

8. Нуклотрон

Нуклотрон – базовая установка ОИЯИ, предназначенная для получения многозарядных ионов (ядер) с энергией до 6 ГэВ на нуклон, пучков протонов, а также поляризованных дейтронов.

Ускоритель – нуклотрон был сооружен в течение 1987–1993 годов. Он создан на основе уникальной технологии сверхпроводящих магнитов, предложенной и развитой в Лаборатории высоких энергий. Конструкторские разработки, испытания и монтаж элементов нуклотрона целиком выполнены силами коллектива лаборатории.

Производство структурных элементов осуществлено в Центральных экспериментальных мастерских ОИЯИ. Результаты первых испытаний ускорителя были опубликованы в 1994 году^{1,2}.

Все проектные параметры машины в основном достигнуты. На практике продемонстрирована высокая надежность системы обеспечения жидким гелием и работающей при температуре около 4,5 К магнито-криостатной системы. В 1994 году были начаты физические эксперименты на внутренней мишени. К 1999 году закончено сооружение и проведены первые испытания системы медленного вывода пучков из нуклотрона. Первые физические эксперименты на выведенном пучке состоялись в марте 2000 года.

За период с марта 1993 года по февраль 2004 года было проведено 28 сеансов работы ускорителя. Проведенная в 1999 году модернизация криогенной системы позволила значительно увеличить длительность непрерывной работы ускорителя и улучшить технико-экономические показатели.

Дополнительно следует отметить, что ускоритель отличается превосходной гибкостью в управлении как при изменении энергии ускоренных частиц, так и при регулировании длительности «стола» магнитного поля.

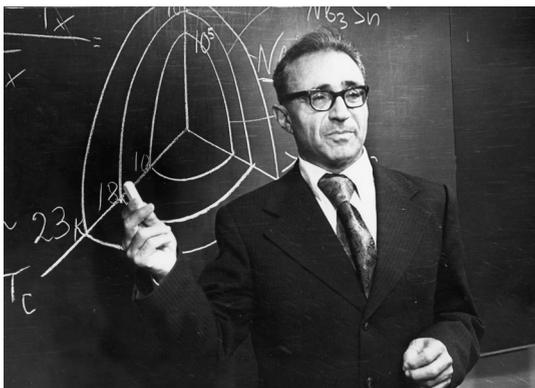
В ходе работ на нуклотроне апробирована новая технология сверхпроводящих магнитов и получен положительный опыт их применения в ускорителе. Полученные результаты будут весьма полезны при проектировании новых быстроциклирующих сверхпроводящих синхротронов для различных приложений.

9. ЛВЭ – научная школа криогеники

Становление криогеники в лаборатории целиком и полностью связано с именем профессора Александра Григорьевича Зельдовича. Он перешел на работу в ЛВЭ по инициативе В.И.Векслера в 1957 году, будучи уже известным ученым, доктором технических наук, участником завершенных к тому времени крупнейших проектов, оказавших существенное влияние на развитие промышленности в СССР. Результаты его труда при создании промышленных кислородных установок нового типа и разра-

¹ *Kovalenko A.D.* // «Status of the Nuclotron», EPAC'94, London, June 1994. Proceedings. 1995. V. 1. P. 161–164.

² *Baldin A.M.* et al. Cryogenic System of the Nuclotron – a New Superconducting Synchrotron // Advances in Cryogenic Engineering. New York, 1994. V. 39. P. 501–508.



А.Г.Зельдович

ботке метода низкотемпературной дистилляции для выделения дейтерия были удостоены высоких правительственных наград – Государственная премия СССР (1953) и Ленинская премия (1960).

При переходе из Института физических проблем (ИФП) в ЛВЭ ОИЯИ А.Г.Зельдович получил «в приданое» маленький лабораторный ожижитель водорода ВОС-3. В 1957 году он был запущен и стал базой для быстрого развития исследований по созданию жидководородных пузырьковых камер, сооружение ко-

торых было первой задачей, поставленной директором ЛВЭ В.И.Векслером перед вновь создаваемым коллективом специалистов по низким температурам.

В Дубне, сразу после образования криогенного отдела в ЛВЭ под руководством А.Г.Зельдовича, начал действовать специализированный семинар по низкотемпературной тематике¹.

Ко времени перехода на работу в ЛВЭ А.Г.Зельдович уже имел огромный опыт совместной работы с промышленностью. 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 ожижительных 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 криогенщиков ЛВЭ.

