

И.К. Буткевич

Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, ул. Косыгина, 2, г. Москва, РФ, 117334
e-mail: butkevich@kapitza.ras.ru

УСПЕХИ ПРИКЛАДНОЙ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И ПРОГРЕСС КРИОГЕННОЙ ТЕХНИКИ

100-летие открытия явления сверхпроводимости ознаменовалось уникальными достижениями в области прикладной сверхпроводимости: началом эксплуатации ЛНС (Большого адронного коллайдера — БАК) со сверхпроводящей магнитной системой и завершением проектирования ITER (Международного экспериментального токамака — ИТЭР) со сверхпроводящими магнитами. Оба эти проекта нельзя было бы осуществить без соответствующего развития криогенной техники, в частности её гелиевого направления. Для криогенного обеспечения объектов со сверхпроводящими устройствами пришлось решать сложные научно-технические задачи. Показано, как совершенствовались гелиевые рефрижераторы и ожижители, предназначенные для криостатирования объектов со сверхпроводниками. Описываются схемы современных двухконтурных систем, в том числе с сателлитными рефрижераторами. Выполнен анализ основных способов повышения надёжности криогенных систем. Сообщается о создании новых приборов для комплексного измерения параметров гелия. Рассматриваются различные направления развития криогенных гелиевых установок и систем, которые явились следствием широкомасштабного использования прикладной сверхпроводимости. Особое внимание уделено достижениям криогенной техники, которые определили возможность реализации таких грандиозных проектов современности, как БАК и ИТЭР.

Ключевые слова: Сверхпроводимость. Криогенная техника. Гелий. СП-устройства. Криогенная гелиевая установка, система. Ожижитель гелия. Двухконтурная система. Криогенный циркуляционный насос. Холодный (криогенный) компрессор (нагнетатель). Рефрижератор с избыточным обратным потоком (сателлит). Надёжность. Резервирование. Коллайдер. Токamak.

I.K. Butkevich

THE ADVANCES IN APPLIED SUPERCONDUCTIVITY AND CRYOGENIC ENGINEERING PROGRESS

100th anniversary of the discovery of superconductivity was marked by unique achievements in the field of application superconductivity, operating the LHC (Large Hadron Collider) with a superconducting magnet system and design completion of ITER (International Tokamak Experimental) with superconducting magnets. Both of these projects were impossible without a corresponding development of cryogenic engineering, in particular the helium lines. To provide facilities with cryogenic superconducting devices had to deal with complex scientific and engineering problems. It is shown, how helium refrigerators and liquefiers, facilities intended for cryostating with superconductors were improved. Schemes of modern double-circuit systems, including with satellite refrigerators are described. The analyses of the main ways to improve the reliability of cryogenic systems is made. New devices for complex measurement of helium parameters are considered. The various directions of development of cryogenic plants and systems, which are the result of the increasingly widespread use of superconductivity application, are discussed. Special attention is paid by the achievements of cryogenic technology, which determined the feasibility of such grandiose projects of modernity, as LHC and ITER.

Keywords: Superconductivity. Cryogenic engineering. Helium. SC devices. Cryogenic helium system. Helium liquefier. Dual-circuit system. Cryogenic circulation pump. Cold (cryogenic) compressor (blower). Refrigerator with an excessive reverse flow (satellite). Reliability. Reservation. Collider. Tokamak.

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2011 г. исполняется сто лет со дня открытия сверхпроводимости. В 1911 г. голландский физик *Камерлинг-Оннес* исследовал поведение ртути при низких температурах и обнаружил, что её электрическое сопротивление при температуре 4,153 К становится равным нулю. В этих условиях электрический ток течёт без потерь. В связи с этим 2011-ый год назван годом сверхпроводимости.

Однако с момента открытия самого явления и до появления научного направления, называемого технической или прикладной сверхпроводимостью, прошло не менее 50 лет. Мне удалось впервые узнать о некоторых реальных применениях сверхпроводимости в технике в 1961 г. на совещании, которое собрал в Госкомитете по использованию атомной энергии СССР его председатель *В.С. Емельянов*, только что вернувшийся из поездки в США. Совещание было посвящено развитию технической сверхпроводимости в нашей стране. На нём присутствовали ведущие физики страны, занимающиеся этой проблемой из Института физических проблем (ИФП) и Института теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ) (Москва), Украинского физико-технического института (УФТИ) и Физико-технического института низких температур (ФТИНТ) (Харьков) и некоторых других НИИ страны.

На этом совещании после выступления Василия Семёновича о достижениях в области технической сверхпроводимости, которые ему демонстрировали в США, отечественные учёные *Борис Георгиевич Лазарев* (УФТИ) и *Николай Евгеньевич Алексеевский* (ИФП) показали в работе сверхпроводящие магниты, которые привезли на совещание в стеклянных сосудах Дьюара, заполненных жидким гелием.

Понятия «жидкий гелий и сверхпроводимость» — «сверхпроводимость и жидкий гелий» тесно связаны. И даже в связи с открытием, так называемой, высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), все сверхпроводящие устройства (СПУ), предназначенные для получения сильных магнитных полей, продолжают создаваться для работы при температуре 4,5 К и ниже. Вряд ли кто-нибудь будет отрицать, что гелиевая криогенная техника в нынешнем виде полностью обязана развитию технической сверхпроводимости. Практически каждое из направлений развития СПУ наложило свой отпечаток на развитие криогенных гелиевых установок (КГУ) и систем (КГС). Однако из всех направлений крупномасштабного применения сверхпроводимости, таких как СП-магниты (СПМ) для систем производства энергии (термоядерный синтез, МГД-генераторы), накопления энергии (индуктивные накопители), физики высоких энергий (ускорительно-накопительные комплексы (УНК)), высокоскоростного наземного транспорта (вагоны на магнитной подушке), промышленных процессов (обогащение руд, фильтрация воды) и, наконец, медицины (ЯМР-томографы); СПУ для генераторов и двигателей переменного и постоянного тока; СП-кабели пос-

тоянного и переменного тока, которым ещё в 70-ые годы прошлого столетия предсказывалось впечатляющее будущее [1], реальное воплощение получили СПМ для Токамаков и УНК, потрясающие своей грандиозностью, и СПМ для ЯМР-томографов, крупномасштабность которых определяется их массой. Если медицинские СПМ являются в основном заливными СПУ и не предъявляют особых требований к КГС и КГУ, то СПМ Токамаков [2] и УНК [3] в связи со своей масштабностью и спецификой работы ставили перед разработчиками кроме требований повышенной надёжности и термодинамической эффективности ещё ряд специфических требований, выполнение которых сделало современные КГУ и КГС такими, какие они сейчас есть.

В настоящей статье делается попытка показать, как выполнялись требования СПУ (в основном СПМ) и какие использовались технические решения при разработке и создании КГС, а также их элементов.

