне. Возможность решения этих проблем просматривалась только при широком использовании криогенной физики и техники. Это было ясно в ХФТИ Боровику и Лазареву, поскольку именно в это время проводились интенсивные работы по гальваномагнитным свойствам металлов и криовакууму [5,6]. Кроме того, и для УТС, и ИКП требовались средства получения низких температур жидководородного и гелиевого диапазонов, с мощностями на два – три порядка большими, чем достигнутые к тому времени; комплексные данные и их развитие по криомагнитным и криовакуумным технологиям, только обозначившим к этому времени свои возможности; общий высокий уровень физической науки и криогеники в частности. (Следует заметить, что в это время еще не было магнито жестких сверхпроводящих материалов). Эта требовавшаяся широта тематики и уровень научно-технического развития были вполне присущи Харьковскому физико-техническому институту, имевшему в своем составе мощные научные силы и в области термоядерных, и криогенных исследований. Термоядерными исследованиями руководил К.Д. Синельников, собравший харьковскую школу физиков – плазменщиков; криогенику возглавлял Б.Г. Лазарев, возродивший и приумноживший после войны криогенные возможности довоенного УФТИ. Именно это вторично учел И.В. Курчатов, поручивший УФТИ термоядерные исследования. Поэтому для решения этих проблем криогенными методами в 1958 г. создается лаборатория “Криогеника в УТС” - вторая криогенная лаборатория в ХФТИ, возглавил которую ученик академика Б.Г. Лазарева - профессор Е.С. Боровик [14, 15]. Однако еще до образования лаборатории им были начаты перспективные работы, на много лет вперед определившие как научное лицо лаборатории, так и породивших ее направлений. Лаборатория Е.С. Боровика состояла в основном из молодых сотрудников отделов Н (криогенного), где ранее работал сам Боровик. Ее штат: три десятка человек в 1958 г., возрос до 120 в 1965 г. Для самого руководителя и его соратников УТС - управляемый термоядерный синтез, являлся совершенно новой областью науки. К моменту образования лаборатории он был известным физиком в области криогеники, физики низких температур и физики твердого тела. И как многие исследователи того времени, имея этот научно-технический задел, успешно вошел в новую для себя, да и большинства исследователей того времени, научную область - управляемый термоядерный синтез и физику плазмы. Вошел с новыми научными идеями, хорошей технической и технологической базой. Однако он продолжал проводить работы и по гальваномагнитным исследованиям и по магнетизму.

НАУЧНЫЕ ПЛАНЫ ЛАБОРАТОРИИ

Задачи лаборатории не ограничились потребностями УТС, магнитными и вакуумными технологиями, игравшими в этом случае вспомогательный характер. Они были направлены и на решение проблем космической индустрии и были во многом сходными и по задачам, и по возможным решениям. Плазменная тематика лаборатории профессора Е.С. Боровика включала широкий спектр исследований, носивших пионерский характер, конечной целью которых являлся термоядерный реактор (ТЯР). К этому шли двумя путями (см. первых два направления).

Первое направление было достаточно традиционным, однако содержало большое количество технических и технологических новаций, суливших возможность получения новых результатов. Это создание горячей плазмы в пробочной криогенной магнитной ловушке ВГЛ, характерными особенностями которой были гиперсоленоиды, охлаждаемые до 20 К, создающие магнитное поле величиной около 105 кЭ; получение сверхвысокого вакуума с помощью крионасосов с температурой 4 и 20 К; использование для перезарядки в инжекторе быстрых нейтральных атомов мишеней с анизотропным распределением скоростей - сверхзвуковых газовых струй [10], позволявших в 3...4 раза сократить пролетное расстояние высоковозбужденных нейтральных атомов водорода и, тем самым, увеличить коэффициент магнитной ионизации на порядок по сравнению с аналогичными магнитными ловушками, действовавшими в США, Англии, институте им. И.В. Курчатова. Заметим, что впоследствии струйные мишени были использованы в ловушке ОГРА-2, института им. И.В. Курчатова, по предложению Боровика.

Второе направление - это исследование возможности получения самоподдерживающихся реакций синтеза (DT) в низкотемпературной плазме большой плотности (проект "Карлик") в результате поглощения и запираения излучения тяжелыми примесями. С помощью импульсных разрядов создавалась плотная ($>10^{18}$ см⁻³) плазма с газовой стабилизацией при давлениях более 10³ атм [12,13]. Давления создавались криокомпрессорами, аналогами тех, которые использовались в Урановом проекте. Подобная техника была впоследствии развита и использована в технологии изостатического прессования и получила большое прикладное применение.

Криогенно вакуумные исследования и технологии имели фундаментальный и прикладной характер.

Криомагнитные исследования и технологии, вначале проводились для гиперпроводящих, а затем и сверхпроводящих систем. Продолжались гальваномагнитные исследования, начаты были исследования импульсной прочности металлов при низких температурах.

Проводились работы по водородной и гелиевой ожижительной технике, исследование процессов теплопередачи в жидкостных и газовых противоточных теплообменниках, начаты работы по автоматизации

ожижителей, создавались автономные крионасосы, впоследствии были созданы ожижители неона и крионасосы на их базе.

Водород в металлах, внедрение неравновесного водорода в металлы, с целью его откачки, распыление, т.е. поведение водорода в металлах при облучении [11]. Появление этого цикла работ в 1958 г. в лаборатории Боровика показывает очень глубокое понимание им проблемы стенок в термоядерных исследованиях, являющейся кардинальной и в настоящее время. Впоследствии проводились исследования насосов типа сверхпроницаемых мембран. В настоящее время исследования поведения водорода в металлах в условиях радиационного воздействия являются самостоятельной областью науки.

Работы по магнетизму проводились в Харьковском университете, на кафедре магнетизма, которой руководил Боровик.

Все эти исследования обеспечивались мощной криогенной базой, по тем временам не имевшей аналогов в советских НИИ, и молодым составом научных, еще не "остепененных", сотрудников. В полной мере работы по созданию научно-технической и криогенной базы, включая термоядерную ловушку ВГЛ-2, были завершены к 1961 г.

Интерес к работам, проводимым в лаборатории Боровика, отмечен большим количеством делегаций, в частности президента АН СССР Келдыша, одного из идеологов космических исследований академика Вернова, заместителя Курчатова - Головина и др., а также многочисленными обсуждениями на Всесоюзных конференциях возможностей использования криогенно-откачиваемых сверхзвуковых струй углекислоты в вакууме в качестве стационарных лазеров и многое др. Нужно отметить, что сам Е.С. старался всегда помочь коллегам в развитии у них новой техники и технологий. В частности, это помощь ФТИНТу АН УССР в создании импульсных криогенных соленоидов с высокими магнитными полями, снабжение жидким гелием центра дальней космической связи в Крыму (гелиевые дьюары, 15...30 л перевозились в купейных вагонах поезда Москва-Симферополь), создание криогенной базы в Харьковском университете, Сухумском ФТИ, прямые внедрения криогенно-космических разработок во многие институты, преподавательская работа в Харьковском университете, обучение аспирантов из Бакинского университета, работа в лаборатории американского практиканта из Беркли и многое другое.

То, что многие годы работы Боровика были актуальными и пионерскими, объяснялось тем, что исследования носили комплексный характер и находились на стыке различных направлений.

КРИОМАГНИТНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технологии, развитые в лаборатории, вышли из гальваномагнитных исследований и были продолжены уже, так сказать, фундаментальными технологическими исследованиями. Здесь и создание стационарных соленоидов, охлаждаемых жидким водородом

дом, и криогенных импульсных магнитных систем [4-6]. Разработка методов расчета, измерение теплопроводностей конструкционных материалов, критических тепловых нагрузок для разных хладагентов в соленоидах и им подобных системах. Разработана и апробирована методика расчёта оптимальной геометрии низкотемпературных соленоидов. Накопленный потенциал позволил создать и на протяжении многих лет успешно эксплуатировать плазменную магнитную ловушку ВГЛ, с величиной магнитного поля 105 кЭ, магнитную ловушку "Олимп", созданную для исследования магнитной ионизации возбужденных нейтральных атомов с величиной магнитного поля 350 кЭ, серию внутренне бандажированных, замоноличенных магнитных систем с напряженностью поля в импульсном режиме до 300 кЭ и в стационарном режиме до 54 кЭ.

Технология замоноличивания родилась в лаборатории в процесс многочисленных испытаний криогенных многовитковых соленоидов ловушки ВГЛ, рассчитанных на достижение очень высоких параметров по величине поля и плотности транспортного тока. И определялась тем, что в многовитковых соленоидах при высоких магнитных полях и плотностях токов происходили микродвижения проводников. Это приводило к их взаимному трению, нарушению электроизоляции и последующему электрическому пробое с разрушением соленоида, что при энергезапасах около 200 кДж приводило к значительным разрушениям в окружающих соленоид системах [8]. Технологии, развитые в лаборатории в начале 60-х годов, позволили достигать требуемых в УТС напряженностей магнитного поля в гиперпроводящих магнитных системах различной конфигурации, например, около 100 кЭ в обмотке типа узора на теннисном мяче, с минимумом поля в центре. Необходимо заметить, что и в настоящее время проведение плазменных экспериментов с такими параметрами магнитных систем могут себе позволить не многие лаборатории в мире. Следует отдать также должное дару предвидения Е.С. Боровика, опубликовавшего работу по необходимости развития сверхпроводящих систем для УТС, когда, казалось, еще не было никаких для этого технических предпосылок. Тем не менее, в лаборатории интенсивно обсуждалась возможность исследования сверхпроводящих обмоток и проводились фундаментальные исследования скачков магнитного потока в жестких сверхпроводниках.

Более поздние исследования сверхпроводящих магнитных систем, направленные на создание сверхпроводящего стелларатора - замкнутой плазменной магнитной ловушки, включали разработки сильнотоковых токонесящих элементов, например, трубчатого типа. Эти разработки позволили создать несколько оригинальных крупных СП-соленоидов, служивших испытательными макетами сверхпроводящих систем сложной, стеллараторной конфигурации: СП - торсатроны "Кристалл-1" и "Кристалл-2" с максимальной величиной магнитного поля, $H_{max}=48$ кЭ, и СП-магнитный сепаратор минерально-сырья с рабочим полем ~ 76 кЭ.

На рис. 5 и 6. представлены фото термоядерной установки "Кристалл-2"- сверхпроводящего 3-х заходного торсатрона без обмоток продольного поля с дивертором. Установка при своем создании в существенной мере опиралась на разработки, выполненные под руководством Боровика в области криомагнитных и вакуумных технологий. Установка длительное время не имела аналогов в мире.

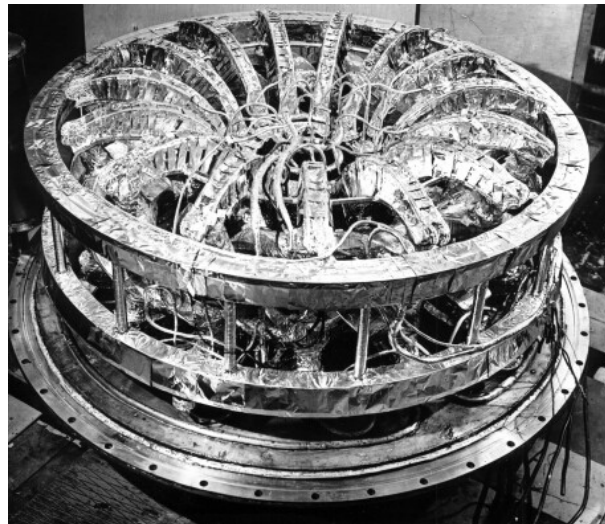


Рис. 5. Магнитная система «Кристалла-2» в сборе. Внутри верхнего соленоида видны радиальные, S-образные элементы силового каркаса. Все охлаждаемые элементы обмотаны алюминиевой фольгой для уменьшения коэффициента поглощения теплового излучения, поскольку через внешний радиационный азотоохлаждаемый экран вводится много "теплых" рабочих элементов

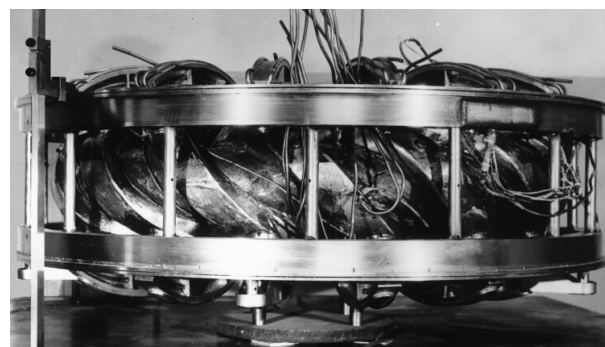


Рис. 6. Магнитная система сверхпроводящего торсатрона в сборе. На первом плане видны компенсирующие соленоиды с силовыми распорками. Между ними просматривается винтовая обмотка

В обмотках торсатрона "Кристалл-2" впервые в СССР была применена предложенная и разработанная в лаборатории технология замоноличивания СП-обмоток, созданы крупногабаритные, около 1.8 м в диаметре, частично стабилизированные, с косвенным охлаждением (это сделано впервые в мире), системы сложной формы с конструктивной плотностью тока до $2 \cdot 10^4$ А/см² и запасенной энергией около 1 МДж, что по этим параметрам находилось выше уровня мировых результатов.

ГОРЯЧАЯ ПЛАЗМА В ПРОБОЧНОЙ КРИОГЕННОЙ ЛОВУШКЕ С СИЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ВГЛ-2. ИНЖЕКТОРЫ БЫСТРЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ (Б.Н.А.)

Плазма создавалась путем лоренцевской ионизации б.н.а. в сильном, 10^5 Э, магнитном поле. На рис. 7 изображен схематический вид ловушки ВГЛ-2.

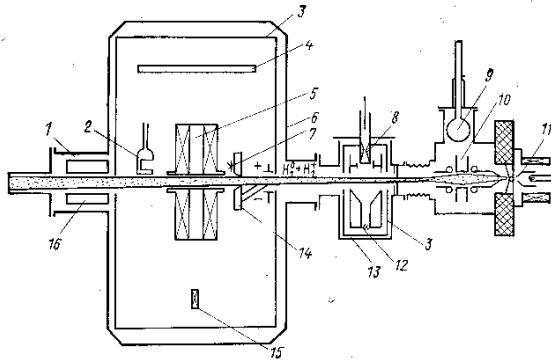
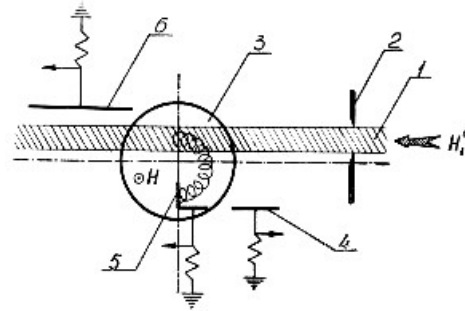


