

КРИОГЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ УСКОРИТЕЛЕ
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР —
НУКЛОТРОНЕ

Н.Н.Аганов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	761
ОСОБЕННОСТИ КРИОСТАТИРОВАНИЯ ЖИДКИМ ГЕЛИЕМ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ НУКЛОТРОНА	763
КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА КОЛЬЦА НУКЛОТРОНА	767
ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВНЕШНЕЙ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ	782
ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РАБОТЕ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ	791
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	801
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	802

КРИОГЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ УСКОРИТЕЛЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДЕР — НУКЛОТРОНЕ

Н.Н.Аганов

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Нуклотрон — первый синхротрон со сверхпроводящими магнитами, специально созданный для ускорения ядер и тяжелых ионов. Этот ускоритель, предназначенный для получения пучков релятивистских частиц с энергией до 6 ГэВ на нуклон, был пущен в эксплуатацию шесть лет назад в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне.

Криогенная система нуклотрона основана на трех гелиевых рефрижераторах, каждый из которых имеет номинальную холодопроизводительность 1600 Вт при температуре 4,5 К. Рефрижераторы охлаждают кольцевой ускоритель с периметром 251,5 м и «холодной» массой около 80 тонн. Кольцо ускорителя состоит из 96 дипольных магнитов длиной 1,5 м и 64 квадрупольных линз длиной 0,45 м. Магнитное поле до 2 Тл формируется железным сердечником и обмоткой возбуждения из полого сверхпроводника, внутри которого течет жидкий гелий. Кроме того, имеется 28 корректирующих магнитов длиной 0,31 м с 3 или 4 типами обмоток в каждом, 12 охлаждаемых тоководов с током 6 кА, 234 токовода с током 100 А для корректирующих обмоток, а также около 600 датчиков криогенной температуры.

Дан обзор новых технических решений, впервые примененных в проекте криогенной системы нуклотрона.

The Nuclotron is the first superconducting synchrotron intended for acceleration of high energy nuclei and heavy ions. The accelerator designed to provide beams of relativistic particles with energies up to 6 GeV per nucleon, was put into operation six years ago at the Joint Institute for Nuclear Research in Dubna near Moscow.

Cryogenic system of the Nuclotron includes three helium refrigerators. Each of them has a nominal capacity of 1600 W at 4.5 K. These refrigerators cool the accelerator ring, which has a perimeter of 251,5 m and a «cold» mass of about 80 tons. The ring of the Nuclotron comprises 96 dipole magnets 1.5 m long and 64 quadrupole lenses 0.45 m long. The magnetic field of about 2 T is formed with a «cold» iron yoke and a hollow superconductor with the two-phase helium flows inside. There are 28 correctors 0.31 m long with 3 or 4 types of windings in each, twelve 6 kA helium-cooled current leads, 234 leads of 100 A current for correcting windings, and also about 600 sensors of cryogenic temperatures.

The experience of using novel technical solutions in the design of the Nuclotron cryogenic system is described.

ВВЕДЕНИЕ

Проект развития базовых установок Лаборатории высоких энергий ОИЯИ предусматривал последовательное создание новых ускорителей — СПИН, нуклотрон и супернуклотрон [1–3] — с использованием в них как основных элементов магнитов со сверхпроводящими обмотками, охлаждаемыми до температуры жидкого гелия. Такие магниты по сравнению с «теплыми», работающими при температуре окружающей среды, имеют ряд преимуществ: во-первых, значительное уменьшение капитальных затрат и металлоемкости; во-вторых, существенное снижение эксплуатационных затрат, основную долю которых определяет расход электроэнергии. Нельзя не отметить и многократное уменьшение габаритов магнитной системы, позволяющее изготовить практически все ее элементы на простом станочном оборудовании средних размеров. Это дает высокую точность и, в конечном итоге, хорошее качество магнитного поля. Большое значение имеет также и возможность изготовления таких не крупногабаритных изделий в институте, т.е. без размещения дорогостоящих заказов в промышленности.

Использование сверхпроводимости связано с необходимостью охлаждать ускоритель до весьма низких температур (около 4,5 К), получаемых только при помощи жидкого гелия. Для этого нужны сложные криогенные системы большой холодопроизводительности. Они требуют значительных капиталовложений. Как показал опыт строительства нуклотрона, капитальные затраты на создание таких криогенных систем достигают 30 % общих затрат на ускоритель. К тому же соответствующее криогенное оборудование чаще всего промышленностью выпускается в виде единичных, единственных в своем роде образцов. Естественно, что в отсутствие серийного производства трудно достичь уровня работы «под ключ»: поставляемое оборудование во многих случаях требует значительных усилий по доработке, доводке, исследованию и оптимизации режимов, а также взаимосогласованию машин и аппаратов, приобретаемых у различных заводов-изготовителей. Более того, ввиду экономической и технической целесообразности значительная часть криогенного оборудования разрабатывалась и изготавливалась своими силами.

В связи с этим в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ традиционно развивалось направление по разработке и исследованию криогенных технологий применительно к создаваемым сверхпроводящим ускорителям. Часть полученных результатов изложена в настоящем обзоре. Главный из них — создание и запуск криогенной системы нуклотрона [54–56] — первого на территории России и третьего в мировой практике действующего ускорителя со сверхпроводящими магнитами: в числе более ранних [26,31] известны лишь Tevatron (США, 1983) и HERA (Германия, 1991).

Нуклотрон, основные параметры которого приведены в табл. 1, предназначен для ускорения тяжелых ядер и многозарядных ионов. Он сооружен в

ЛВЭ ОИЯИ в период 1987–1992 гг. Проектная энергия заряженных частиц с отношением заряда к массе $z/A=1/2$ составляет 6 ГэВ/нуклон. Параметры ускорителя и программа физических исследований на нем были представлены в [4,5].

Таблица 1. Основные параметры нуклотрона

Проектная энергия частиц, ГэВ/нуклон	6
Периметр, м	251,5
Максимальное магнитное поле, Тл	2,0
Запасенная энергия, МДж	2,35
Температура, К	4,5
Общий статический теплоприток, кВт	1,75
Динамическое тепловыделение при 0,5 Гц, кВт	2,9
Частота повторения циклов, Гц	до 1,0
Суммарная «холодная» масса, т	80
Время охлаждения до рабочей температуры, ч	80

В соответствии с планами развития ускорительного комплекса ЛВЭ кольцо нуклотрона размещено в цокольном этаже синхрофазотрона (рис.1). Периметр ускорителя составляет 251,5 м. Кольцо состоит из 96 полутораметровых дипольных магнитов, 64 квадрупольных линз длиной по 0,45 м, 28 мультипольных корректоров (0,31 м) с тремя или четырьмя типами обмоток в каждом. Питание основных магнитов и вывод энергии обеспечивают 12 токовыводов на 6 кА, охлаждаемых холодными парами гелия. Токовыводы на 100 А (234 шт.) питают корректирующие обмотки. Кроме того, имеются специальные устройства для инъекции пучка, ускорения, диагностики и вывода. Для измерения температур по периметру кольца установлено около 600 криогенных термометров.

Для криостатирования кольца ускорителя от системы криогенного обеспечения требовалось выполнение следующих условий:

1) Холодопроизводительность на гелиевом температурном уровне в рабочем режиме от 1750 до 4620 Вт, в том числе:

а) компенсация теплопритоков из окружающей среды 1750 Вт;

б) компенсация динамических тепловыделений до 2870 Вт при частоте изменения магнитного поля 0,5 Гц.

2) Производство дополнительно до 100 л/ч жидкого гелия, отводимого из криостата для охлаждения токовыводов.

3) Охлаждение магнитной системы весом около 80 тонн от температуры окружающей среды до 4,5 К за период не более 80–100 часов.

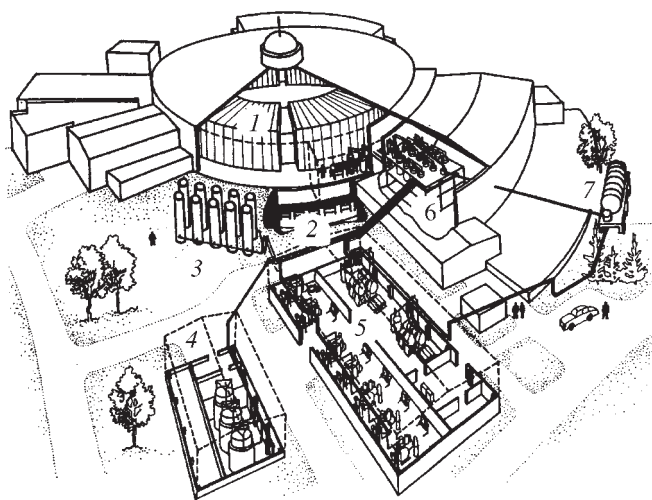


Рис.1. Общий вид системы криообеспечения нуклотрона: 1 — синхрофазотрон; 2 — кольцо сверхпроводящих магнитов нуклотрона; 3 — ресиверы сжатого гелия; 4 — здание газгольдерной; 5 — компрессорный цех; 6 — блоки охлаждения установок КГУ-1600/4,5; 7 — танк жидкого гелия

1. ОСОБЕННОСТИ КРИОСТАТИРОВАНИЯ ЖИДКИМ ГЕЛИЕМ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ НУКЛОТРОНА

Криоэгенные системы отводят тепло, выделяющееся в обмотках сверхпроводящих магнитов при изменении магнитного поля и при торможении рассеянных ускоренных частиц, а также тепло, притекающее из окружающей среды через теплоизоляцию, токовводы, опоры и подвески.

Весь комплекс проблем, возникающий при создании подобных систем, логически разделяется на две части. Одна из них связана с самим криостатируемым объектом — сверхпроводящей магнитной системой ускорителя. Другая — с производящим холод рефрижератором.

В первой части наиболее важны такие проблемы: равномерное распределение низкой температуры по периметру, эффективность использования холода (минимизация теплопритоков и тепловыделений), безопасность эвакуации энергии магнитного поля и аварийной порчи вакуума в теплоизоляционном кожухе. Во второй части важны энергетическая эффективность получения холода, многорежимность, высокий уровень надежности.

Следует отметить, что каждое из перечисленных условий находится в технических противоречиях с другими. Например, в интересах повышения

надежности приходится отказываться от использования более эффективных поршневых машин и применять имеющие сравнительно низкий к.п.д. винтовые компрессоры и детандеры турбинного типа, безопасность эвакуации энергии требует большего количества токовводов, а это существенно увеличивает теплопритоки и т.д. Поэтому задача создания криогенной системы нуклотрона состояла не только в том, чтобы продвинуться вперед в решении каждой из перечисленных проблем, но и достичь в системе в целом оптимального компромисса между ними в рамках существующей технико-экономической ситуации.

При криостатировании сверхпроводящих ускорителей различают два способа отвода тепла:

1) Традиционный метод криостатирования сверхпроводящих магнитов с погружением их в кипящий гелий. В сильно протяженных системах он неприменим: ввиду чрезвычайно малой плотности жидкого гелия становится невозможным поддерживать его одинаковый уровень в разных точках криостата, т.к. по периметру системы всегда существует некоторая разность давлений. Этот способ можно использовать только для сравнительно компактных систем.

2) Другой способ, при котором тепло отводится путем циркуляции криоагента по расположенным внутри или около обмоток каналам, применяется повсеместно. Его дополнительное преимущество — существенное уменьшение количества гелия, требующегося для заполнения системы. Это снижает опасность повышения давления гелия при самопроизвольных переходах магнитов из сверхпроводящего в нормальное состояние и в случаях разгерметизации теплоизолирующего вакуумного кожуха.

Принципиально существуют две разновидности циркуляционных систем криостатирования, отличающиеся фазовым состоянием криоагента. В одних подвод тепла к циркулирующему гелию не вызывает фазового перехода, в других этот процесс происходит при кипении парожидкостного потока. До создания нуклотрона неоднократно высказывались опасения, что при использовании двухфазной парожидкостной смеси может возникать неустойчивость режима течения, которая характеризуется пульсирующим изменением расхода криоагента, его давления и температуры, или блокированием некоторых из параллельных каналов «паровыми пробками».

Из-за этих опасений в описанных ранее системах сверхпроводящих ускорителей отвод тепла осуществлялся, как правило, к однофазному потоку жидкого гелия. Поскольку температура такого потока при этом возрастает (она не должна повышаться более чем на несколько десятых градуса из-за снижения критической плотности тока в сверхпроводящих обмотках), применяются специальные меры для ее понижения. Низкую температуру поддерживают путем теплообмена внутри магнита между жидким и кипящим двухфазным гелием или после каждой группы магнитов устанавливают теплообменники.

Чтобы исключить промежуточный теплообмен и тем самым значительно упростить схему криостатирования и конструкцию магнитной системы, можно применять многократную циркуляцию жидкого гелия посредством специальных насосов. В этом направлении известен целый ряд работ [6, 7], в том числе и наше предложение [8–10] — использовать в качестве насоса жидкого гелия струйные аппараты. Однако способ многократной циркуляции широкой практической реализации не получил, ввиду необходимости существенно расширять каналы в магнитах во избежание значительного роста гидравлического сопротивления из-за увеличения расхода.

Наш анализ всевозможных вариантов схем криостатирования показал, что имеется ряд причин, по которым все-таки предпочтительнее осуществлять отвод тепла непосредственно к кипящему гелию. Наиболее существенная из них — возможность получения при прочих равных условиях более низкой и равномерно распределенной по периметру температуры магнитов. Кроме того, возможные локальные тепловыделения в случае кипящего гелия сравнительно менее опасны, т.к. температура не может повыситься, пока не испарится вся жидкость.

Именно из этих соображений для вновь создаваемых в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ ускорителей — модельного синхротрона СПИН и нуклотрона — отдавалось предпочтение криостатированию путем отвода тепла непосредственно к кипящему гелию. Концепция криостатирования первого из них основывалась на применении «погружного» способа. Однако уже и при создании ускорителя СПИН стало ясно, что его 60-метровый периметр — предельный случай применения такого способа [11], и в дальнейшем для нуклотрона, имеющего периметр более 250 метров, необходимо перейти на циркуляционный способ. Ряд дополнительных экспериментальных исследований, как на одиночных магнитах [12], так и с группами магнитов, показал, что опасения, связанные с применением потока кипящего гелия, были преувеличены. Между тем допустимость подвода к парожидкостному потоку сравнительно большого количества тепла позволяет резко уменьшить количество гелия, которое необходимо прокачивать через магнитную систему, и, как следствие, отказаться от каких бы то ни было промежуточных охладителей и специальных циркуляционных устройств. В результате для нуклотрона, впервые для аналогичных систем, был выбран способ криостатирования сверхпроводящих магнитов посредством циркуляции парожидкостного потока гелия.

Особенности работы при гелиевых температурах в существенной мере ужесточают требование высокой термодинамической эффективности. Действительно, даже при идеальном проведении всех процессов затраты энергии на получение холода достаточно велики. Как известно, минимальные энергозатраты на единицу вырабатываемого холода определяются соотношением

$$\varepsilon = |1 - T_{0,c} / T|,$$

где $T_{0,c}$ — температура окружающей среды; T — температура криостатирования.

