

A-233

41



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

8-94-409

На правах рукописи

УДК 621.384.6:536.483

АГАПОВ
Николай Николаевич

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ
КРИООБЕСПЕЧЕНИЯ УСКОРИТЕЛЕЙ
СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ МАГНИТАМИ**

**Специальность: 01.04.01 — техника эксперимента,
физика приборов, автоматизация физических исследо-
ваний**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

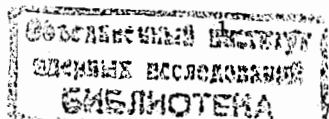
Дубна 1994

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Как известно, энергия ускоренных частиц растет с увеличением радиуса ускорителя и величины магнитного поля, в котором происходит ускорение. Современные ускорители уже достигли внушительных размеров – периметры их тоннелей измеряются десятками километров. Энергозатраты на питание "теплых" электромагнитов приближаются к пределам возможного, поэтому развитие ускорительной техники находится в прямой зависимости от прогресса в технической сверхпроводимости и криогенике.

Современные проекты крупных ускорителей (ДАБЛЕР, ИЗАБЕЛЛА, СУПЕРКОЛЛАЙДЕР – в США, УНК – в России, ГЕРА – в Германии, ЛНС – в ЦЕРНе, НУКЛОТРОН – в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне) основывались исключительно на использовании сверхпроводящих магнитных систем. Однако ввиду чрезвычайной сложности осуществления этих проектов до последнего времени только два из них получили практическое воплощение: ДАБЛЕР (1983) и ГЕРА (1991). В 1993 году был осуществлен запуск нового сверхпроводящего ускорителя тяжелых ядер НУКЛОТРОНа, создание криогенной системы которого было главной задачей представляемой работы.

Проект развития базовых установок Лаборатории высоких энергий ОИЯИ предусматривает последовательное создание новых ускорителей – СПИН, НУКЛОТРОН и СУПЕРНУКЛОТРОН – с использованием в них как основных элементов магнитов со сверхпроводящими обмотками, охлаждаемыми до температуры жидкого гелия. Применение таких магнитов по сравнению с "теплыми", работающими при температуре окружающей среды, дает 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, что позволяет изготовить практически все ее элементы на простом станочном оборудовании средних размеров. Это дает высокую точность и в конечном итоге определяет хорошее качество магнитного поля. Большое значение также имеет возможность изготовления таких не крупногабаритных изделий силами подразделений ОИЯИ без размещения дорогостоящих



заказов в промышленности.

Применение сверхпроводимости связано с охлаждением ускорителей до весьма низких температур, получаемых только при помощи жидкого гелия. Для этого необходимы сложные криогенные системы большой холодопроизводительности, требующие значительных капиталовложений. Как показал опыт НУКЛОТРОНа, капитальные затраты на создание таких криогенных систем достигают 30% общих затрат на ускоритель. К тому же соответствующее криогенное оборудование чаще всего промышленностью выпускается лишь единичными, единственными в своем роде образцами. Естественно, что в отсутствии серийного производства не достигается уровень 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 заводоизготовителей. Кроме того, по ряду экономических и технических обстоятельств значительную часть криогенного оборудования оказывается целесообразнее разрабатывать и изготавливать в самой Лаборатории.

В связи с этим в ЛВЭ традиционно развивается направление по работам и исследованию криогенных технологий применительно к создаваемым сверхпроводящим ускорителям. Часть результатов таких работ изложена в настоящей диссертации. Основной из них – криогенная система НУКЛОТРОНа, первого в нашей стране и третьего в мировой практике действующего ускорителя со сверхпроводящими магнитами. В развитие ускорительного комплекса ЛВЭ он размещен в цокольном этаже синхрофазотрона (рис.1).

Цель диссертации заключалась в создании для сооружаемых в ЛВЭ ОИЯИ сверхпроводящих ускорителей высокоэффективных криогенных систем на гелиевом температурном уровне, обладающих повышенной надежностью, автоматизированных, безопасных и удобных в эксплуатации во всех режимах. Кроме того, ставилась задача криогенного обеспечения научно-исследовательских работ и испытаний, необходимых при разработке такого рода ускорителей.

Научная новизна отражена в следующих тезисах:

– введено широко используемое в практике понятие характеристики гелиевого рефрижератора, дающее методическую основу анализа взаимосвязей различных параметров криогенных систем для сверхпроводящих магнитов: теплопритоков из окружающей среды, скорости накоп-

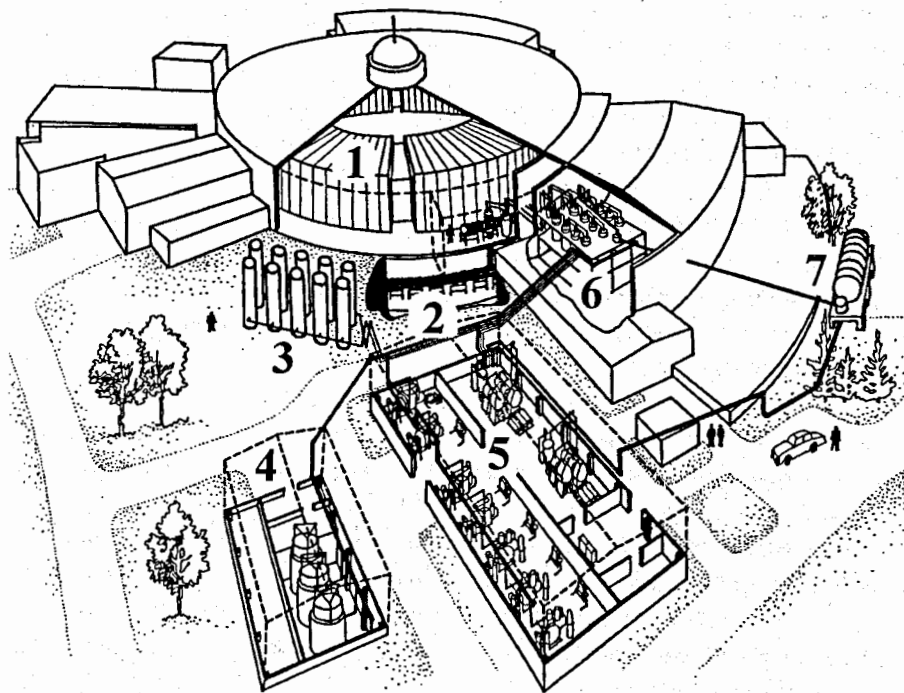


Рис. 1. Общий вид системы криогенного обеспечения НУКЛОТРОНа
1 – синхрофазотрон; 2 – кольцо НУКЛОТРОНа; 3 – ресиверы хранения сжатого гелия; 4 – здание газгольдерной; 5 – компрессорный цех; 6 – блоки охлаждения установок КГУ-1600/4,5; 7 – стационарное хранилище жидкого гелия на 36000 литров.

ления жидкости в криостатируемом объекте, расхода охлаждающего гелия на токовводы, холодопроизводительности в режимах с избыточным обратным потоком;

– впервые поставлена задача и разработан метод расчета режимов гелиевых рефрижераторов; по результатам расчетов сформулирован применяемый на практике близкий к оптимальному способ регулирования потоков гелия по температурному уровню последнего из детандеров ступени предварительного охлаждения;

– методически более точно, чем ранее, проведен термодинамический анализ систем с сателлитными рефрижераторами, что позволяет правильно устанавливать оптимальные параметры рефрижераторов при вынужденных кратковременных их переходах в сателлитные режимы, а также обоснованно производить проектирование новых рефрижераторов с избыточным обратным потоком;

– проведена серия технологических экспериментов, в ходе которых на опыте получены характеристики головного образца гелиевого рефрижератора КГУ-1600/4,5 в различных составах оборудования: в дроссельном режиме, с парожидкостными детандерами – поршневым и турбинного типа, с повышенным сверх номинального расходом сжатого гелия из компрессоров;

– проведен расчет характеристик установки КГУ-1600/4,5 для режимов без использования жидкого азота в цикле; показано, что такая работа возможна во всем диапазоне режимов – от рефрижераторного до ожижительного;

– на созданных криогенных комплексах впервые осуществлена получившая впоследствии чрезвычайно важное практическое применение работа гелиевого турбодетандера в парожидкостной области; экспериментально показано, что в комбинированных режимах работы парожидкостная турбина обладает саморегулируемостью;

– создан стенд и впервые проведены всесторонние исследования головного образца двухступенчатого винтового компрессорного агрегата "КАСКАД-80/25"; показана возможность его работы в режиме со значительным вакуумом на всасывании, что в соответствующих циклах дает возможность снизить температуру криостатирования;

– предложен, реализован и исследован при регулировании различных параметров криогенной установки КГУ-1600/4,5 новый универсальный алгоритм регулирования с применением микропроцессорной техники и электроприводов с постоянной скоростью движения;

– показано, что в "погружных" объектах, подобных установке СПИН, есть опасность "запирания" предохранительных клапанов жидкостью и существует заметный перепад уровней жидкого гелия по периметру;

– на основе расчетов предложена и реализована схема потоков в криостате установки СПИН, которая сводит до минимума разность уровней жидкого гелия по периметру и показано, что размеры этой установки следует считать предельными для реализации погружного

способа криостатирования;

– предложена и осуществлена простая, надежная и экономичная схема запуска установки КГУ-1600/4,5 при работе с крупными криостатируемыми объектами: в случае НУКЛОТРОНа с охлаждаемой массой 80 тонн пусковой период составляет около 100 часов;

– предложена и реализована обеспечивающая высокую надежность криостатирования гибкая схема параллельной работы трех гелиевых рефрижераторов на кольцо НУКЛОТРОНа, отличающаяся тем, что два рефрижератора работают по отдельности каждый на свое полукольцо, но имеют возможность передачи жидкого гелия из одного в другой при необходимости повышения холодопроизводительности или перевода какого-либо из них в сателлитный режим; третий рефрижератор работает независимо в ожижительном режиме с подачей жидкого гелия в любой из двух основных;

– впервые реализован способ криостатирования потоком двухфазного гелия объекта большой протяженности и имеющего более 150 параллельных каналов для криоагента; работоспособность такого способа подтверждена в ходе пяти успешно проведенных сеансов НУКЛОТРОНа общей продолжительностью более 1000 часов.