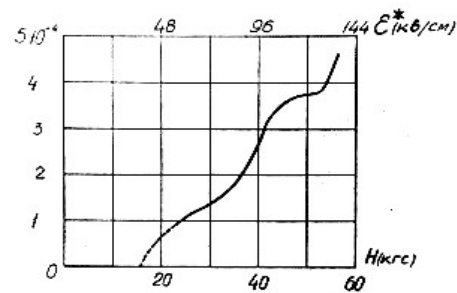
Рис. 7. Схема магнитной плазменной ловушки ВГЛ-2. 1, 6, 13 – вакуумные камеры, 2- криогенный калориметр, 3 - экран, охлаждаемый жидким азотом-80 К; 4, 9, 12, 16 - водородные и гелиевые конденсационно- сорбционные насосы; 5 - криогенные магнитные обмотки- соленоиды; 7, 14 - приемник пучка и калориметр; 8 - сверхзвуковое сопло газовой мишени для перезарядки ионов; 10, 11 – ионный источник с линзой для фокусировки пучка; 15 - вакуумная манометрическая лампа

На рис. 8 приведено схематическое устройство системы измерения и доля ионизованных возбужденных атомов водорода. При энергии б.н.а. 30 кэВ ионизация происходила для уровней с главным квантовым числом $n \geq 7$. Высокая заселенность этих уровней в области ионизации определялась малым пролетным расстоянием от мишени нейтрализации, всего 90 см, что выгодно отличало инжектор б.н.а. ВГЛ-2 от 2.5 м инжектора Калэмского “Феникса” и 4.5 м – Московской ОГРЫ-2. Это определялось особыми свойствами перезарядных мишеней - сверхзвуковых струй в вакууме с анизотропным распределением скоростей. Сама струя - мишень давала малый поток газа в направлении пучка; в то же время она запирала направленный поток газа из ионного источника. Одновременно с этим криогенные насосы, откачивающие газ мишени, откачивали газ и из ионного источника, с эффективной скоростью около 10^7 л/с. Плотность плазмы на 1 этапе составляла $5 \cdot 10^8$ см⁻³ и определялась перезарядкой на газе, десорбиравшемся при плазменной бомбардировке и натекавшем из системы поглощения пучка и инжектора. Для уменьшения этих потоков была развита технология локально прогреваемых криогенных систем, использовано внедрение быстрых ионов водорода в прогретые мишени из титана, улучшены показатели инжектора. Плотность горячей плазмы на 2 этапе достигала $5 \cdot 10^9$ см⁻³ и определялась плаз-

менными неустойчивостями. Техническое решение - помещение магнитной системы внутри большого вакуумного объема, позволяет использовать вакуумные насосы больших производительностей, снимает многие вопросы выбора компоновки, позволяет использовать приемы систем дифференциальной откачки, упрощает эксплуатацию и многое другое. Это техническое решение, часто используемое в космических имитаторах, впоследствии применялось на многих термоядерных установках, в частности, на Харьковских торсатронах “Кристалл-2”, “Ураган-3” и др.



а



б

Рис. 8. Схема измерения величины магнитной ионизации (а) и доля атомов, ионизируемых в центральной области ловушки (б): 1 – пучок атомов водорода; 2 – диафрагма; 3 – центральная область поля; 4 – входной коллектор; 5 – центральный коллектор; 6 – выходной коллектор

Для увеличения плотности плазмы в ловушке требовалось повышение эквивалентного тока пучка б.н.а. Для этого были созданы ионные источники нового типа с плазменной системой фокусировки. Одновременно с созданием ионного источника практикант Р.В.Пайл (Беркли, США) занимался именно этим. Были созданы инжекторы быстрых нейтральных атомов нового типа, на основе ионных источников секторного и кольцевого типов. Для кольцевого инжектора, фокусирующего пучок в центр кольца, эквивалентный ток нейтральных атомов водорода достигал 20 А, для секторного - 1 А ионов Ag^+ . Испытания и создание ионных источников различных конфигураций, инжекторов б.н.а. в существенной мере упрощались при помещении их в большой объем с мощной криогенной откачкой и малогабаритными кольцевыми мишенями для перезарядки, которые, в свою очередь, являлись еще и насосами для откачки водорода.

ЭЛЕКТРОННО-ГОРЯЧАЯ ПЛОТНАЯ ПЛАЗМА – ПЛАЗМЕННАЯ МИШЕНЬ

Дальнейший прогресс в исследованиях на ловушке ВГЛ связывался с повышением коэффициента захвата б.н.а. Работа Боровика, Бусола, Синельникова "Расчет заполнения плазмой магнитной ловушки ВГЛ", 1963 г., оказалась программной, обеспечившей исследования на 10-15 лет. Как указывалось, на первом этапе создания плазмы в ловушке ВГЛ доминировала магнитная ионизация возбужденного быстрого нейтрального пучка, что ограничивало плотность плазмы, поэтому было решено проводить захват быстрых нейтральных атомов на плазменных мишенях с плотностью $10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Коэффициент захвата при этом должен был увеличиться с величины около $5 \cdot 10^{-4}$ до величины 0,5...0,7. В эту плазму затем должны были инжектироваться б.н.а. из кольцевого инжектора. Плотная и электронно-горячая плазма мишени должна была создаваться с помощью мощного импульсного электронного пучка. Полученные результаты по созданию плазменной мишени приведены на рис. 9 и 10, где показаны конструкция модифицированной установки ВГЛ-2 и полученные параметры плазмы.

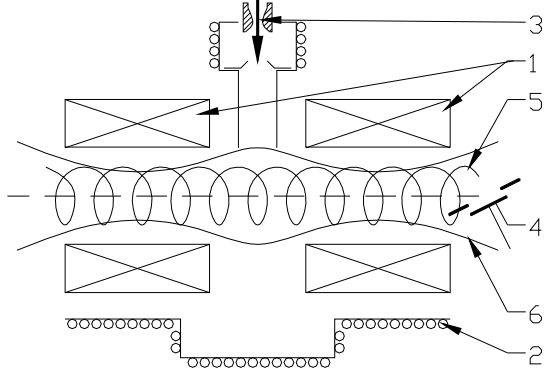


Рис. 9. Схематический вид ловушки ВГЛ-4: 1 – соленоиды; 2 – конденсационный водородно-гелиевый насос; 3 – устройство создания плотной узконаправленной сверхзвуковой струи; 4 – импульсная электронная пушка, 100 кВ, 100 А; 5 – схематическая траектория электронного пучка; 6 – магнитные силовые линии

Плазма создавалась при взаимодействии плотной газовой мишени с анизотропным распределением скоростей и плотностью $10^{14} \leq n_0 \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$ (Hr, Ar), с мощным спиральным пучком электронов с током $I_e \leq 100 \text{ А}$, ускоряющим напряжением $V_e \leq 100 \text{ кВ}$, длительностью инжекции $\tau \leq 200 \dots 400 \text{ мкс}$, в сильном магнитном поле. Около 50% энергии пучка переходило в энергию плазмы. Была получена плотность плазмы в диапазоне $n_e \approx 10^{14} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Энергосодержание $n_e T \approx 1,5 \cdot 10^{18} \text{ эВ/см}^3$ определялось на ~90% электронной компонентой, энергия ионов достигала 500 эВ. Установлена сильная зависимость величины энергосодержания плазмы от напряженности магнитного поля при фиксированном значении плотности плазмы. Показано, что основными механизмами, ответственными за нагрев, являются

циклотронный и гибридный резонансы. Полученные результаты могли явиться хорошим стартом для изучения пробкотронов – реакторов, однако эта тематика была прекращена в ХФТИ и передана в ИАЭ (Москва) и в ИЯИ (Новосибирск), где для аналогичной системы аналогичные параметры плазмы будут получены через много лет.