Например, при $T = 4,5$ К энергозатраты составляют 64 Вт на 1 Вт холода. С учетом же пока еще довольно низкого (10–20 %) к.п.д. криогенных гелиевых рефрижераторов они достигают 320–640 Вт/Вт [13]. Получать и распределять холод необходимо очень экономно. Чтобы снизить затраты энергии, современные криогенные установки, как правило, строятся из сложных каскадов трех-пяти ступеней адиабатного расширения газа на различных температурных уровнях. В большинстве случаев процесс дросселирования Джоуля — Томсона для производства холода в ступени окончательного охлаждения заменен расширением в детандере. В связи с большими затратами на получение холода при разработке элементов нуклотрона большое внимание уделено борьбе с теплопритоками по мостам и опорам, по тоководам, в трубопроводах, тщательно исследованы динамические тепловыделения в магнитах, возникающие из-за переменного тока в обмотках.

Высокая эффективность должна быть обеспечена не в одном, а в различных режимах работы криогенной системы. Из-за большой охлаждаемой массы и протяженности нуклотрона его охлаждение до рабочих температур требует довольно много времени. В ходе пускового периода используется весьма широкий спектр режимов: охлаждение, режим сжижения гелия, рефрижераторный режим и различные их сочетания. Кроме того, в зависимости от настройки ускорителя (энергии частиц и частоты изменения токов магнитов) требуется различная холодопроизводительность. Исследование переменных режимов гелиевых рефрижераторов впервые проводилось нами в [14,15] и постоянно развивалось в ходе создания нуклотрона.

Из-за больших затрат, сложности и трудоемкости процессов ввода в рабочий режим всей системы, в качестве максимальной задачи, было бы желательно постоянно поддерживать низкие температуры всех элементов ускорителя. Во всяком случае, рефрижераторные установки должны обладать таким уровнем надежности, который обеспечивает непрерывное поддержание рабочих температур магнитной системы не менее чем 4000–5000 часов в году. В случае отказов каких-либо машин и аппаратов система криогенного обеспечения должна предусматривать возможности их ремонта или замены без остановки всего комплекса. Такие возможности дает применение в системе некоторого заранее запасенного количества жидкого гелия или его подача от параллельно работающего ожижителя гелия. Соответствующие этому случаю так называемые «спутниковые» режимы рассмотрены в [16].

2. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА КОЛЬЦА НУКЛОТРОНА

Общее представление о принципиальной схеме криостатирования ускорителя [17–19] дает рис.2. В основу криогенной системы положены три агрегата охлаждения КГУ-1600/4,5. Каждый из них состоит из трех газовых турбодетандеров $T1$, $T2$ и $T3$, ванны жидкого азота, двух- и трехпоточных

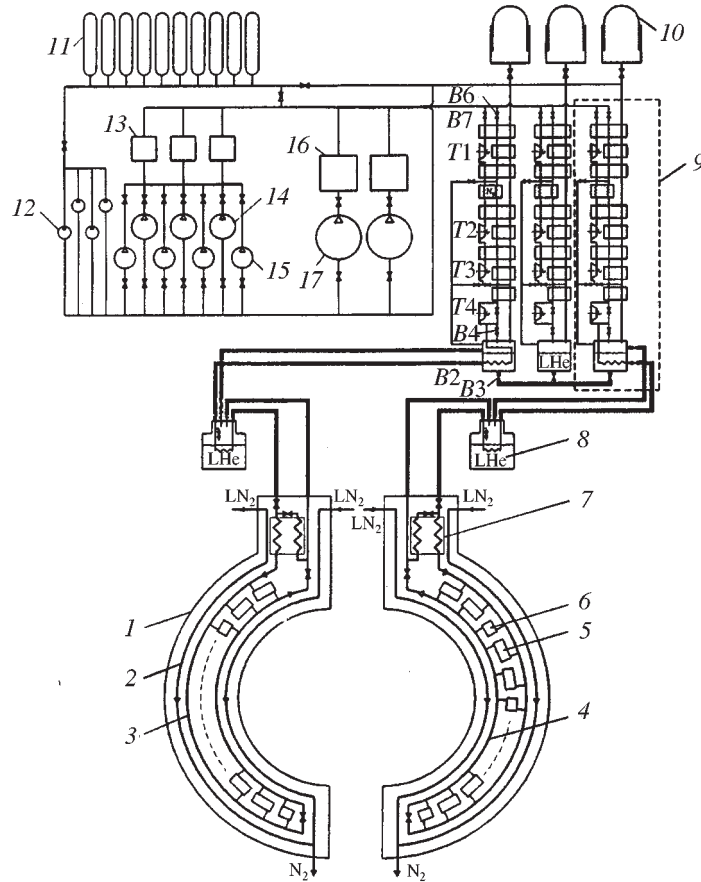


Рис.2. Принципиальная схема криогенной гелиевой системы нуклотрона: 1 — вакуумный кожух; 2 — теплозащитный экран; 3 — коллектор прямого потока; 4 — коллектор обратного потока; 5 — дипольный магнит; 6 — квадрупольный магнит; 7 — переохладитель; 8 — сепаратор; 9 — блок охлаждения КГУ-1600/4,5; 10 — газгольдер; 11 — ресивер; 12 — поршневой компрессор 1ВУВ-45/150; 13 — блок осушки; 14 — поршневой компрессор 305НП-20/30; 15 — поршневой компрессор 2ГМ4-12/31; 16 — блок маслоочистки МО-800; 17 — винтовой компрессор «Каскад-80/25»

теплообменников, парожидкостного турбодетандера *T4* и сборника жидкого гелия объемом около 1000 л. Сжатый гелий после компрессоров, пройдя очистку от масла и влаги, на входе в каждый агрегат охлаждения КГУ-1600/4,5 разделяется на две части, одна из которых — турбодетандерный поток после вентиля *B7* расширяется последовательно в трех турбодетандерах с давления 2,5 МПа до 0,13 МПа. Основной поток подается через вентиль *B6*, охлаждается за счет теплообмена с обратным потоком гелия до температуры 5,5–8,5 К и расширяется в парожидкостном турбодетандере с давления 2,5 МПа до 0,13–0,17 МПа. В дальнейшем одна часть основного потока отводится в сборник жидкого гелия (вентиль *B4*), а другая часть (вентиль *B2*) подается по теплоизолированному трубопроводу в промежуточный сепаратор (8), после охлаждения в котором направляется в коллектор (3) прямого потока криостатной системы нуклотрона.

Каждая из двух установок КГУ-1600/4,5 подключена к своему полукольцу. Третья установка — резервная. Она предназначена для работы в ожигательном режиме с подачей жидкого гелия вентилем *B3* по теплоизолированному трубопроводу в любую из установок, подключенных непосредственно к полукольцу ускорителя. При подаче жидкого гелия от резервной КГУ-1600/4,5 каждая из двух оставшихся может быть переведена в «сателлитный» режим. Это обеспечивает продолжение циркуляции необходимого количества жидкого гелия на соответствующем полукольце нуклотрона в течение останова турбодетандеров, возможных вследствие их выхода из строя или во время замены по другим причинам. Кроме того, подключение резервной КГУ-1600/4,5 обеспечивает при необходимости повышение холодопроизводительности всей системы в целом.

В криогенной системе нуклотрона задействованы компрессоры различных типов и модификаций. Основой системы компримирования служит винтовой компрессорный агрегат (17 на рис.2) «Каскад-80/25» производства казанского объединения АО «НИИТУРБОКОМПРЕССОР» [21]. Для ступенчатого регулирования расхода сжатого гелия и резервирования используются поршневые компрессоры меньшей производительности: 3О5НП-20/30 и 2ГМ4-12/31 (14), (15). Закачка испарившегося гелия в ресиверы осуществляется небольшими поршневыми компрессорами 1ВУВ-45/150 (12), способными работать при более высоком давлении на нагнетании.

Основные технические характеристики применяемых компрессоров даны в табл. 2. К настоящему времени на криогенной системе нуклотрона установлен один агрегат «Каскад-80/25», вторую машину планируется ввести в действие в 2000 году. Суммарная производительность компрессоров, расположенных в машинном зале нуклотрона, установленная мощность и расход охлаждающей воды составляют 12240 Нм³/ч, 2,6 МВт и 155 м³/ч. После того как будет задействован второй агрегат «Каскад-80/25», эти значения увеличатся, соответственно, до 17280 Нм³/ч, 3,85 МВт и 215 м³/ч.

Таблица 2. Основные технические характеристики компрессоров криогенной системы нуклотрона

Характеристики	«Каскад-80/25»	305НП-80/25	2ГМ-12/31	1ВУВ-45/150
Количество, шт.	2	3	4	4
Тип	Винт.	Поршн.	Поршн.	Поршн.
Производительность (при условиях всасывания), м ³ /ч	5040	1200	840	45
Давление нагнетания, МПа	2,5	3,0	3,1	15,0
Установленная мощность электродвигателя, кВт	2 × 630	200	160	22
Напряжение электродвигателя, В	6000	380	380	380
Число ступеней сжатия	2	3	3	3
Число оборотов компрессора, об./мин	2970	500	740	620
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	60	15	7,2	1,5

Винтовой компрессорный агрегат «Каскад-80/25» имеет на выходе систему очистки от масла и влаги, основным элементом которой является блок МО-800 (16) производства НПО «Криогенмаш» [22]. Окончательная очистка от паров масла осуществляется в этом блоке посредством двух угольных адсорберов, каждый из которых рассчитан на длительность работы 2500 часов. По истечении указанного времени адсорберы переключаются, и пришедший в негодность уголь заменяется новым. Очистка от влаги осуществляется в двух цеолитовых адсорберах блока МО-800. Каждый из них рассчитан на работу в течение 10 суток, а затем подвергается регенерации. Очистка от влаги сжатого гелия, получаемого от поршневых компрессоров, производится в трех параллельно включенных блоках осушки (13). Система хранения газообразного гелия рассчитана на 6000 Нм³. Она состоит из 10 ресиверов (11) с объемом по 20 м³ и рабочим давлением 3,0 МПа. Кроме того, имеются три маслonaполненных газгольдера (10) с объемом по 20 м³. Основная работа производится только на одном из них, два других используются для испытаний на герметичность отдельных компрессоров после их ремонта.

Естественно, работа с газгольдером такого небольшого объема на описываемой довольно крупной системе криогенного обеспечения на первом этапе вызывала некоторые затруднения. Однако мы не посчитали возможным пойти по такому пути, как, например, на установке «Токамак-15», где в аналогичной по масштабу криогенной системе [23] использован маслonaполненный газ-

гольдер объемом 1000 м^3 . Во-первых, весьма значительны капитальные затраты как на такое устройство, так и на здание, где оно должно размещаться. Во-вторых, как это отмечал П.Л. Капица [24] еще в 1936 г. при описании его первого детандерного ожижителя гелия, воздух через масло газгольдера имеет возможность диффундировать в систему. При большом объеме газгольдера загрязнение гелия воздухом из окружающей среды могло оказаться весьма значительными. В некоторой степени функцию газгольдера выполняет и подсоединенный к обратному потоку ресивер емкостью 100 м^3 , используемый в моменты запуска агрегата «Каскад-80/25».

На рис.3 показан план размещения оборудования системы криогенного обеспечения нуклотрона. Машины и аппараты располагаются в трех корпусах: в корпусе синхрофазотрона на имевшихся уже площадях и в двух новых, специально построенных, — корпусе компрессорной и корпусе газгольдерной. Часть оборудования размещена на прилегающей к корпусам территории. В частности, вблизи корпуса компрессорной располагается система хранения и раздачи жидкого азота (34) и (35), неподалеку установлены ресиверы (21)–(30) для хранения газообразного гелия.

Кольцевая магнитокриостатная система [4,5,18,19]. Как показано на рис.2, каждый из дипольных и квадрупольных магнитов питается жидким гелием из коллектора, проложенного по всей длине ускорителя. В расчетном режиме из сверхпроводящего кабеля гелий выходит с массовым паросодержанием $\sim 0,35$ и далее охлаждает железное ярмо соответствующего магнита, после чего с паросодержанием до $0,9$ отводится в обратный коллектор.

Элементы магнитной оптики ускорителя, а также гелиевые коллекторы прямого и обратного потоков размещены в кольцевом криостате, образуемом горизонтальными цилиндрическими участками из нержавеющей стали. Кроме того, по всему периметру кольцевого криостата имеется теплозащитный экран, охлаждаемый жидким азотом. Цилиндрические участки имеют длины, соответствующие длинам магнитов, и в сборе образуют единые магнитокриостатные блоки, которые соединяются между собой посредством сильфонных развязок. Статический теплоприток из окружающей среды к магнитокриостатному блоку диполя составляет $6,6 \text{ Вт}$, квадруполь — $5,8 \text{ Вт}$.

В магнитокриостатном блоке (рис.4) магнит закрепляется посредством восьми тяг (9) так, что после охлаждения до рабочих температур положение его магнитной оси в пространстве не изменяется. К торцам вакуумного кожуха (8) с помощью накидных фланцев, позволяющих поворачивать блок вокруг оси, присоединены гибкие сильфонные элементы (1), которые дают возможность взаимного перемещения блоков, что необходимо для юстировки. Конструкция устанавливается на имеющую юстировочное приспособление подставку (15). Вакуумные кожухи блоков соединяются разъемными муфтами (5). Они обеспечивают доступ к соединениям электрических и криогенных коммуникаций, расположенным в коротких промежутках между магнитами.

