

УДК 621.384.634.5

НАУЧНАЯ ШКОЛА КРИОГЕНИКИ В ЛАБОРАТОРИИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Н. Н. Аганов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В экспериментальной ядерной физике в качестве инструментов и приборов используют сложные инженерные устройства и сооружения. Мощный толчок эта область науки дала развитию криогенной техники. Для изучения свойств элементарных частиц потребовалась разработка совершенно новых приборов: жидководородных пузырьковых камер, криогенных мишеней, сверхпроводящих магнитов и т. д. В статье описано формирование научной школы криогеники в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Обсуждаются развитые здесь направления криогенной техники, сыгравшие ключевую роль во многих физических экспериментах.

Experimental nuclear physics uses very complicated instruments and macroengineering. This field of science gave a powerful incentive to the development of cryogenic engineering. Particle physics needed such tools as bubble chambers with liquid hydrogen, cryogenic targets, and superconducting magnets and so on. The formation of the scientific school of cryogenics at the Veksler and Baldin Laboratory of High Energies, JINR, is described. A review of the most important directions of low-temperature technology developed at the laboratory which played a crucial role in many physical experiments is given.

Становление криогеники в Лаборатории высоких энергий целиком и полностью связано с именем профессора Александра Григорьевича Зельдовича (фото 1). Он перешел на работу в ЛВЭ по инициативе В. И. Векслера в 1957 г., будучи уже известным ученым, доктором технических наук, участником завершаемых к тому времени крупнейших проектов, оказавших существенное влияние на развитие промышленности в СССР. Результаты его труда при создании кислородных установок нового типа и разработке метода низкотемпературной дистилляции для выделения дейтерия были удостоены высоких правительственных наград — Ленинской премии (1960), Государственной премии СССР (1953), орденов: «Знак Почета» (1943), Красной Звезды (1945), Трудового Красного Знамени (1954, 1971) и др.

Сразу отметим два важнейших обстоятельства, способствовавших успешному развитию криогеники в ЛВЭ. Во-первых, А. Г. Зельдовичем были внесены в повседневную работу преемственность и научные традиции, у истоков которых стояли выдающиеся ученые Э. Резерфорд и П. Л. Капица. Во-вторых, им всегда поддерживалась тесная связь науки с промышленностью и их глубокое постоянное взаимное влияние.

Академик П. Л. Капица, в тесном контакте с которым до перехода в ЛВЭ работал А. Г. Зельдович, начал свою научную карьеру со стажировки в Кембридже в июле 1921 г. При огромной поддержке Э. Резерфорда П. Л. Капица к 1933 г. становится директором Мондовской лаборатории Королевского общества. 19 апреля 1934 г. он впервые получает жидкий гелий на созданной им установке на основе адиабатического метода. Этот ожижитель гелия стал технической базой последующего быстрого прогресса в криогенике,

отмеченном позже присуждением П.Л.Капице Нобелевской премии «за фундаментальные изобретения и открытия в области физики низких температур».

Когда в сентябре 1934 г. после приезда в СССР П.Л.Капице не было разрешено вернуться в Кембридж для продолжения исследований, сенат Кембриджского университета, по ходатайству Э.Резерфорда, дал согласие на передачу в СССР — для института Капицы — научного оборудования Мондовской лаборатории. Это оборудование стало основой вновь созданного Института физических проблем в Москве. История в том же духе преемственности и научных традиций случилась через 22 года, когда А.Г.Зельдович перешел из ИФП в ЛВЭ ОИЯИ. Он получил «в приданое» маленький лабораторный ожигитель водорода ВОС-3, вскоре (1957 г.) запущенный и ставший базой для быстрого развития исследований по созданию жидководородных пузырьковых камер, сооружение которых было первой задачей, поставленной директором ЛВЭ В.И.Векслером перед вновь создаваемым коллективом специалистов по низким температурам.

Нельзя не упомянуть и о традициях научных семинаров. Еще в 1922 г. в Кембридже состоялось первое заседание физического семинара, получившего в дальнейшем название «Клуб Капицы». В 1937 г. в ИФП начал работу новый семинар — «капичник», так его стали называть, когда из сугубо институтского он превратился в общемосковский и даже всесоюзный. И в Дубне, сразу после образования криогенного отдела в ЛВЭ под руководством профессора А.Г.Зельдовича, начал действовать специализированный семинар по низкотемпературной тематике. За период 1957–1973 гг. было проведено 430 научных семинаров! Их влияние на формирование коллектива молодых научных работников и инженеров невозможно переоценить.