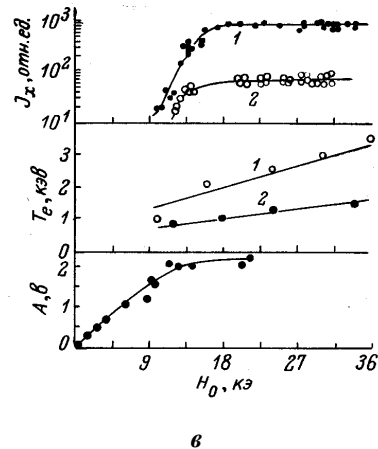
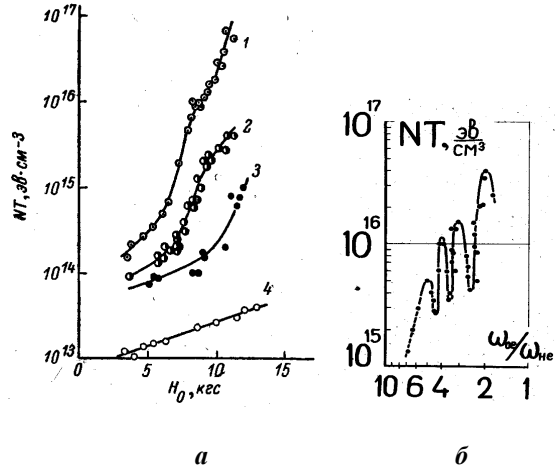


Рис. 10. Величина диамагнитного сигнала от напряженности магнитного поля в центре ловушки. E_e (кВ), I_e (А); 1–30, 10; 2–15, 10; 3–15, 3; 4–15, ≤ 1 (а); энергосодержание плазмы от величины отношения электронной плазменной частоты к электронной циклотронной частоте (б), зависимость интенсивности рентгеновского излучения (J_x), электронной температуры плазмы (T_e), и амплитуды субмиллиметрового излучения (A) от напряженности магнитного поля в центре ловушки для различных мощностей электронного пучка. 1 – $W_e = 3,6$, 2 – 0,6 МВт (в)

РЕАКЦИИ СИНТЕЗА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Во всех проектах термоядерных реакторов, при разумных их размерах, предполагается, что излучение удержать нельзя. Следовательно, рабочие температуры определяются из условия равенства выделения энергии при термоядерной реакции и интенсивностью излучения. Поэтому требуется очень высокая чистота плазмы относительно примесей, появ-

ляются специальные устройства для очистки плазмы. Однако существует принципиальная возможность удержания излучения и значительное понижение рабочей температуры за счет поглощения излучения слоем плазмы, окружающим зону реакции. Эта идея Боровика была положена в основу проекта "Карлик" и для выяснения возможностей были проделаны расчеты, где проанализирована связь следующих параметров: температура, давление, примеси в плазме; расчет величины теплотеря в результате различных механизмов. Это позволило оценить критические размеры реактора (рис. 11).

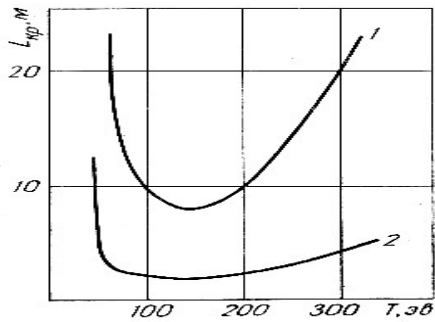


Рис. 11. Зависимость критических размеров от температуры при давлении 10^7 атм

Проведенные затем эксперименты с импульсными разрядами высокого давления установили возможность поглощения излучения примесями, однако необходимо было существенное повышение параметров плазмы и по плотности, и по температуре. Для этого требовался переход к сверхмощной импульсной микро- и наносекундной технике. В настоящее время такие параметры плазмы получаются в сверхмощных разрядах со схлопывающимися лайнерами или в разрядах в жидкости. Например в работах Ю.А.Попова, О.А.Федоровича (4-я научно-техническая конф. "Электрические разряды в жидкостях", г. Николаев, 1988 г.) отмечено, что яркостная температура канала при увеличении количества примесей металла снижается из-за экранировки излучения, а максимум излучения смещается из 1-го полупериода в 5-6-й. При этом нет корреляции между максимальными проводимостью и температурой.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЫСТРЫХ ИОНОВ H_1^+ С ПОВЕРХНОСТЬЮ

Столкновение быстрых частиц с поверхностями металлов сопровождается: десорбцией газов, расплыванием металлов, внедрением быстрых частиц в металлы, т.е. откачкой газа. Знание этих процессов и возможность ими управлять важны не только для удержания плазмы, но и для решения проблемы первой стенки и дивертора ТЯР.

Изучение взаимодействия велось для двух типов металлов: химически слабо связывающие водород (никель и нержавеющая сталь) и образующие с водородом прочные связи (титан, тантал). Результаты исследования показали, что имеется существенная зависимость коэффициента внедрения от плотности

внедренного водорода, температуры мишени и рода металла. Наибольшим коэффициентом внедрения обладают металлы, образующие с водородом прочные связи, однако и для нержавеющей стали 1X18H9T эта величина превышает 93%, (энергия $H_1^+ = 35$ кэВ). При нормальных температурах в исследуемой области концентраций снижение коэффициента внедрения для Ti и Ta не происходит тогда, как для нержавеющей стали и Ni при концентрациях внедренного водорода около $1 \cdot 10^{19}$ см⁻² наблюдается уменьшение коэффициента внедрения соответственно в 2 и 3 раза. При высоких температурах (~1000 К) коэффициент внедрения резко снижается для всех исследованных металлов. На рис. 12 показаны зависимости коэффициентов внедрения быстрых атомов водорода η в различные металлы от их температуры.

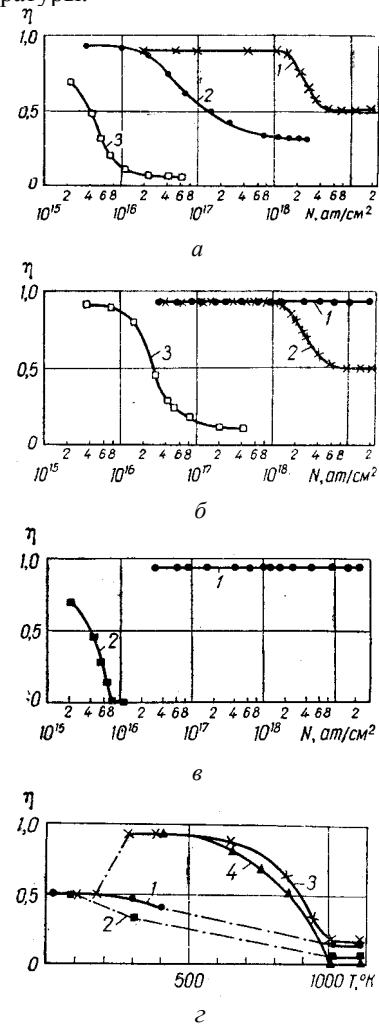


Рис. 12. Зависимость η от плотности внедренного водорода для Ni при температуре мишени: 1–78 К; 2–300 К; 3–1100 К (а); зависимость η от плотности внедренного водорода для Ti, при температуре мишени: 1–300 К; 2–78 К; 3–1100 К (б); зависимость η от плотности внедренного водорода для Ta, при температуре мишени: 1–400 К; 2–1200 К (в); зависимость η от температуры металла, 1– для нержавеющей стали, 2– для Ni, 3– для Ti, 4– для Ta (г)

КРИОГЕННО-ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Являясь соавтором криогенных конденсационных насосов, Е.С. Боровик со своими учениками продолжил изучение ее физических основ. Был определен предельный вакуум крионасосов, определены упругости паров основных компонентов среды, исследованы условия работы крионасосов в форвакуумной области давлений. ХФТИ являлся пионером использования криооткачки при решениях проблем УТС, имитации космического пространства, ускорительной техники, электроники, металлургии – областях, где требовались сверхвысокий вакуум и высокие скорости откачки, чистые безмасляные условия, применения крионасосов в условиях радиационного воздействия. В лаборатории Боровика был впервые получен пластический вольфрам, показаны возможности криооткачки для быстрого, 2...3 мин, получения вакуума – 10^{-13} Торр прямо от атмосферного давления. Установлено, что крионасосы в широком диапазоне давлений являются наиболее экономичными средствами, поэтому они стали использоваться и в области переходных давлений и форвакуума. Определена роль теплообмена и теплопередачи в получении теоретически максимального коэффициента конденсации в широком диапазоне давлений от атмосферы до сверхвысокого вакуума. Именно эта информация позволила создать плотные газовые мишени с резкой границей в вакууме, экономичные криогенные форвакуумные средства откачки для имитаторов космоса в области давлений 10^{-1} ... 10^{-3} Торр, крионасосы для откачки от атмосферного давления для полностью безмасляных технологий.