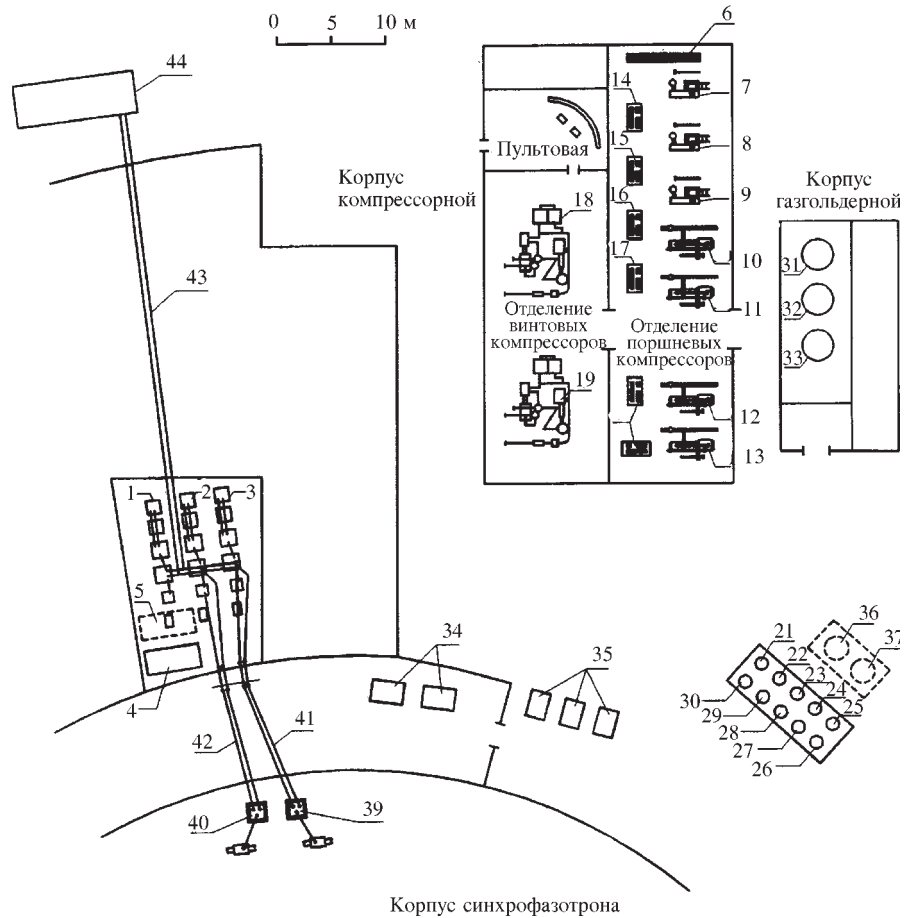


Рис.3. План размещения основного оборудования криогенной системы нуклотрона: 1-3 — гелиевые установки КГУ1600/4,5; 4-5 — блоки очистки МО-800; 6 — силовые электротехнические шкафы; 7-9 — поршневые компрессоры 3О5НП-20/30; 10-13 — поршневые компрессоры 2ГМ4-12/31; 14-17 — закачные поршневые компрессоры 1БУВ-45/150; 18-19 — винтовые компрессорные агрегаты «Каскад-80/25»; 21-30 — резервуары хранения сжатого газа; 31-33 — газгольдеры; 34,35 — танки жидкого азота; 36,37 — резервуары на обратном потоке; 38 — насосы для подачи охлаждающей воды; 39,40 — промежуточные сепараторы жидкого гелия; 41-43 — трубопроводы жидкого гелия; 44 — танк жидкого гелия

Имеется три типа магнитокриостатных блоков: дипольных, фокусирующих и дефокусирующих магнитов. Каждый блок перед установкой в кольцо ускорителя подвергнут комплексной проверке (гидравлическое сопротивление

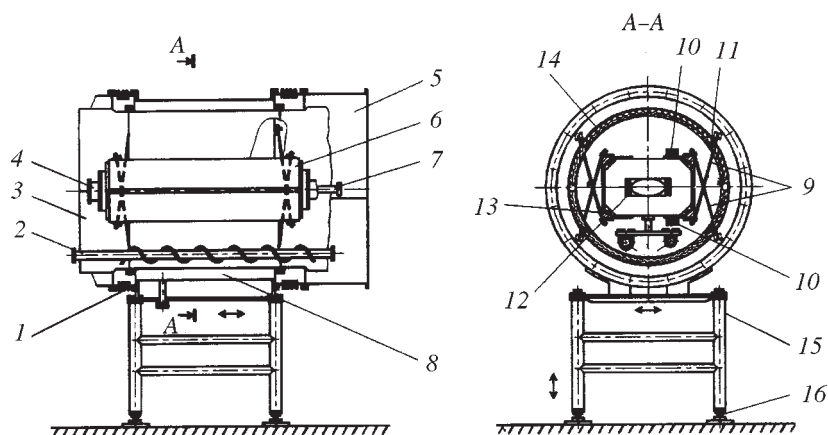


Рис.4. Магнитокриостатный блок нуклотрона: 1 — сильфон; 2 — гелиевые коллекторы; 3 — теплоизолирующий экран; 4 — вакуумная камера ионопровода; 5 — муфта; 6 — железное ядро; 7 — трубопровод жидкого азота; 8 — вакуумный кожух; 9 — тяга; 10 — сверхпроводящий кабель электрической связи магнитов; 11 — тепловой мост; 12 — обмотка; 13 — трубка для охлаждения ядра; 14 — суперизоляция; 15 — подставка; 16 — домкрат

ние, электрическая прочность, магнитные измерения и др.) при температуре жидкого гелия на специальных стендах. В ходе окончательной сборки кольца производилась стыковка лишь ограниченного количества элементов: гелиевых коллекторов (2), трубопровода жидкого азота (7), вакуумной камеры (4) и разъемных муфт (5).

Все магниты ускорителя соединяются по группам в три электрические цепи: *B*, *BR* — отклоняющие магниты, *F* — фокусирующие и *D* — дефокусирующие магниты. В каждом блоке помимо электрической цепи собственного магнита имеются транзитные кабели электрической связи магнитов других групп (рис.5). Для электрического соединения соседних блоков в каждом промежутке между магнитами выполняются четыре спая сверхпроводящих кабелей. Очень важно, что все гелиевые каналы блока соединены с гелиевыми коллекторами внутри блока, и эти соединения проверены на герметичность в ходе предварительных тестовых низкотемпературных испытаний. Такая технология исключает гелиевые течи в окружающее магниты вакуумное пространство с большой степенью вероятности.

Так же, как и в установке СПИН [3,32], в нуклотроне использованы простые и экономичные магниты типа «Дубна», в которых поле формируется посредством железного ядра. Они характеризуются минимальным расходом сверхпроводника, хотя и ограничены по условиям насыщения железа величи-

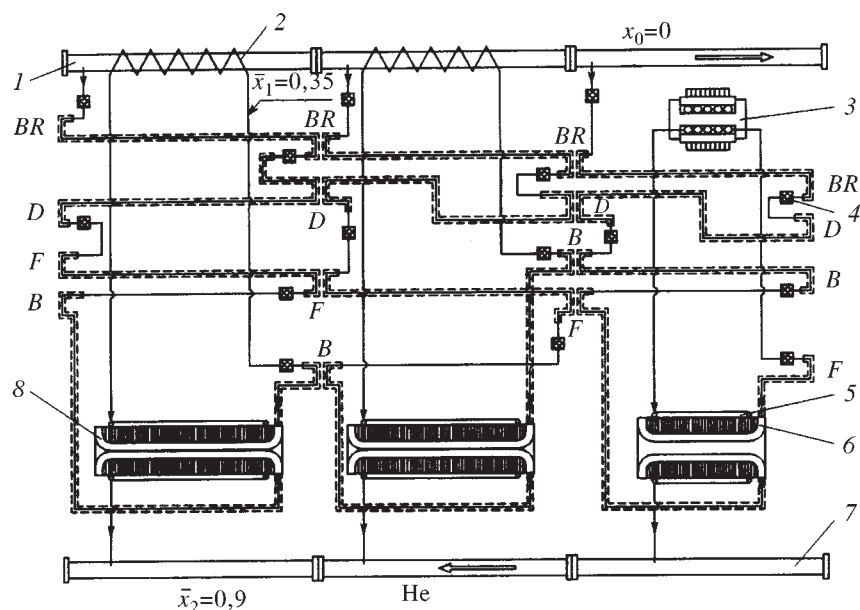


Рис.5. Схема электрических и гелиевых коммуникаций магнитокриостатных блоков: 1 — питающий коллектор; 2 — трубка для охлаждения коллектора; 3 — мультипольный корректор; 4 — металлокерамическая электроизоляционная трубка; 5 — трубка для охлаждения железного ярма; 6 — обмотка квадруполя; 7 — отводящий коллектор; 8 — обмотка диполя; x — массовое паросодержание потоков гелия

ной индукции магнитного поля (до 2,3 Тл). Основные элементы таких магнитов — сверхпроводящая обмотка и железное ярмо, обеспечивающее магнитное поле высокой однородности и воспринимающее магнитные силы, действующие на обмотку. Однако в отличие от установки СПИН конструкция магнитов нуклотрона предусматривает криостатирование более прогрессивным циркуляционным способом. Сверхпроводящий кабель создан на основе мельхиоровой трубки диаметром 5x0,5 мм, внутри которой циркулирует парожидкостный поток гелия. На эту трубку спирально намотан сверхпроводящий кабель, представляющий собой медную проволочную матрицу диаметром 0,5 мм, содержащую внутри 1045 тонких ниобиево-титановых волокон толщиной 10 мкм (рис.6). Номинальный ток такого сверхпроводящего кабеля — 6 кА, переход магнитов в нормальное состояние наблюдается при подаче тока около 7,5 кА.

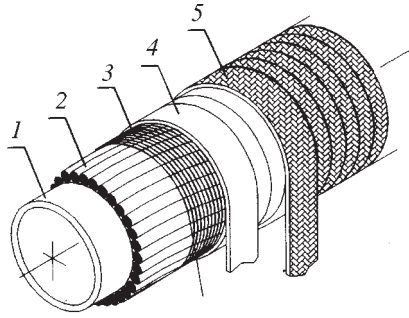


Рис.6. Конструкция сверхпроводящего кабеля нуклотрона: 1 — мельхиоровая трубка; 2 — сверхпроводящая проволока; 3 — нихромовая проволока; 4 — каптоновая лента; 5 — стеклолента

Поперечное сечение дипольных магнитов и квадрупольных линз приведено на рис.7. Магниты имеют разборную конструкцию. Железное ярмо диполей состоит из двух соединенных посредством болтов симметричных частей, смонтированных из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Железо квадруполей имеет четыре симметричные части. Основные характеристики магнитов приведены в табл. 3. На рис.8 представлена зависимость суммы статического теплопритока и динамических тепловыделений полного кольца от режима работы ускорителя. Потребная холодопроизводительность изменяется от величины статического теплопритока (1750 Вт) при редком следовании импульсов тока в магнитах до 4620 Вт при частоте 0,5 Гц.

В [33] содержатся подробные данные магнитных измерений диполей и квадруполей нуклотрона, рассмотрен алгоритм расстановки магнитов с целью

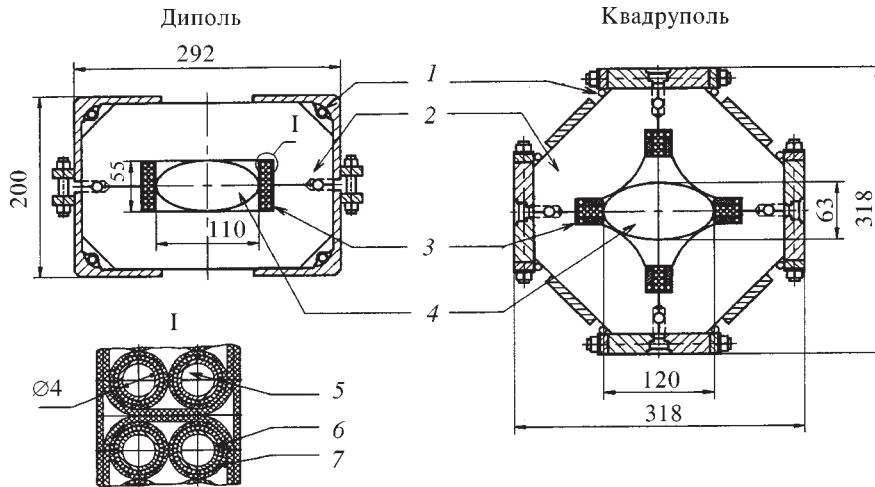


Рис.7. Поперечные разрезы дипольного и квадрупольного магнитов: 1 — охлаждающая трубка; 2 — железное ярмо; 3 — сверхпроводящая обмотка; 4 — ионпровод; 5 — двухфазный гелий; 6 — мельхиоровая трубка; 7 — сверхпроводящий кабель

уменьшения искажения замкнутой орбиты из-за разброса их эффективных длин. Возможности дальнейшего совершенствования описанного типа магнитов, увеличивающие магнитное поле до величин 3,5–5 Тл, предложены в [34].

Таблица 3. Основные характеристики магнитов нуклотрона

Характеристики	Диполь	Квадруполь
Количество элементов	96	64
Масса, кг	500	200
Апертура, мм	110 × 55	120 × 63
Длина железного ярма, мм	1370	430
Физическая длина, мм	1462	450
Число витков в обмотке	2 × 8	4 × 5
Длина сверхпроводящего кабеля в обмотке, м	62	24
Индукция при номинальном токе 6 кА, Тл	1,98	—
Градиент при номинальном токе 5,6 кА, Тл/м	—	33,4
Запасенная энергия, кДж	19,8	6,9
Динамические тепловыделения в цикле с частотой 0,5 Гц, Вт	21	12
Статический теплоприток (при нулевом токе), Вт	6,6	5,2

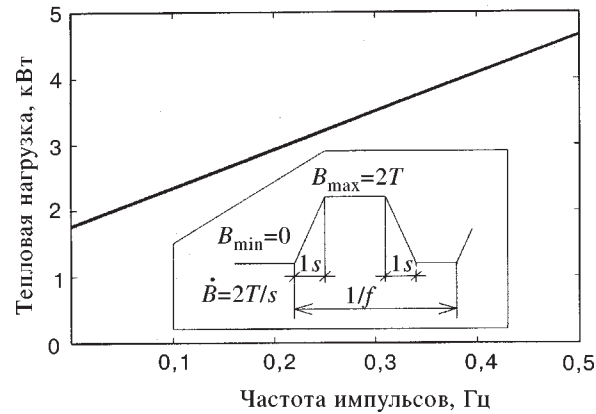


Рис.8. Потребная холодопроизводительность криогенной системы нуклотрона в зависимости от частоты повторения импульсов тока в магнитах

Сверхпроводящие мультипольные магниты для коррекции орбиты частиц [63]. Для обеспечения коррекции орбиты частиц в кольце нуклотрона смонтировано 28 мультипольных корректоров с тремя или четырьмя типами

Таблица 4. Основные параметры сверхпроводящих корректирующих магнитов нуклотрона

Внутренняя трубка, мм	132
Внутренний диаметр обмотки, мм	147
Длина обмотки, мм	310
Максимальный расчетный ток, А	100
Обмотки	D/S/O
Максимальное поле, Тл	0,15/0,4/0,1
Ампер-витки, кА	9/8,2/1,5

обмоток в каждом. В составе корректоров в разных комбинациях имеются дипольные (D), квадрупольные (Q), секступольные (S) и октупольные обмотки (O). Каждая из них запитывается электрическим током независимо от других. Корректоры смонтированы на базовых квадрупольных магнитах.

Основные параметры мультипольных корректоров приводятся в табл. 4, конструкция показана на рис.9.

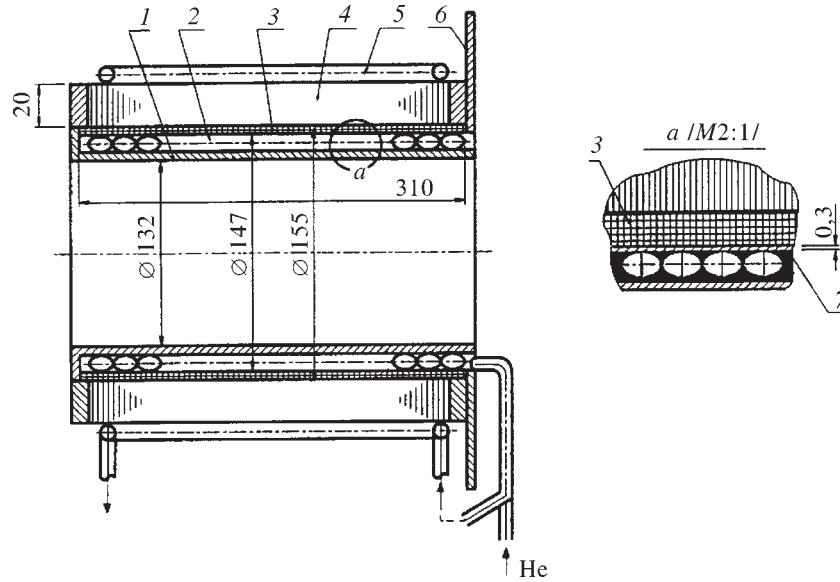


Рис.9. Конструкция мультипольного корректирующего магнита: 1 — поддерживающий цилиндр; 2 — змеевик с двухфазным гелием; 3 — сверхпроводящие обмотки; 4 — железное ядро, 5 — теплообменник охлаждения железного ядра, 6 — фланец, 7 — электроизоляция

Обмотки выполнены из сверхпроводящего провода диаметром 0,5 мм в одном слое. Они пропитаны эпоксидным компаундом и приклеены к змеевику (2), по которому проходит двухфазный гелий при температуре 4,5 К. Трубка (2) диаметром 5x0,5 мм припаяна к цилиндру (1), изготовленному из нержавеющей стали. Обмотки окружены железным ярмом из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы соединены путем сварки. Охлаждение железного ярма осуществляется посредством припаянной к нему медной трубки диаметром 6x1 мм.