Практическая ценность работы заключается прежде всего в том, что решена задача криостатирования на гелиевом температурном уровне первого в нашей стране и третьего в мировой практике действующего ускорителя заряженных частиц высоких энергий со сверхпроводящими магнитами.

Содержащиеся в диссертации материалы дают основу для дальнейшего повышения энергетической эффективности системы криообеспечения НУКЛОТРОНа и его комплексной автоматизации.

Полученный опыт работы с винтовым компрессорным агрегатом КАСКАД-80/25 и парожидкостными турбодетандерами сыграл важную роль в развитии проекта криогенной системы Ускорительно - накопительного комплекса УНК-3000 в г.Протвино.

Оказано значительное влияние на развитие отечественной гелиевой промышленности. Использование криогенного комплекса НУКЛОТРОНа позволило России впервые выйти на мировой рынок с таким продуктом высокой технологии как жидкий гелий.

Криогенный комплекс НУКЛОТРОНа полностью обеспечивает постоянно возрастающие потребности ОИЯИ в жидком гелии. Испол-

зование этого комплекса в замкнутом цикле криостатирования вакуумных криопанелей синхрофазотрона позволило впервые провести на нем ускорение ядер серы.

Апробация работ и публикации. Основные результаты и выводы, включенные в диссертацию обсуждались на научных семинарах и конференциях:

– 15th International Cryogenic Engineering Conference, Genova, Italy, 1994;

– Международный конгресс "Гелий-94", Москва-Петербург, 1994;

– Cryogenic Engineering Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1993;

– X Международная конференция по ускорителям заряженных частиц высоких энергий, Серпухов, 1977;

– Международная научно-практическая конференция "Криогенная техника – наука и производству", Балашиха, 1991;

– VIII Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1983;

– III Международный семинар ИКФА "Возможности и ограничения сверхпроводящих магнитов ускорителей", Протвино, 1980;

– всесоюзные конференции - "I Всесоюзная конференция по криогенной технике", Ленинград, 1973; "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники", Ленинград, 1981;

"Холод - народному хозяйству", Ленинград, 1991;

– всесоюзные семинары по криогенной технике в МВТУ им.Баумана;

– научные семинары отделов в ЛВЭ ОИЯИ и ИФВЭ (Протвино).

Основные результаты диссертации опубликованы в работах, список которых приведен в конце автореферата.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.

Она состоит из введения, пяти частей, заключения и списка литературы.

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, содержатся сведения о публикациях и апробации работы.

В первой части показаны особенности криостатирования крупных

установок со сверхпроводящими магнитными системами большой протяженности и на этой основе дана мотивировка необходимости рассмотрения тех вопросов, которые включены в различные разделы диссертации.

Криогенные системы отводят тепло, выделяющееся в обмотках сверхпроводящих магнитов при циклическом изменении магнитного поля, торможении рассеянных ускоренных частиц, а также тепло, притекающее из окружающей среды через теплоизоляцию, опоры и по тоководам. По способу отвода тепла различают:

– традиционный метод криостатирования сверхпроводящих магнитов – погружение в кипящий гелий. В сильно протяженных системах он неприменим, т.к. ввиду чрезвычайно малой плотности жидкого гелия становится невозможным поддерживать его одинаковый уровень в разных точках криостата;

– другой метод, при котором тепло отводится циркуляцией криоагента по расположенным внутри или около обмоток каналам, применяется повсеместно. Его дополнительное преимущество – уменьшение количества гелия, требующегося для заполнения системы и, соответственно, снижение опасности повышения давления гелия при переходах магнитов из сверхпроводящего в нормальное состояние.

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. Неоднократно высказывались опасения, что при использовании двухфазной парожидкостной смеси может возникнуть неустойчивость режима течения, которая характеризуется пульсирующим изменением расхода, давления и температуры криоагента или блокированием некоторых из параллельных каналов "паровыми пробками". Из-за этих опасений во всех описанных ранее системах сверхпроводящих ускорителей теплоотвод в основном осуществляют потоком однофазного жидкого гелия.

Основные требования, предъявляемые к системам криостатирования, состоят в обеспечении возможно более низкой температуры магнитов, высокой энергетической эффективности при различных режимах работы, надежности и безопасности, современного уровня автоматизации. Содержание диссертации, а также направление и методы решения задач были обусловлены этими требованиями.

Именно из соображений получения возможно более низкой при прочих равных условиях температуры магнитов в обоих случаях – для модельного синхротрона СПИН и ускорителя НУКЛОТРОН – было отдано предпочтение криостатированию путем отвода тепла непосредственно к кипящему гелию. Концепция синхротрона СПИН основывалась на применении погружного способа, однако периметр этого ускорителя около 60 метров – предельный случай применения такого способа, и в дальнейшем для НУКЛОТРОНа, имеющего периметр около 250 метров, стало необходимым перейти на циркуляционный способ. Ряд дополнительных экспериментальных исследований как на одиночных магнитах, 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, в отличие от известных аналогичных систем, был выбран способ криостатирования сверхпроводящих магнитов посредством циркуляции парожидкостного потока гелия.

Требование высокой энергетической эффективности при работе криогенных систем во многих режимах вызвало необходимость включения специального раздела об исследовании режимов рефрижераторов. Действительно, из-за большой охлаждаемой массы, сложности и протяженности рассматриваемых криостатируемых объектов процесс охлаждения их до рабочих температур требует очень длительного времени. В ходе запуска используется весьма широкий спектр режимов. Из соображений надежности отдельно исследованы так называемые "сателлитные" режимы, посредством которых предусматривалась возможность ремонта или замены каких-либо машин и аппаратов без остановки всего криогенного комплекса. Обеспечение высокого уровня надежности потребовало кроме того и полного отказа от обычных для лабораторных криогенных установок машин с возвратно-поступательным движением поршня с заменой их винтовыми компрессорами и турбодетандерами с повышенным ресурсом и длительным временем безотказной работы. В связи с этим в диссертацию включены разделы об испытаниях головных образцов таких машин. Показана необходимость включения в работу

вопросов автоматизации и безопасности работ.

Вторая часть диссертации посвящена исследованию режимов работы гелиевых рефрижераторов. Как известно, криогенный гелиевый рефрижератор создают на основе расчета соответствующего термодинамического цикла. Если такой рефрижератор предполагается использовать в нескольких различных режимах, то анализируют все варианты цикла и проектирование продолжают по тому варианту, который требует наибольшей теплопередающей поверхности теплообменников. Действительный 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. Например, при работе рефрижератора в комплекте с крупной сверхпроводящей магнитной системой необходимо пройти по крайней мере три следующие стадии: понижение температуры рефрижератора и криостатируемого объекта до температуры жидкого гелия – режим охлаждения; заполнение криостатов жидким гелием – ожиджительный режим; поддержание заданного уровня жидкого гелия при компенсации теплопритоков или тепловыделений – рефрижераторный режим. В последнем случае часть жидкого или холодного газообразного гелия как правило необходимо отводить на охлаждение тоководов, тепловых мостов или экранов.

При криостатировании сверхпроводящих магнитных систем гелиевые рефрижераторы практически во всех случаях работают в комбинированных режимах, когда одновременно с производством холода осуществляется и ожиднение гелия. Зависимость холодопроизводительности от количества одновременно вырабатываемого жидкого гелия мы назвали характеристикой рефрижератора.

Подобные зависимости полезны в целом ряде случаев. Например, если характеристика известна, можно определить скорость накопления жидкого гелия в криостатируемом объекте с известным теплопритоком и, следовательно, количественно оценить ту часть пускового периода, которая соответствует времени накопления необходимого уровня жидкого гелия в криостате.

На практике часто используют и ту ветвь характеристики, которая соответствует случаю, когда жидкий гелий не вырабатывается, а вводится в цикл (режимы с избыточным обратным потоком или "сателлитные" режимы). В этом случае тепловыделения в криостатируемом

объекте могут превышать номинальную холодопроизводительность рефрижератора, но нормальный процесс криостатирования между тем обеспечивается. Такая работа может осуществляться и без подвода жидкого гелия извне за счет заранее накопленной жидкости в сборнике рефрижератора или в криостатах объекта. Характеристика позволяет оценить время, на которое рассчитан сделанный запас.

Более сложный случай использования характеристик – анализ и оптимизация системы с охлаждающими тоководами: существует оптимальное значение величины расхода жидкого гелия, направляемого на охлаждение тоководов, т.к. холодопроизводительность рефрижератора снижается по мере повышения этого расхода, а теплоприток из окружающей среды по тоководу уменьшается.

Диссертация содержит экспериментальные и расчетные данные по характеристикам базовой криогенной установки КГУ-1600/4,5, спроектированной и поставленной в ОИЯИ объединением НПО "Гелиймаш" специально для создаваемых здесь ускорительных комплексов. Методика расчетов подробно представлена также на более простых примерах прототипных рефрижераторов.