2. ПОДСИСТЕМЫ СЖАТИЯ (КОМПРИМИРОВАНИЯ) ГЕЛИЯ

Подсистемы (далее «системы») компримирования гелия включают в себя два типа оборудования: машины для сжатия — компрессоры и ёмкости для оперативного хранения газообразного гелия (газгольдеры или ресиверы).

СПМ-системы Токамаков и УНК предъявляют к системам сжатия идентичные требования: повышенная надёжность, связанная с достаточно длинными кампаниями (от двух до шести месяцев непрерывной работы), компактность на фоне больших тепловых нагрузок (от 6 кВт для «Токамака-15» до 144 кВт для БАК — Большого адронного коллайдера, приведённых к 4,5 К), высокая эффективность и полная автоматизация.

Применительно к компрессорам эти требования трансформируются в отказ от поршневых машин, обладающих наименьшей надёжностью по сравнению с винтовыми (ВК) и турбокомпрессорами (ТК) и меньшей единичной мощностью. Вместе с тем единичная мощность винтовых компрессоров также не безгранична и существенно меньше, чем у турбоагрегатов. По времени наработки до первого отказа винтовые компрессоры в несколько (примерно в 5) раз уступают центробежным компрессорам (ЦК), их изотермический КПД тоже ниже, чем у ТК, и что самое главное — винтовые маслозаполненные компрессорные агрегаты требуют многоступенчатой очистки гелия от масла.

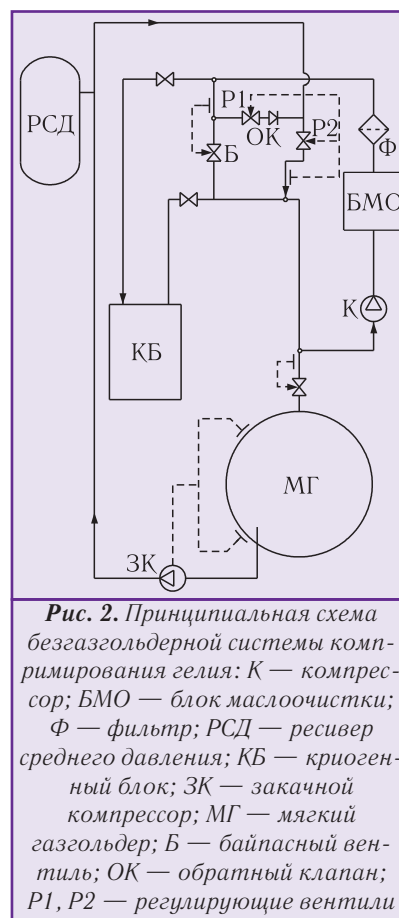
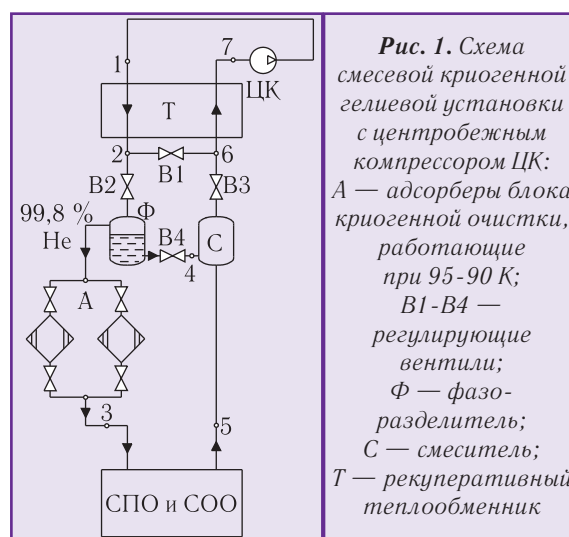
Всё это побудило искать нестандартные решения. Попытка избавиться от масла заставила разработчиков гелиевых ВК провести исследования сухих машин этого типа. Однако их низкая эффективность не позволила рекомендовать использование сухих ВК в таких энергоёмких системах, как крупные КГС. Интересным было предложение заменить масло в ВК жидкостью на основе воды с различными специальными присадками. Исследования, проведённые в НПО

«Криогенмаш» такого компрессора дали обнадеживающие результаты: его КПД по крайней мере не хуже, чем у маслозаполненного ВК, а очистка гелия от такой жидкости намного проще, чем от масла. Кроме того, последствия попадания воды в криогенную систему устраняются в несколько раз быстрее и с меньшими трудовыми и финансовыми затратами, чем обезжиривание криогенного оборудования. К сожалению, эта работа не была закончена.

Самым радикальным решением проблемы сухого сжатия гелия было бы использование для этой цели ТК. Однако из-за особенности ряда физических свойств гелия его прямое сжатие в ТК не представляется возможным. Попытка создания такого гелиевого центробежного компрессора на давление нагнетания всего 0,6 МПа (весьма далёкого от оптимального давления для циклов КГУ) по заданию НПО «Гелиймаш» не увенчалась успехом. Машина получилась очень громоздкой с огромным количеством колёс. Тем не менее инженерная мысль специалистов, причём практически одновременно в США и СССР, нашла весьма нетривиальное и очень красивое решение — реализовать сжатие в ЦК не чистого гелия, а его смеси с более тяжёлым газом. Эти предложения были защищены патентом США и авторским свидетельством СССР. В качестве такой примеси, в частности, было предложено использовать один из фреонов, температура парциальной конденсации которого близка к 100 К. Это позволило не только реализовать эффективное сжатие такой смеси в обычном азотном ЦК, но и использовать положительный дроссель-эффект фреона в ступени предварительного охлаждения (СПО), отказавшись от СПО с использованием холода жидкого азота (рис. 1). Такая работа была выполнена сотрудниками НПО «Криогенмаш» и Одесского института холодильной промышленности (ОТИХП). Были проведены необходимые расчёты, подобран фреон, разработана схема ступени предварительного охлаждения и конструкция ЦК. Первые испытания ступени выявили ряд проблем, требующих технического решения. Тем не менее была показана перспективность этого пути, а также отсутствие принципиальных трудностей при его реализации. К сожалению, незавершённость экспериментальной программы из-за сложностей с финансированием не позволила рекомендовать такую систему компримирования для использования в КГС УНК и ИТЭР (Международный термоядерный экспериментальный реактор). Внедрение её привело бы к уменьшению количества компрессоров в пять раз, капитальных затрат на систему компримирования — на 73 %, а эксплуатационных расходов — на 33 % [4].