Токовводы [45-47]. Ввод больших по величине электрических токов от работающих при температуре окружающей среды источников питания в охлаждаемые жидким гелием сверхпроводящие магниты — довольно сложная задача. Чем больше площадь сечения и меньше длина проводника, тем большее количество тепла притекает извне в магнитокриостатную систему. Однако и чрезмерное уменьшение площади сечения может приводить к большим теплопритокам из-за разогрева токоввода при прохождении электрического тока. Задача создания токовводов состоит в обеспечении их способности пропускать требуемый электрический ток с минимальными затратами холода. Для ее решения обычно применяют охлаждаемые токовводы, в которых основная часть джоулева тепла и теплопритока из окружающей среды снимается отводимым из криостата низкотемпературным потоком паров гелия, нагревающимся при прохождении токоввода в направлении, противоположном потоку тепла. При оптимизации затрат следует учитывать, что производство в рефрижераторе охлаждающего потока, так же, как и производство холода, связано со значительными энергетическими затратами. Поэтому задача оптимизации корректно может быть решена только в том случае, когда на единицу подводимого к магниту электрического тока расходуется минимальная энергия на приводе криогенного рефрижератора.

В литературе подобный подход встречается редко. Авторы публикаций обычно ограничиваются минимизацией величины теплопритоков на единицу электрического тока, а ведь энергозатраты, обусловленные только величиной теплопритока, составляют лишь малую долю общих затрат на криостатирование токоввода. В этой связи полезно определить, каким единым критерием методически верно можно охарактеризовать эффективность работы токоввода. Как известно [49], минимальная работа получения единицы холода e_q (эксергия холода) и жидкого гелия e_g (эксергия потока) выражается формулами:

$$e_q = T_{0,c} / T - 1,$$

$$e_g = i - i_{0,c} - T_{0,c} (s - s_{0,c}),$$

где T , $T_{0,c}$ — температура криостатирования и окружающей среды; i , $i_{0,c}$ — удельная энтальпия жидкого гелия и гелия при параметрах окружающей среды; s , $s_{0,c}$ — удельная энтропия жидкого гелия и гелия при параметрах окружающей среды.

Для гелия при температуре 4,2 К эти величины составляют $e_q = 70,4$, $e_g = 6805$ Дж/г. Общие затраты эксергии на токоввод определяются как сумма составляющих

$$E = Qe_q + Ge_g,$$

где Q — теплоприток в криостат по токовводу; G — расход гелия, отводимого по токовводу.

С учетом этих составляющих эффективность токоввода характеризуется величиной $e_i = E/I$ затрат эксергии на единицу вводимого электрического тока. Обычно эта величина составляет $0,35 \div 0,5$ Вт/А.

Оперируя величиной e_i , достаточно просто определить дополнительные энергозатраты на приводе гелиевого рефрижератора, связанные с обслуживанием токовводов: $A = e_i I / \eta$, где η — эксергетический к.п.д. рефрижератора ($0,10 \div 0,20$). Например, если $e_i = 0,48$ Вт/А, при восьми основных токовводах нуклотрона для тока в каждом из них 6 кА и режима рефрижератора с к.п.д., равным 0,15, они составляют около 154 кВт.

На практике для организации эффективного теплообмена токоведущих частей с охлаждающим газом в конструкции токовводов используют оплетки из тонкой медной проволоки. Однако в [48] показано, что при увеличении поверхности теплообмена с помощью оплеток удлиняется путь тока, который идет зигзагообразно, и соответственно растут джоулевы потери. Таким образом, недостатки известных токовводов были обусловлены одновременным выполнением оплеткой функций токоведущего элемента и теплообменника. Для уменьшения джоулевых потерь авторами предложено использовать токоведущие медные пластины, соединенные по всей длине со сплюсненными обмотками. Электрическое сопротивление пластин значительно меньше сопротивления пакета оплеток, и большая часть тока протекает по этим пластинам, а оплетки используются только для интенсификации теплообмена.

Конструкция примененного для нуклотрона токоввода показана на рис.10. Токоведущие элементы состоят из двух медных полос (1) и четырех сплюсненных оплеток (2), торцы которых сварены. В результате образуется короб, охватывающий теплообменник с удельной поверхностью около $55 \text{ см}^2/\text{см}^3$. Поскольку сварка торцов не обеспечивает необходимой герметичности для находящегося под вакуумом криостата, токоведущий элемент помещен в тонкостенную трубу (3) из нержавеющей стали. Небольшое отверстие в стенке короба позволяет выравнивать давление внутри и вне короба, что обеспечивает его целостность при повышении давления. Допустимое внутреннее давление токоввода составляет 2,5 МПа.

Электрические изоляторы (4)–(7) выполнены из капролона. Изоляторы проверены на электрическую прочность в воздухе. Сухой изолятор выдерживает постоянное напряжение 20 кВ, смоченный водой — 2,5 кВ (имеется в ви-

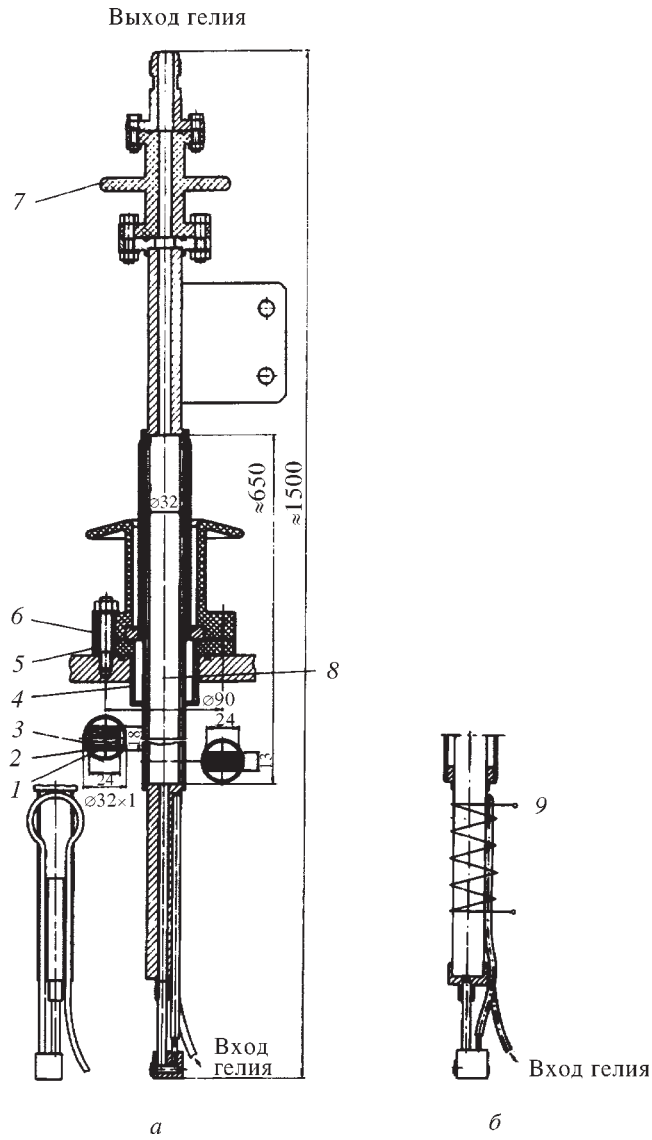


Рис.10. Конструкция токоввода: 1 — полоса медная; 2 — оплетка; 3 — труба; 4-7 — капролоновые электроизоляторы, 8 — теплообменник, 9 — нагреватель

ду возможность образования снеговой шубы в верхней части токоввода при выходе холодного гелия).

Для проведения испытаний отдельных магнитов на стендах и для кольца ускорителя было создано несколько модификаций описанной конструкции. Полученные параметры тоководов приведены в табл. 5. Отдельная часть тоководов нуклотрона предназначена лишь для кратковременной (несколько секунд) работы в ходе эвакуации энергии магнитной системы при потере сверхпроводимости. Эти тоководы [46], обеспечивающие вывод тока 8 кА за 1–2 с, отличаются пониженным статическим теплопритоком в криостат.

Таблица 5. Основные параметры тоководов

Оптимальный ток, кА	4,0	6,0	7,0	9,0
Эффективная длина, мм	600	600	650	820
Сечение токоведущего элемента, мм				
Верх	105	160	130	160
Низ	75	110	100	120
Поперечные размеры токонесущего элемента (верх), мм	20 × 15	28 × 15	27 × 17	27 × 22
Расход гелия на охлаждение токовода, г/с	0,2	0,3	0,316 (5 кА)	0,351 (6 кА)
Теплоприток на единицу тока, Вт/кА	1,0	1,0	1,12	1,17
Теплоприток без тока, Вт/кА	2,5	4,0	3,5	6,0
Гидравлическое сопротивление, кПа	10	12	10	11
Расход эксергии на единицу тока (эффективность), Вт/А	0,41	0,41	0,51	0,48

Особенность тоководов для мультипольных корректоров состоит в том, что в этом случае охлаждение потоком гелия не применяется [63]. Отвод тепла осуществляется на уровне 80 К посредством тепловых мостов к теплоизолирующему азотному экрану криостата нуклотрона.

Термометрия [50–52,65]. В ходе развития работ по созданию нуклотрона потребовалось большое количество точных, надежных, доступных по цене термометров, способных работать в широком интервале температур и по возможности не изменяющих свои характеристики в магнитных и радиационных полях. Поскольку отечественных термометров, в полной мере удовлетворявших этим требованиям, не существовало, был проведен цикл исследовательских работ по созданию собственной базы термометрии. В результате в качестве датчиков температуры было предложено использовать отечественные резисторы [53] типа ТВО (тепlostойкий, влагостойкий, объемный). Исследования и опыт применения в течение более десяти лет показали, что основ-

ные характеристики предложенных термометров не хуже, чем у зарубежных аналогов, а в отношении рабочего интервала температур и стабильности их превосходят.

Резисторы типа ТВО, предназначенные для работы в электронных устройствах в цепях постоянного и переменного тока, а также в импульсных режимах, выпускаются промышленностью с номинальными мощностями от 0,125 до 60 Вт. Существенные достоинства этих резисторов состоят в малой индуктивности, хорошей электрической изоляции конструкции и высокой надежности. Для целей низкотемпературных измерений наиболее подходят резисторы с номиналом 0,125 Вт, имеющие минимальные размеры. Максимальное удобство стыковки с измерительной системой при хорошей чувствительности обеспечивают резисторы с номинальным сопротивлением 1000 Ом.

Как показано на рис. 11, резистор ТВО-0,125 представляет собой стержень прямоугольной формы с запрессованными по торцам выводами (1). Объемная токопроводящая композиция (2) прямоугольного сечения герметично защищена керамической оболочкой (3) и слоем стеклоэмали (4) толщиной 0,2 мм. Электрические контакты между проводящей композицией (2) и платиновыми выводами (1) осуществляются путем диффузии серебряного порошка (5) при спекании и прессовании в процессе производства, поэтому они герметичны и имеют повышенную прочность. Токопроводящая композиция состоит из мелкодисперсной (50–200 Å) газовой сажи (3–5%), борно-свинцового флюса и корундового микропорошка. Масса резистора составляет 0,075 г. Величину его теплоемкости при низких температурах можно описать эмпирической зависимостью

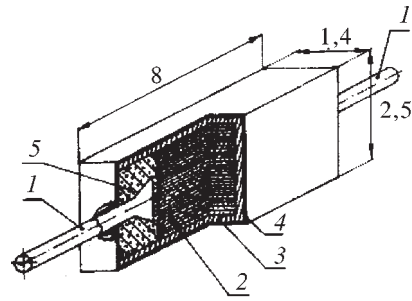


Рис. 11. Конструкция и размеры композитного резистора ТВО-0,125: 1 — платиновые выводы; 2 — токопроводящая объемная композиция; 3 — керамическая оболочка; 4 — стеклоэмаль; 5 — серебряный порошок

$$C_T = 10^{-6} (0,99T + 1,70T^3) [\text{Дж/г}\cdot\text{К}].$$

При температуре 4,2 К эта величина составляет $1,3 \cdot 10^{-4}$ Дж/г·К.

Сопротивление резистора ТВО нелинейно растет с понижением температуры. Зависимости $R = f(T)$ ТВО и часто применяемых для измерения низких температур резисторов фирмы «Аллен-Бредли» аналогичны: в обоих случаях они имеют вид, близкий к гиперболе. Изменение чувствительности резисторов в зависимости от измеряемой температуры показано в табл. 6.

Таблица 6. Чувствительность резисторов ТВО и «Аллен-Бредли», Ом/К

Температура, К	4,2	20,4	77,4	273	400
Резистор ТВО (1000 Ом)	714	26,5	3,8	0,8	0,5
«Аллен-Бредли» (100 Ом)	360	7,0	0,47	0,04	—

Поскольку промышленность выпускает резисторы ТВО с отклонениями от номинальных сопротивлений от 5 до 20%, каждый термопреобразователь, создаваемый на их основе, требует индивидуальной градуировки. Для описания результатов градуировки используется уравнение

$$T = \sum K_n (R_0 / R)^n,$$

где коэффициенты K_n полинома определяются по калибровочным данным методом наименьших квадратов, обычно $R_0 = 1000$ Ом. Для интерполяции с погрешностью по температуре до 0,5% в интервале 4,2 ÷ 300 К необходимо брать семь коэффициентов полинома.

Для градуировки термометров в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ создан специальный стенд, измерения на котором производятся одновременно для партии из 20 термопреобразователей. Используется четырехпроводная схема с питанием постоянным измерительным током 10 мкА со стабильностью не хуже 10^{-5} . Температура контролируется по образцовому германиевому термометру ТСГ-1 в диапазоне 4,2 ÷ 30 К с точностью 0,02 К и в диапазоне 30 ÷ 273 К по платиновому термометру ТСПН-3 с точностью 0,05 К. Производительность стенда и разработанные программы для обработки получаемых результатов позволили не только оснастить все системы нуклотрона необходимой термометрией, но и предоставить термометры для целого ряда исследований, ведущихся в ОИЯИ и многих других организациях в России.

3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ВНЕШНЕЙ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ

Гелиевый рефрижератор КГУ-1600/4,5[20]. Криогенная гелиевая установка КГУ-1600/4,5 спроектирована московским объединением НПО «Гелиймаш» по заказу и с участием специалистов Лаборатории высоких энергий ОИЯИ. Головной образец, испытания которого были начаты в 1980 г., предназначался для криостатирования сверхпроводящего модельного синхротрона СПИН и сжижения гелия для нужд различных экспериментальных стендов ОИЯИ, работавших как для исследований сверхпроводящих магнитов в рамках программы создания нуклотрона, так и для других целей. Впоследствии на криогенном комплексе нуклотрона были смонтированы еще три такие установки.