Говоря о связях с промышленностью, важно отметить, что ко времени перехода на работу в ЛВЭ профессор А.Г.Зельдович уже имел в этом огромный опыт. Он считал, что взаимодействие наука–промышленность чрезвычайно нужно, плодотворно, и последовательно проводил эту мысль в жизнь. В результате по чертежам, разработанным в криогенном отделе ЛВЭ, промышленностью изготовлены водородно-гелиевые установки, которыми в свое время были оснащены многие исследовательские институты в СССР. В начале работ по использованию жидкого водорода, особенно для космических программ, была выпущена целая серия ожигительных установок ВО-2М, разработанных в криогенном отделе ЛВЭ. Сотрудники лаборатории оказали существенную помощь в их наладке и запуске. Головные образцы крупнейших турбодетандерных гелиевых установок КГУ-250/4,5 и КГУ-1600/4,5 также прошли наладку под опекой ученых ЛВЭ, причем ими были внесены весьма существенные вклады в технологию.

Жидководородные пузырьковые камеры — первые физические приборы, созданные вновь образованным молодым коллективом криогеников ЛВЭ. В 1956 г. В.И.Векслер вернулся с Международной конференции по физике высоких энергий под большим впечатлением от доклада Л.Альвареса о создании полуметровой жидководородной камеры в Беркли. Он уловил все преимущества нового прибора и решил, что эта методика должна быть освоена в ЛВЭ.

Началом работ по жидководородным камерам, по-видимому, следует считать организованный в октябре 1956 г. по инициативе В.И.Векслера приезд группы сотрудников ИФП, уже имевших к тому времени значительный опыт работы при экзотически низких температурах конденсации водорода (около 20,4 К). Кроме А.Г.Зельдовича среди них были А.Б.Фрадков и И.Б.Данилов. (Все трое впоследствии известные как авторы «Справочника по физико-техническим основам криогенной техники» — настольной

книги любого специалиста, занятого в этой области. Этот справочник, выдержавший несколько изданий на протяжении десятков лет, имел огромное значение для развития криогенной техники в СССР и других странах.) В результате встречи А. Г. Зельдович серьезно заинтересовался этой новой большой перспективной работой.

Принцип действия пузырьковой камеры состоит в том, что если через жидкость, находящуюся в метастабильном состоянии (жидкость как бы готова вскипеть, но «не знает», в какой точке начать), пропускать пучок частиц из ускорителя, то при их прохождении в жидкости выделяется энергия, вызывающая возникновение пузырьков, которые в дальнейшем растут самопроизвольно. Таким образом, траектории первичных частиц, попавших в камеру из ускорителя, и траектории вторичных частиц, получаемых в результате ядерных реакций первичных частиц с рабочим веществом камеры, обозначаются треками из цепочек пузырьков. Треки фотографируют, когда пузырьки возрастают до размеров, соответствующих разрешающей способности системы фотографирования. Пузырьковые камеры размещают в магнитном поле, так что, измерив радиус кривизны трека, можно определить импульс частицы.

Для заполнения пузырьковых камер могут быть пригодны многие вещества, однако чем меньше различных атомов содержит вещество и чем эти атомы проще, тем легче разобраться в результатах экспериментов. Поэтому, несмотря на значительные трудности при работе с низкими температурами, жидкий водород — наиболее подходящее рабочее вещество для таких устройств.

Первой была создана 40-см камера. Под непосредственным руководством А. В. Белогова в 1957–1958 г. шло ее проектирование, в 1958 г. — сборка и, наконец, в 1959 г. — запуск с наблюдением треков. В течение 1959–1967 г. было получено 240 тыс. стереофотографий, а затем прибор был передан Физико-техническому институту АН УССР. Этот первый опыт приобретался с великими трудностями. В нержавеющей камере оказалась коварная микротечь, которая открывалась только в присутствии жидкого водорода. Борьба с этой «холодной» течью продолжалась около года, но пройденная при этом школа не пропала даром. Полученный опыт позволил вскоре создать один из лучших в мире приборов, по точности и надежности превосходящий все существовавшие в то время аналоги.

Это была 100-см водородная камера. Ее разработка началась в 1960 г., и уже в 1964 г. был осуществлен запуск и получены первые треки. На пучках синхрофазотрона ЛВЭ в период до 1971 г. было сделано более 600 тыс. четырехкадровых стереофотографий. Конечно, создание такого крупного устройства как водородная камера — результат труда большого коллектива. Однако определяющий вклад, безусловно, был сделан руководителем работ Е. И. Дьячковым (фото 2), ставшим впоследствии доктором технических наук и начальником сектора ЛВЭ. Так, им были предложены: дьюарный способ теплоизоляции, термостатирование с помощью радиатора, дьюар многогранной формы с гибкой внутренней оболочкой, меры по обеспечению чистоты оптических поверхностей, система отдельной стабилизации температуры и давления в камере. Успешная реализация именно этих предложений позволила получить точный, простой в изготовлении, надежный прибор.