Требование компактности криогенной системы определило выбор безгазгольдерной системы как более компактной и не предъявляющей специальных требований к помещению, так как ресиверы могут располагаться вообще вне стен здания. Однако требование поддержания постоянного давления с высокой точностью на всасывании компрессоров оказалось выполнимо только с появлением микропроцес-

сорной системы автоматического управления. Кстати, первая отечественная безгазгольдерная система компримирования гелия была создана Гипроокислородом вместе с НПО «Криогенмаш» ещё в 1970 г. для КГС, предназначенной для обратной конденсации паров и переохлаждения жидкого водорода [5]. Однако из-за низких темпов создания отечественной компьютерной базы (по сравнению со странами Западной Европы, США и Японии) дальнейшего развития в отечественных КГУ и КГС безгазгольдерные системы сжатия гелия пока не получили, в то время как фирмы «Linde» и «Air Liquide» применяют их в КГУ даже средней и малой производительности (рис. 2).



3. ПОДСИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ГЕЛИЯ

3.1. Очистка от масла и влаги

С применением винтовых маслозаполненных компрессоров для сжатия гелия обострилась проблема его очистки от масла. Она решалась практически идентично как в отечественных, так и в зарубежных КГС. Основопологающими принципами системы маслоочистки явилась её многоступенчатость и охлаждение гелия ниже температуры окружающей среды. Первая, инерционная ступень маслоочистки, предназначена для удаления капельного масла, причём она может состоять из одного, двух и даже трёх последовательно установленных аппаратов как непосредственно после компрессора, так и отделённых от него нагнетательным трубопроводом, а иногда холодильником или теплообменником. Дополнительное охлаждение газа после компрессора позволяет удалить из криоагента максимальное количество капельного масла. Вторая ступень используется для удаления аэрозоля и состоит чаще всего из двух или трёх последовательно установленных фильтров, обладающих наряду с фильтрующими свойствами также и коагулирующими. Последнее позволяет укрупнить аэрозольные частицы и облегчить их фильтрацию. Третья ступень маслоочистки предназначена для удаления паров масла с помощью адсорбентов типа угля. Наиболее распространённый адсорбент в отечественных системах очистки — уголь СКТ.

На рис. 3 представлены две схемы подсистемы маслоочистки. Первая из схем использована в КГС «Токамак-15», а вторая — в БНЛ (Брукхевенской

национальной лаборатории США). В обеих системах применяется предварительное охлаждение (на рис. 3 не показано) для повышения эффективности работы системы очистки: в КГС «Токамак-15» — обратным потоком гелия, в КГС БНЛ — специальной фреоновой установкой. В системах, как видно из рис. 3, использованы две ступени фильтрации: грубая, работающая в режиме намочения с периодической продувкой и сливом масла из аппаратов очистки, и тонкая, в которой появление масла в линии продувки означает выработку ресурса и необходимость замены фильтра. Обычно система маслоочистки конструктивно совмещается с системой влагоочистки (отсюда появление термина: «система масло- и влагоочистки» или «система влагомаслоочистки»). Аппараты в ней расположены после масляных адсорберов и представляют также адсорбционную ступень очистки на силикагеле или цеолите. Как правило, это — две параллельные ветви адсорберов и фильтров (от механических частиц). Одна ветвь работает в режиме очистки, а вторая — в режиме регенерации за счёт прогрева сорбента. Регенерация масляных адсорберов практически невозможна, однако они также устанавливаются в двух параллельных ветвях, что позволяет производить замену сорбента в одной ветви, не нарушая работоспособность системы очистки при любой длительности кампании.

3.2. Системы криогенной очистки

В отличие от малых КГУ, предназначенных для ожижения, где очистке подвергается только ожижае-

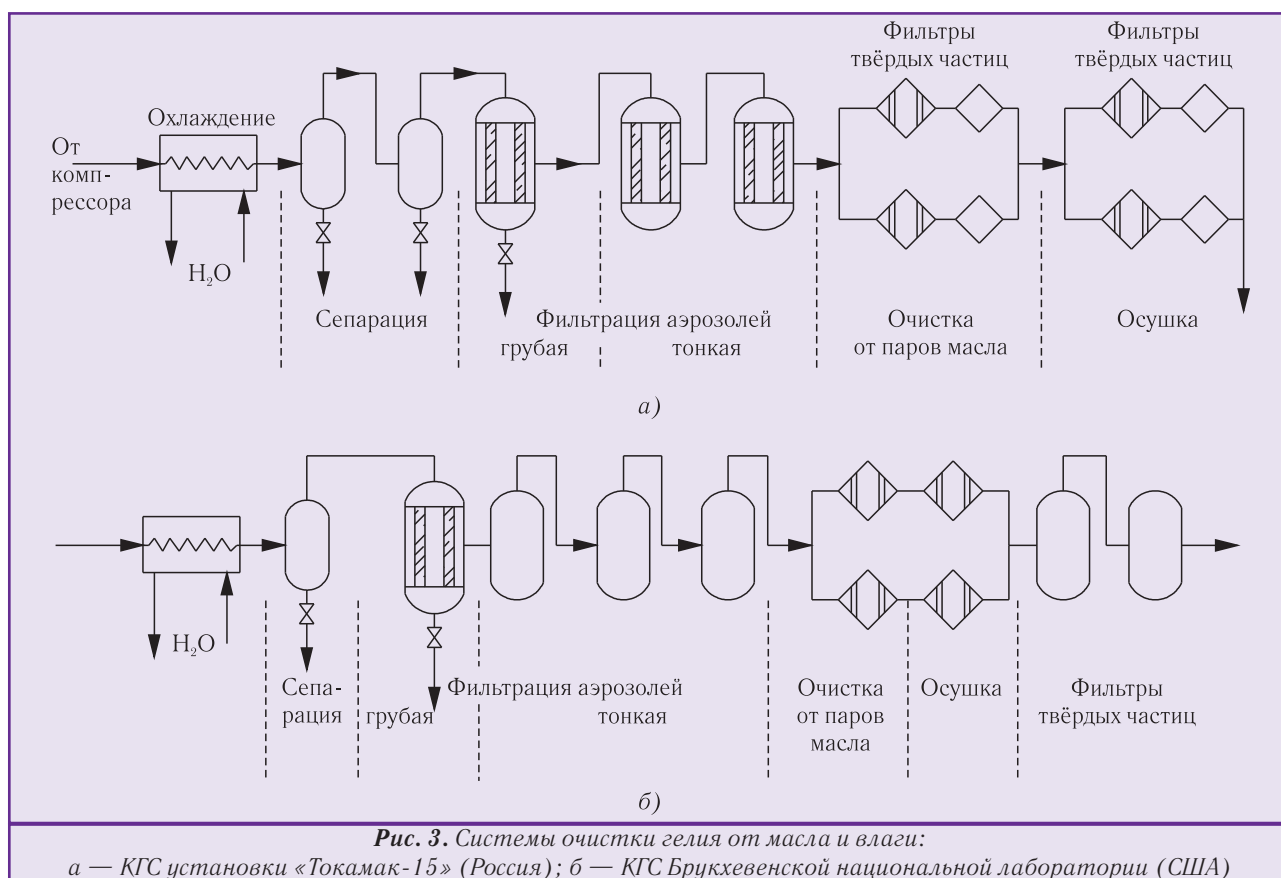


Рис. 3. Системы очистки гелия от масла и влаги:

а — КГС установки «Токамак-15» (Россия); б — КГС Брукхевенской национальной лаборатории (США)

мая часть потока гелия, в крупных системах весь поток, сжимаемый компрессором, проходит через систему очистки. Это объясняется большим ресурсом непрерывной работы крупных систем и большим количеством потенциальных источников загрязнения.