Агрегат охлаждения КГУ-1600/4,5 включает пять основных блоков (рис.12), заключенных в собственные вакуумные теплоизолирующие кожухи и соединенных с другими посредством теплоизолированных трубопроводов. Блок (1) представляет собой состоящую из двух- и трехпоточных витых теплообменников гирлянду, из соответствующих мест которой по расположенному в центре вакуумному кожуху отходят три пары трубопроводов входа и выхода гелия турбодетандеров ступени предварительного охлаждения. Турбодетандерный блок (2) конструктивно размещен в верхней части блока (1).

Очистка гелия от примесей при температуре жидкого азота осуществляется в двух переключающихся блоках 3(1) и 3(2) с размещенными в них угольными адсорберами. Во время работы одного блока второй находится в процессе регенерации. Она производится прогревом горячим газом и последующим вакуумированием. Адсорбер очистки от примесей Ne и H_2 установлен внутри блока сжижения (4). Возможностей его регенерации в ходе работы не преду-

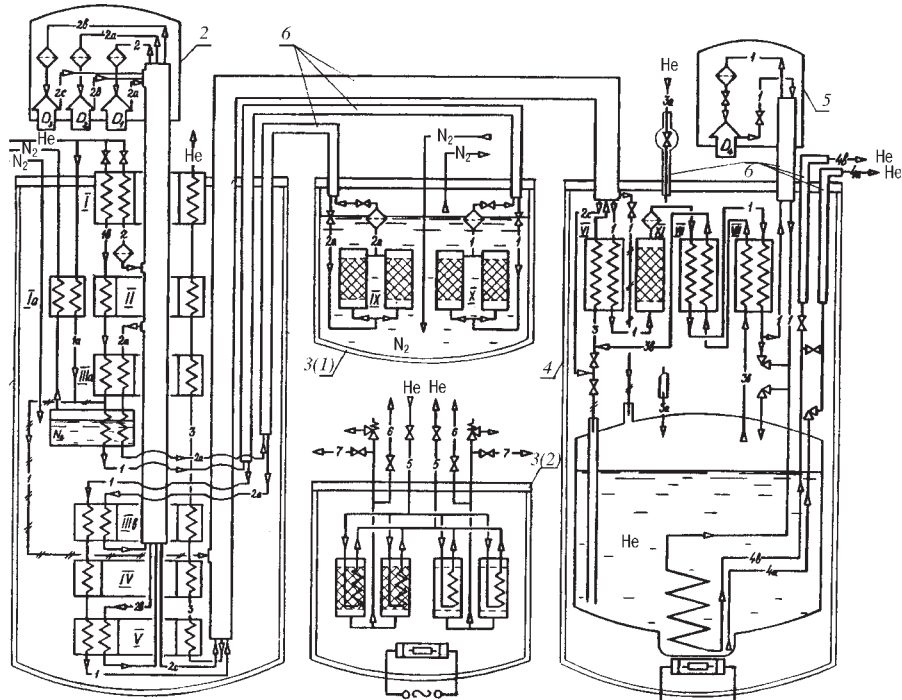


Рис.12. Схема установки КГУ-1600/4,5: 1 — основной блок теплообменников; 2 — турбодетандерный блок; 3 — блоки очистки от примесей N_2 и O_2 ; 4 — блок сжижения; 5 — блок парожидкостного турбодетандера

смаatrивалось: как правило, она осуществляется на теплой установке перед каждым длительным сеансом эксплуатации. Блок сжижения (4), кроме того, включает сборник жидкого гелия объемом около 1000 литров, теплообменники и низкотемпературную арматуру управления установкой и распределения жидкого гелия по потребителям. К блоку сжижения примыкает блок парожидкостного турбодетандера (5).

Как известно, при криостатировании сверхпроводящих магнитных систем гелиевые рефрижераторы работают в таких режимах, когда одновременно с производством холода дополнительно вырабатывается и некоторое количество жидкого гелия, которое необходимо для заполнения криостатов и охлаждения тоководов. Поэтому были экспериментально изучены характеристики установки КГУ-1600/4,5 при работе в подобных комбинированных режимах.

Методика измерений состояла в том, что при каком-то значении холодопроизводительности, имитируемом встроенным в сборник жидкого гелия электронагревателем, измеряется количество сжижаемого гелия. Полученные таким образом результаты представлены на рис.13. Давление сжатого газа на входе в установку в процессе измерений поддерживалось около 2,0 МПа, суммарная производительность компрессоров составляла 3600 Нм³/час.

Характеристика (1) соответствует режимам с дросселированием в ступени окончательного охлаждения. При замене дросселя на парожидкостный турбодетандер (кривая 2) холодопроизводительность существенно возрастает: в чисто рефрижераторном режиме — с 1100 до 1700 Вт, т.е. более чем в 1,5 раза.

Для форсирования установки в дроссельном режиме можно подключить резервный компрессор (кривая 3), увеличив расход гелия до 4800 Нм³/ч. Холодопроизводительность при этом возрастает примерно на 400 Вт, однако увеличивается давление в сборнике жидкого гелия с 0,028 до 0,044 МПа, что повышает температуру криостатирования на 0,13 К.

С применением парожидкостного детандера поршневого типа (кривая 4) установка КГУ-1600/4,5 обладает несколько большей холодопроизводительностью и энергетической эффективностью, чем в случае парожидкостного турбодетандера. Однако из соображений надежности нами, как правило, были использованы турбомашины.

Приведенные выше характеристики получены в режимах, когда в ступени предварительного охлаждения используется жидкий азот. Осуществить эффективную работу на различных точках характеристики в отсутствие жидкого азота в цикле довольно сложно. Это обусловлено нерегулируемостью проходных сечений сопловых аппаратов последовательно включенных турбодетандеров: при переходе от одного режима к другому требуется существенное перераспределение потоков. Путем расчетного анализа переменных режимов

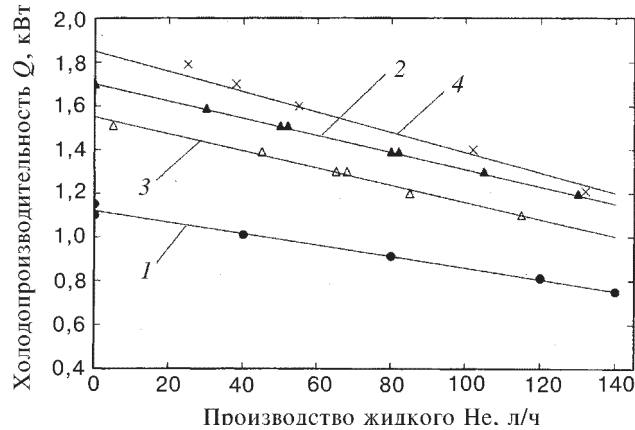


Рис.13. Характеристики установки КГУ-1600/4,5 при одновременном производстве холода на уровне 4,5 К и жидкого гелия: 1 — режимы с дросселированием в ступени окончательного охлаждения; 2 — с расширением в парожидкостном турбодетандере; 3 — дроссельные режимы при повышенном расходе сжатого гелия (четыре компрессора 305НП20/30); 4 — с поршневым парожидкостным детандером

рефрижераторов найдены и реализованы технические решения, которые позволяют эффективно работать на значительной части характеристики и без потребления жидкого азота. Методические основы анализа переменных режимов и результаты расчетов для КГУ-1600/4,5 рассмотрены ниже.

Достижение высокой эффективности рефрижераторов обеспечено современным уровнем разработок таких его основных элементов, как турбодетандеры и теплообменная аппаратура.

Турбодетандеры [35,39,58] установки КГУ-1600/4,5 являются высокоскоростными малоразмерными турбинами, не имеющими аналогов в мировой практике. Проточная часть турбомашин с радиально-осевым рабочим колесом имеет специальную профилировку, обеспечивающую высокую эффективность расширения рабочего тела.

Конструктивно турбодетандеры выполнены по однотипной схеме. Рабочее колесо турбодетандера консольно закреплено на вертикально расположенном валу, опирающемся на радиальный газостатический и радиально-осевой гидростатический масляный подшипники. Газовый подшипник расположен непосредственно у рабочего колеса и хорошо герметизирует низкотемпературную проточную часть от попадания паров масла. Он малочувствителен к изменениям температуры и выделяет незначительное количество теплоты трения, что уменьшает теплоприток к криогенной части турбины. Высокая виброустойчивость ротора в основном обеспечивается специаль-

ным гидростатическим подшипником, в котором в рабочем режиме происходит интенсивное образование эмульсии масла, благодаря чему существенно снижается момент сопротивления вращению ротора. Гидростатический подшипник воспринимает все радиальные и осевые нагрузки со стороны турбины. Мощность, развиваемая турбиной, расходуется на трение в подшипниках и нагрев масла, циркуляция и охлаждение которого осуществляется герметичной системой маслообеспечения.

Холодная и теплая части турбодетандера разделены на валу двухсекционным лабиринтным уплотнением с промежуточной камерой, предназначенной для подвода теплого гелия под давлением с целью создания дополнительного газового затвора. Рабочее колесо и направляющий аппарат, а также система подвески ротора и нагрузочное устройство выполнены в едином блоке — модуле. Тем самым существенно упрощена технология изготовления конструкции; ремонт осуществляется простой заменой модуля без нарушения герметизации вакуумного теплоизоляционного кожуха.

Благодаря оптимальному выбору зазоров в подшипниках, давлению масла и распределению роторных масс удалось при весьма высоких скоростях ротора добиться вращения практически без прецессии. Турбины способны длительно работать при частоте вращения ротора до 300000 об/мин. Рабочие частоты вращения существенно ниже, поэтому турбодетандеры обладают высокой надежностью работы и способны выдерживать существенные перегрузки.

Турбинные ступени смонтированы в вакуумном кожухе, который объединен с системой циркуляции и охлаждения масла в единый блок — турбодетандерный агрегат.

Особым достижением следует считать создание уникального парожидкостного турбодетандера [35]. Как известно, для повышения энергетической эффективности криогенных рефрижераторов и ожижителей большое значение имеет возможность замены связанного с большими потерями эксергии процесса дросселирования Джоуля — Томсона на более совершенный процесс адиабатного расширения в детандере. В 1965 г. замена дросселя на детандер была предложена и реализована в цикле водородного ожижителя в ОИЯИ [36]. На гелиевом ожижителе такую модернизацию впервые (1970 г.) удалось произвести С.Коллинзу [37], в итоге повысившему производительность установки в ожижительном режиме с 60 до 80 л/ч, а в рефрижераторном — со 180 до 250 Вт. В обоих случаях были использованы детандеры поршневого типа.

Поршневые детандеры вместо дросселя применялись и в первоначальном варианте головного образца рефрижератора КГУ-1600/4,5. Следует отметить, что было достигнуто довольно высокое (рис.13) повышение эффективности (около 70%) по сравнению с дроссельным режимом.

Между тем фирма «Зульцер» сообщила (1980 г.) об успешной замене дросселирования Джоуля — Томсона на расширение в турбодетандерах сразу в нескольких гелиевых системах. Автор сообщения [38] отмечал, что во избежание технических проблем, которые могут проявиться при расширении потока в двухфазной парожидкостной области, предпочтительнее осуществлять работу турбины только в однофазной области. Это достигалось тем, что на выходе детандера устанавливался вентиль, посредством которого давление после турбомашин поддерживалось около 0,25 МПа, т.е. чуть выше, чем критическое давление гелия. Впрочем, в ходе экспериментов были случаи, когда вентиль был открыт слишком сильно, и детандер входил в парожидкостную область. В течение непродолжительного времени, когда это случалось, каких-либо проблем с работоспособностью турбины не возникало.

В 1985 г. мы также попытались заменить поршневой парожидкостный гелиевый детандер установки КГУ-1600/4,5 на детандер турбинного типа. Наряду с проблемой надежности такая модернизация позволяла разрешить и значительные эксплуатационные трудности, возникающие в моменты поломок поршневых машин: подобные случаи, как правило, вызывали резкое повышение давления сжатого газа на входе в установку и, соответственно, быстрое понижение уровня газгольдера вплоть до срабатывания концевых выключателей, блокирующих возможное всасывание масла и атмосферного воздуха в гелиевую систему и, во избежание аварии, отключающих все работающие компрессоры. В случае же самопроизвольной остановки машины турбинного типа это неприятное последствие отсутствует: сопловый аппарат продолжает пропускать необходимое количество гелия, т.е. турбина как бы сама превращается в дроссель.

Опытный образец парожидкостного гелиевого турбодетандера был создан в НПО «Гелиймаш» по заказу ОИЯИ и проходил доводку и испытания в составе системы криогенного обеспечения установки СПИН. Турбодетандер был рассчитан для рефрижераторного режима работы КГУ-1600/4,5 с одновременным частичным получением жидкого гелия и имел следующие проектные параметры: давление на входе — 1,8 МПа, температура на входе — 5,2 К, давление на выходе — 0,15 МПа, расход рабочей среды — 2400 Нм³/ч, мощность — 0,85 кВт.

В целях обеспечения однотипности расширительных машин, комплектующих установки КГУ-1600/4,5, гелиевый парожидкостный турбодетандер был выполнен по принципиальной схеме, принятой ранее и для газовых турбодетандеров предварительного охлаждения. В турбодетандере использована центростремительная реактивная турбинная ступень с радиально-осевым полуоткрытым колесом. Наружный диаметр колеса 15 мм, частота вращения 140000–180000 об/мин, высота лопаток направляющего аппарата 0,5 мм.

Из рис.13 видно, что в рефрижераторном режиме эффективность КГУ-1600/4,5 с парожидкостным турбодетандером по сравнению с дросселем более чем на 50% выше. Принципиально важно, что, несмотря на отсутствие возможностей регулирования проходных сечений соплового аппарата турбодетандера, эффективная работа установки КГУ-1600/4,5 обеспечивается на всех точках характеристики. Такой эффект «саморегулирования» потоков в переменных режимах объясняется тем, что при максимальном расходе гелия через турбину (рефрижераторный режим) оптимальная температура на входе минимальна и составляет 5,2 К. При переходе к ожижительному режиму требуемый расход гелия в ступени окончательного охлаждения довольно существенно уменьшается, но это компенсируется ростом оптимальной температуры на входе турбомашин, достигающей в этом случае 8,5 К. Этот рост температуры на входе снижает количество перерабатываемого гелия как раз настолько, чтобы эффективно перераспределить потоки.

Полученный нами положительный опыт применения парожидкостного гелиевого турбодетандера на головном образце КГУ-1600/4,5 позволил в дальнейших работах по созданию нуклотрона целиком отказаться от расширительных машин поршневого типа, что существенно сказалось на повышении надежности всей системы. Длительная работа показала абсолютное отсутствие каких-либо технических проблем, которых можно было ожидать в режимах с окончанием процесса расширения в двухфазной парожидкостной области.

Теплообменная аппаратура [59] криогенной гелиевой установки КГУ-1600/4,5 состоит из оригинальных высокоэффективных витых трубчатых теплообменников. Они выполнены из медных труб малого диаметра, оребренных медной проволокой. Намотка труб многослойная, без дистанционных проставок между слоями. Спирально навитая на каждую трубу медная проволока образует хорошо обтекаемую форму оребрения и является не только интенсификатором теплообмена, но и дистанционным элементом между слоями труб.

Такая конструкция позволяет обеспечить малый эквивалентный диаметр межтрубного пространства. Эти особенности определяют высокую компактность теплообменников. В конструкции теплообменников предусмотрена навивка труб по специальной методике с переменными значениями продольного и поперечного шагов, что сводит к предельно минимальным значениям неравномерности распределения газов по каналам межтрубного пространства и продольную теплопроводность по элементам конструкции. Благодаря этому достигается высокая эффективность теплообменников.