Экспериментальные характеристики установки КГУ-1600/4,5 в реализованных на практике режимах приведены на рис. 2. Характеристика 1 соответствует режимам с дросселированием в ступени окончательного охлаждения. При замене дросселя на парожидкостной турбодетандер (характеристика 2) холодопроизводительность существенно возрастает: в чисто рефрижераторном режиме - с 1100 до 1700 Вт, т.е. в 1,5 раза. Для форсирования установки в дроссельном режиме можно подключить резервный компрессор (характеристика 3), увеличив расход гелия с 3600 м³/час до 4800. Холодопроизводительность при этом возрастает примерно на 400 Вт, однако включение дополнительного компрессора приводит к увеличению давления в сборнике жидкого гелия с 0,028 до 0,044 МПа, что повышает температуру криостатирования магнитов на 0,13 К. С применением поршневого парожидкостного детандера (характеристика 4) установка КГУ-1600/4,5 обладает несколько большей холодопроизводительностью и энергетической эффективностью, чем в случае парожидкостного турбодетандера. Однако из соображений надежности, как правило, нами были использованы машины турбинного типа.

Расчет характеристики – довольно сложная задача, но его необхо-

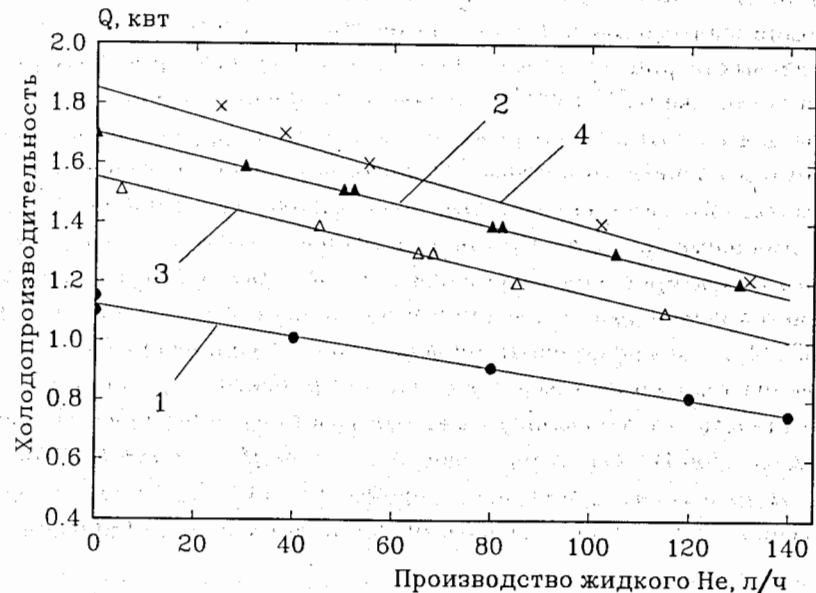


Рис. 2. Характеристики установки КГУ-1600/4,5 при одновременном производстве холода на уровне 4,5 К и жидкого гелия.

1–режимы с дросселированием в ступени окончательного охлаждения; 2–режимы с расширением в парожидкостном турбодетандере; 3–дроссельные режимы при повышенном расходе сжатого гелия (четыре компрессора 305НП-20/30); 4–режимы с поршневым парожидкостным детандером.

димость проявляется по крайней мере в двух аспектах. Во-первых, экспериментальное изучение характеристик связано с весьма большими затратами электроэнергии и другими составляющими затрат при эксплуатации установок. Во-вторых, это единственное средство изучения в тех случаях, когда исследуемые режимы еще не реализованы на практике. В частности, установка КГУ-1600/4,5 до сих пор работает с двумя (вместо трех) турбодетандерами в ступени предварительного охлаждения и использует в зависимости от целей запуска от 250 до 300 л/час жидкого азота. Это существенно снижает ее технико-экономические показатели.

Для повышения энергетической и экономической эффективности

криогенной системы НУКЛОТРОНа чрезвычайно важно принять меры по экономии жидкого азота и, по возможности, исключить его применение в гелиевых рефрижераторах. Поскольку в ходе экспериментальных работ на установке КГУ-1600/4,5 удачного комплекта из трех турбодетандеров для работы в таком режиме так и не было подобрано, встала задача путем расчетного анализа выяснить возможности работы в режиме без жидкого азота на различных точках характеристики и определить оптимальные параметры установки для последующего более рационального проектирования турбомашин. В качестве исходных данных для расчетов использовались величины поверхностей теплообменников КГУ-1600/4,5, коэффициенты теплопередачи и гидравлического сопротивления теплообменников для основного проектного режима, в котором установка без использования жидкого азота должна одновременно производить 1850 Вт холода на уровне 4,5 К и 50 л/час жидкого гелия. Расход сжатого гелия принимался равным 0,17 кг/с, давление после компрессоров – 2,5 МПа, адиабатный к.п.д. всех турбодетандеров – 65%.

Для решения поставленной задачи к каждому данному значению степени ожижения необходимо было определить значение холодопроизводительности q на единицу расхода сжатого газа из компрессоров.

Результаты проведенных расчетов показали, что и для принятых сравнительно небольших величин к.п.д. турбодетандеров 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 составляет 2,18 кВт. Максимальное значение степени ожижения $x=0,10$ соответствует производительности в ожижительном режиме 490 л/час. При этом достигается весьма высокая энергетическая эффективность. Удельные затраты на получение холода и жидкого гелия составят соответственно 255 Вт/Вт холода при 4,5 К и 1,13 кВт·ч на 1 литр жидкости.

Из приведенных в диссертации материалов следует, что оптимальные температуры включения детандеров ступени предварительного охлаждения, составляющие 140, 50 и 19 К независимы от количества жидкого гелия, выводимого из цикла, т.е. они одинаковы как для чисто рефрижераторного, так и для ожижительного режимов. Вблизи оптимума характер зависимостей производительности от этих температур достаточно пологий, и для получения эффективных режимов вполне

допустимо обеспечивать распределение температур с 10%-ной точностью.

В диссертации содержатся результаты расчетов и для случая с дросселированием в ступени окончательного охлаждения. Показано, что приведенные выше оптимальные значения температур перед детандерами остаются неизменными и при дросселировании, т.е. указанные значения могут быть рекомендованы вне зависимости не только от количества выводимого из цикла жидкого гелия, но и величины к.п.д. парожидкостного детандера. При дросселировании в ступени окончательного охлаждения максимальная холодопроизводительность составляет $q=5,6$ кДж/кг, а коэффициент ожижения $x=0,08$.

Методика расчета режимов основана на совместном решении уравнений энергетического баланса и теплопередачи в теплообменниках. Если на стадии проектирования установки определяют геометрические размеры теплообменных аппаратов по заданным параметрам теплообмениваемых сред, то в данном случае существует обратная задача. В диссертации даны соотношения, наиболее просто описывающие ее решение. Они позволяют для разных схем рефрижераторов легко составить цепочку уравнений, в которой последовательно находятся все недостающие параметры. В работе рассмотрены особенности решения таких систем уравнений с учетом реальных термодинамических свойств гелия, определяемых по таблицам.

Следует отметить довольно важный практический выход, который имели проведенные расчеты режимов разных типов рефрижераторов: оптимальная температура на входе в последний детандер ступени предварительного охлаждения практически не зависит от количества производимой жидкости, что позволяет принять в качестве алгоритма управления распределением потоков в рефрижераторе постоянство этой температуры. Этот простой, близкий к оптимальному и весьма удобный в практической работе метод регулирования в настоящее время очень широко применяется при проведении сложных процессов в системах, включающих совместно работающие гелиевый рефрижератор и криостатируемый объект.

Третья часть диссертации посвящена работам, обеспечивающим основные факторы повышения надежности и эффективности криогенных гелиевых систем. К таким факторам относятся: использование машин без возвратно-поступательного движения поршня; дополнительное по-

вышение надежности криостатирования возможностями использования требующих ремонта установок в сателлитных режимах; современный уровень автоматизации.

Опытная эксплуатация головного образца криогенной гелиевой установки КГУ-1600 показала, что основные причины низкой надежности обусловлены применением машин поршневого типа – компрессоров 305НП-20/30 и парожидкостного детандера. Поэтому дальнейшее развитие поставило необходимость перехода на винтовое компрессорное оборудование и замены поршневого парожидкостного детандера на машину турбинного типа.

Гелиевый винтовой маслозаполненный компрессорный агрегат "Каскад-80/25" разработан в НПО "Казанькомпрессормаш" применительно к системе криогенного обеспечения Ускорительно-накопительного комплекса, создаваемого в Институте физики высоких энергий в Протвино. Для этого сооружения предполагалось выпустить серию таких машин в количестве около 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 НУ-КЛОТРОНа.

Винтовой компрессорный агрегат "Каскад-80/25" – машина второго поколения отечественных винтовых маслозаполненных гелиевых компрессоров. В криогенной системе установки "Токамак-15" применялся трехступенчатый компрессорный агрегат со сходными по производительности и давлению на нагнетании параметрами. В отличие от него "Каскад-80/25" выполнен в двухступенчатом варианте с одним маслоотделителем и общей маслосистемой компрессоров первой и второй ступени.

Компрессорная установка "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 тех же параметров, что и на первой ступени.

В блок маслоохладителей входит четыре прямооточных теплообменника с водяным охлаждением.