На рис. 4 показана зависимость необходимой глубины очистки от ресурса непрерывной работы крупной КГУ для типичной конструкции отечественных теплообменных аппаратов КГУ: витых, противоточных, из трубок, оребренных проволокой. Необходимая глубина очистки при ресурсе непрерывной работы 5000-8000 ч должна быть не хуже $1 \cdot 10^{-6}$. В отечественных блоках очистки обеспечивается реальная глубина очистки по O_2 не хуже $(1...3) \cdot 10^{-7}$ и по N_2 не хуже $(2...6) \cdot 10^{-7}$ % об. Понятно, что при очистке всего потока гелия, поступающего в установку, использование для этой цели метода вымораживания (типичного для гелиевых ожижителей фирмы «Linde») становится невозможным.

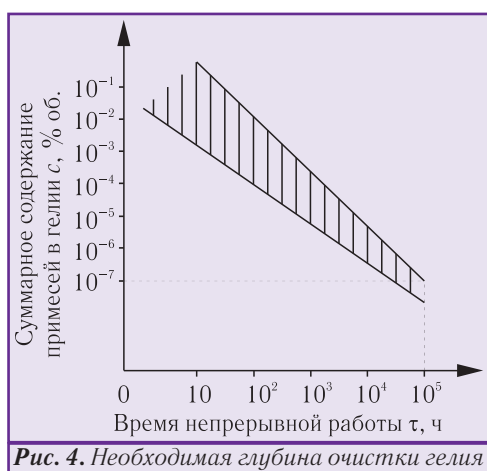


Рис. 4. Необходимая глубина очистки гелия

Блоки очистки в крупных КГУ работают на сорбционном принципе, используя свойство адсорбентов увеличивать поглотительную способность тех примесей, температура конденсации, которых близка к температуре сорбента. Основными примесями, требующими удаления из гелия, являются азот, кислород, аргон. Поэтому криогенные блоки очистки работают при температуре 100-80 К, используя для своего охлаждения чаще всего жидкий азот или детандерные СПО, как, например, в КГУ-1600/4,5. Разделение, в этой ситуации, функций очистки и предварительного охлаждения, как это сделано, например, в КГУ-150/4,5 или КГУ-400/4,5, приводит практически к удвоению затрат жидкого азота и ухудшению энергетических характеристик системы. Во всех крупных КГУ блоки криогенной очистки гелия совмещаются с СПО. Первой отечественной КГУ, в которой была реализована совмещенная система криогенной очистки (рис. 5), стала КГУ-1600/4,5 (производитель — НПО «Гелиймаш»), предназначенная для криостатирования СП магнитной системы ускорителя «Нуклотрон» в ОИЯИ (Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна Московской области). По этому же принципу функционируют

системы криогенной очистки гелия в крупнейших криомодулях (18 кВт при 4,5 К), комплектующих в количестве 8 единиц КГС БАК.

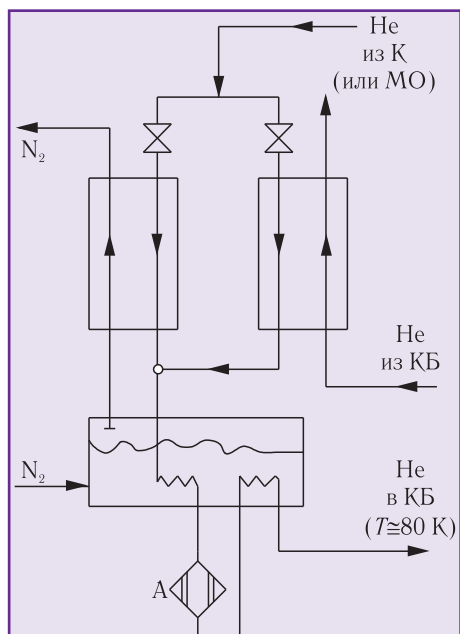


Рис. 5. Система криогенной очистки всего потока гелия, совмещенная с СПО КГУ: К — компрессор; МО — система маслоочистки; КБ — криогенный блок; А — адсорбер

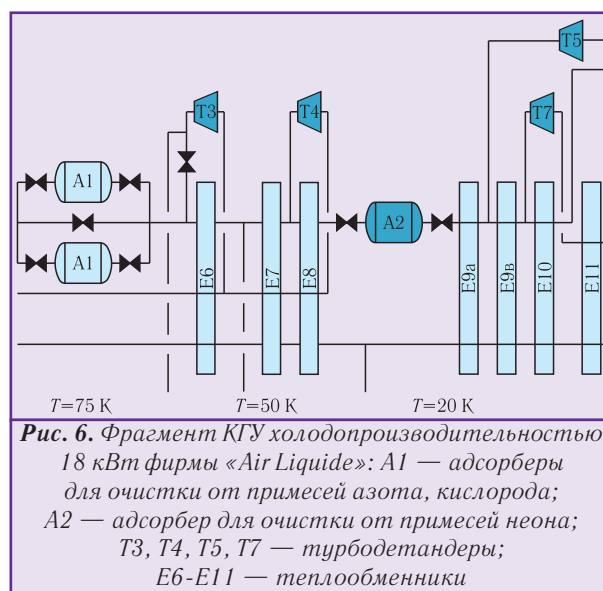


Рис. 6. Фрагмент КГУ холодопроизводительностью 18 кВт фирмы «Air Liquide»: A1 — адсорберы для очистки от примесей азота, кислорода; A2 — адсорбер для очистки от примесей неона; T3, T4, T5, T7 — турбодетандеры; E6-E11 — теплообменники

Однако в зависимости от месторождения гелий-носного природного газа, в гелии может содержаться достаточное количество неона. Так, в оренбургском гелии процентные содержания неона и азота оказываются практически одного порядка. Расчёты и эксперименты показывают, что при $T=80$ К из смеси с азотом и гелием неон адсорбируется плохо. Для значительного увеличения ёмкости угля по неону и снижения объёмной доли неона в гелии до уровня $1 \cdot 10^{-5}$ % необходимо производить процесс очистки при температурах 25-30 К. Этим определяется появление ещё одного блока очистки, встроенного в криогенный блок