На рис. 13 показаны зависимости коэффициентов конденсации от давления. На рис. 14 – зависимости энергозатрат различных насосов от диапазона рабочих давлений.

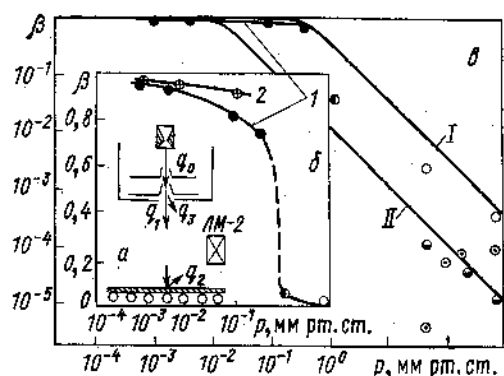


Рис. 13. Схема эксперимента (а) и зависимости коэффициента конденсации азота от давления (б) и (в). Рисунок (а); схема проведения экспериментов на струях газов (б). Кривая 1- температура газа - 300 К; кривая 2 - температура газа - 80 К. Рисунок (в) – логарифмический масштаб; экспериментальные точки рисунка (б) от давления 10^{-4} до 10^0 Торр. Точки при высоких давлениях получены при конденсации в жидкую фазу. Кривые I и II - температура газов 300 и 78 К

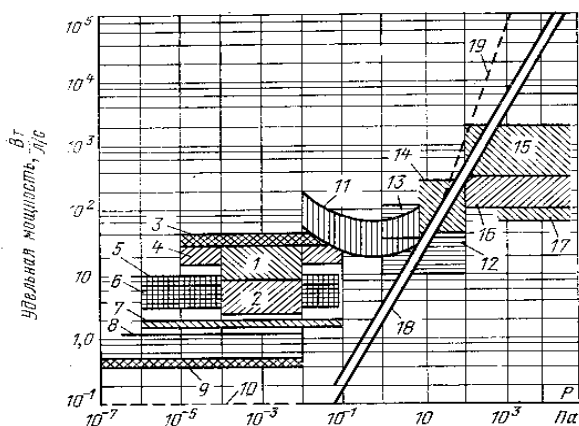


Рис. 14. Удельные энергозатраты от давления для различных средств откачки: 1, 2 – диффузионные насосы ($S_{0.л} > 10^3$ л. с); 3, 4 – турбомолекулярные насосы; 5, 6 – магнитные электроразрядные насосы; 7 – ионно-геттерные насосы; 8 – автономный гелиевый конденсационный насос ГК-40; 9 – автономные водородные конденсационные насосы ВК-40 и ВК-100; 10 – альтернативные модификации насосов типа ВК-40; 11 – бустерные насосы; 12, 13 – двухроторные насосы; 14 – эжекторные насосы; 15, 24, 25 – механические форвакуумные насосы; 16 – форвакуумный водородный насос; 17, 20 – конденсационные насосы при температурном напоре 2,4 и 10 К (усреднение в интервале 760... 100 мм рт.ст.); 18 – водородный конденсационный насос; 19, 21 – азотные конденсационные насосы; 22, 23 – конденсационная откачка с температурными напорами 2,4 и 10 К; 26 – форвакуумный водородный насос

РАЗВИТИЕ КРИОГЕННОЙ ОЖИЖИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ. АВТОНОМНЫЕ ДРОССЕЛЬНЫЕ ОЖИЖИТЕЛИ H_2 И He, АВТОНОМНЫЕ КРИОПАНЕЛИ

Разработаны простые и надежные ожижители – рефрижераторы неона, водорода, гелия дроссельного типа с эффективными теплообменниками различных производительностей (вплоть до 1000 л/ч). Ожижители с теоретически максимальным коэффициентом ожижения (18...20%) отличались малыми габаритами и весом. Это последнее было обеспечено исследованием процессов теплообмена при кипении криогенных жидкостей, процессов теплопередачи в теплообменниках различных конструкций, в частности, встречно и поперечно точных газовых теплообменниках в условиях работы различных криогенных устройств. Созданы автоматические системы, обеспечивающие работу ожижителей – рефрижераторов в различных технологических схемах. Всё это позволило создать серию автономных крионасосов производительностью 10^4 ... 10^6 л/с, разработать физические принципы конструирования вакуумных имитаторов космических условий [16]. В результате этого ХФТИ принимало участие в изго-

товлении и эксплуатации первых в СССР имитаторов космоса различного назначения.

СТРУИ В ВАКУУМЕ, ФОРВАКУУМНАЯ КРИОТКАЧКА

Плотные газовые (Ar , H_2 , N_2 , CO_2) мишени в вакууме создавались при истечении газа через сверхзвуковые сопла с тепловыми и криогенными коллиматорами. Откачка рассеянного газа и основного потока производилась крионасосами. Угол расходимости струи и вакууме, задаваемый соотношением входного и выходного сечений сопла, достигал $1 \dots 2^\circ$. Дополнительным эффектом наблюдавшимся в этих экспериментах, была конденсация газа в струях с образованием регулируемых по величине кластеров, что было измерено с помощью техники пересекавшихся молекулярных пучков. Процессы кластеризации в струях, являвшихся паразитными в технике инжекторов б.н.а, оказались полезными в технике ядерных мишеней и особо плодотворными при создании имитаторов солнечного излучения, вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена. Именно кластеризация позволила получить сплошной спектр при взаимодействии электронного пучка с газовой струей. Плотность газа в этих малорасходящихся ($1 \dots 2^\circ$) сверхзвуковых потоках водорода достигала величин $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, расход около 10^{22} ч/с , градиенты плотности на границе струя-вакуум в радиальном направлении $\sim 10^{16} \text{ ч/см}\cdot\text{см}^3$. Например, для струи мишени с плотностью $n_0 \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$, поперечником $\sim 5 \text{ см}$, на расстоянии 12 см от центра струи достигался вакуум около $2 \cdot 10^{-8}$ Торр. Техника газовых струй с криооткачкой, созданная в ХФТИ для перезарядки ионных пучков, использовалась в ОИЯИ для ядерных реакций, во ФТИНТе АН УССР – для создания имитаторов солнечного света, в ИФХ АН УССР – для исследования химических реакций на молекулярных пучках, в ИЯФСО АН СССР – для моделирования работы ракетных двигателей в верхних слоях атмосферы и т.д.