Испытания винтового компрессорного агрегата "Каскад-80/25" проводились по замкнутой безгазгольдерной схеме. Требуемое давление на всасывании первой ступени обеспечивалось ресиверами 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. Отделившийся газ проходит сепаратор, концевой холодильник и через байпасирующий вентиль вновь поступает на всас компрессора.

Параметры агрегата "Каскад-80/25" по техническим условиям и в ходе испытаний были следующие:

| | по техническим условиям | по данным испытаний |
|---|-------------------------|---------------------|
| Производительность, м ³ /мин | 78-90 | 100-107 |
| Давление всасывания, МПа | 0,120-0,104 | 0,071-0,086 |
| Давление нагнетания, МПа | 2,5 | 2,32-2,54 |
| Мощность потребляемая, кВт | | |
| I ступень | 565 | 563-640 |
| II ступень | 439 | 339-395 |
| Унос масла, г/час | 369 | 370 |
| Изотермический к.п.д. | не менее 0,5 | 0,52-0,55 |

Испытания проводились при давлении всасывания более низком, чем по техническим условиям, – в пределах 0,071-0,086 МПа. Дальнейшее повышение давления всасывания приводило к повышению межступенчатого давления и вызывало перегрузку электродвигателя первой ступени. Имеются две причины, по которым такое пониженное давление в трубопроводе всасывания компрессора для системы криогенного обеспечения НУ-КЛОТРОНа неприемлемо. Во-первых, она работает при поддержании некоторого избыточного давления в обратном потоке с помощью маслозаполненного газгольдера. Во-вторых, даже если произойдет переход на безгазгольдерную схему (как это и предполагается в будущем), давление ниже атмосферного нежелательно из-за возможного загрязнения гелия воздухом из окружающей среды при недостаточной герметичности системы. Вследствие этого возникла необходимость в таком

согласовании производительностей ступеней компрессорного агрегата, который позволил бы работать при некотором избыточном давлении во всасывающем трубопроводе.

Задача согласования производительностей ступеней решалась двумя способами – байпасированием части газа после первой ступени и дросселированием газа на всасывании первой ступени. В диссертации обсуждаются и другие, более эффективные меры по согласованию производительностей ступеней, одна из которых – доработка имеющегося двигателя с целью повышения допустимой мощности – реализуется в настоящее время.

Несмотря на отмеченную несогласованность производительностей ступеней, в целом головной образец агрегата "Каскад-80/25" хорошо зарекомендовал себя в ходе испытаний и проведенной в 1993 году интенсивной эксплуатации. Изотермический к.п.д., полученный при давлении на всасывании 0,071-0,086 МПа, составил 0,52-0,55. Замеры шумовых характеристик в пяти точках на расстоянии 1 м от агрегата показали уровни звуковой мощности не более 81-102 дБ. В течение последнего года агрегат "Каскад-80/25" отработал для нужд криогенного комплекса НУКЛОТРОНа более 3000 часов при производстве около 30-ти плановых включений и выключений. В указанный период не было выявлено никаких существенных отказов или отклонения параметров машины от нормы. Таким образом, агрегат "Каскад-80/25" стал не только основой компрессорного обеспечения криогенной системы НУКЛОТРОНа, но и после небольшой доработки уверенно может быть рекомендован для серийного производства и применения в других крупных криогенных системах.

Созданный нами стенд позволил произвести испытания агрегата "Каскад-80/25" в вакуумно-компрессорном режиме. Они показали высокую надежность и эффективность машины при работе в широком диапазоне давлений всасывания – от 0,02 до 0,085 МПа. Это открывает новые возможности создания высокоэффективных крупных криогенных гелиевых систем на более низкий температурный уровень криостатирования – до температуры 3,0 К и ниже.

Для повышения энергетической эффективности криогенных рефрижераторов и ожижителей большое значение имеет возможность замены связанного с большими потерями эксергии процесса дросселирования на более совершенный процесс адиабатного расширения в детандере.

В 1965 году замена дросселя на детандер была предложена и реализована в цикле водородного ожижителя в ОИЯИ. На гелиевом ожижителе такую модернизацию впервые (1970 г.) удалось провести С.Коллинзу. В обоих случаях были использованы детандеры поршневого типа.

Поршневые детандеры вместо дросселя применялись и в первоначальном варианте головного образца рефрижератора КГУ-1600/4,5. В 1985 году была предпринята попытка заменить поршневой парожидкостной гелиевый детандер установки КГУ-1600/4,5 на машину турбинного типа. Наряду с повышением надежности такая модернизация позволяла разрешить и значительные эксплуатационные трудности, возникающие во время переходных процессов при поломках поршневых детандеров: в случае самопроизвольной остановки машины турбинного типа сопловой 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 нм ³ /час; |
| - мощность | - 0,85 кВт. |

В целях обеспечения однотипности расширительных машин, комплектующих установки КГУ-1600/4,5 гелиевый парожидкостной турбодетандер был выполнен по принципиальной схеме, принятой ранее и для газовых турбодетандеров предварительного охлаждения.

Холодопроизводительность установки КГУ-1600/4,5 при использовании парожидкостного турбодетандера показана на рис.2. Как уже отмечалось, в рефрижераторном режиме она составляет 1700 Вт, что на 50% выше, чем при дросселировании. Принципиально, что несмотря на отсутствие возможностей регулирования проходных сечений соплового аппарата турбодетандера, эффективная работа установки КГУ-1600/4,5 обеспечивается на всех точках характеристики при неизмен-

ном расходе сжатого газа, подаваемого компрессорами. Такой эффект "саморегулирования" распределения потоков при переходе от рефрижераторного к ожижительному режиму объясняется тем, что в рефрижераторном режиме, когда необходим максимальный расход гелия через турбину, 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 турбомшины, составляющей в чисто ожижительном режиме около 8,5 К. Понятно, что такой рост температуры существенно снижает количество перерабатываемого гелия, и этого оказывается достаточно для эффективного перераспределения потоков.

При криостатировании крупных ускорителей со сверхпроводящими магнитами предпочтение часто отдают криогенным системам из равномерно расположенных по периметру кольца рефрижераторов с избыточным обратным потоком – сателлитов. Они работают за счет жидкого гелия, получаемого от центрального ожижителя, что повышает надежность, т.к. позволяет в каждом из таких рефрижераторов обойтись минимумом оборудования в ступенях предварительного охлаждения.

Но даже если в номинальном режиме рефрижератор работает по обычной схеме, возможно его применение и в сателлитном режиме. Такая необходимость возникает, например, при выходе из строя какого-либо из детандеров ступени предварительного охлаждения, когда нельзя прервать работу по криостатированию объекта. В этом случае используется заранее запасенный жидкий гелий или же он подливается от параллельно работающего на тот же объект рефрижератора. Указанный способ резервирования предусмотрен в криогенной системе НУ-КЛОТРОНа.

Вопросы применения рефрижераторов с избыточным обратным потоком рассматривались многими авторами. Наиболее подробный анализ опубликован А.И.Агеевым с сотрудниками. Однако полученные данные нельзя считать достаточно полными в силу того, что в качестве одного из критериев при сопоставлении различных вариантов обычно 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

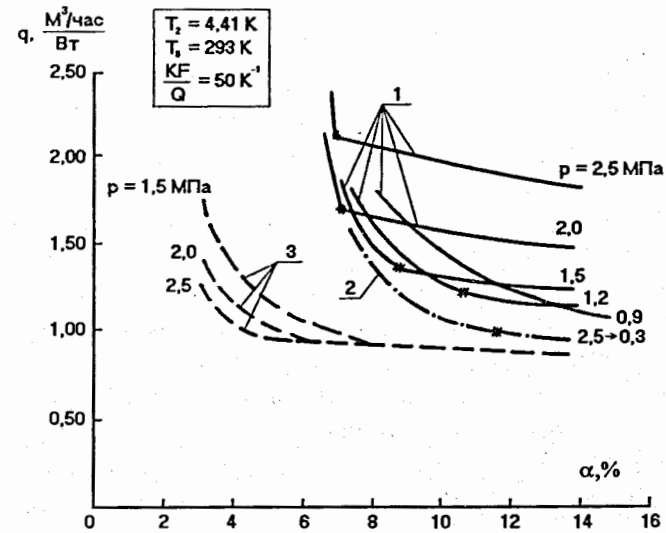


Рис. 3. Удельный расход сжатого газа в зависимости от относительного количества потребляемого в сателлит жидкого гелия для различных давлений в прямом потоке. 1 - сателлит с простым дросселированием; 2 - с промежуточным дросселированием; 3 - детандерный сателлит при адиабатном к.п.д. 0,8 (* - точки с минимумом удельного расхода энергии).

мере уменьшения количества используемого жидкого гелия. Необходимое условие методически верного сопоставления вариантов соблюдается только тогда, когда в качестве одного из исходных данных взята величина kF – произведения коэффициента теплопередачи и поверхности теплообмена теплообменников рефрижератора. Полученные из этих соображений расчетные данные представлены на рис.3.

В дроссельных сателлитах с понижением давления от 2,5 до 1,2 МПа удельный расход сжатого газа существенно уменьшается. При дальнейшем снижении давления в области $p < 1,2 \text{ МПа}$ удельный расход сжатого газа, наоборот, увеличивается, что объясняется ростом температуры перед дросселем вследствие неблагоприятного соотношения теплоемкостей в прямом и обратном потоках. Эффективность сателлитного рефрижератора в таком случае можно повысить путем введения промежуточного дросселирования. Кривая 2 показывает зависимость,

полученную при повышенном гидравлическом сопротивлении по прямому потоку в холодной части теплообменника. Процесс непрерывного дросселирования происходит от 2,5 до 0,3 МПа. Наименьший удельный расход сжатого газа достигается с применением вместо дросселя детандера.