на указанном температурном уровне (рис. 6). Как следует из рисунков 5 и 6, неоновый адсорбер установлен в единственном числе, в то время как азотные адсорберы везде устанавливаются попарно с возможностью переключения. Это обусловлено временем и температурой регенерации неонowego адсорбера (эти параметры значительно ниже, чем у азотного адсорбера), а также тем, что часть неона все же адсорбируется на азотном температурном уровне на слоях сорбента, к которым гелий подходит уже очищенным от азота. Этим определяется и соответствующее время защитного действия азотных адсорберов: по мере перемещения слоя сорбента, насыщенного азотом, к выходному сечению аппарата неон вытесняется азотом в более дальние слои сорбента, и переключение азотных адсорберов происходит до того, как неон вытеснится из азотного адсорбера в систему. В противном случае произойдет лавинообразное увеличение концентрации неона в потоке гелия, с которой неоновый адсорбер не справится. Подобная ситуация, проявившаяся в забивке установки неоном, однажды наблюдалась на КГС «Токамак-15», правда, при отсутствии в то время неоновых адсорберов.

4. ЦИКЛЫ И СХЕМЫ КГУ

Рост производительности единичного модуля и существенное увеличение суммарной холодопроизводительности КГС (до 100 и более кВт на температур-

ном уровне 4,5 К) вызывали стремление к повышению термодинамической эффективности цикла в основном за счёт увеличения количества детандеров. Типичным примером применения такого подхода является КГУ КГС БАК на 18 кВт при 4,5 К (рис. 7). Подобный цикл использован в криогенных блоках таких КГУ, хотя и с небольшими вариациями, фирмой «Air Liquide» (8 детандеров) и фирмой «Linde» (10 детандеров). Такое решение вполне понятно, так как позволяет не только повысить термодинамическую эффективность криогенной системы, но и сократить время захлаживания СП-магнитов. Вместе с тем усложнение схемы КГУ за счёт наращивания количества машин неизбежно приводит к ухудшению показателей надёжности такой КГС.

Совершенствование сверхпроводящих магнитов (увеличение магнитного поля и рабочего тока) непосредственно связано с понижением температуры криостатирования. Ярким примером СП-магнитов, работающих на температурном уровне 1,8 К, являются СП-магнитные системы французского Токамака («Tore-Supra») и БАК. Это привело к появлению нового направления в гелиевой криогенной технике: разработке и созданию центробежных криогенных нагнетателей для снижения давления паров гелия. Сегодня можно с уверенностью утверждать, что такие машины существуют, причём изоэнтропийный КПД криогенных компрессоров КГС ИТЭР ожидается на уровне 0,65. Подобные машины уже работают в сос-

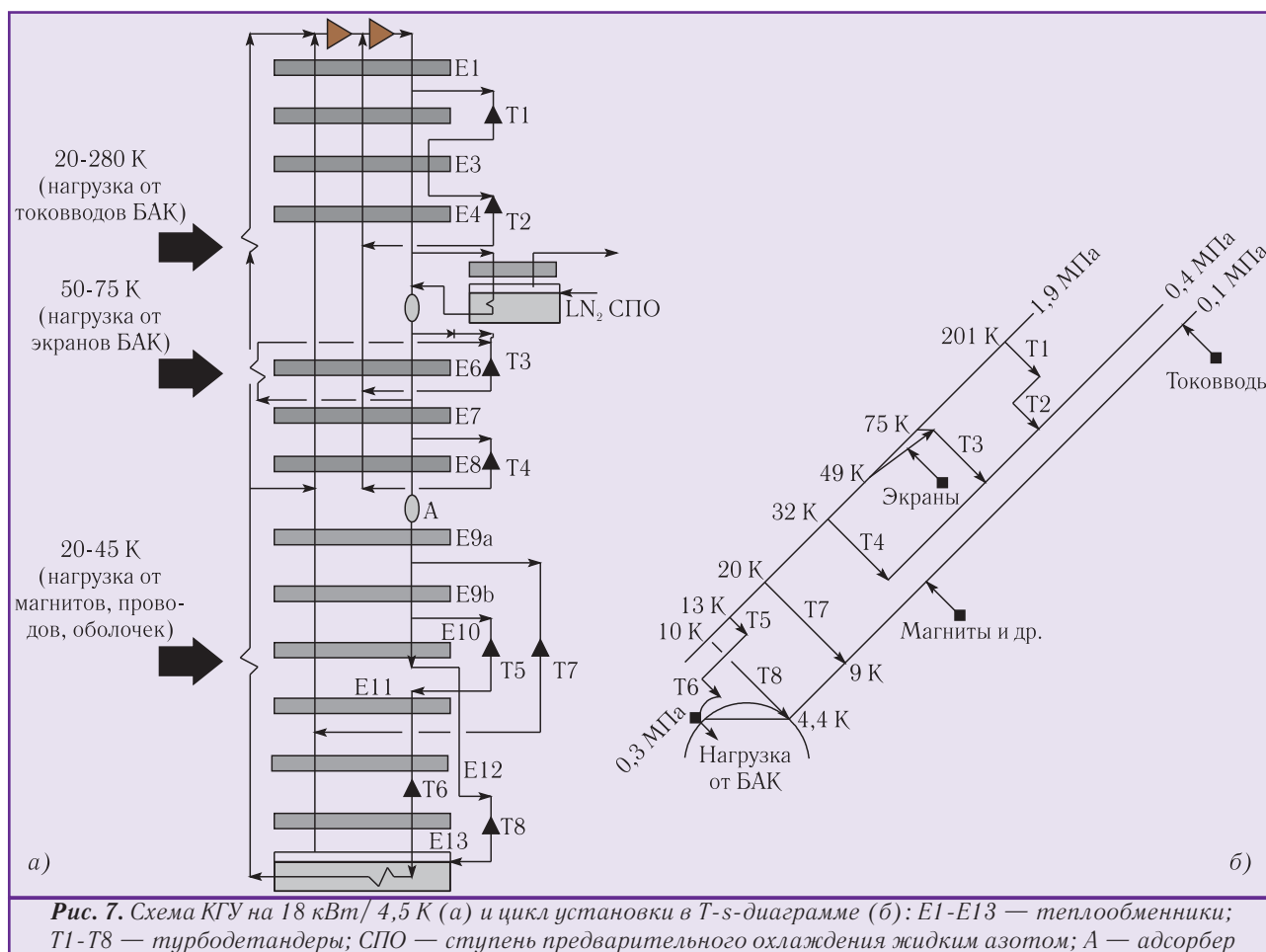


Рис. 7. Схема КГУ на 18 кВт/4,5 К (а) и цикл установки в T-s-диаграмме (б): E1-E13 — теплообменники; T1-T8 — турбодетандеры; СПО — ступень предварительного охлаждения жидким азотом; А — адсорбер

таве КГС БАК в многоступенчатом агрегате. На их основе созданы гелиевые рефрижераторные установки на температурный уровень 1,8 К. Циклы таких установок, разработанных фирмами «Air Liquide» и «Linde», показаны на рис. 8. В российской криогенной технике (в НПО «Криогенмаш») ещё в конце 70-ых годов прошлого столетия была разработана схема КГУ (ОРГ-100-250/4,5) с откачным эжектором, которая успешно применялась для криостатирования СП-магнитной системы «Токамак-7» на температурном уровне 3,8 К (рис. 9) [2].