Впоследствии все эти решения были полностью перенесены на двухметровую водородную камеру «Людмила», созданную и испытанную в ЛВЭ, а затем длительное время успешно проработавшую на ускорителе У-70 в Институте физики высоких энергий в Протвино.

Криогенные мишени — другой тип низкотемпературного инструмента для физических исследований. В течение всего времени существования ЛВЭ этим направлением деятельности криогенного отдела руководил заслуженный конструктор РФ Л. Б. Голованов (фото 3), начальник сектора, кандидат технических наук.

Как известно, мишени нужны для того, чтобы по результатам взаимодействий пучка с веществом мишени изучать свойства элементарных частиц. Как и в случае пузырьковой камеры, рабочее вещество может быть разным, но предпочтительнее такое, в котором есть только простые ядра. Чаще всего применяют водородные мишени, а также дейтериевые и гелиевые. Вероятность взаимодействия налетающих частиц с веществом мишени пропорциональна произведению плотности вещества на длину мишени. Отсюда понятно стремление иметь рабочее вещество в жидком виде, т. е. при криогенных температурах: известно, что жидкость плотнее газа, находящегося при атмосферном давлении и комнатной температуре в 700–800 раз.

По функциональной связи с детекторами мишени условно можно разделить на три категории. Первая — автономные мишени, т. е. мишени, входящие в экспериментальную установку отдельным независимым элементом. Такие мишени предназначены для экспериментов, проводимых электронной методикой. Вторая — мишени для फिल्मовых детекторов — стримерных и пузырьковых камер. Эти мишени находятся внутри трекочувствительного объема. Третья — мишени-детекторы, т. е. мишени, которые сами одновременно являются детекторами или детекторы расположены внутри них.

Ясно, что криогенная мишень представляет собой сложный физический прибор, к которому предъявляются особые, весьма специфические, часто противоречащие друг другу требования. Основные из них:

- наполнение мишени жидкими криоагентами H_2 , D_2 или He;
- точность определения количества вещества в мишени (до 0,1–0,05 %);
- минимальное количество материала стенок сосуда (металлы практически неприменимы);
- малое количество взрывоопасного водорода — реконденсация жидким гелием;
- возможность и безопасность использования мишени в электромагнитных полях;
- ограничение жидких H_2 и D_2 плоскими стенками;
- возможность длительной работы, т. е. малый теплоприток извне.

За время работы было создано множество разных типов мишеней, успешно отработавших в физических центрах разных стран: в Дубне, Серпухове, Ереване, Сакле (Франция), Брукхейвене (США). Это были секционные мишени, мишени с плоскими окнами, с камерой, имеющей плоские стенки, подвижные с четырьмя камерами, специальные для стримерных камер и великое множество других. Только до 1972 г. их было создано более десяти. В 1981 г. один из приборов — прецизионная установка с жидководородной мишенью, которая позволяла поддерживать количество водорода на пути частиц с точностью до 0,05 %, — был отмечен золотой медалью ВДНХ СССР.

Говоря о работах сектора Л. Б. Голованова, нельзя не упомянуть и еще об одном важном направлении деятельности этого коллектива: им были разработаны столь необходимые для начала работ в области криогенных температур первые сосуды для хранения и транспортировки жидкого водорода и гелия. Эти надежные и экономичные 50- и 100-л сосуды Дьюара и по сей день находятся в эксплуатации. Они серийно выпускались в Центральном экспериментальном мастерских ОИЯИ, причем было получено свидетельство на промышленный образец.

Интересной разновидностью мишеней стала «мишень — водородная струя». Работы по ее созданию возглавлял Ю. К. Пилипенко (фото 4), впоследствии начальник криогенного отдела ЛВЭ, лауреат Государственной премии СССР. С помощью такого типа мишени в конце 60-х и начале 70-х гг. были получены важные физические результаты на ускорителях в Протвино и Батавии (США). Принцип работы струйной мишени состоит в том, что струя плотного холодного водорода впрыскивается непосредственно в вакуумную камеру ускорителя, а затем улавливается. То есть эксперимент проводится непосредственно на внутреннем пучке ускорителя.

Основные преимущества использования струйной мишени: большая вероятность ядерного взаимодействия за счет многократного прохождения пучка, отсутствие вторичных взаимодействий в струе из-за малого количества вещества и длительная и равномерная растяжка первичного пучка. Основные проблемы — формирование и улавливание струи водорода в вакууме. Эта проблема была решена путем использования конденсационного насоса с жидким гелием.