В диссертации рассмотрены также удельные затраты энергии в криогенной системе с сателлитными рефрижераторами. Эти затраты складываются из затрат на сжатие газа в компрессоре и на получение жидкого гелия в ожижителе. Точки с минимумом удельных энергозатрат отмечены на рис.3. Сателлит с простым дросселированием имеет наименьшие удельные затраты при давлении в прямом потоке 1,2 МПа и относительном количестве потребляемого гелия 10,6%. Для этих параметров они составляют 460 Вт/Вт. Промежуточное дросселирование уменьшает удельные затраты до 435 Вт/Вт. В установке с детандером оптимум достигается при $\eta = 4,7\%$, а отдельные энергозатраты снижаются до величины 275 Вт/Вт.

Аналогичные оптимизационные расчеты проведены не только при величинах $kF/Q = 50K^{-1}$, но и ряде других значений, причем показано, что уменьшение этой величины в области $kF/Q < 50K^{-1}$ начинает существенно увеличивать энергозатраты, а увеличение при $kF/Q > 50K^{-1}$ не приводит к заметному их изменению. Из этого следует, что при $kF/Q > 50K^{-1}$ технические потери уже сведены к минимуму и преобладают собственные потери от необратимости теплообмена, существующие даже когда в каком-либо из сечений теплообменника разность температур между потоками становится равной нулю (т.е. при kF стремящемся к бесконечности). Естественно, что параметры установки при этом перестают зависеть от величины комплекса kF/Q .

Величины теплообменных поверхностей криогенных гелиевых рефрижераторов настолько велики, что, как правило, условие $kF/Q > 50K^{-1}$ соблюдается. Таким образом, при переводе в сателлитный режим любого из них с достаточной точностью можно использовать приведенные на рис.3 и другие содержащиеся в диссертации зависимости.

Необходимость существенного повышения уровня автоматизации выпускаемых отечественной промышленностью криогенных гелиевых установок общеизвестна. Это обстоятельство заставило нас проводить работы по автоматизации криогенных систем собственными силами, используя накопленный в ОИЯИ большой опыт по применению электро-

ники в стандарте КАМАК и микропроцессорной техники.

В диссертации дано описание одной из первых микропроцессорных систем контроля и управления, которая создана нами в ЛВЭ ОИЯИ в 1981 году применительно к головному образцу криогенной гелиевой установки КГУ-1600/4,5. Эта система способна одновременно измерять около 150 различных параметров (информация собирается с датчиков температуры, давления, оборотов, уровней жидкого гелия и азота, а также с датчиков состояний отдельных устройств установки) и управлять исполнительными устройствами в количестве до 20 шт. Эта система эксплуатировалась нами при обслуживании установки СПИН и при ожижении гелия на КГУ-1600/4,5 на протяжении десяти лет. За это время все, что связано со сбором, обработкой и представлением информации, получило широкое распространение в других аналогичных системах: три из них, в более современном варианте электроники, созданы и эксплуатируются на установках КГУ-1600/4,5 криогенного комплекса НУКЛОТРОНа. Независимо существует система термометрии кольца НУКЛОТРОНа, обеспечивающая сбор и представление информации с более, чем 500 шт. термопреобразователей.

Однако на НУКЛОТРОНе остается недостаточно разработанным и внедренным в практику направление, связанное с исследованием алгоритмов работы регулирующих органов криогенных гелиевых установок: в отличие от аналогичных западных рефрижераторов и ожижителей гелия, в которых при управлении используются П-, ПИ-, ПИД- законы регулирования, реализуемые пневмосистемами, воздействующими на мембранные исполнительные механизмы, установки КГУ-1600/4,5 поставляются с регулирующими вентилями, имеющими электроприводы с постоянной скоростью движения. Проведенные работы показали, что микропроцессорная техника наряду с традиционным подходом позволяет создавать программы, точно моделирующие действия опытного оператора. При этом достигается высокое качество регулирования и широкий диапазон устойчивой работы даже в том случае, когда используются только обычные электроприводы с постоянной скоростью движения, управляемые от выходных регистров микропроцессорной системы сигналами типа "да-нет". В диссертации описан полученный нами опыт по разработке таких алгоритмов и соответствующих программ управления, реализованных на одной из установок КГУ-1600/4,5.

Общий принцип управления заключается в том, что программа сос-

гоит из нескольких иерархических уровней. В первую очередь обеспечиваются параметры установки, при которых не приводятся в действие предохранительные клапаны, блокировки, сигнализация и др. устройства для безопасной и безаварийной работы. На втором этапе производятся операции, приводящие к уменьшению абсолютной величины производной по времени от регулируемого параметра. И, наконец, на третьем этапе идет плавная подстройка этого параметра к заданной области значений. На этом принципе создан универсальный алгоритм управления регулирующим клапаном, который успешно применялся для регулирования положения газгольдера, давления сжатого газа после компрессоров, давления в танке жидкого азота, уровня жидкого гелия в сборнике. В работе приводятся константы и графики переходных процессов регулирования различных параметров. Отмечены некоторые особенности управления клапанами.

Четвертая часть описывает создание системы криогенного обеспечения модельного сверхпроводящего синхротрона СПИН на энергию 1,5 Гэв.

Хотя, как уже отмечалось, для крупных сооружений оптимальны циркуляционные схемы, сравнительно небольшие одиночные магниты и группы магнитов традиционно предпочитают криостатировать посредством погружения их в кипящий гелий. В этом случае при прочих равных условиях достигается более низкая и хорошо стабилизируемая температура криостатирования, значительно проще решаются вопросы подвода силовых и измерительных кабелей к каждому отдельному магниту. Эти соображения сыграли решающую роль при выборе "погружной" схемы для установки СПИН.

Однако, сделав подобный выбор, необходимо было учесть ряд особенностей, проявляющихся при довольно большой длине "погружного" криостата: возможность изменения уровня жидкости по периметру установки; специфические условия работы предохранительных клапанов, большое количество жидкого гелия и трудности его эвакуации как в аварийных случаях, так и при штатной остановке системы.

Как объект криостатирования, установка СПИН (рис.4) характеризуется тем, что дипольные и квадрупольные магниты образуют замкнутый контур в виде двух полуколец радиусом 5 м и соединяющих их двух прямолинейных участков длиной 10 м. Общий периметр магнитной дорожки ускорителя составляет таким образом около 54 м. Все

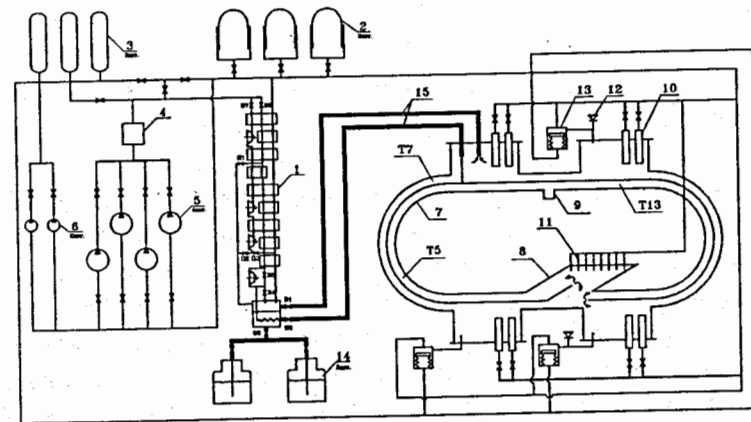


Рис. 4. Принципиальная схема криостатирования ускорителя СПИН.

1 - гелиевая установка КГУ-1600/4,5; 2 - газгольдеры вместимостью 20 м³; 3 - ресиверы для хранения сжатого газа - V=20 м³, p_p=30 кг/см²; 4 - блок осушки цеолитовый; 5 - поршневые компрессоры 305НП-20/30; 6 - поршневые компрессоры 1ВУВ-45/150; 7 - криостат установки СПИН; 8 - гелиевый сосуд канала инжекции; 9 - криостат измерительного периода; 10 - тоководы на 3000 А; 11 - тоководы на 300 А; 12 - предохранительные мембраны; 13 - предохранительные клапаны; 14 - гелиевый сосуд ЦТГ-0,5/0,7; 15 - трубопроводы жидкого гелия.

магниты размещены внутри гелиевого сосуда, состоящего из горизонтальных цилиндрических участков диаметром 280 мм. Стенки сосуда изготовлены из листовой нержавеющей стали толщиной 2 мм. Для компенсации температурных деформаций отдельные участки гелиевого сосуда соединены между собой посредством сильфонов соответствующего диаметра. Вес магнитной системы составляет 3,0 т, вес холодной массы ускорителя 5,8 т. Конструкция криостата предусматривает установку теплозащитного экрана с жидким азотом, однако на этапе первоначальных испытаний для уменьшения объема работ при подготовке и последующем ремонте ускорителя на место постоянной эксплуатации экран не устанавливался. Естественно, это привело к тому, что тепловые нагрузки и технологические требования к внешней криогенной системе значительно выросли.

Общий объем гелиевого криостата с находящимися в нем сверхпро-

водящими магнитами составляет 4 м^3 , свободный объем, занимаемый собственно жидким гелием, - около 1 м^3 . По периметру установки имеются четыре горловины для ввода-вывода электрического тока и гелия. Эти горловины используются также для размещения предохранительных устройств и кабельных разъемов системы КИПиА.