Теплообменники отличаются высокой надежностью в криогенных условиях работы, поскольку обладают самокомпенсацией температурных напряжений в широком диапазоне температур благодаря естественной деформируемости выводов концов труб на коллекторы.

В рефрижераторе КГУ-1600/4,5 более десятка криогенных теплообменников, но их компактность позволяет свести криогенные блоки к сравнительно небольшим размерам.

Винтовой компрессорный агрегат «Каскад-80/25» [21,40-43]. Опытная эксплуатация головного образца криогенной гелиевой установки КГУ-1600/4,5 показала, что главные проблемы с надежностью связаны с применением компрессоров поршневого типа, в которых имелось большое количество требующих частой замены и ремонта впускных и выпускных клапанов. Поэтому дальнейшее развитие привело к необходимости перехода на винтовое компрессорное оборудование.

Гелиевый винтовой маслозаполненный компрессорный агрегат «Каскад-80/25» разработан в НПО «Казанькомпрессормаш» применительно к системе криогенного обеспечения ускорительно-накопительного комплекса УНК [44], создававшегося в Институте физики высоких энергий в Протвино. Для этого сооружения предполагалось выпустить серию таких машин в количестве 60 шт. В рамках протокола о совместной научно-исследовательской работе между ИФВЭ и ОИЯИ испытания и доводка головного образца компрессорного агрегата «Каскад-80/25» проводилась в ЛВЭ ОИЯИ. Условиями протокола была предусмотрена последующая эксплуатация агрегата в составе криогенного комплекса нуклотрона.

Винтовой компрессорный агрегат «Каскад-80/25» — машина второго поколения отечественных винтовых маслозаполненных компрессоров, используемых в криогенных установках для компримирования гелия [21]. В криогенной системе установки «Токамак-15» применен [23] компрессорный агрегат с аналогичными по производительности параметрами, состоящий из двух двухступенчатых установок «Каскад-40/16» и одной дожимающей машины «Каскад-6/16-25». В отличие от него «Каскад-80/25» выполнен в двухступенчатом варианте с одним маслоотделителем и общей маслосистемой компрессоров первой и второй ступени.

Агрегат «Каскад-80/25» состоит из четырех основных блоков: первой ступени, второй ступени, блока маслоохладителей и блока управления. Первая ступень содержит два параллельно работающих компрессора, приводящихся в действие одним электродвигателем мощностью 0,63 МВт с напряжением питания 6 кВ.

Вторая ступень состоит из одного винтового компрессора с золотниковым регулятором производительности, вертикального маслоотделителя и электродвигателя с теми же параметрами, что и на первой ступени. В блок маслоохладителей входят четыре прямоточных теплообменника с водяным охлаждением. Система автоматики осуществляет постоянный контроль основных параметров, защиту от аварийных режимов и автоматическое поддержание номинального давления нагнетания компрессоров первой ступени (промежуточного давления).

Испытания винтового компрессорного агрегата «Каскад-80/25» проводились по замкнутой схеме (рис. 14). Требуемое давление на всасывании первой ступени обеспечивалось ресиверами (10) общим объемом около 160 м³. Газообразный гелий из ресиверов поступает в первую ступень, где сжимается до давления 0,6–0,7 МПа и одновременно охлаждается маслом, впрыскиваемым под давлением в полость сжатия, а затем — во вторую ступень. Здесь маслогазовая смесь сжимается до конечных параметров и поступает в маслоотделитель (2). Отделившийся газ проходит сепаратор (3), концевой холодильник (4) и через вентиль вновь поступает на вход компрессора. Масло из маслоотделителя сливается в маслобак и через фильтр грубой очистки (5) поступает в маслоохладители (9), где охлаждается водой. На первую ступень масло поступает, пройдя жиклер (13) и разделившись на две линии: по одной масло впрыскивается непосредственно в камеру сжатия, по второй линии, пройдя фильтры тонкой очистки (6), поступает на смазку подшипников и создание масляного затвора в концевом уплотнении. Во вторую ступень масло подается посредством шестеренчатого насоса (8), где давление его повышается на

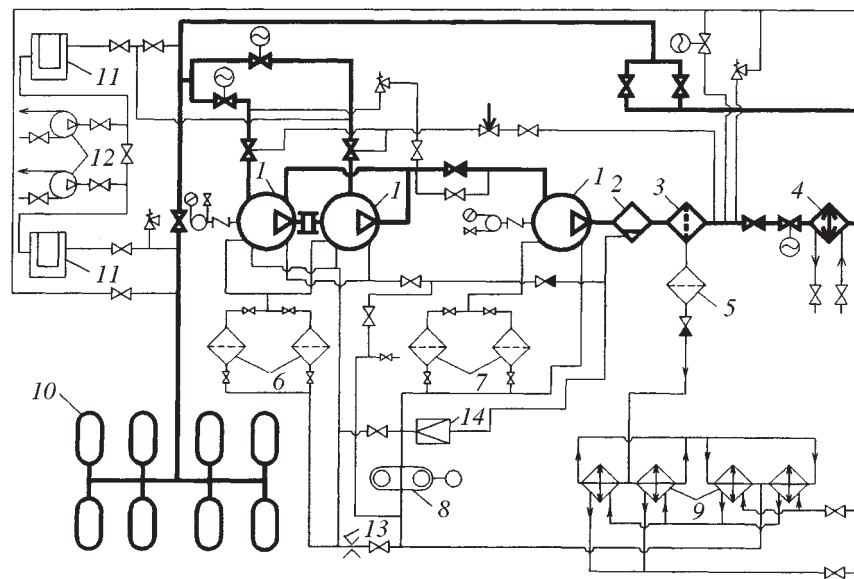


Рис. 14. Принципиальная схема агрегата «Каскад-80/25» и стенда для испытаний: 1 — компрессор; 2 — маслоотделитель; 3 — сепаратор; 4 — концевой холодильник; 5 — фильтр грубой очистки; 6 — фильтр тонкой очистки первой ступени; 7 — фильтр тонкой очистки второй ступени; 8 — шестеренчатый масляный насос; 9 — маслоохладители; 10 — ресиверы на всасывании; 11 — вакуумные ловушки; 12 — насос вакуумный; 13 — жиклер; 14 — клапан перепускной

0,4–0,5 МПа. В камеру сжатия масло впрыскивается непосредственно, а на смазку подшипников, золотника и концевой уплотнения — через фильтр тонкой очистки (7).

Вакуумные насосы (12) и ловушки (11) предназначены для постановки стенда под гелий. Кроме того, они весьма эффективно используются при подготовке системы к пуску для удаления влаги из масла, которым заполняется компрессор. Для этого в холодильники (9) подается горячая вода, и циркулирующее при включенном насосе (8) масло нагревается до температуры 70–80 °С. При последующей откачке влага задерживается в ловушке (11), заливаемой жидким азотом. Марка применяемого масла — турбинное Т-30.

Головной образец винтового компрессорного агрегата «Каскад-80/25» хорошо зарекомендовал себя в ходе испытаний и последующей интенсивной эксплуатации. Изотермический к.п.д., полученный при давлении на всасывании 0,072–0,0875 МПа, составил 0,52–0,55. Замеры шумовых характеристик, проведенные в точках на расстоянии 1 м от агрегата, показали, что уровни звуковой мощности составляют не более 81–102 дБ. Так, в течение одного года агрегат «Каскад-80/25» отработал для нужд криогенного комплекса нуклотрона около 5000 часов при производстве более 50 плановых включений и выключений. При этом не выявлено ни одного случая отказов или отклонения параметров машины от нормы. Таким образом, агрегат «Каскад-80/25» стал не только основой компрессорного обеспечения криогенной системы нуклотрона, но и рекомендован для серийного производства и применения в других крупных криогенных системах.

4. ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ РАБОТЕ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Охлаждение сверхпроводящих магнитов нуклотрона до рабочей температуры [60,61]. Для описанных выше магнитов нуклотрона практически нет каких-либо ограничений по времени охлаждения в связи с температурными градиентами и напряжениями в конструкциях. Все они проходили испытания при времени охлаждения до гелиевых температур не более 10 часов. Поэтому было решено охлаждать всю магнитную систему ускорителя за минимально возможное время. Анализ показал, что наиболее приемлемо в нашем случае 80–100 часов. Это рекордно короткое время охлаждения по сравнению с аналогичными системами. Принятая схема (рис. 15) использует принудительный поток газообразного гелия, охлажденный в установках КГУ-1600/4,5 посредством испарения около 80 м³ заранее запасенного жидкого азота.

Процесс охлаждения реализуется без какого-либо дополнительного оснащения: используется только штатное оборудование гелиевых рефрижераторов. Прямой и обратный потоки имеют те же направления, что и при обычной

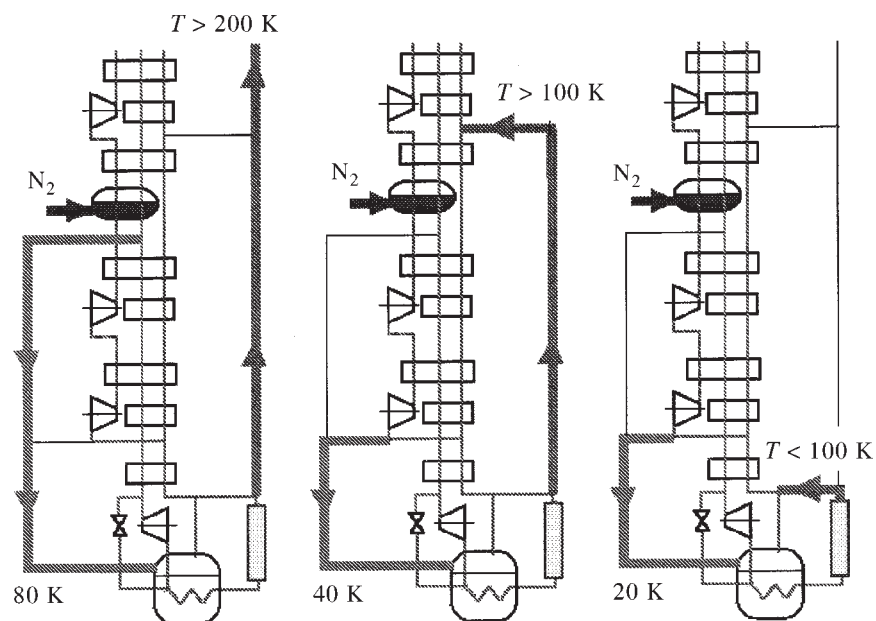


Рис.15. Принципиальные схемы переключений потоков при охлаждении кольца нуклотрона до рабочей температуры

работе в номинальном режиме, т.е. при криостатировании магнитов на гелиевом температурном уровне. Однако чтобы ускорить охлаждение, установки КГУ-1600/4,5 снабжены обводными линиями, показанными на рис.15. Кольцо ускорителя вводится в рабочий режим в три этапа, каждому из которых соответствует одна из схем этого рисунка.

На рис.16 приведено распределение температур магнитов по периметру кольца в зависимости от времени охлаждения. Как видно из рисунка, в рассматриваемом случае время ввода в режим составило около 80 часов. На рис.17 показано, как изменяется температура потока гелия по мере прохождения разных точек внутренних каналов магнитов: на входе, выходе из полого сверхпроводящего кабеля и выходе из трубки охлаждения железного ярма.

Режимы с избыточным обратным потоком («сателлитные») [16]. При криостатировании крупных ускорителей со сверхпроводящими магнитами предпочтение иногда отдают криогенным системам из равномерно расположенных по периметру кольца рефрижераторов с избыточным обратным потоком — сателлитов [25,26]. Они работают за счет жидкого гелия, получаемого от центрального ожижителя, что позволяет в каждом из таких рефрижераторов

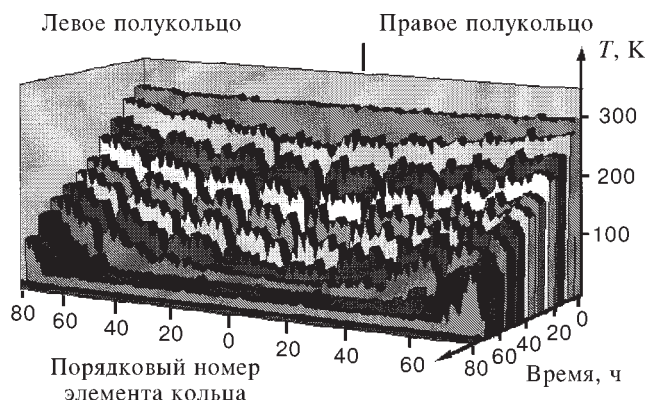


Рис.16 Распределение температур магнитов по периметру кольца в зависимости от времени охлаждения

обойтись минимумом оборудования в ступенях предварительного охлаждения. В этом случае рефрижератор, чаще всего состоящий только из теплообменников и сборника жидкого гелия, обладает высокой надежностью и не требует обслуживания, т.к. наименее надежные и требующие обслуживания элементы криогенной системы сосредоточены на центральном ожигителе. Важно, что при этом сохраняется высокая термодинамическая эффективность: благодаря тому, что теплоемкость (произведение расхода на удельную

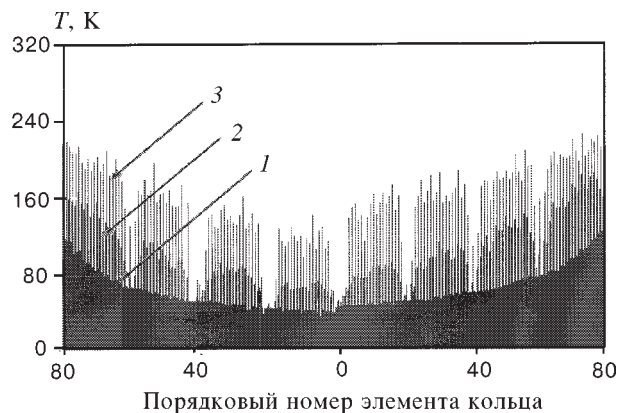


Рис.17. Температура потока гелия по мере прохождения разных точек внутренних каналов магнитов: на входе (1), выходе из полого сверхпроводящего кабеля (2) и выходе из трубки охлаждения железного ярма (3)

теплоемкость) обратного потока всегда несколько выше теплоемкости прямого потока, самостоятельно устанавливается наиболее оптимальное распределение температур [62] в теплообменнике, когда разность температур между потоками изменяется пропорционально температуре обратного потока.

Даже если в номинальном режиме рефрижератор работает по обычной схеме, когда общий расход в прямом потоке больше или равен расходу в обратном потоке, полезным бывает его применение и в сателлитном режиме. Такая потребность возникает, например, когда выходят из строя детандеры ступени предварительного охлаждения, а работу по криостатированию объекта необходимо продолжать. В этом случае используется заранее запасенный жидкий гелий или же он подливается от параллельно работающего на тот же объект рефрижератора. В частности, такой способ резервирования предусмотрен и схемой криостатирования нуклотрона (рис.2).