Установка для формирования и улавливания струи устроена так, что сжатый водород из буферной емкости через электромагнитный клапан и теплообменник при давлении 0,15–0,4 МПа и температуре 40 К поступает в сопловой аппарат, состоящий из трех соосных сопел. Струя пересекает зону пучка ускорителя и попадает в гелиевый конденсационный насос, состоящий из сосуда для жидкого гелия и медной ловушки. За время 200 мс, в течение которого клапан остается открытым, высокий вакуум (0,0013 Па) вокруг струи не ухудшается.

Сверхпроводимость стала достоянием техники после того, как в 1961 г. было открыто, что соединение Nb_3Sn сохраняет сверхпроводящее состояние при плотности тока до 10^5 А/см² в магнитном поле 9 Тл ($T = 4,2$ К). Развернулись работы по изучению этого уникального явления.

В 1964 г. И. Н. Гончаровым (фото 5) создана группа исследований физических свойств сверхпроводящих материалов. Группа явилась зародышем для последующего бурного развития изучения и использования сверхпроводимости в ОИЯИ. Уже в 1965 г. этой группой была получена премия ОИЯИ за цикл работ по исследованию сверхпроводящих сплавов и создание магнита с полем 8,5 Тл. К 1972 г. разработан и пущен в эксплуатацию комплекс исследовательской аппаратуры: криостаты, ряд сверхпроводящих магнитов с полем до 10 Тл, источники питания, системы контроля и измерения.

Предложен и использован метод низкотемпературной обработки сверхпроводящих сплавов для получения высоких критических токов, изучены зависимости критического тока от магнитного поля и температуры ряда классов сверхпроводников. Исследовалось резистивное состояние СП-сплавов, что было необходимо как для их практического использования, так и для построения теории критических токов

Ю. А. Шишовым (фото 6) в 1966 г. образована группа, деятельность которой была направлена на практическое использование крупных устройств на основе сверхпроводимости. Уже в 1969 г. создан и испытан сверхпроводящий соленоид с диаметром отверстия 340 мм. Это был первый крупный соленоид, в момент создания рекордный по ряду параметров как в СССР, так и странах-участницах ОИЯИ: ток в ленте 1,8 кА, поле 2,5 Тл, вес 600 кг. Необычно большим по тому времени было и количество гелия, заливаемого в криостат, — 300 л. С 1970 г. велись работы по созданию сверхпроводящей магнитной системы «Кольцетрон» — соленоид внутренним диаметром 0,62 и длиной 2,5 м, поле 2,0 Тл.