Приведенные в диссертации расчеты показали, что разница в уровнях жидкого гелия по периметру криостата установки СПИН, обусловленная перепадом давлений из-за движения паровой фазы над поверхностью жидкости, может быть весьма значительной. На основе расчетов разработана схема, сводящая в данной системе эффект изменения уровня к минимуму. Было предложено разделить периметр криостата на две части. Такое деление реализуется весьма просто: жидкий гелий от установки КГУ-1600/4,5 по трубе, расположенной внутри криостата ускорителя, подается в диаметрально противоположную точку по отношению к месту отвода пара. Пар отводится по двум направлениям, причем длина каждого из них составляет половину всего периметра установки (рис.4). Схема имеет и другие преимущества: прямой поток перед выходом из подающей трубы в криостат дополнительно конденсируется. Кроме того, нет необходимости в каких-либо перегородках внутри криостата. Однако несмотря на то, что в данном случае принятые меры были достаточны, следует отметить, что периметр рассматриваемого ускорителя - предельный случай применения погружного способа.

При разработке схемы криостатирования ускорителя учтены и другие обстоятельства: предполагались значительные по сравнению с имеющейся производительностью рефрижератора теплопритоки и связанные с этим трудности ввода системы в рабочий режим, весьма ненадежными были поршневые машины (компрессоры 305НП-20/30 и испытанные нами две модификации поршневого парожидкостного детандера), штатная схема запуска головного образца рефрижератора КГУ-1600/4,5, в которой применялись низкотемпературные пневмоуправляемые клапаны, не отвечала предъявляемым требованиям.

Сравнительно большие по сравнению с располагаемой холодопроизводительностью теплопритоки особенно много дополнительных трудностей приносят на заключительной стадии пускового периода системы, когда рефрижератор наряду с производством жидкого гелия одновременно должен компенсировать теплопритоки к криостату и трубопро-

водам. В предельном случае, если теплоприток и холодопроизводительность близки по величине, ожижение гелия не происходит и время запуска системы стремится к бесконечности. Рассматриваемая ситуация была почти такой из-за отсутствия на первом этапе работ теплоизолирующих азотных экранов как на самом криостате установки СПИН, так и на трубопроводах, связывающих его с рефрижератором.

Чтобы увеличить скорость накопления уровня гелия в криостате установки СПИН, предполагалось использовать заранее запасенный жидкий гелий. Хранение этого запаса осуществлялось в транспортных цистернах ЦТГ-0,5/0,7 емкостью 500 л (поз. 14 на рис.4). Для их пристыковки было оборудовано два специальных узла, обеспеченных необходимой для перекачивания жидкости системой наддува.

С использованием пристыкованных к системе "холодных" цистерн ЦТГ-0,5/0,7 рационально была решена и другая, особенно сложная в аварийных ситуациях, задача остановки системы СПИНа без потерь гелия в атмосферу. После закрытия вентиля В2 испаряющийся гелий по обратному трубопроводу через вентиль В1 продолжает подаваться в обратный поток рефрижератора. В результате уровень жидкости в сборнике рефрижератора начинает быстро расти (со скоростью до 1000 л/час), а в криостате СПИНа - уменьшаться. Одновременно жидкость из сборника выдавливают в ЦТГ-0,5/0,7 через вентиль В3 - в итоге полная эвакуация жидкого гелия из криостата СПИНа проводилась абсолютно без сброса холода на температурный уровень окружающей среды и максимально быстро. Низкая надежность поршневых машин определила и еще одну функцию, выполняемую заранее запасенным жидким гелием - его использование для подпитки системы, когда она работает в спутном режиме.

В проведенной доработке, касающейся пусковой схемы, мы отказались от обычно применяемой технологии, когда в ходе пуска гелий из охлаждаемого объекта направляется в ту ступень охлаждения рефрижератора, которая соответствует температурному уровню возвращаемого потока. В нашем случае направление движения прямого и обратного потока гелия неизменно: оно одинаково как при охлаждении, так и при стационарном режиме криостатирования. Необходимое при запуске байпасирование теплообменников производится по охлаждающим потокам посредством вентиля В1, В2 и В3. Эта пусковая схема позволяет запускать установку КГУ-1600/4,5 из теплого состояния за

5 часов. При совместной работе с ускорителем СПИН вся система полностью вводится в режим за время около 50 часов.

В целях повышения надёжности криогенной системы установка КГУ-1600/4,5 дополнительно к трем штатным была оснащена резервным компрессором 305НП-20/30. Это дало возможность не только выводить из работы и ремонтировать довольно часто выходящие из строя поршневые компрессора, но и при необходимости остановки парожидкостного детандера существенно форсировать холодопроизводительность в дроссельном режиме (см. характеристику 3 на рис.2). Основные эксперименты по криостатированию установки СПИН были проведены в дроссельном режиме на трех компрессорах (характеристика 1). После достижения рабочей температуры скорость накопления жидкого гелия в системе составляла около 40 л/час. Из баланса теплопритоков и производительности рефрижератора в этом режиме следует, что суммарная тепловая нагрузка составляла около 1000 Вт, причем значительная ее доля (350 Вт) вносилась криогенными гелиевыми трубопроводами, соединяющими КГУ-1600/4,5 и криостатную систему СПИНа, которые располагались на расстоянии около 60 м друг от друга.

Пятая часть диссертации посвящена созданию системы криогенного обеспечения ускорителя НУКЛОТРОН – нового сверхпроводящего синхротрона на энергию до 6 ГэВ/нуклон, построенного в ЛВЭ ОИЯИ в период 1987-92 гг. Установка НУКЛОТРОН как объект криостатирования представляет собой регулярную структуру из 96 шт. дипольных и 64 шт. квадрупольных магнитов, расположенных в кольцевом тоннеле под синхрофазотроном по периметру 251,5 м. Магниты имеют следующие основные характеристики:

| | |
|---|--------|
| ДИПОЛЬ | |
| Длина | 1,5 м |
| Масса | 500 кг |
| Индукция при номинальном токе 6 кА | 1,98 Т |
| Динамические тепловыделения при скорости нарастания поля $V = 2\text{Т/с}$ и частоте 0,5 Гц | 21 Вт |
| Длина сверхпроводящего кабеля | 62 м |
| КВАДРУПОЛЬ | |
| Длина | 0,45 м |
| Масса | 200 кг |
| Динамические тепловыделения | 12 Вт |
| Длина сверхпроводящего кабеля | 24 м |

Так же, как и в установке СПИН, в НУКЛОТРОНе использованы простые и экономичные магниты типа Дубна, в которых поле формируется посредством железного ярма. Они характеризуются минимальным расходом сверхпроводника, но ограничены по условиям насыщения железа величиной индукции магнитного поля (до 2,3 Т). Однако в отличие от СПИНа, конструкция магнитов НУКЛОТРОНа предусматривает охлаждение более прогрессивным циркуляционным способом: сверхпроводящий кабель создан на основе мельхиоровой трубки диаметром $5 \times 0,5$ мм, внутри которой циркулирует парожидкостной поток гелия. На эту трубку спирально намотан сверхпроводящий провод, представляющий собой медную проволочную матрицу диаметром 0,5 мм, содержащую внутри 1045 шт. тонких ниобий-титановых волокон диаметром 10 мкм.

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 около 0,35 и далее охлаждает железное ярмо соответствующего магнита, после чего с паросодержанием до 0,9 отводится в обратный коллектор. Основное питание дипольных и квадрупольных магнитов осуществляется посредством 12 охлаждаемых гелием тоководов с номинальным током 6 кА.

При разработке к системе внешнего криогенного обеспечения предъявлялись следующие основные требования:

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

для компенсации теплопритоков из окружающей среды - 1750 Вт;

для компенсации динамических тепловыделений - до 2870 Вт при частоте 0,5 Гц.

– Одновременно в рабочем режиме необходимо производить до 100 л/час жидкого гелия, отводимого из криостата для охлаждения тоководов.

– Охлаждение магнитной системы весом около 80 тонн от температуры окружающей среды до 4,5 К не более чем за 120 часов.

В основу криогенной системы (рис.5) положены три агрегата охлаждения КГУ-1600/4,5. Как уже было сказано, каждая из установок КГУ-1600/4,5 может производить до 2,18 кВт холода или около 490 л/час жидкого гелия без использования жидкого азота. Однако, эти режимы