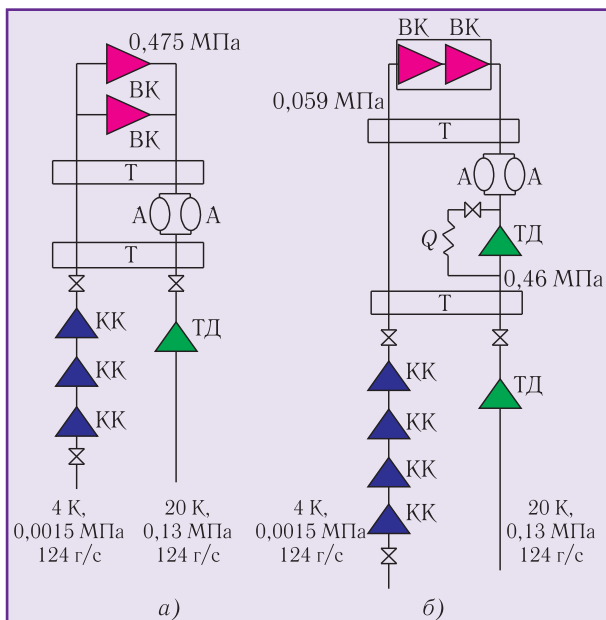


Рис. 8. Принципиальные схемы КГУ на 2,4 кВт/ 1,8 К фирмы «Air Liquide» (а) и фирмы «Linde» (б): ВК — винтовой компрессор; Т — теплообменник; КК — криогенный компрессор (нагнетатель); А — адсорбер; ТД — турбодетандер; Q — «перехват» тепла от криогенных компрессоров

5. ДВУХКОНТУРНЫЕ КГС

Двухконтурные КГС появились в связи с необходимостью криостатирования СП-магнитов закритическим гелием с нагревом последнего, как правило, не более чем на 1 К или двухфазным гелием с малым паросодержанием. И тот, и другой режимы нуждались в значительном увеличении расхода гелия через каналы СПУ по сравнению с оптимальным расходом гелия, проходящим через СОО КГУ. Требовалось создать КГС, в которой изменение расхода через СПУ в идеальном случае не влияло бы на холодопроизводительность системы [6].

Как нельзя лучше эту проблему решала двухконтурная КГС, в которой расходы в контурах криогенерации и криостатирования не были жёстко взаимосвязаны. Поэтому можно было эффективно обеспечивать практически любую величину удельной тепловой нагрузки в СПУ. Эта проблема (увеличение кратности циркуляции) легко решается в классической двухконтурной системе с циркуляционным криоген-

ным насосом. Такая КГС применяется для криостатирования СП-магнитной системы БАК; аналогичная система с двумя контурами используется и для криостатирования магнитов ИТЭР. На рис. 10 показан один из вариантов СОО криоблока двухконтурной КГС ИТЭР с циркуляционным насосом сверхкритического гелия, предназначенным для криостатирования сверхпроводящих магнитов или криовакуумных насосов. Использование циркуляции гелия позволяет независимо обеспечить оптимальный расход криоагента в КГУ (контуре криогенерации) и необходимый расход в контуре криостатирования, определяемый условиями работы СПУ. Понятно, что реализация таких систем была бы невозможна без появления эффективных криогенных гелиевых циркуляционных насосов. В результате многих лет работы ведущих криогенных фирм Западной Европы и Японии такие насосы были созданы, причём их КПД для КГС ИТЭР ожидается на уровне 0,7.

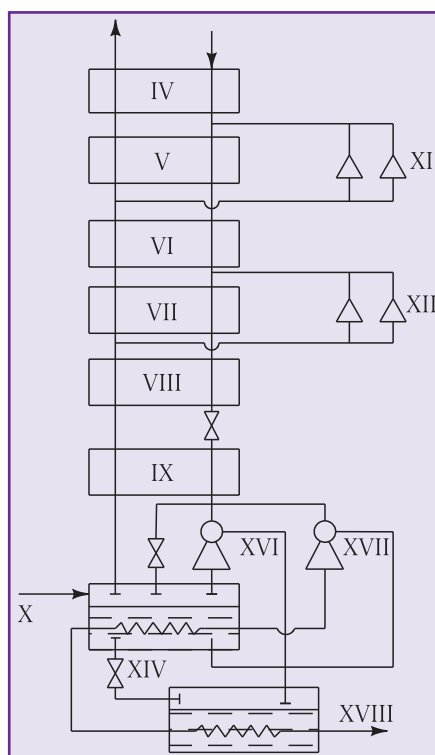


Рис. 9. Фрагмент КГУ ОРГ-100-250/4,5 ниже азотной СПО с дроссельно-эжекторной ступенью окончательного охлаждения (СОО): IV-IX — теплообменники; X — ванна жидкого гелия; XI, XII — поршневые детандеры; XIV — переливной вентиль; XVI — откачный эжектор; XVII — циркуляционный эжектор; XVIII — вакуумная ванна жидкого гелия

СП-магнитные системы Токамаков и УНК характеризуются ещё и существенно нестационарной тепловой нагрузкой. Причём, наблюдается нестационарность двух типов. Одна из них определяется переменностью суммарной тепловой нагрузки в зависимости от реализуемого режима. В некоторых режимах она

может отличаться от максимальной, на которую проектируется криогенная система, в несколько раз. Другая — типично пульсационная нагрузка с периодом от десятков до сотен секунд. Так, для ИТЭР на фоне общей статической рефрижераторной нагрузки в 29 кВт на температурном уровне 4,3 К амплитуда динамической составляющей достигает в некоторых режимах 12 кВт. В связи с этим при средней необходимой скорости ожижения 0,16 кг/с пиковая скорость может повышаться до 0,8 кг/с.