Вопросы применения рефрижераторов с избыточным обратным потоком рассматривались многими авторами. Подробный термодинамический анализ опубликован в [27], где приводятся сведения об оптимальных параметрах сателлитных рефрижераторов, удельных расходах энергии и необходимых поверхностях теплообменников. Однако полученные здесь данные нельзя считать достаточными в силу того, что в качестве одного из критериев при сопоставлении различных вариантов выбиралась минимальная разность температур между потоками в теплообменнике сателлита. Между тем при одинаковой минимальной разности температур необходимая поверхность теплообмена существенно зависит от соотношения потоков в этом теплообменнике, увеличиваясь по мере уменьшения количества используемого жидкого гелия. Поэтому различные варианты параметров и энергетических показателей сателлитных рефрижераторов можно корректно сравнивать лишь тогда, когда каждому из них будет соответствовать одинаковая поверхность теплообмена. Кроме того, большой практический интерес вызывает анализ роста или ухудшения энергетической эффективности одной и той же сателлитной рефрижераторной установки с изменением ее режима. Таким образом, необходимые условия методически верного сопоставления вариантов соблюдаются только в том случае, когда в качестве исходных данных взяты коэффициент теплопередачи и поверхность теплообмена теплообменников рефрижератора. Такой подход изложен в [16]. В своей работе по настройке режимов криогенной системы нуклотрона мы руководствовались полученными здесь данными.

По этим данным для сателлитного рефрижератора, схема которого показана на рис.18, расчетные параметры приводятся на рис.19 и 20. Первый из них показывает зависимость расхода $g = G / Q$ сжатого газа на единицу холодопроизводительности от относительного количества потребляемого жидкого гелия (обозначения даны на рис.18).

В качестве исходных данных принято $kF/Q=100 \text{ K}^{-1}$, где kF — произведение коэффициента теплопередачи и поверхности теплообмена теплообменника; температура окружающей среды $T_3 = 293 \text{ K}$; температура в испарителе $T_2 = 4,4 \text{ K}$; давление в точке (4) — $0,105 \text{ МПа}$.

На рис.20 показаны результаты расчетов по затратам энергии на получение холода в спутниковом рефрижераторе. Кроме принятых выше исходных данных, мы положили: адиабатический к.п.д. турбодетандера — $0,7$, изотермический к.п.д. винтового компрессора — $0,5$, эксергетический к.п.д. оживителя гелия — $0,15$. Как видно из рисунка, имеются минимумы энергетических затрат как при использовании дросселя, так и в режимах с парожидкостным турбодетандером. Для случая с дросселированием оптимальные параметры работы — давление в прямом потоке $1,2 \text{ МПа}$ и коэффициент $\alpha = 10,5 \%$. Эти параметры существенно изменяются при использовании парожидкостного детандера. В этом случае они составляют, соответственно, $2,5 \text{ МПа}$ и $4-6 \%$. Минимумы энергетических затрат носят достаточно пологий характер. Это позволяет получать близкую к оптимальному значению эффективность даже в тех случаях, когда система функционирует с большим разбросом параметров. Так, в схеме с расширением в детандере изменения величины α в пределах $3-8\%$ и давления $1,5-2,5 \text{ МПа}$ не приводят к большому изменению общей эффективности системы.

По данным рис.19 и 20 легко оптимизировать параметры системы. Однако для нуклотрона необходимо учитывать одно ограничение: величина массового паросодержания на выходе из магнитов по условиям работы нуклотрона ограничена $x_5 \leq 90 \%$. Расход сжатого газа на единицу холодопроизводительности может быть определен как $g \approx 1/rx_5 = 0,057 \text{ [г}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{Вт}^{-1}]$, где r — теплота парообразования. Таким образом, если $g < 0,057$, паросодержание на выходе из магнитов будет превышать величину, принятую как предельно допустимая. Область, где паросодержание x_5 выше предельного, отмечена на рис.19 серым цветом. В цикле с детандером, к сожалению, нельзя работать непосредственно при оптимальных условиях, однако на границе разрешенной области

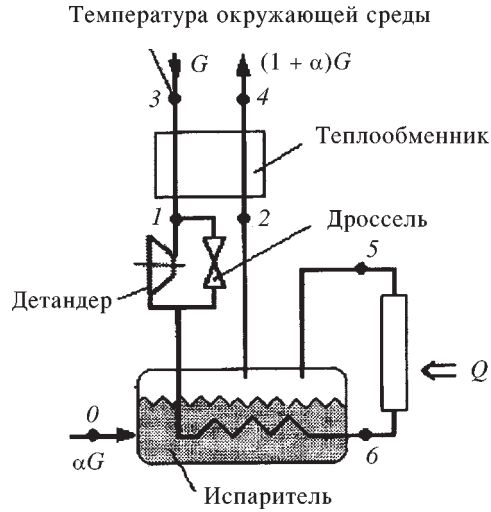


Рис.18. Расчетная схема сателлитного рефрижератора: G — количество сжатого газа из компрессора; Q — холодопроизводительность; α — доля подводимого жидкого гелия от расхода сжатого газа

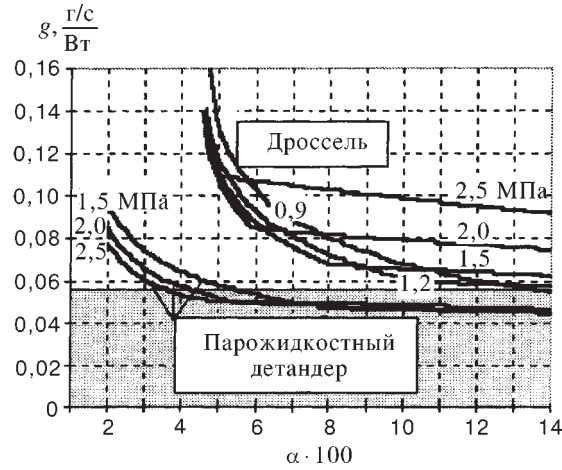


Рис.19. Зависимость расхода $g = G/Q$ сжатого газа на единицу холодопроизводительности для различных давлений в прямом потоке спутникового рефрижератора

($\alpha = 3,6\%$ для 2,5 МПа, 4,4% для 2,0 МПа и 5,5% для 1,5 МПа) эффективность лишь незначительно ниже благодаря тому, что, как уже отмечалось, минимумы энергетических затрат носят достаточно пологий характер.

Высокая энергетическая эффективность позволяет успешно использовать спутничные режимы для регулирования общей холодопроизводительности

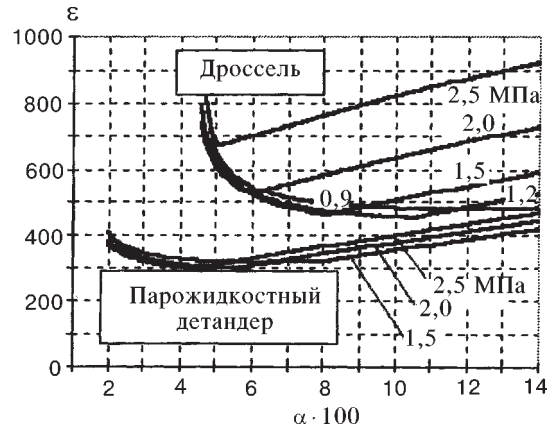


Рис.20. Удельный расход энергии в зависимости от количества потребляемого в спутничном рефрижераторе жидкого гелия для различных давлений в прямом потоке рефрижератора

криогенной системы. Так, весьма часто требуется работать в режимах с пониженной — до 2,0 кВт — холодопроизводительностью. Обычно в такой ситуации задействовано два рефрижератора. Первый работает в своем номинальном режиме, он охлаждает первое полукольцо и дополнительно производит жидкий гелий. Характеристики такого «смешанного» режима были представлены на рис.13. Второй рефрижератор, получающий жидкий гелий от первого, работает в сателлитном режиме с дросселем или парожидкостным турбодетандером.

В течение всех сеансов работы на физические эксперименты и для исследований собственно ускорителя на нуклотроне практически не было простоев по причинам, связанным с криогенной системой. Обычно в резерве имелось достаточное количество жидкого гелия, чтобы переключить любой из рефрижераторов в сателлитный режим и продолжать криостатирование кольца ускорителя при одновременно проводимых восстановительных или регламентных работах на элементах системы криогенного обеспечения.

Характеристики рефрижератора при комбинированном производстве холода и жидкого гелия [13-15]. Криогенный гелиевый рефрижератор создают на основе расчета соответствующего термодинамического цикла. Если его предполагается использовать в нескольких различных режимах, то анализируют все варианты цикла и проектирование продолжают по тому из них, который требует наибольшей теплопередающей поверхности теплообменников. Действительный же цикл работы рефрижератора может существенно отличаться от расчетного как вследствие отклонения фактических параметров машин и аппаратов от принятых в расчете, так и из-за изменений условий работы потребителя. При криостатировании сверхпроводящих магнитных систем гелиевые рефрижераторы работают в различных комбинированных режимах, когда одновременно с производством холода осуществляется и сжижение гелия. Зависимость холодопроизводительности от количества одновременно вырабатываемого жидкого гелия принято называть характеристикой рефрижератора.

Подобные характеристики дают наглядную методическую основу анализа криогенных систем, состоящих из рефрижератора и криостатируемого объекта. По ним, например, можно определить скорость накопления жидкости при заданном теплопритоке и, следовательно, количественно оценить ту часть пускового периода, которая соответствует времени накопления необходимого уровня жидкого гелия в криостате. Полезно использование характеристик и в системах с охлаждаемыми тоководами.

Характеристики рефрижератора могут быть получены как экспериментальным, так и расчетным путем. Ранее на рис.13 уже приводились экспериментальные характеристики, снятые нами в ходе исследования режимов криогенной гелиевой установки КГУ-1600/4,5. Получение характеристик путем расчетов — довольно сложная задача, но необходимость ее решения проявля-

ется, по крайней мере, в двух аспектах. Во-первых, экспериментальное изучение характеристик крупных установок связано с большими затратами электроэнергии и другими эксплуатационными затратами. Во-вторых, это единственное средство изучения в тех случаях, когда исследуемые режимы еще не реализованы на практике.

Методика расчета режимов рефрижераторов основана на совместном решении уравнений теплопередачи и энергетического баланса теплообменников [14].

Ниже приводятся расчетные данные по работе КГУ-1600/4,5 в режимах без жидкого азота на различных точках характеристики, полученные с целью последующего наиболее рационального проектирования турбомашин. Расчетная схема приведена на рис.21. В качестве исходных данных использовались площади поверхностей теплообмена теплообменников КГУ-1600/4,5,

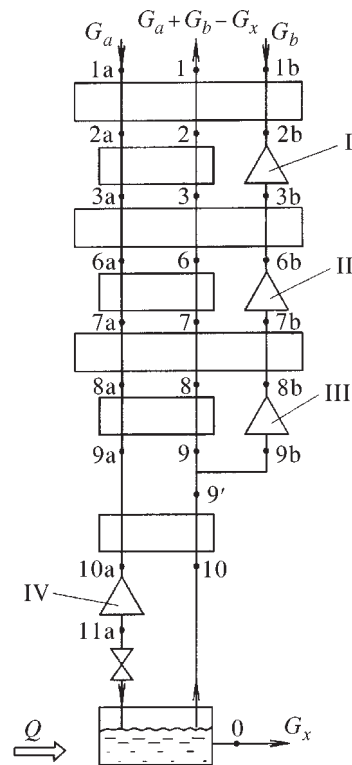


Рис.21. Расчетная схема рефрижератора КГУ-1600/4,5 при работе без использования жидкого азота

коэффициенты теплопередачи и гидравлического сопротивления теплообменников для основного проектного режима, в котором при суммарной производительности компрессоров $3600 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ установка без использования жидкого азота одновременно должна производить 1850 Вт холода на уровне $4,5 \text{ К}$ и 50 л/ч жидкого гелия. Расход сжатого гелия принимался равным $0,17 \text{ кг/с}$, давление после компрессоров — $2,5 \text{ МПа}$, адиабатный к.п.д. всех турбодетандеров — $0,65$.

Если принять обозначения: G_k — количество сжатого гелия, подаваемого из компрессора, G_x — количество жидкого гелия, выводимого из цикла, Q — холодопроизводительность, $q = Q / G_k$ — удельная холодопроизводительность, $x = G_x / G_k$ — степень ожижения, оптимизация параметров сводится к определению при заданном значении x максимума функции трех переменных $q = f(T_{2b}, T_{6b}, T_{8b})$, где T_{2b}, T_{6b}, T_{8b} — температуры сжатого гелия на входе в турбодетандеры ступени предварительного охлаждения.

Результаты проведенных оптимизационных расчетов для случая применения парожидкостного детандера приводятся на рис. 22,23 и 24. Видно, что даже для принятых сравнительно невысоких к.п.д. турбодетандеров

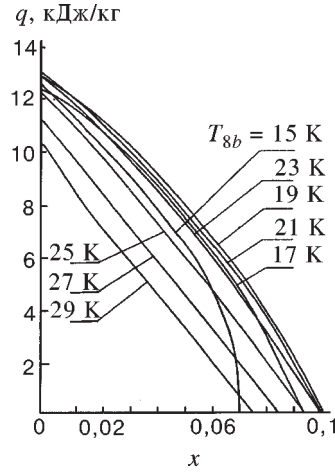


Рис.22. Расчетные характеристики КГУ-1600/4,5 при различных значениях температуры T_{8b} перед турбодетандером III степени предварительного охлаждения и использовании парожидкостного турбодетандера IV. Оптимальные значения температур $T_{6b} = 50$ К и $T_{2b} = 140$ К

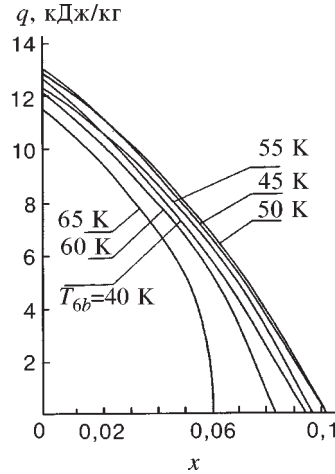


Рис.23. Расчетные характеристики КГУ-1600/4,5 при различных значениях температуры T_{6b} перед турбодетандером II степени предварительного охлаждения и использовании парожидкостного турбодетандера IV. Оптимальные значения температур $T_{8b} = 19$ К и $T_{2b} = 140$ К

тандеров эффективная работа без потребления жидкого азота может быть достигнута во всех точках характеристики. В чисто рефрижераторном режиме при максимальном значении $q = 12,8$ кДж/кг, холодопроизводительность КГУ-1600/4,5 составляет $Q = qG_k = 12,8 \times 0,17 = 2,18$ кВт. Максимальное значение $x = 0,1$ соответствует производительности в оживительном режиме $G_x = xG_k = 0,1 \times 0,17 = 0,017$ кг/с = 490 л/ч.

Эффективность установки при этом достаточно высока. Удельные затраты на получение холода и жидкого гелия составят 306 Вт/Вт холода при 4,5 К и 1,36 кВт/ч на литр жидкости (при изотермическом к.п.д. компрессора 50% — случай винтовой машины).