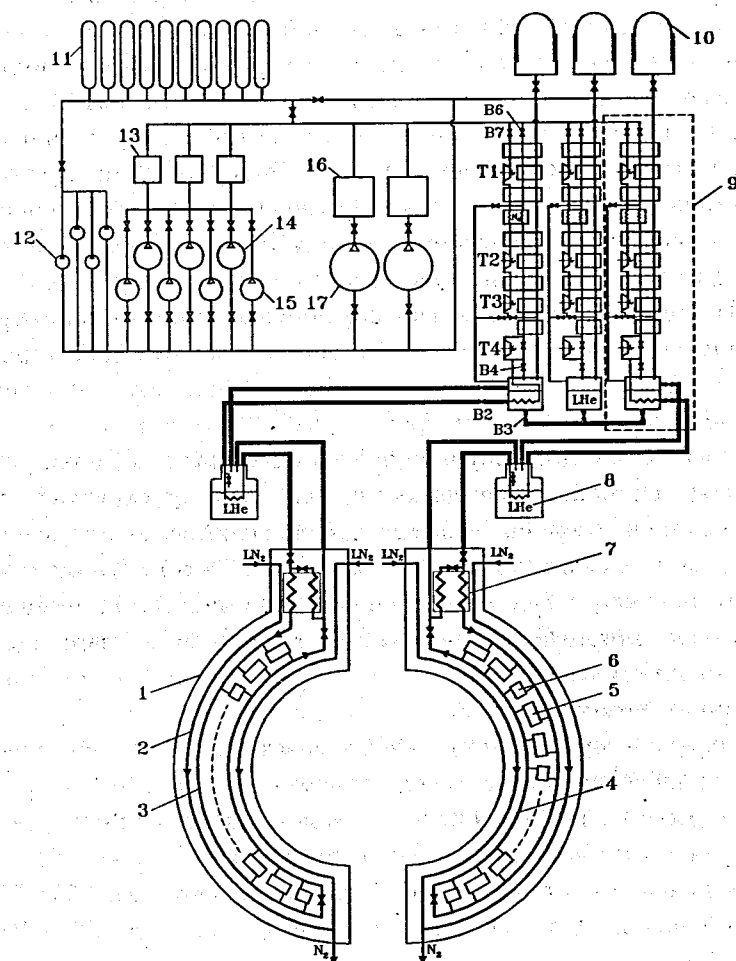


Рис. 5. Принципиальная схема криогенной гелиевой системы НУКЛОТРОНа.
 1 – вакуумный кожух; 2 – теплозащитный экран; 3 – коллектор прямого потока;
 4 – коллектор обратного потока; 5 – дипольный магнит; 6 – квадрупольный магнит;
 7 – переохладитель; 8 – сепаратор; 9 – блок охлаждения КГУ-1600/4,5; 10 – 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".

пока еще не отработаны: турбодетандер Т1 реально не используется, и установки с потреблением жидкого азота производят до 1,7 кВт холода (характеристика 2 рис.2).

Две установки КГУ-1600/4,5 подключены к соответствующему полукольцу, третья – резервная. Она предназначена для работы в оживительном режиме с подачей жидкого гелия (вентиль В3) по теплоизолированному трубопроводу в любую из установок, подключенных непосредственно на полукольцо ускорителя. При подаче жидкого гелия из резервной КГУ-1600/4,5 каждая из двух основных установок может быть переведена в "сателлитный" режим, что обеспечивает циркуляцию необходимого количества жидкого гелия на соответствующем полукольце НУКЛОТРОНа в течение вынужденных остановок турбодетандеров, производимых вследствие их выхода из строя или необходимости замены по другим причинам. Кроме того, подключение резервной КГУ-1600/4,5 обеспечивает при необходимости форсированный режим при повышенной холодопроизводительности.

В криогенной системе НУКЛОТРОНа задействованы компрессоры различных типов и модификаций. Применяемые компрессоры имеют следующие основные технические характеристики:

| | КАСКАД-80/25 | 305НП-20/30 | 2ГМ4-12/31 | 1ВУВ-45/150 |
|---|--------------|-------------|------------|-------------|
| 1. Количество, шт. | 2(1) | 3 | 4 | 4 |
| 2. Тип | винт. | поршн. | поршн. | поршн. |
| 3. Производительность, м ³ /час | 5040 | 1200 | 840 | 45 |
| 4. Давление на нагнетании, МПа | 2,5 | 3,0 | 3,1 | 15,0 |
| 5. Установленная мощность электродвигателя, кВт | 2×630 | 200 | 160 | 22 |
| 6. Напряжение электродвигателя, В | 6000 | 380 | 380 | 380 |
| 7. Число ступеней сжатия | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 8. Число оборотов компрессора, об/мин | 2970 | 500 | 740 | 620 |
| 9. Расход охлаждающей воды, м ³ /час | 60 | 15 | 7,2 | 1,5 |

К настоящему времени на криогенной системе НУКЛОТРОНа установлен только один агрегат "Каскад-80/25"; в перспективе планируется ввести в действие еще одну такую машину. Суммарная производительность компрессоров, расположенных в машзале НУКЛОТРОНа, установленная мощность и расход охлаждающей воды составляют соответственно 12240 м³/час, 2600 кВт и 155 м³/час.

Агрегат "Каскад-80/25" имеет на выходе систему очистки от масла и влаги, основным элементом которой является блок МО-800 производства НПО "Криогенмаш". Система хранения сжатого гелия вмещает 6000 нм³. Кроме того, имеется три маслозаполненных газгольдера объемом по 20 м³. Основная работа производится только на одном из них, два других используются для испытаний на герметичность отдельных компрессоров после их ремонта.

Первое охлаждение НУКЛОТРОНа после сборки всех элементов кольца 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. Диполи и линзы были запитаны постоянным током 90 А. Затем в вакуумную камеру НУКЛОТРОНа был инжестирован пучок дейтронов с энергией 5 МэВ и началась работа по его проводке. 26 марта были зарегистрированы первые обороты пучка в кольце – эта дата общепризнана как дата ввода в действие первого сверхпроводящего ускорителя тяжелых ядер на высокие энергии.

В течение года после первого запуска всего кольца было проведено еще три сеанса работы. В четвертом сеансе работы НУКЛОТРОНа, проходившем в марте 1994 года, было осуществлено значительное повышение энергии ускоренных частиц – максимальный импульс пучка дейтронов составил 3,8 GeV/c.

С точки зрения пускового периода магнитной системы все четыре проведенных сеанса практически не отличались. Полное захлаживание и стабилизация параметров происходит в течение 100-120 часов. Детальная картина распределения температур по периметру магнитной системы в ходе охлаждения представлена на рис.6.

Сеансы работы НУКЛОТРОНа проводились в различных составах оборудования. Так, в декабре 1993 года пуск ускорителя осуществлялся на двух турбодетандерах ступени предварительного охлаждения и парожидкостном детандере в каждой из двух установок КГУ-1600/4,5. Этому составу оборудования соответствует характеристика 2 на рис.2. Избыток холодопроизводительности позволил одновременно с криостатированием кольца НУКЛОТРОНа производить 420 л/час жидкого гелия на слив в стационарную емкость. В соответствии с характеристикой рефрижератора количество дополнительно производимого жидкого гелия эквивалентно избыточной холодопроизводительности 1650 Вт. Это подтверждает уже приведенную нами ранее оценку

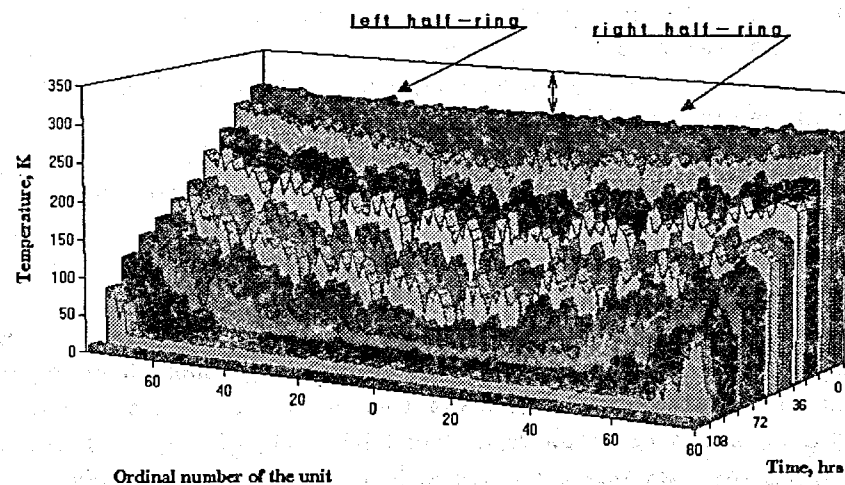


Рис. 6. Эпюры температур магнитных элементов по периметру НУКЛОТРОНа в ходе пускового периода.

суммарных стационарных теплопритоков.

В сеансе марта 1994 г. установки КГУ-1600/4,5 работали без парожидкостных детандеров, т.е. на характеристике 1. При максимальном токе, подаваемом в магниты, для охлаждения тоководов отводилось около 60 нм³ гелия в час, что соответствует около 90 л/час жидкости. В этой ситуации был полный баланс между холодопроизводительностью рефрижераторов и потребностью в холоде на кольце.

В течение одного года с первого пуска системы криогенного обеспечения НУКЛОТРОНа она проработала в сеансах ускорителя около 1000 часов. Одновременно с этим по программе ожижения гелия было отработано дополнительно еще 2000 часов. Общая наработка в течение 3000 часов в год без существенных сбоев показала высокую надежность системы.

Большинство элементов криогенного комплекса НУКЛОТРОНа – блоки установок КГУ-1600/4,5, компрессорное оборудование, оборудование системы очистки и хранения гелия – было смонтировано и пущено в работу еще в 1990 году, несколько ранее, чем это потребовалось по графику запуска самого ускорителя. В связи с этим было рассмо-

тreno несколько предложений по использованию комплекса и в других целях. Наиболее важными оказались две из таких возможностей: улучшение вакуума в действующем синхрофазотроне и ожижение гелия в промышленных масштабах.

Применение системы криогенного обеспечения НУКЛОТРОНа позволило с помощью криооткачки по всему периметру камеры синхрофазотрона с объемом 75 м³ на порядок улучшить вакуум. Это дало возможность впервые на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ ускорить ядра серы.

С середины 80-х годов создаваемые для ускорителей криогенные комплексы интенсивно используются в целях ожижения гелия. За это время накоплен большой опыт заполнения транспортных сосудов от 100 до 40000 литров как от одной установки КГУ-1600/4,5, так и от параллельно работающих таких установок. В диссертации рассмотрены эксплуатационные параметры КГУ-1600/4,5, работающих в режиме слива в транспортные цистерны.