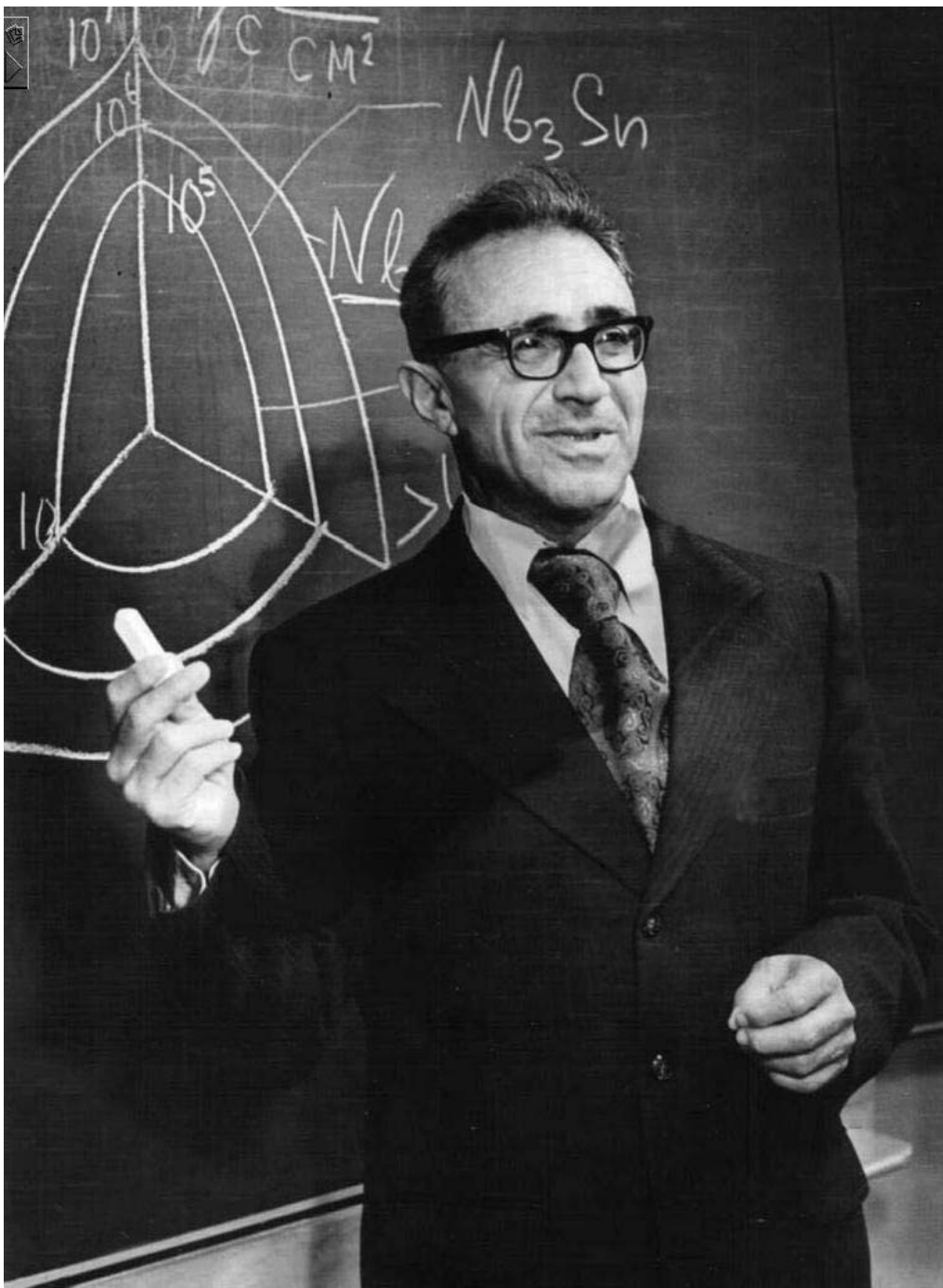


Фото 1. А. Г. Зельдович



Фото 2. Е. И. Дьячков



Фото 3. Л. Б. Голованов

Фото 4. Ю. К. Пилипенко



Фото 5. И. Н. Гончаров



Фото 6. Ю. А. Шишов



Фото 7. В. А. Белушкин

Проводилось очень много важных, в сущности пионерских, работ по сопутствующим проблемам: сильноточные токовводы, обнаружение нормальной зоны, вывод запасенной энергии, сверхпроводящие ключи, термометрия и др.

Большое значение для развития применений технической сверхпроводимости в наши дни имели исследования так называемого «косвенного» криостатирования, когда обмотка не имеет непосредственного контакта с жидким гелием: тепло отводится посредством теплопроводящих мостов.

Значительный вклад в развитие технической сверхпроводимости сделал сектор, руководимый Е. И. Дьячковым. С начала 70-х гг. этот коллектив с водородных пузырьковых камер полностью переключился на тематику, связанную с созданием нуклотрона. Он создал стенды для испытаний импульсных сверхпроводящих магнитов, проводил конструкторские разработки и испытания на стендах магнитов будущего ускорителя, занимался исследованиями потерь (тепловыделений) в сверхпроводнике при импульсной нагрузке. Была разработана аппаратура и осуществлена на практике методика теплотехнических исследований импульсных сверхпроводящих магнитов нуклотрона.

Сектор произвел комплексные испытания и проверку всех (!!!) магнитов нуклотрона при рабочих токах и температуре 4,5 К. Каким темпом развивались работы по сверхпроводимости в ходе создания нуклотрона, может проиллюстрировать таблица, в которой приведено количество жидкого гелия, произведенное в разные годы.

Производство жидкого гелия в ЛВЭ

Период	Объем, л	Этап работ
1961, осень	—	Первое сжижение гелия
1962	750	До развития работ по сверхпроводимости
1972	25 000	Первые работы по сверхпроводимости
1982	40 000	Развитие работ по сверхпроводимости
1992	380 000	Испытания магнитов нуклотрона
1993	1 303 000	Работа для промышленности
2003	2 000 000	Нуклотрон

Заканчивая этот краткий обзор работ в области сверхпроводимости, необходимо отметить, что полученные знания оказали значительное влияние на технологию и конструкции рекордных по параметрам источников частиц, созданных впоследствии в ЛВЭ.

В 1977 г. начата эксплуатация криогенного источника ядер КРИОН, на синхрофазотроне ускорены до 5 ГэВ на нуклон ядра С, N, Ne. Позже на нуклотроне получен пучок ядер Fe (руководитель Е. Д. Донец).

В 1981 г. введен в эксплуатацию источник «Полярис», с помощью которого ускорены поляризованные дейтроны до энергии 4,2 ГэВ на нуклон (руководитель Ю. К. Пилипенко).

Ожигатели водорода и гелия промышленностью в 50-х гг. не выпускались. Для нужд криостатирования вновь создаваемых физических приборов их было необходимо разработать и изготовить. Это направление весьма успешно стартовало под руководством Ю. К. Пилипенко, впоследствии важную роль играли начальник сектора В. А. Белушкин (фото 7), заместитель начальника отдела Н. И. Баландинов и начальник группы В. В. Крылов.