Из полученных результатов следует, что температуры включения детандеров степени предварительного охлаждения, обеспечивающие оптимальную характеристику, составляют 140, 50 и 19 К. Они практически не зависят от величины x , т.е. приблизительно одинаковы как для чисто рефрижераторного, так и для оживительного режимов. Вблизи оптимума функция

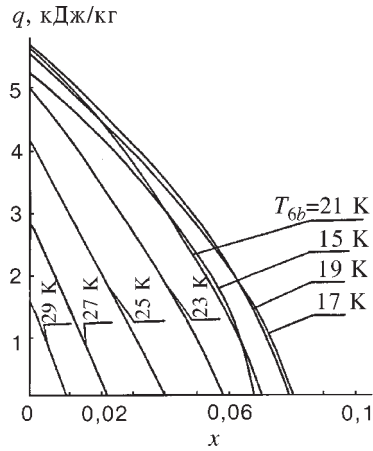


Рис.24. Расчетные характеристики КГУ-1600/4,5 при различных значениях температуры T_{2b} перед турбодетандером I ступени предварительного охлаждения и использовании парожидкостного турбодетандера IV. Оптимальные значения температур $T_{8b} = 19$ К и $T_{6b} = 50$ К

$q = f(T_{2b}, T_{6b}, T_{8b})$ достаточно полого, и для получения эффективных режимов может быть вполне допустимо, если проточные части включенных последовательно турбодетандеров будут обеспечивать распределение температур не более чем с 10% точностью: $T_{2b} = (140 \pm 20)$ К; $T_{6b} = (50 \pm 5)$ К; $T_{8b} = (19 \pm 2)$ К.

Следует отметить, что оптимальные значения температур T_{2b} , T_{6b} и T_{8b} , определенные для случая с применением парожидкостного детандера, остаются практически неизменными и в случае дросселирования в ступени окончательного охлаждения. Это свидетельствует о том, что указанные значения могут быть рекомендованы вне зависимости не только от количества x выводимого из цикла жидкого гелия, но и от величины к.п.д. парожидкостного детандера. При дросселировании в ступени окончательного охлаждения максимально достижимая холодопроизводительность составляет лишь $q = 5,6$ кДж/кг, а коэффициент сжижения $x = 0,08$. Как види-

дим, при переходе к дросселированию наиболее существенно снижение производительности для рефрижераторного режима, при котором наибольшая часть потока проходит по ступени окончательного охлаждения и, следовательно, велики термодинамические потери.

Ввиду нерегулируемости сопловых аппаратов для работы в каждой точке из приведенных выше характеристик необходим свой индивидуальный комплект из трех турбодетандеров. Расход через турбину жестко определен геометрией проточной части машины и параметрами на входе — давлением и температурой. Приближенные зависимости для расхода как функции давления и температуры на входе приводятся в [28,29]. Результаты расчетов с учетом этих ограничений показаны на рис.25 штриховыми линиями (2). Как видим, в максимуме эти кривые касаются оптимальной характеристики, но слева и справа от него эффективность установки резко снижается. Это происходит потому, что при изменении x становится другой оптимальной долей газа, отводимого на детандеры предварительного охлаждения, а эта оптимальная доля не может быть обеспечена ввиду нерегулируемости турбин. Поэтому параметры установки быстро уходят от оптимальных значений.

Поднять эффективность установки при работе с одним комплектом турбодетандеров на достаточно большом участке характеристики можно путем изменения количества сжатого гелия, поступающего на установку от компрессоров, в зависимости от текущего режима. На рис.25 такой вариант показан кривыми (3). На средней из них при $x=0,01$ количество перерабатываемого газа равно 0,22 кг/с, а при $x=0,07$ уменьшено до 0,13 кг/с. Указанный способ получения оптимальной характеристики, впервые продемонстрирован на опыте с подобной установкой меньшего масштаба в [57]. В криогенной системе нуклотрона он применим достаточно просто, т.к. в качестве резервного оборудования система содержит семь сравнительно небольших поршневых компрессоров, последовательное подключение которых обеспечивает возможность эффективно и в широких пределах изменять производительность компрессорного цеха.

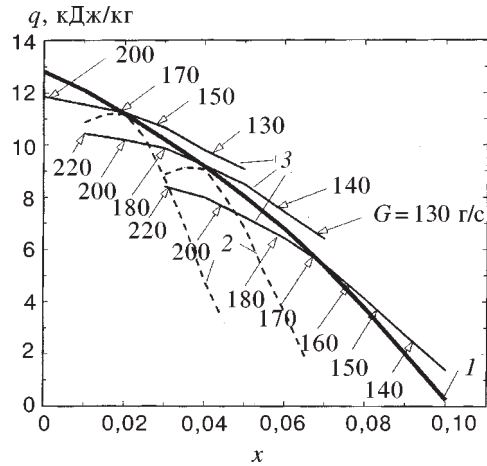


Рис.25. Сравнение оптимальной (1) характеристики установки КГУ-1600/4,5 с характеристиками для заданных комплектов турбодетандеров при постоянном (2) и переменном (3) расходе газа, перерабатываемого установкой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первое охлаждение полного кольца нуклотрона после сборки всех элементов в тоннеле и комплексной проверки подсистем было начато 17 марта 1993 г. За 100 часов на всех элементах была достигнута температура около 4,5 К, а вакуум в камере ускорителя составил 10^{-9} — 10^{-10} Тор.

Диполи и магнитные линзы были запитаны постоянным током 90 А. Затем в вакуумную камеру нуклотрона был инжектирован пучок дейтронов с энергией 5 МэВ и началась работа по проводке пучка. 26 марта были зарегистрированы первые обороты пучка в кольце — эта дата общепризнана как дата ввода в действие нового сверхпроводящего ускорителя тяжелых ядер [54–56].

Успешному запуску в марте 1993 г. предшествовала тщательно спланированная и целенаправленная работа по тестированию всех элементов кольца ускорителя. При гелиевых температурах на специально созданных стендах

были испытаны (иногда неоднократно) все магнитокриостатные элементы: 96 дипольных, 56 квадрупольных, целый ряд нестандартных элементов и тоководы. Проведены испытания цепочек магнитов различной длины. В феврале 1990 г. на отдельном стенде был испытан ряд из 12 дипольных и 4 квадрупольных магнитов — одна восьмая часть полной магнитной системы ускорителя. Магниты выдержали $2 \cdot 10^5$ циклов возбуждения с рабочим током 6,5 кА. В феврале 1992 г. уже на своем месте в тоннеле был смонтирован первый квадрант нуклотрона, состоящий из 28 диполей и 11 квадрупольей. После охлаждения до рабочей температуры в квадрант был инжектирован и проведен по всей длине пучок поляризованных дейтронов.

В течение времени, прошедшего после первого запуска полного кольца, сеансы работы нуклотрона проводятся регулярно. На этих сеансах криогенная система была задействована в течение более 3000 часов. Кроме того, по заявкам других потребителей отработано около 5000 часов при годовом производстве до 1 млн. литров жидкого гелия. При этом не зафиксировано отказов, приводивших к простоему оборудования или срыву плановых работ.

Подводя итог, необходимо сказать, что криогенная система нуклотрона представляет собой довольно дерзкий проект с большим количеством ранее не применявшихся технических идей и решений. Эта система описывается в таких основных терминах, как «быстроциклирующие сверхпроводящие магниты», «криостатирование потоком двухфазного гелия», «весьма короткое время охлаждения до рабочей температуры», «параллельное соединение всех магнитов», «парожидкостные турбодетандеры», «винтовой компрессор со степенью повышения давления более 25 в двух ступенях». Эти технические решения [66] позволили создать не только весьма эффективную и надежную систему, но и сделать ее необычно дешево. Это принципиально важно для осуществимости будущих ускорителей. Важно настолько, что «низкая стоимость» присутствует в самом названии одного из таких проектов [30], рассчитанного на использование кольца длиной около 1000 км с отклоняющими магнитами, создающими поля менее 2 Тл. В качестве прототипа такого магнита рассматриваются сверхпроводящие магниты типа нуклотрона [64].

Автор благодарен за дополнительную поддержку данной работы отделом физики многочастичных систем ФИАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Балдин А.М. и др.** — В сб.: Труды IV Всесоюз. сов. по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1975, т. II, с.4.
2. **Балдин А.М. и др.** — Предложения по программе Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований в 1991-95 гг., Дубна, 1989, с. 210.
3. **Шелаев И. А.** — В сб.: Труды XIII Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Новосибирск: Наука, 1987, т.2, с.24.

4. **Baldin A.M. et al.** — IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1983, v. NS-30, No.4, p.3247.
5. **Smirnov A.A. et al.** — J. de Physique, 1984, col. C1, sup. No.1, No.45, p.279.
6. **Dinaburg L.B. et al.** — Cryogenics, 1977, v.17, No.7, p.439.
7. **Dean J.W.** — Cryogenics, 1974, v.14, No.6, p.307.
8. **Агапов Н.Н. и др.** — В сб.: Труды X Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Серпухов, 1977, т.П, с.241.
9. **Agarov N.N. et al.** — Cryogenics, 1978, v.18, No.8, p.491.
10. **Agarov N.N. et al.** — Cryogenics, 1980, v.20, No.4, p.200.
11. **Агапов Н.Н. и др.** — Сообщение ОИЯИ 8-83-702, Дубна, 1983.
12. **Дьячков Е.И. и др.** — Сообщение ОИЯИ 8-82-169, Дубна, 1982.
13. **Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А. Г.** — ЭЧАЯ, 1982, т.13, вып.5, с.982.
14. **Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А.Г.** — Препринт ОИЯИ 8-9436, Дубна, 1976.
15. **Агапов Н.Н., Баландикова Н.И., Белушкин В.А. и др.** — Криогенные приборы и устройства в ядерной физике. М.: Энергоиздат, 1982.
16. **Agarov N.N.** — Adv. in Criog. Eng., 1998, v.43A, p.557.
17. **Агапов Н.Н. и др.** — Тез. докл. Межд. научно-практической конф. «Криогенная техника — науке и производству», ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М., 1991; Сообщение ОИЯИ P8-90-481, Дубна, 1990.
18. **Смирнов А.А., Ходжибагян Г.Г.** — Препринт ОИЯИ 9-88-344, Дубна, 1988.
19. **Baldin A.M. et al.** — Adv. in Cryog. Eng., 1994, v.39a, p.501; JINR Preprint E9-93-273, Dubna, 1993.
20. **Краковский Б.Д., Пронько В.Г.** — В сб.: Труды III Сов. по использованию ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, ОИЯИ, 1979, с.347.
21. **Шнепп В.Б. и др.** — Химическое и нефтяное машиностроение, 1980, №11, с.25.
22. **Архаров А.Н. и др.** — Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1987.
23. **Беляков В.П.** — Криогенная техника и технология. М.: Энергоиздат, 1982.
24. **Капица П.Л.** — УФН, 1936, т.XVI, вып.2, с.145.
25. **Агеев А.И. и др.** — В сб.: Труды VII Всесоюзн.сов. по ускорителям заряженных частиц. М.: Изд-во АН СССР, 1980, с.11.
26. **Rode C., Brindza P., Richied D.** — Advances in Cryogenic Engineering, 1980, v.25, p.326.
27. **Агеев А.И., Шамичев А.Н.** — Препринт ИФВЭ 82-159, Серпухов, 1982.
28. **Вайнштейн Г.Е. и др.** — Холодильная техника и технология. Киев: Техника, 1980, вып.31, с.45.
29. **Вайнштейн Г.Е. и др.** — Известия ВУЗов СССР. Энергетика, 1982, №5, с. 66.
30. **Foster G.W., Malamud E.** — Preprint Fermilab TM-1976, Batavia, 1996.
31. **Barton H.R. et al.** — Advances in Cryogenic Engineering, 1986, vol.31, p.634.
32. **Аверичев С. А. и др.** — Препринт ОИЯИ P8-11700, Дубна, 1978.
33. **Донягин А.М., Коваленко А.Д. и др.** — Сообщение ОИЯИ P9-94-329, Дубна, 1994.
34. **Коваленко А.Д., Аверичев С.А.** — Сообщение ОИЯИ P9-93-280, Дубна, 1993.
35. **Давыдов А.Б. и др.** — Химическое и нефтяное машиностроение, 1989, №4, с.23; Сообщение ОИЯИ 8-86-711, Дубна, 1986.
36. **Balandikov N.I. et al.** — Cryogenics, 1966, v. 6, p.158.
37. **Johnson R.W., Collins S.C., Smith J.L.** — Advances in Cryogenic Engineering, 1971, v.16, p.171.

38. **Quack H.** — In: Proc. of the VIII Int. Conf. in Cryogenic Engineering, 1980, p.343.
39. **Давыдов А.Б. и др.** — Авт. свид. СССР №361367 от 02.02.71. Бюл. ОИПОТЗ, 1973, №1, с. 98.
40. **Агапов Н. Н. и др.** — Сообщение ОИЯИ 8-90-304, Дубна, 1990.
41. **Агапов Н.Н. и др.** — Химическое и нефтяное машиностроение, 1991, №1, с.18.
42. **Агапов Н.Н. и др.** — Сообщение ОИЯИ P8-91-510, Дубна, 1991.
43. **Агапов Н.Н. и др.** — Сообщение ОИЯИ P8-91-509, Дубна, 1991.
44. **Агеев А.И. и др.** — В сб.: Труды XIII Межд. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Новосибирск: Наука, 1987, т.2., с. 332.
45. **Bartenev V.D., Shishov Yu.A.** — Cryogenics, 1991, v.31, p.985.
46. **Бартенеv В.Д.** — Препринт ОИЯИ P8-94-37, Дубна, 1994.
47. **Бартенеv В.Д., Шишов Ю.А.** — В сб.: Труды XI Всесоюзн. конф. по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Дубна, 1989, т.2, с.260.
48. **Бартенеv В.Д., Дацков В.И., Шишов Ю. А.** — ПТЭ, 1984, №5, с.228.
49. **Соколов Е. Я., Бродянский В.М.** — Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. М.: Энергоиздат, 1981.
50. **Дацков В.И.** — ПТЭ, 1981, №4, с.253.
51. **Дацков В. И.** — Труды 2-й Всесоюзн. конф. по техническому использованию сверхпроводимости. Л., 1984, т.2, с.250.
52. **Дацков В.И. и др.** — Сообщение ОИЯИ P8-87-604, Дубна, 1987.
53. **Гребенкина В.Г. и др.** — Объемные резисторы. Киев: Наукова думка, 1976, с.26.
54. **Нуклотрон — ускоритель релятивистских ядер** — Новости ОИЯИ, 1993, №1, с.1.
55. **Dubna — Nuclotron** — CERN COURIER, 1993, v.33, No.6, p.9.
56. **Dubna — Relativistic Deuterons in the NUCLOTRON** — CERN COURIER, 1994, v.34, No.6, p.21.
57. **Агеев А.И. и др.** — Препринт ОИЯИ 8-10790, Дубна, 1977.
58. **Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Шерстюк А.Н.** — Расчет и конструирование турбодетандеров. М.: Машиностроение, 1987.
59. **Красникова О.К. и др.** — Химическое и нефтяное машиностроение, 1975, №5, с.17.
60. **Agapov N.N. et al.** — In: Proc. of the 16th Int. Engineering Conf., 1996, part 1, p.139.
61. **Agapov N.N. et al.** — IEEE Transactions on Magnetics, 1996, part 1, v.32, No.4, h.3113.
62. **Grassman P. and Kopp J.** — Kaltetchnik, 1957, No.10, p.306.
63. **Baldin A.M. et al.** — IEEE Transactions on Magnetics, 1996, vol.32, No.4, p.2197.
64. **Baldin A.M. et al.** — Preprint JINR E9-96-343, Dubna, 1996.
65. **Агапов Н.Н. и др.** — Сообщение ОИЯИ P10-97-91, Дубна, 1997.
66. **Agapov et al.** — JINR Rapid Communications, 1998, No.3(89).