Существенно улучшено снабжение жидким гелием как сторонних потребителей, так и потребителей ОИЯИ с включением в состав системы криогенного обеспечения НУКЛОТРОНа стационарного сосуда жидкого гелия вместимостью 36000 литров. При этом в системе работают одновременно две установки с производительностью до 1000 л/час.

Для нужд ОИЯИ в 1993 году в 500-литровые транспортные сосуды Дьюара произведено около 60000 литров жидкого гелия. Основными потребителями стали стенды для испытаний различных элементов НУКЛОТРОНа, но значительное количество гелия произведено и для других физических приборов и экспериментов. Оренбургский гелиевый завод – одно из основных девяти производств гелия в мире – до 1992 года не имел выхода на западно-европейский рынок в связи с отсутствием ожижителей гелия. Использование криогенного комплекса по заказам этого предприятия позволило произвести на экспорт по контрактам с фирмами "Air Products" и "BOC" в течение 1993 года более 1 млн. литров жидкого гелия.

В заключении приводятся тезисы, отражающие научную новизну и практическую ценность, формулируются основные результаты:

1. Созданы крупнейшие в стране по холодопроизводительности на гелиевом температурном уровне, высоконадежные и эффективные сис-

темы криогенного обеспечения сверхпроводящего синхротрона СПИН и НУКЛОТРОНА – нового сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер.

2. Успешное осуществление этих работ обусловлено привлечением наиболее современной элементной базы: проведены испытания, доводка и практическое внедрение головных образцов различного оборудования, поставляемого НПО ГЕЛИЙМАШ, НПО КРИОГЕНМАШ, АО НИИтурбокомпрессор, а также изготовленного силами ОИЯИ. Важнейшие из таких элементов – блоки охлаждения установок КГУ-1600/4,5, винтовой компрессорный агрегат КАСКАД-80/25, парожидкостные турбодетандеры, микропроцессорные системы диагностики и управления.

3. Высокая надежность и эффективность созданных криогенных систем обеспечена предложенными схемными решениями и методиками исследования режимов работы криогенного оборудования, полученными на их основе расчетными и экспериментальными зависимостями – характеристиками рефрижераторов, работающих в комбинированных режимах при одновременном производстве холода и жидкого гелия, оптимизацией режимов сателлитных рефрижераторов.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Агапов Н.Н. и др. Многоцелевая гелиевая холодильная установка. Тезисы докладов I Всесоюзной конференции по криогенной технике, ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М, 1973, с.139-140.

2. Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А.Г. Многоцелевой гелиевый рефрижератор. Реф. сб. "Химическое и нефтяное машиностроение", ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М, 1976, N2, с.32-33. Препринт ОИЯИ P8-8850, Дубна, 1975.

3. Агапов Н.Н. и др. Импульсный дипольный магнит из трубчатого сверхпроводника с циркуляционной системой криостатирования. ПТЭ, N2, 1981, с.196-199. Cryogenics, 1980, v.20, N6, p.345 - 348. Препринт ОИЯИ P8-12786, Дубна, 1979.

4. Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А.Г. Термодинамический анализ систем криостатирования сверхпроводящих устройств с циркуляцией жидкого гелия. Труды III Международного семинара

ИКФА "Возможности и ограничения сверхпроводящих магнитов ускорителей", Протвино, с.192-205. Препринт ОИЯИ 8-80-81, Дубна, 1981. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности процессов и оборудования холодильной и криогенной техники", Л., 1981, с.112.

5. Агапов Н.Н. и др. Микропроцессорная система управления большим гелиевым ожижителем. Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1983, т. II, с.346-348. Препринт ОИЯИ Р8-82-368, Дубна, 1982.

6. Криогенные приборы и устройства в ядерной физике. /Под ред. А.Г.Зельдовича. Авт. Н.Н.Агапов, Н.И.Баландикова, В.А.Белушкин и др. М., Энергоиздат, 1982.

7. Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А.Г. Криогенные системы сверхпроводящих ускорителей. Журнал "Физика элементарных частиц и атомного ядра", 1982, т.13, вып.5, с.982-1023.

8. Агапов Н.Н., Базылева Н.П., Слепнев В.М., Турзо И. Матобеспечение для системы управления большим гелиевым ожижителем. Сообщение ОИЯИ 10-83-357, Дубна, 1983.

9. Агапов Н.Н., Суханова А.К. Особенности криобеспечения ускорителя со сверхпроводящими магнитами, погруженными в кипящий гелий. Сообщение ОИЯИ 8-83-702, Дубна, 1983.

10. Агапов Н.Н. Термодинамический анализ и оптимизация криогенных гелиевых систем с сателлитными рефрижераторами. Сообщение ОИЯИ 8-84-165, Дубна, 1984.

11. Агапов Н.Н., Королев В.С., Слепнев В.М., Турзо И. Алгоритмы автоматического управления криогенной гелиевой установкой КГУ-1600. Сообщение ОИЯИ 8-85-111, Дубна, 1985.

12. Шелаев И.А., Алфеев В.С., Агапов Н.Н. и др. Криогенная система сверхпроводящего синхротрона СПИН. Препринт ОИЯИ Р9-85-593, Дубна, 1985.

13. Агапов Н.Н. и др. Результаты предварительных испытаний внешней криогенной системы для сверхпроводящего ускорителя СПИН. Сообщение ОИЯИ 8-86-368, Дубна, 1986.

14. Давыдов А.Б., Кобулашвили А.Ш., Щербаков В.Д., Агапов Н.Н. и др. Парожидкостный турбодетандер криогенной гелиевой установки. Журнал "Химическое и нефтяное машиностроение", 1989, N4, с.23-24. Сообщение ОИЯИ 8-86-711, Дубна, 1986.

15. Агапов Н.Н. и др. Результаты испытаний головного образца винтового компрессорного агрегата "Каскад-80/25". Сообщение ОИЯИ 8-90-304, Дубна, 1990.

16. Агапов Н.Н. и др. Система криогенного обеспечения НУКЛОТРОНа – сверхпроводящего ускорителя релятивистских ядер. Тезисы докладов Международной научно-практической конференции "Криогенная техника – науке и производству", ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М., 1991. Сообщение ОИЯИ Р8-90-481, Дубна, 1990.

17. Агапов Н.Н., Назмутдинов Р.М., Куприянов А.Н. и др. Гелиевая винтовая двухступенчатая компрессорная установка "Каскад-80/25" Инф. сборник "Химическое и нефтяное машиностроение", 1991, N1, с.18-21.

18. Агапов Н.Н. и др. Исследование работы гелиевого винтового маслозаполненного агрегата "Каскад-80/25" в вакуумно-компрессорном режиме. Сообщение ОИЯИ Р8-91-510, Дубна, 1991.

19. Агапов Н.Н. и др. Согласование производительностей ступеней гелиевого винтового маслозаполненного агрегата "Каскад-80/25". Сообщение ОИЯИ Р8-91-509, Дубна, 1991.

20. Агапов Н.Н., Белушкин В.А., Зельдович А.Г. Исследование нерасчетных режимов гелиевого рефрижератора. Препринт ОИЯИ 8-9436, Дубна, 1976.

21. Караганов Л.Т.,..... Агапов Н.Н. и др. Вакуум-компрессорные характеристики гелиевого винтового маслозаполненного агрегата. В кн.: Тезисы докладов Всесоюзной научно-практической конф. "Холод – народному хозяйству", ЛТИХП, 1991, с.148.

22. Агапов Н.Н. и др. О возможности криостатирования сверхпроводящих магнитных систем ускорителей с использованием струйных насосов для циркуляции жидкого гелия. – В кн.: Труды X Международной конференции по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Серпухов: 1977, т. II, с.241-252.

23. Agapov N.N. et al. Study of a liquid helium jet pump for circulating refrigeration systems. – Cryogenics, 1978, v.18, N8, p.491-496.

24. Agapov N.N. et al. Study of jet pumps for circulating a helium two - phase mixture. – Cryogenics, 1980, v.20, N4, p.200-202.

25. Baldin A.M., Agapov N.N. et al. Cryogenic system of the NUCLOTROTON – a new superconducting synchrotron. Препринт ОИЯИ Е9-93-273, 1993. Advances in Cryogenic Engineering, 1994, v.39,

р.501-508. Тезисы докладов конференции Cryogenic Engineering Conference, Albuquerque, New Mexico, 1993, p.84.

26. A.D. Kovalenko, N.N. Agapov et al. The first run with S relativistic nuclei at the LHE accelerating facility in Dubna. JINR Rapid Communications N2(59) - 93, p.53-55, Dubna, 1993.

27. Н.Н. Агапов, В.В. Крылов, Т.В. Никиткина. Опыт эксплуатации КГУ-1600/4,5 в оживительном режиме. Сообщение ОИЯИ 8-91-575, Дубна, 1991.

28. A.M. Baldin, N.N. Agapov et al. Cryogenics of the new superconducting accelerator NUCLOTRON – the first year under operation – Abstract Booklet of the 15th Int. Cryogenic Eng. Conf., Genova, Italy, 1994, p.12.

29. N.N. Agapov, A.M. Baldin et al. Cooling of the superconducting correction impulse magnets for the accelerator NUCLOTRON – Abstract Booklet of the 15th Int. Cryogenic Eng. Conf., Genova, Italy, 1994, p.321.

Рукопись поступила в издательский отдел
31 октября 1994 года.