Ожижение водорода имеет свои особенности, одна из которых состоит в том, что водород является химически активным взрывоопасным газом. Вместе с воздухом он обра-

зует взрывчатую смесь в широком интервале концентраций: от 4 до 74 % по водороду, а температура воспламенения смеси составляет всего 580–590 °С. Последствия возможного взрыва очень велики, так как 1 кг водорода, смешанный с соответствующим количеством воздуха, эквивалентен 15 кг тротила. Понятно, что из-за этого работа с водородом требует не только специальной техники, но и крайне высокой дисциплины.

Помимо сложностей, связанных с низкими температурами и чрезвычайной взрывоопасностью, при ожигении и хранении водорода существовала еще одна трудная задача, связанная с двумя возможными типами объединения атомов в молекулу. При антипараллельной ориентации ядерных спинов образуется молекула параводорода, при параллельной — ортоводорода. Ортопарасостав водорода зависит от температуры. При комнатной температуре он состоит из 25 % пара- и 75 % ортомодификации (нормальный водород). Устойчивой формой при температуре жидкости 20,4 К является почти чистый параводород. Основная проблема состояла в том, что ортопаралпереход происходит самопроизвольно и сопровождается большим выделением тепла, приводящим к полному испарению жидкости даже при идеальной теплоизоляции. Впервые в СССР жидкий параводород был получен на ожигительной установке ВГО-1, созданной в ЛВЭ. Это устройство могло производить до 80 л/ч нормального жидкого водорода, 50 л/ч параводорода или 30 л/ч жидкого гелия.

Следующей ожигительной установкой стал ожигитель ВО-2, предназначенный для обслуживания крупных жидководородных пузырьковых камер. Его производительность составляла 230 л/ч жидкого нормального или 140 л/ч параводорода. Эта разработка сотрудников ЛВЭ принадлежала к числу наиболее современных установок данного типа и впоследствии выпускалась серийно. На ожигителе ВО-2 в 1965 г. впервые в мире была продемонстрирована возможность замены процесса дросселирования адиабатическим расширением в поршневом детандере. При этом производительность ожигителя была повышена на 50–60 %. Этот способ существенного повышения энергетической эффективности теперь используется повсеместно.

В связи с потребностями ОИЯИ, и в особенности из-за бурного развития исследований по сверхпроводимости, развивалась база и по производству жидкого гелия. Были последовательно спроектированы и введены в действие установка ВГО1М производительностью 75 л/ч, первый детандерный, не требовавший встроенного водородного цикла, ожигитель МГО на 90 л/ч.

Начиная с 1975 г. в связи с началом использования сверхпроводимости возникла настоятельная необходимость в эффективных и надежных промышленных гелиевых рефрижераторах. Вместе с НПО «Гелиймаш» были освоены головные образцы гелиевых ожигителей с турбодетандерами: установка КГУ-250/4,5 — 90 л/ч жидкого гелия и прототип криогенных установок нуклотрона КГУ-1600/4,5 на 500 л/ч жидкого гелия.

Установки МГО и КГУ-250/4,5 применялись для криостатирования крупнейшего в то время сверхпроводящего соленоида установки «Кольцетрон» — прототипа будущего коллективного ускорителя заряженных частиц. Скептики утверждали, что принятая схема КГУ-250/4,5 (два последовательно включенных через теплообменник турбодетандера) будет неприемлема в практике, а сами высокооборотные турбины на газовых опорах весьма ненадежны. Действительно, вначале от операторов требовалось прямо-таки искусство для запуска установки и поддержания необходимых параметров. Затем эти процессы были отлажены, и головной образец установки КГУ-250/4,5 активно используется в ОИЯИ вплоть до настоящего времени. Теперь эта установка имеет марку КГУ-500/4,5, т. е. ее

производительность увеличилась в 2 раза. В период создания новой турбодетандерной установки, впервые работающей в комплексе с крупным сверхпроводящим устройством, сформировались тесные профессиональные взаимоотношения между сотрудниками московского НПО «Гелиймаш» и ОИЯИ, как правило, носившие характер научного соревнования. При этом огромную роль в развитии работ сыграли профессор В. Г. Пронько и А. Г. Зельдович — руководители научных коллективов НПО «Гелиймаш» и ОИЯИ. Заложена здесь основа во многом определила успешное создание в будущем не только криогеники для нуклотрона, но и способствовала успешному развитию ряда других криогенных комплексов. Автору этих строк тоже посчастливилось приобрести начальный опыт в этом «питомнике».