КОНДЕНСАЦИОННО-АДСОРБЦИОННАЯ ОТКАЧКА. СОРБЕНТЫ НОВОГО ТИПА

Во время экспериментов со сверхзвуковыми струями было обнаружено, что криоконденсаты CO_2 при 20 К являются эффективными сорбентами для H_2 , что послужило основой нового метода откачки. Специальные эксперименты показали, что криоконденсаты всех газов в диапазоне температур $4 \dots 20 \text{ К}$ являются эффективными сорбентами для H_2 и He , по емкости не уступающими традиционным сорбентам: углям и цеолитам. Концентрация сорбата в сорбенте в области высокого вакуума может лежать на уровне 10% , а кинетические и тепловые характеристики являются более предпочтительными. Коэффициенты прилипания лежат на уровне $0.6 \dots 0.3$, и коэффициенты поглощения теплового излучения в большинстве случаев не достигают и 10% от теплопоглощения углей. Было показано, что внешние параметры, такие как температура осаждения, температурная предыстория, скорость осаждения, на-

личие конденсируемых и не конденсируемых примесей, сильно влияют на статические и динамические сорбционные характеристики. Проведенный рентгеноструктурный анализ показал, что величины сорбции определяются размером кристаллического зерна и максимальны при его величине около 10^{-6} см .

Существенной особенностью нового метода откачки является возможность работы при одновременном напуске газов сорбента и сорбата, причем в условиях больших переохлаждений, например H_2 при 4 К , осуществляется режим, названный криозахватом, когда соотношение частиц сорбент – сорбат достигает отношения $1:1$.

В этих же условиях гелий также увеличивает свои сорбционные характеристики в несколько раз. Как показали последующие исследования, на базе этого метода возможно создание средств большой производительности для H_2 и He применительно к ТЯР. Следует заметить, что приведенные выше работы оказались пионерскими и до настоящего времени, 30 лет спустя, многие зарубежные авторы ссылаются на работы по криоадсорбции, проведенные в лаборатории Боровика, в ХФТИ.

КРИОВАКУУМНЫЕ НЕОНОВЫЕ СИСТЕМЫ

Интерес к использованию жидкого неона был вызван его уникальными теплофизическими свойствами и прежде всего высокой молярной теплотой испарения. Температура кипения жидкого неона близка к водородной, однако при его испарении можно отвести в 3.3 раза больше тепла, чем при испарении того же объема водорода. В качестве ожижителей использовались уже разработанные ожижители водорода. Были созданы конструкции неоновых крионасосов и, в частности, безмасляный неоновый вакуумный агрегат с неоновым рефрижератором холодопроизводительностью 350 Вт .

В полной мере достоинства жидкого неона как хладагента проявились при создании вакуумной газодинамической установки (ЦНИИМАШ), предназначенной для моделирования теплофизических процессов при входе космических аппаратов в верхние слои атмосферы. Ее основой являлись две неоновые криопанели общей площадью 15 м^2 и ожижитель-рефрижератор холодопроизводительностью 700 Вт . На этой установке проведены исследования сверхзвуковых газовых струй азота при потоках $0.1 \dots 15 \text{ г/с}$ и температурах $300 \dots 1000 \text{ К}$. При этих параметрах струй давление в камере устанавливалось на уровне $10^{-3} \dots 10^{-2}$ Торр и поддерживалось в течение $20 \dots 70 \text{ с}$. Использование жидкого неона позволило отказаться от азотных радиационных экранов.

Разработаны высокопроизводительные неоновые криоконденсационные насосы внешнего размещения (НКВН-15 и НКВН-50) со скоростью откачки по воздуху 15 и $50 \text{ м}^3/\text{с}$, предельным вакуумом 10^{-7} Торр и длительностью работы при одноразовой заправке около 100 ч . Этими насосами снабжены вакуумные камеры для наземной отработки стацио-

нарных плазменных двигателей, предназначенных для систем коррекции и ориентации космических аппаратов. С помощью насоса НКВН-50 в вакуумной камере в период испытаний поддерживался вакуум не хуже $2 \cdot 10^{-4}$ Торр при потоке ксеноновой плазмы 6 мг/с. На этой установке в ОКБ "Факел" проводились ресурсные испытания двигателей, определялись их тяговые и электрофизические характеристики.

ДИВЕРТОРНО-ВАКУУМНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УТС

Уже на первом этапе развития этих работ в разных странах проводился поиск устройств и технологий очистки плазмы от примесей. Эта проблема была не очень актуальна для пробкотронов, так как в этих системах с самого начала использовались сверхвысоковакуумные технологии, высокие скорости откачки, сепарация инжектировавшихся пучков и др. (см., например, ловушки ВГЛ-2 ХФТИ, "Феникс" Калэм, Англия, ОГРА-2, Москва). В то же время в замкнутых системах паромасляный насос определял уровень вакуумной технологии, и хотя были известны устройства, снижающие уровень примесей в плазме – магнитные диверторы, эффективный заряд ионов в плазме был равен 20...30.

В ХФТИ при разработке замкнутых термоядерных систем типа стелларатор после длительных исследований остановились на магнитной системе типа торсатрон без обмотки продольного поля с полоидальным дивертором. Следующим шагом, на долгие годы определившим развитие систем с таким дивертором, явилось решение о размещении магнитной системы внутри вакуумной камеры с насосами большой производительности, подобно ловушке ВГЛ-2. Помимо возможности использования насосов большой производительности для откачки дивертора такое решение позволяло решить и проблему криостатирования при переходе к сверхпроводящим магнитным системам, подобно сверхпроводящим ловушкам "Кристалл 1 и 2".

В процессе исследований в замкнутых системах конкурировали две концепции. Первая (откачиваемый дивертор) – горячая плазма на границе, малый коэффициент рециклирования, малый коэффициент возврата газа из дивертора, ввод топлива с помощью высокоскоростных таблеток смеси DT. Вторая – холодная граничная плазма, большой коэффициент рециклирования, высокая плотность газа в диверторе.

Оба эти направления были заложены в концепции конструкции дивертора, разрабатываемого в ХФТИ не только для реактора торсатрона, но и для торсатрона "Ураган-3". Переход с одного режима на другой мог осуществляться изменением производительности крионасосов дивертора, линейно располагавшихся вдоль полоидального дивертора (впоследствии подобные решения были применены на Европейском токамаке "Джет"), а также введением в камеру дивертора вспомогательного газа. Результаты экспериментов, моделирующие работу неоткачиваемого дивертора, в плане исследования эффективно-

сти торможения плазменной струи на газовой мишени, выполненные на СП-торсатроне "Кристалл-2", были использованы для разработки приемных пластин дивертора в проекте "Интер". Криогенная селективная откачка примесей из разрядной камеры разрабатывалась для крутого тора "Глобус", ЛФТИ (Ленинград).

Однако основным направлением работ считался откачиваемый дивертор с малым менее 0.1 коэффициентом возврата, как наиболее пригодный для ТЯР. Поэтому в лаборатории проводился цикл работ по исследованию криовакуумных систем в условиях радиационного воздействия. Это полностью и локально прогреваемые криогенные системы, в которых был получен рекордный результат – вакуум 10^{-14} Торр. Исследовались оптические свойства прогретых и обработанных разрядом криогенных поверхностей (получены коэффициенты поглощения около $1 \cdot 10^{-4}$ при 4 К), что позволяло использовать не экранированные азотными экранами гелиевые поверхности в вакууме. Исследовались коэффициенты распыления криоконденсатов ионами ($10^3 \dots 10^4$ мол/ион, $H_2 - H_1^+$) ($5 \dots 20$ ат/ион, Kr, Xe – He^+), стимулированное излучением газовыделение; водородопоглощение поверхностью палладия с различными покрытиями, получены коэффициенты поглощения $\sim 10^{-2} \dots 10^{-4}$ (для создания высокотемпературных насосов для водорода); также исследовались коэффициенты поглощения теплового излучения криоконденсатами H_2 , Ar, N_2 , CO_2 , H_2O ; возможность и способы защиты криоповерхностей от излучения СВЧ, плазмы, частиц; конструкции крионасосов, системы криообеспечения для быстрой регенерации крионасосов без большого температурного дрейфа или без вылива хладагента.