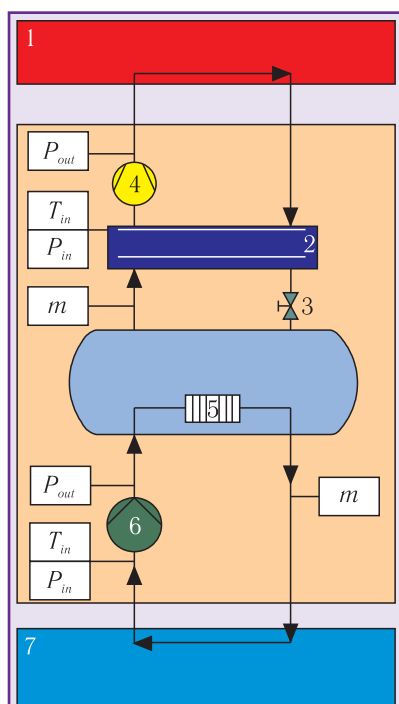


Рис. 10. Один из криомодулей двухконтурной КГС ИТЭР: 1 — КГУ; 2 — ванна жидкого гелия; 3 — дроссельный вентиль; 4 — холодный (криогенный) компрессор; 5 — теплообменник; 6 — циркуляционный насос сверхкритического гелия; 7 — тепловая нагрузка от магнитов или вакуумных крионасосов; P_{in} , P_{out} — давления всасывания и нагнетания, T_{in} — температура всасывания, m — массовый расход

Таким образом в классической двухконтурной КГС с криогенным циркуляционным насосом остаётся нерешённой вторая проблема, обусловленная переменностью тепловой нагрузки объекта криостатирования. Её решение требует обеспечения независимости работы контура криогенерации не только от расхода криоагента в контуре криостатирования, но и от колебаний тепловой нагрузки в последнем. В КГС ИТЭР для стабилизации режимов работы криоблоков при изменениях программы экспериментов используются накопительные ёмкости жидкого гелия, а для компенсации резкого падения тепловой нагрузки — электронагреватель обратного потока гелия перед

компрессором мощностью в 345 кВт. При этом электроприводы криогенных компрессора и насоса позволяют менять их производительность за счёт изменения скорости вращения ротора.

Более удачным (по энергетической эффективности, регулируемости и надёжности) для тепловой «развязки» контуров криогенерации и криостатирования представляется использование двухконтурной схемы с рефрижератором с избыточным обратным потоком (РИОП) или сателлитным рефрижератором [7] (так его назвали американские специалисты) (рис. 11), в которой роль основного криогенератора выполняет ожижитель гелия. Для обеспечения его независимости от тепловой нагрузки потребителя в системе присутствует криососуд-накопитель, который, являясь криогенным аккумулятором, позволяет ожижителю работать в постоянном оптимальном режиме ожижения [6]. С целью повышения термодинамической эффективности такой двухконтурной КГС и более гибкого и эффективного регулирования целесообразно использовать в СОО РИОП детандер с регулируемой производительностью. Именно такая КГС с сателлитными рефрижераторами и поршневыми детандерами была применена для криостатирования СП-магнитов ускорителя «Doublet» в лаборатории Ферми (США) [7]. Такой же РИОП, но с дроссельной СОО, был использован в КГС «Токамак-15» для криостатирования СП-магнитов тороидального поля [2]. По некоторым данным в КГС ИТЭР также предполагается использование накопленного жидкого гелия в режимах с пониженной тепловой нагрузкой для увеличения рефрижераторной составляющей холодопроизводительности, когда это потребует. Очевидно, это возможно при переводе криомодуля в частичный режим с избыточным обратным потоком.

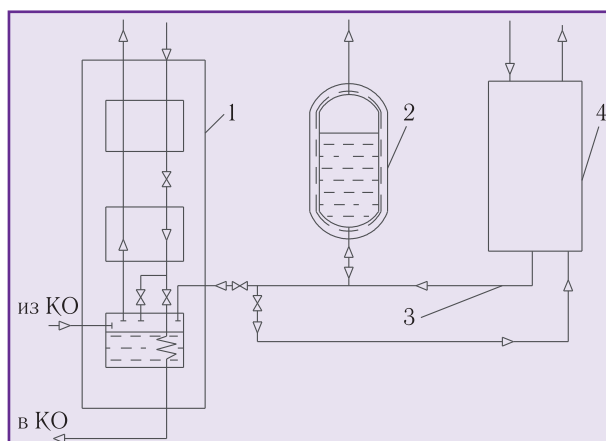


Рис. 11. Двухконтурная КГС с РИОП: 1 — РИОП; 2 — криососуд-накопитель жидкого гелия; 3 — криогенный коллектор; 4 — ожижитель гелия; КО — контур охлаждения

Следует заметить, что для совершенствования схемно-технологических решений КГС, предназначенных для крупных СП-магнитных систем с пульсационной тепловой нагрузкой большой амплитуды (например, как в ИТЭР), ещё и сегодня имеется ши-

рокое поле деятельности. Некоторые нетривиальные решения для «сглаживания» этих пульсаций были использованы при разработке КГС ИТЭР, но результаты их практической реализации пока неизвестны. Тем не менее сегодня можно с определённой констатировать, что в двухконтурных КГС с РИОП эта проблема стоит менее остро и, очевидно, может быть решена с меньшими потерями эффективности, чем в классических двухконтурных КГС с криогенными циркуляционными насосами.

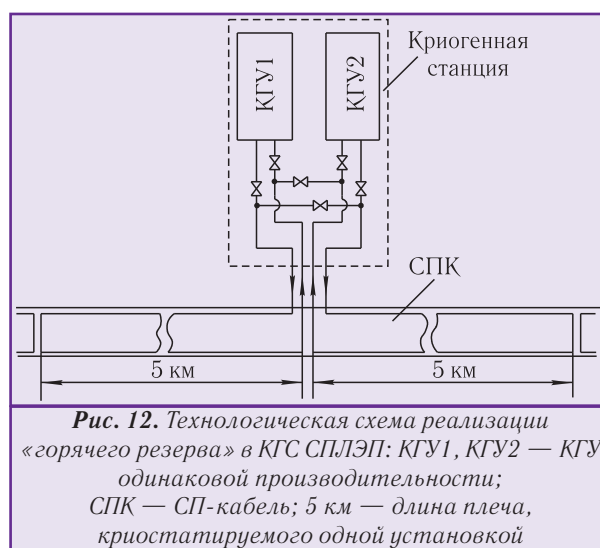
6. НАДЁЖНОСТЬ КГС ДЛЯ СПУ

Требования высокого уровня надёжности в таких грандиозных экспериментально-исследовательских комплексах, как ИТЭР и БАК, предъявляются ко всем системам, являющимся составной частью этих установок. При этом криогенная система не является исключением. Причём следует отметить, что высокий уровень надёжности криогенной системы определяется не столько требованиями безопасности, сколько экономическими соображениями. Стоимость одного эксперимента настолько высока, что любой его срыв или даже отсрочка приводят к потере миллионов долларов. Именно поэтому требуемый коэффициент готовности K_g криогенных систем подобных комплексов находится в диапазоне значений 0,96-0,98. Это не такая уж заоблачная величина, но даже не столь жёсткое её значение обеспечить в таких сложных и многофункциональных системах, какими являются КГС ИТЭР и БАК, представляется далеко непростой задачей.