С конца 70-х гг. в ЛВЭ начались работы по созданию сверхпроводящего ускорителя. НПО «Гелиймаш» получило от ОИЯИ заказ на создание новой крупной гелиевой установки КГУ-1600/4,5 холодопроизводительностью около 1600 Вт. Головной образец рефрижератора предполагалось использовать для обеспечения жидким гелием предстоящих испытаний сотен различных элементов нуклотрона и их сборок, а также с целью отработки технических решений, заложенных в гелиевые рефрижераторы вновь создаваемой крупнейшей в стране системы криогенного обеспечения сверхпроводящего ускорителя. На этапе проектирования головного образца КГУ-1600/4,5 коллектив НПО «Гелиймаш» добился такого высокопрофессионального результата, что даже по прошествии более двух десятилетий эксплуатации нет никаких идей по улучшению компоновки рефрижератора — настолько она удобна, продуманна и технологична. В определенной степени на этот результат повлияли и дискуссии между сотрудниками ОИЯИ и НПО «Гелиймаш», проходившие почти еженедельно. Например, в результате ряда обсуждений, инициатором которых выступал курировавший разработку от ОИЯИ В. А. Белушкин, была все же принята схема с очисткой, встроенной в холодильный цикл. Именно благодаря этому стала возможной работа криогенного комплекса нуклотрона без использования жидкого азота.

Главным отличием установки КГУ-1600/4,5 от установки КГУ-250/4,5 было применение парожидкостного детандера. Как известно, для повышения энергетической эффективности криогенных рефрижераторов и ожижителей большое значение имеет возможность замены связанного со значительными термодинамическими потерями в процессе дросселирования Джоуля–Томсона на более совершенный процесс адиабатного расширения в детандере. Идея замены дросселя на детандер в ступени окончательного охлаждения была предложена Ю. К. Пилипенко и А. Г. Зельдовичем и впервые реализована В. А. Белушкиным в цикле водородного ожижителя в 1965 г. в ОИЯИ. Для гелиевого ожижителя такую модернизацию впервые (1970 г.) удалось осуществить американскому инженеру С. Коллинзу. В обоих случаях были использованы детандеры поршневого типа.

В ходе работ стало очевидным, что созданные коллективом сотрудников НПО «Гелиймаш» гелиевые турбодетандеры по надежности далеко превосходят, а по КПД практически не уступают поршневым машинам. Однако неясно было, работоспособны ли они при окончании процесса расширения гелия в двухфазной парожидкостной области. Такой опыт в мировой практике отсутствовал. Оказалось, что для принятой конструкции турбодетандера каких-либо проблем нет: при первом же включении парожидкостного турбодетандера (1985 г.) была достигнута холодопроизводительность 1700 Вт, что на 50 % больше, чем в дроссельном режиме. В настоящее время в цикле с четырьмя турбодетандерами (три последовательно включенных газовых и один парожидкостный) холо-

допроизводительность рефрижератора КГУ-1600/4,5 составляет более 2000 Вт, причем жидкий азот в цикле не используется.

Полученный положительный опыт применения парожидкостного гелиевого турбодетандера на головном образце КГУ-1600/4,5 позволил в дальнейших работах по созданию нуклотрона полностью отказаться от расширительных машин поршневого типа. Это существенно сказалось на повышении надежности всей системы. Длительная эксплуатация показала абсолютное отсутствие каких-либо технических проблем, которых можно было ожидать в режимах работы системы при окончании процесса расширения в двухфазной парожидкостной области. Следует особо подчеркнуть, что мировой приоритет в таком важнейшем направлении как замена процесса дросселирования в криогенных установках на адиабатное расширение в детандерах как поршневого, так и турбинного типа закреплен за ОИЯИ.

Криогенная система нуклотрона начала создаваться в 1986 г., после того как в Дубне состоялась встреча делегации НПО «Гелиймаш» и руководителей проекта «Нуклотрон» директора ЛВЭ А. М. Балдина и главного инженера лаборатории Л. Г. Макарова. Был оформлен и согласован в деталях новый заказ на три установки КГУ-1600/4,5, криогенные трубопроводы, промежуточные сепараторы и другое вспомогательное оборудование. Именно с этого момента начались активные работы по созданию криогенного комплекса нового сверхпроводящего ускорителя. В короткие сроки были сооружены площадки обслуживания для агрегатов охлаждения, построены новые здания компрессорной и газгольдерной, смонтировано хранилище газообразного гелия. Общую координацию проектных и монтажных работ, проработку и согласование элементов схемы криогенного обеспечения нуклотрона осуществляла руководимая автором данной статьи группа сотрудников ОИЯИ. Для сокращения сроков проектные, строительные и монтажные работы велись одновременно, и разумное согласование всех этих дел было весьма хлопотным. Неизбежные на этом этапе просчеты отсутствовали только благодаря активнейшему лидеру группы — В. И. Липченко. Таким образом, ввод в действие криогенной системы нуклотрона состоялся чрезвычайно быстро — в 1991 г. В феврале 1992 г. был успешно испытан при гелиевой температуре первый квадрант нуклотрона — четвертая часть кольца ускорителя. В марте 1993 г. было впервые охлаждено до гелиевых температур полное кольцо и начата его эксплуатация.