МАГНЕТИЗМ

Этот весьма обширный раздел деятельности Боровика, связанный с Харьковским университетом, помимо более десятка журнальных публикаций включает и издание двух монографий по магнетизму.

В середине 50-х годов Боровик организовал в Харьковском государственном университете на кафедре общей физики физического факультета специализацию "физика магнитных явлений". Вместе с заведующим кафедрой А.С. Мильнером они прочитали ряд спецкурсов. Эти лекции затем были объединены и изданы в виде книги "Лекции по ферромагнетизму" (1960 г., издательство ХГУ), утвержденной Министерством высшего образования в качестве учебника для вузов. Дополненное и исправленное издание учебника под названием "Лекции по магнетизму" вышло в 1964 г. Несколько позже (1972 г.) учебник был дополнен новыми главами в небольшой книге "Лекции по магнетизму", авторы Е.С. Боровик, А.С. Мильнер, В.В. Еременко.

Созданная Е.С. специализация сохранилась и по сей день, а лекции, читаемые студентам, специализирующимся в области магнетизма, базируются на учебнике, инициатором и автором которого остается Е.С. Боровик.

Магнитную специализацию физического факультета ХГУ отличает достаточно современная направленность исследований. Это изучение намагниченности и магнитоотрицания, магнитной анизотропии и обменного взаимодействия в ферритах и спиновых стеклах, изучается ферромагнитный и ядерный магнитный резонанс. Еще при жизни Е.С. и под его руководством было защищено несколько кандидатских диссертаций, но и по сей день сотрудники кафедры продолжают исследования, направление которым дал Е.С. Боровик.

Хотя Е.С. никогда не работал в Физико-техническом институте низких температур, можно с уверенностью утверждать, что он оказал заметное влияние на становление исследований в области низкотемпературного магнетизма и в этом институте. Достаточно сказать, что развитие импульсной методики магнитооптических и спектральных исследований во ФТИНТе полностью базировалось на разработках Е.С. и его сотрудников. Это, прежде всего, относится к использованию медных импульсных соленоидов при температуре жидкого водорода, сверхзвуковых струй в вакууме, о чем речь шла выше.

Под влиянием Е.С. работы во ФТИНТе сосредоточились на изучении низкотемпературных магнетиков (антиферромагнетиков) с привлечением наиболее современных методов – магнитооптики и неупругого рассеяния света, спектроскопии (оптической, гамма-резонансной, радио- и субмиллиметровой).

По совету Е.С. во ФТИНТе был создан филиал магнитной кафедры ХГУ, что и сегодня позволяет студентам знакомиться с современным магнетизмом, а лучшим – продолжить исследования в направлениях, по сей день ощущающих влияние таланта Е.С. Боровика.

ИТОГИ

За 40 лет существования научного коллектива, созданного Е.С.Боровиком, опубликовано свыше 400 статей, 3 книги и 200 изобретений. Защищено 3 докторских и 10 кандидатских диссертаций. Несомненно, результаты были бы более значимыми, если бы не трагическая, преждевременная смерть члена-корреспондента АН УССР, профессора Е.С. Боровика в феврале 1966 г.

ХАРАКТЕР, СЛУЧАИ ИЗ ЖИЗНИ

Любопытно, что Боровик, как и Б.Г. Лазарев, не был членом КПСС, поэтому этот минус компенсировался высоким профессионализмом и порядочностью. Возможно, причиной этого было исключение из комсомола в 1935 г. с формулировкой: "политическая близорукость". Тем не менее идея социального равенства ему была близка и, по-видимому, он был коммунистом – идеалистом.

В практике Е.С. Боровика была любопытная особенность, которую можно объяснить как высокой щепетильностью в вопросах соавторства, так и желанием дать и максимально развить самостоятельность молодых научных сотрудников, подготовить

их к защите диссертаций. Фактически это выражалось в том, что при подготовке новых публикаций Е.С. в какой-то момент обсуждения результатов работы решительно отказывался от соавторства со словами: "Это чисто ваша работа. Я на начальной стадии предложил и думал, что вы этим и окончите, а вы этой работе дали новое звучание, поэтому она целиком ваша". Никакие уговоры поколебать его мнения не могли. Его окончательный ответ был: "Публикуйте самостоятельно, без меня". С самого начала он отказался от соавторства в работе по сорбентам "нового типа", хотя с интересом их обсуждал. "Это чисто ваша работа, вы ее выдумали и полностью провели. Кстати, посмотрите у Кеезома в книге, он что-то подобное описывал. Но у вас намного мощнее..." Потом, когда мы с Р. Булатовой и В.С. Коганом провели рентгеновские исследования слоев сконденсированных газов и предложили механизм откачки, он как-то с удивлением мне сказал: "Ну, вы и развернулись... Молодцом!"

В его практику также входило поощрение частых выступлений сотрудников на лабораторных семинарах, которые он рассматривал как важный элемент обучения. Сюда же можно отнести и командирование молодых сотрудников на Всесоюзные научные конференции, часто без всякой опеки, что способствовало выработке самостоятельности и ответственности. Евгений Станиславович поощрял Ф.И. Бусола к преподавательской деятельности, и тот ряд лет проводил занятия по высшей математике в ХИИТе. В дискуссиях он терпеливо выслушивал собеседника, с какими бы бредовыми идеями он не выступал, и всегда давал вежливый и деловой совет. Именно это качество и всем известная особая щепетильность в соавторстве привлекали к Е.С. Боровику большое число людей для всевозможных консультаций, обсуждений и советов.

Как известно, молодые научные сотрудники в своей среде вырабатывают особые аббревиатуры или имен своих руководителей. Синельникова называли - К.Д., Лазарева - Б.Г., Вальтера - А.К. или Антоном. Боровика называли - Доктор. Пойдем к Доктору, или Доктор сказал, или надо это обсудить с Доктором.

Любопытно, что Евгений Станиславович, несмотря на свой колоссальный авторитет среди сотрудников лаборатории, признавал свои ошибки и делал это достаточно легко и публично, что никак не сказывалось на его авторитете. Однажды у нас с Евгением Станиславовичем возникла дискуссия о радиационной обстановке вблизи нашего инжектора быстрых нейтральных атомов. Он усомнился в такой возможности, я же указал на наличие электронов компенсации в потенциальной яме ионного пучка, которые ускоряясь у ионного источника, создают рентгеновский фон. Через некоторое время Евгений Станиславович мне сказал: "Володя, по ряду вопросов вы стали специалистом такого ранга, что вам не следует адресоваться ко мне." Заметив мое удивление, добавил: "Вы сами знаете по каким.»

Встреча Нового 1961 года проводилось всем составом лаборатории с женами на территории инсти-

тута в Пятихатках, в столовой. Ходили смотреть установки, которые, как сказал Е.С., отвлекают мужей от жен и семьи. Нужно заметить, что в те времена было нормой работать более положенных 8 или 7 ч, и окончание работы в 10...12 ч вечера не считалось чем-то неординарным. Так работало большинство научных сотрудников, большинство окошек в лабораторных корпусах ХФТИ светилось далеко за полночь.

В том же году, отвечая на призыв руководства страны, Боровик вместе с сотрудниками лаборатории собирал желуди в пятихатском лесу. Заметим, что никакой критики ни в чей адрес, несмотря на специфичность работы, не было. Думаю, что эти акции руководитель лаборатории использовал для сплочения коллектива и создания нужного положительного климата. Кстати, определенный положительный климат создавало и то, что жена Евгения Станиславовича, Наталья Мироновна Цин, работавшая в лаборатории руководителем группы химиков, очень тактично и умно помогала решать различные ненаучные вопросы.