Началом работ по жидководородным камерам, по-видимому, следует считать организованный в октябре 1956 года по инициативе В.И.Векслера проезд группы сотрудников ИФП, уже имевших к тому времени значительный опыт работы при экзотически низких температурах конденсации водорода (около 20,4 К).

Первой была создана 40-сантиметровая камера. Под непосредственным руководством А.В.Белоногова в 1957–1958 годах шло ее проектирование, в 1958 году – сбор-

¹ Агапов Н.Н., Баландинов Н.И., Балушкин В.А., Голованов Л.Б., Зельдович А.Г., Хухарева И.С., Шишов Ю.А. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике / Под ред. А.Г.Зельдовича. М.: Энергоиздат, 1982.

ка и, наконец, в 1959 — запуск с наблюдением треков. В течение 1959—1967 годов было получено 240 тысяч стереофотографий, а затем прибор был передан Физико-техническому институту АН УССР. Этот первый опыт приобретался с великими трудностями. В корпусе камеры 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 прибор, по точности и надежности превосходящий все существовавшие в то время аналоги.

Это была 100-сантиметровая водородная камера. Ее разработка началась в 1960 году, и уже в 1964 году был осуществлен запуск и получены первые треки. На пучках синхрофазотрона ЛВЭ в период до 1971 года было сделано более 600 тысяч 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. 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.

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, то есть малая испаряемость.

За время работы было создано множество разных типов мишеней, успешно отработавших в физических центрах разных стран: 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 стриммерных камер и великое множество других. Только до 1972 года их было создано более десяти.

В 1981 году один из приборов — прецизионная установка с жидководородной мишенью, которая позволяла поддерживать количество водорода на пути частиц с точ-



Ю.К.Пилипенко

ностью 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: 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-литровые сосуды Дьюара и сегодня находятся в эксплуатации. Они серийно выпускались в Центральном экспериментальном мастерском ОИЯИ, причем было получено свидетельство на промышленный образец.

Интересной разновидностью мишенной стала «мишень — водородная струя». Работы по ее созданию возглавлял Ю.К.Пилипенко. Впоследствии он стал начальником криогенного отдела ЛВЭ.

С помощью такого типа мишени в конце 60-х и начале 70-х годов были получены важные физические результаты на ускорителях в ИФВЭ (Россия) и ФНАЛ (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.

Сверхпроводимость стала достоянием техники после того как в 1961 году 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 году И.Н.Гончаровым создана группа для исследований физических свойств сверхпроводящих материалов. Группа явилась первым зародышем для последующего бурного развития изучения и использования сверхпроводимости в ОИЯИ. Уже в 1965 году была получена премия ОИЯИ за цикл работ по исследованию сверхпроводящих сплавов и создание магнита с полем 8,5 Тл. К 1972 году разработан и пущен в эксплуатацию комплекс исследовательской аппаратуры: криостаты, ряд сверх-

проводящих магнитов с полем до 10 Тл, источники питания, системы контроля и измерения.

Был 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 в 1966 году образована группа, деятельность которой была направлена на практическое использование крупных устройств на основе сверхпроводимости. Уже в 1969 году 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 литров. С 1970 года велись работы по созданию сверхпроводящей магнитной системы «кольцетрон» – соленоид с внутренним диаметром 0,62 и длиной 2,5 метра, поле 2,0 Тл.

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 годов 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 1, в которой приведено количество жидкого гелия, произведенное в разные годы.

Необходимо отметить, что полученные знания оказали значительное влияние на технологию и конструкции рекордных по параметрам источников частиц, созданных впоследствии в ЛВЭ: в 1977 году 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 году введен в эксплуатацию источник «Полярис», с помощью которого ускорены поляризованные дейтроны до энергии 4,2 ГэВ на нуклон (руководитель Ю.К.Пилипенко).

Таблица 1. Производство жидкого гелия в ЛВЭ

Период	Объем, литр	Этап работ
1961 – осень 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

Ожижители водорода и гелия промышленностью в 50-х годах 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 сыграли начальник сектора В.А.Белушкин, заместитель начальника отдела Н.И.Баландиков и начальник группы В.В.Крылов.