В связи с созданием и запуском нового сверхпроводящего ускорителя ЛВЭ уже к 1991 г. имела четыре действующих установки КГУ-1600/4,5. Три из них, объединенные в единую систему криогенного обеспечения нуклотрона и способные работать на общий коллектор выдачи жидкого гелия потребителю, обеспечивали суммарную производительность 1500 л/ч. По существу это был крупнейший в стране завод по сжижению гелия, в котором крайне нуждалась отечественная гелиевая промышленность для поставки данного продукта высокой технологии на экспорт. Руководство Оренбургского гелиевого завода обратилось в ОИЯИ с предложением наладить совместное производство жидкого гелия и заправку автомобильных контейнеров вместимостью 40 000 л. После проведения подготовительных работ в июле-августе 1992 г. в качестве технологического эксперимента было заполнено два пробных контейнера для инофирм «Эр Продактс» и БОК, а затем была организована непрерывная их отгрузка. Газообразный гелий под давлением до 25 МПа доставлялся в Дубну по железной дороге в специальных агрегатах. Для заправки жидким гелием каждого контейнера требовалось пять-шесть вагонов сжатого газа. После доработки системы заправки жидким гелием в 1993 г. было заполнено жидким гелием и

отправлено на экспорт 32 автоконтейнера, т. е. получено более 1 млн л жидкого гелия в год. Такое дополнительное использование криогенной системы нуклотрона обеспечило приток внебюджетных финансовых средств, которые помогли завершить создание нового ускорителя в чрезвычайно трудных экономических условиях 1992–1993 гг. Один из редких примеров, когда наука сама смогла себя поддержать — профинансировать эксперименты.

Естественно, что параллельно с оживением гелия проводились и сеансы экспериментов на нуклотроне, со времени первого запуска их проведено уже 25. Общее время криостатирования кольца ускорителя превысило 9000 ч, причем отказов и простоев по вине криогенной системы практически не было. Этот результат достигнут благодаря не только высокой надежности машин и аппаратов криогенной системы, но и принятой гибкой системы резервирования, возможности замены любого из турбодетандеров без приостановки криостатирования кольца ускорителя. Важную роль играло и правильное применение так называемых «сателлитных режимов», когда циркуляция гелия в кольце осуществлялась за счет использования жидкости, ранее накопленной в сборниках установок КГУ-1600/4,5 и промежуточных сепараторах. Большое значение в повышении надежности системы имело внедрение нового винтового компрессора КАСКАД-80/25, разработанного в НПО «Казанькомпрессормаш» для системы криогенного обеспечения ускорительно-накопительного комплекса, создание которого планировалось в Институте физики высоких энергий (Протвино). Головной образец проходил испытания и сдачу межведомственной комиссии в составе криогенного комплекса нуклотрона.

В целом проект системы криогенного обеспечения нуклотрона отличается необычайно большим количеством новых технических идей и решений, никогда ранее не применявшихся в мировой практике. Криогенная система нуклотрона описывается в таких основных терминах, как быстроциклирующие сверхпроводящие магниты, криостатирование двухфазным парожидкостным потоком гелия, экстремально короткое время захлаживания системы, параллельное соединение по криоагенту сотен сверхпроводящих магнитов, парожидкостный гелиевый турбодетандер, винтовой гелиевый компрессор со степенью сжатия более 25 всего в двух ступенях, применение струйных аппаратов для циркуляции жидкого гелия и многое другое. Каждая из перечисленных характеристик — новый важный шаг в развитии криогенной гелиевой техники.

В заключение приведем высказывание А. М. Балдина. В 1969 г. он писал: «Очень редкий эксперимент в области физики высоких энергий не нуждается в большом участии специалистов-криогеников. Причем для целого ряда экспериментов такое участие является решающим. . . ». Последующее развитие научной школы криогеники в Лаборатории высоких энергий полностью подтвердило правоту этих слов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по физико-техническим основам криогеники / М. П. Малков, И. Б. Данилов, А. Г. Зельдович, А. Б. Фрадков. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике / Под ред. А. Г. Зельдовича. М.: Энергоиздат, 1982.
3. Аганов Н. Н. Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер — нуклотроне // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, вып. 3. С. 760.