Несмотря на огромную занятость, Евгений Станиславович проявлял заботу о своих сотрудниках: в 1962 г. сразу трое сотрудников его лаборатории получили квартиры.

Учитывая молодежный состав лаборатории, Евгений Станиславович поддерживал и спортивную жизнь коллектива. В лаборатории проводились регулярные шахматные турниры. Турниры по настольному теннису были особенно представительны (в лаборатории был столь широкий состав игроков, что играли две лиги), играли в волейбол и футбол. Любопытно, что нынешние поколения теннисистов играют в том же месте и на том же теннисном столе. Сам Евгений Станиславович был хорошим лыжником, и я неоднократно встречал его в лесу.

Первыми диссертантами в лаборатории в 1965 г. были Волоцкая и Мамедов - аспирант Боровика и сотрудник Бакинского института физики. К сожалению, многим остальным сотрудникам пришлось защищаться без руководителя, вернее с руководителем в черной рамке.

Наша последняя встреча произошла в больничной палате, в которую меня неожиданно пригласил Яков Петрович Костин, заместитель Боровика. Евгений Станиславович в палате был один, кровать была застелена, и он стоял, улыбаясь. Я был очень удивлен, поскольку врачи нам все время говорили, что у Боровика - осложнения, перитонит и положение очень серьезное, решается вопрос жизни. Поэтому, то что он не лежит, а стоит, а кровать застелена произвели на меня ободряющее действие, а его слова о том, что он в ближайшее время выйдет отсюда и займется делами, в частности моей диссертацией, я воспринял как нормализацию ситуации. "Не волнуйтесь, мы же с вами обсуждали все ваши работы перед их публикацией", - добавил он. Поэтому, выйдя, я успокоил своих коллег, что Доктор в ближайшее время появится в лаборатории. К большому сожалению, наш оптимизм через два дня был развеян. Евгения Станиславовича не стало.

Было бы ценно иметь высказывания о Боровике коллег его ранга, однако таковых не осталось. Возможно, некий свет на это пролет случай, имевший место со мной, через год после смерти Боровика.

«Друзья познаются в беде» - эта старая поговорка пришла мне на ум, когда я выходил из кабинета Б.И. Веркина в середине 1967 г. Дело в том, что после длительных, бесплодных попыток пробиться на Ученый совет через Ученого секретаря я решил идти прямо к Б.И. - так называли Бориса Иеримеевича Веркина сотрудники ФТИНТа. Однажды, после очередного заседания Ученого совета, я вошел в открытые двери его кабинета. Он нервно прохаживался и довольно недружелюбно меня встретил, но отступить было поздно, и я начал излагать суть дела. Он меня перебил и сказал, что обычно этими вопросами занимается руководитель соискателя. Я выпалил: "Он не может этого сделать!" Он пожал плечами и спросил: "Почему?" Я - "Он умер." Его как-то передернуло, и он быстро спросил: "Кто Ваш руководитель?" Я - "Евгений Станиславович Боровик". "Женя?" - с каким-то волнением и придыханием спросил Б.И. "Да", - сказал я. Телефонная трубка как-то мгновенно возникла у него в руке. "Ученого секретаря ко мне", - сказал он и, повернувшись ко мне, добавил: "Можете быть свободны, все состоится в ближайшее время." Через неделю я стоял перед Б.Н. Есельсоном, моим будущим оппонентом.

Автор признателен В.В. Еременко за ценные замечания и дополнения.



Рис. 15. Евгений Станиславович Боровик, 1965 г.



Рис. 16. В группе магнитных ловушек. Слева - направо: Боровик, Кобзев, Юферов, Скибенко



Рис. 17. Семинар отдела Н, в зале Административного корпуса на старой площадке. Слева - направо: Боровик, Хоткевич, Есельсон, Галкин, Лазарев, Веркин, Судовцов, Руденко, Лазарева



Рис. 18. Е.С. Боровик и Н.Е. Алексеевский на Международной конференции по низким температурам, Англия, 1961 г.



Рис. 19. После войны в лаборатории отдела Н



Рис. 20. Аэропорт Хитроу 1961 г.



Рис. 21. 1962 г., командировка в Англию

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.Г. Лазарев. *Жизнь в науке. Избранные труды. Воспоминания*. Харьков, 2003.
2. Е.С. Боровик. О теплопроводности углекислоты и связи между теплопроводностью и вязкостью // *ЖЭТФ*. 1949, т.19, в.7, с562.
3. Е.С. Боровик. Электропроводность металлов при большой плотности тока // *ДАН СССР*. 1953, т.91, с.771.
4. Е.С. Боровик. О взаимосвязи анизотропии эффекта Холла и изменения сопротивления металлов в магнитном поле. Часть2. // *ФММ*, 1956, т.2, с.52.
5. Е.С. Боровик, С.Ф. Гришин. Определение состава остаточных газов при работе конденсационных насосов // *ЖТФ*, 1959, т.29, с.1110.
6. Е.С. Боровик, Б.Г. Лазарев, И.Ф. Михайлов. Водородный конденсационный насос с автономным оживителем // *Атомная энергия*, 1959, с.117.
7. Е.С. Боровик, А.Г. Лимарь. Получение импульсных магнитных полей большой длительности // *ЖТФ*. 1961, с.939.
8. Е.С. Боровик, Ф.Н. Бусол, В.А. Коваленко, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Магнитная ловушка с применением низкотемпературной техники // *Материалы конференции по УТР и физике плазмы*. М., 1961, с.215.
9. Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, С.Ф. Гришин. Исследование возможности получения стационарных магнитных полей в катушках, охлаждаемых жидким водородом // *ЖТФ*. 1961, т.31, с.459.
10. Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, В.Б. Юферов, Е.И. Скибенко. Исследование сверхзвуковой струи CO₂ в качестве мишени для перезарядки ионов // *ЖТФ*. 1963, №8.
11. Е.С. Боровик, Н.П. Катрич, Г.Т. Николаев. Определение коэффициента внедрения ионов Н⁺ в металлы // *Атомная энергия*, 1965.
12. Е.С. Боровик. К вопросу о самоподдерживающихся реакциях синтеза в плазме большой плотности. I // *Магнитные ловушки*, Киев: "Наукова думка", 1969.
13. Е.С. Боровик, Р.В. Митин. К вопросу о самоподдерживающихся реакциях синтеза в плазме большой плотности II // *Магнитные ловушки*. Киев: "Наукова думка", 1969.
14. В.Б. Юферов, Е.И. Скибенко, В.А. Кравченко, Ю.В. Холод. Криогеніка у КТС // *УФЖ*. 1998, т.43, №9, с. 1190–1192.
15. В.Б. Юферов, Н.А. Косик, Е.И. Скибенко, Ю.В. Холод. Вторая криогенная лаборатория УФТИ. Евгений Станиславович Боровик. Вакуумные технологии и оборудование // *Харьковская научная ассамблея, ICVTE-6. Сборник докладов Международной конференции "Вакуумные технологии и оборудование" 21-26 апреля 2003 г.* Харьков, 2003, с. 316-332.
16. Е.С. Боровик, И.Ф. Михайлов. *Основные принципы конструирования имитаторов космоса*. Рукопись. Ротапринт ФТИ, 1965.

ЄВГЕНІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ БОРОВИК. ДРУГА КРИОГЕННА ЛАБОРАТОРІЯ УФТІ

В.Б. Юферов

Описані деякі наукові результати та факти із життя члена кореспондента АН УРСР, професора, доктора фізико-математичних наук, Євгенія Станіславовича Боровика.

EUGENIY STANISLAVOVICH BOROVIK. SECOND CRYOGENIC LABORATORY OF UFTI

V.B. Yuferov

Some scientific results and facts from the life of member-correspondent of AS of Ukraine, professor, doctor of science Eugensy Stanislavovich Borovik are described.