Помимо сложностей, связанных с низкими температурами и чрезвычайной взрывоопасностью, при ожижении и хранении водорода существовала еще одна проблема, связанная с двумя возможными типами объединения атомов в молекулу. При антипараллельной ориентации ядерных спинов образуется молекула параводорода, при параллельной – ортоводорода. Ортопара – состав 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 ортопарапереход происходит самопроизвольно и сопровождается большим выделением тепла, приводящим к полному испарению жидкости даже при идеальной теплоизоляции. Впервые в СССР жидкий параводород был получен на ожижительной 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 ожижительной установкой стал ожижитель 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, которая впоследствии выпускалась серийно. На ожижителе ВО-2 в 1965 году впервые в мире была продемонстрирована возможность замены процесса дросселирования адиабатическим расширением в поршневом детандере. При этом производительность ожижителя 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 ВГО-1М производительностью 75 л/ч, первый детандерный, не требовавший встроенного водородного цикла, ожижитель МГО на 90 л/ч.

Начиная с 1975 года, 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 ожижителей 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, то есть 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 В.Г.Пронько и А.Г.Зельдович – руководители научных коллективов НПО «Гелиймаш» и ОИЯИ. Заложенная здесь основа во многом определила успешное создание в будущем не только криогеники для нуклотрона, но и способствовала успешному развитию ряда других криогенных комплексов.

С конца 70-х годов 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, продумана 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 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. Идея замены дросселя на детандер в ступени окончательного охлаждения была предложена (Ю.К.Пилипенко и А.Г.Зельдович) и впервые реализована (В.А.Белушкин) в цикле водородного ожижителя в 1965 году в

ОИЯИ. Для гелиевого оживителя 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 парожидкостной) холодопроизводительность 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*¹ начала создаваться в 1986 году, 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 вновь созданная группа сотрудников ОИЯИ. Для сокращения сроков проектные, строительные и монтажные работы велись одновременно, и разумное согласование всех этих дел было весьма хлопотно. 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 – 1991 год. В феврале 1992 года был успешно испытан при гелиевой

¹ *Аганов Н.Н.* Криогенные технологии в сверхпроводящем ускорителе релятивистских ядер – нуклотроне // ЭЧАЯ. 1999. Т. 30, вып. 3. С. 760.

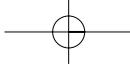
температуре первый квадрант нуклотрона — четвертая часть кольца ускорителя. В марте 1993 года было впервые охлаждено до гелиевых температур полное кольцо и начата его эксплуатация.

В связи с созданием и запуском нового сверхпроводящего ускорителя ЛВЭ уже к 1991 году имела четыре действующих установки КГУ-1600/4,5. Три из них, объединенные в единую систему криогенного обеспечения нуклотрона и работающие на общий коллектор выдачи жидкого гелия потребителю, обеспечивали суммарную производительность в количестве 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 им автомобильных контейнеров вместимостью 40000 л. После проведения подготовительных работ, в июле-августе 1992 года, 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 году было заполнено жидким гелием и отправлено на экспорт 32 автоконтейнера, то есть получено более одного миллиона литров 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 годов. Один из редких примеров, когда наука сама смогла себя поддержать — профинансировать эксперименты.

Естественно, что параллельно с оживением гелия проводились и сеансы экспериментов на нуклотроне, 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 «спутельных 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 выше характеристик – новый важный шаг в развитии криогенной гелиевой техники.

10. Вместо заключения

Из сказанного выше следует, что за 50 лет существования ОИЯИ коллективу специалистов Лаборатории высоких энергий удалось успешно провести целый ряд исследований и получить выдающиеся научные результаты по изучению фундаментальных свойств и структуры элементарных частиц и атомного ядра. Совокупность этих результатов, а также результатов, полученных в последующие годы, внесут заметный вклад в развитие теории сильных взаимодействий и создание современной теории атомного ядра.

Успех ЛВЭ в получении новых важных физических результатов в экспериментах на крупнейших в мире ускорителях всегда приходил благодаря использованию предложенных физиками и инженерами лаборатории новых идей и методических разработок, многие из которых соответствовали мировому уровню, а также за счет широкого использования в экспериментах новейших достижений техники.

Проводимые в ЛВЭ фундаментальные исследования в области релятивистской ядерной физики, помимо чисто научных исследований, дают также возможность решать важные прикладные задачи.

Выполнение коллективом Лаборатории высоких энергий экспериментальной программы успешно продолжается и в настоящее время.