В современных КГС их высокий уровень надёжности, как правило, обеспечивается традиционными путями: повышением надёжности отдельных элементов и резервированием наименее надёжных составляющих криогенной системы. Если первый путь не имеет принципиальных особенностей для КГС по сравнению с любыми термомеханическими системами, то при реализации второго следует учитывать специфику её работы. Из теории надёжности известно, что резервирование однородными элементами (компрессора — компрессором, детандера — детандером, КГУ — КГУ и т.д.) позволяет существенно (на порядок и более) повысить надёжность резервируемых элементов, если резерв — ремонтируемый. Это означает, что после отказа и замены отказавшего элемента резервным, первый сразу же отправляется в ремонт. Причём время ремонта непосредственно сказывается на эффективности резерва. Понятно, что для того чтобы при отказе какого либо элемента КГС не произошло нарушение работоспособности всей системы, ввод в эксплуатацию резервного элемента должен быть максимально быстрым. В связи с тем, что большинство машин, аппаратов, блоков КГС работает при криогенных температурах и требует для ввода в эксплуатацию захлаживания, которое связано со значительными затратами времени из-за тепловой инерционности, то наиболее часто при резервировании КГС применяется в терминах надёжности так называемый «горячий резерв». Для криогенной систе-

мы это означает, что резервное оборудование должно быть предварительно захлажено и не просто захлажено, а находиться в состоянии распределения в нём температурных полей аналогично работающему оборудованию. Если это криогенная машина (компрессор, детандер, циркуляционный насос), то проблема решается относительно просто. Через резервную машину постоянно продувается небольшой рабочий поток гелия, однако, это тем не менее — потеря холодопроизводительности.

Более эффективным и универсальным решением является работа двух машин, агрегатов и даже установок, расположенных параллельно. При отказе одной из них вторая просто удваивает свою производительность. Одним из первых проектов, реализующих эту идею, был проект КГС СПЛЭП, в которой криогенная станция, состоящая из двух одинаковых КГУ, криостатировала два плеча СПК, т.е. каждая КГУ — своё плечо, равной длины (рис. 12). При отказе одной из КГУ вторая удваивала свою производительность и подключалась к криостатированию второго плеча. Стоимость такого резервирования достаточно высока, однако только конкретные расчёты могут подтвердить его целесообразность.



Второй особенностью резервирования оборудования КГС является то, что для получения от него ощутимого эффекта, он должен быть ремонтируемым. Для криогенного оборудования это означает отогрев отказавшего элемента, его извлечение из криогенной установки (системы), а после восстановления — монтаж и захлаживание. Все эти действия возможны только при соответствующей конструкции установочных узлов, минимизации теплопритоков к работающему оборудованию, герметизации места, из которого отказавший узел демонтируется. Последнее сопряжено с появлением новых элементов (чаще всего — определённого количества криогенной запорной арматуры), которые также обладают своими показателями надёжности, что не может не сказаться на снижении показателей надёжности всей системы [8]. И в этом случае целесообразность такого резервирования может быть

аргументирована только соответствующими расчётами. Чаще всего такой ремонтируемый резерв имеет смысл применять, если регламент работы криогенной системы позволяет провести ремонт (замену) во время кратковременных остановок, даже и без полного отогрева системы. В КГС ИТЭР такой однородный резерв используется для повышения надёжности криогенных компрессоров и циркуляционных насосов.

Наиболее эффективным для КГС СПУ является неоднородное резервирование. В КГС в качестве такого резерва обычно используются сосуды с жидким гелием. В связи с тем, что их надёжность на несколько порядков выше надёжности КГУ и их элементов при условии, что запаса жидкого гелия в таких хранилищах хватает на время ремонта отказавшего оборудования, может быть обеспечен практически любой, наперёд заданный уровень надёжности КГС с таким резервом. Именно из условия обеспечения более высокого уровня надёжности КГС для СПМ ИТЭР отечественными инженерами и учёными предлагалась двухконтурная КГС с РИОП [9] и откачным и циркуляционным эжекторами (вместо криогенных компрессоров и циркуляционных насосов), хорошо зарекомендовавшая себя в КГС «Токамак-7», как с точки зрения надёжности, так и эффективности [2]. Сочетание неоднородного резервирования для основных криогенаторов (ожижителей гелия) с однородным ремонтируемым резервом для РИОП позволяют обеспечить заданный уровень надёжности КГС в целом с минимальными затратами по сравнению с другими схемными решениями.

7. КОМПОНОВКА КРИОГЕННЫХ БЛОКОВ КГС

Постоянное наращивание единичной холодопроизводительности криогенных модулей (2000 л/ч для КГС ускорителя «Doublер» в лаборатории Ферми (США), 2400 л/ч для КГС УНК-3000 в Протвино (СССР) и наконец 18 кВт на температурном уровне 4,5 К (в эквиваленте примерно 4500 л/ч) для КГС БАК и ИТЭР) потребовало новых компоновочных решений при создании криогенного оборудования. Традиционная компоновка ожижителя гелия с производительностью 2000 л/ч (в лаборатории Ферми, США) из-за такой большой высоты криогенного блока, что его сборку пришлось осуществлять на месте эксплуатации, оказалась не только более дорогой, но и ненадёжной. Стремление максимальный объём работ по изготовлению, сборке и испытаниям реализовать в заводских условиях побудило специалистов из НПО «Криогенмаш» разработать нетрадиционную компоновку криогенного модуля [10]. В ней предусматривалось напольное размещение ожижителя гелия, скомпонованного в нескольких транспортабельных криогенных блоках (по два на одной раме) (фото 13). Такое решение позволило не только максимальный объём работ по изготовлению и испытанию выполнить на фирме-изготовителе и резко сократить объём монтажных работ на площадке заказчика, но и осуществить доставку ожижителя транспортом в со-

стоянии полной готовности (конструкция выполнена с учётом высоты авто- и железнодорожных мостов). По другому пути пошли разработчики самых крупных единичных криомодулей КГС (18000/4,5) фирм «Linde» и «Air Liquide». Они разместили все криогенное оборудование в двух основных блоках: вертикальном (фото 14,а), содержащем все теплообменные аппараты, и горизонтальном (фото 14,б), в котором находится ванна жидкого азота, турбодетандеры и криогенные клапаны. Блоки связаны между собой системой криогенных трубопроводов.



Фото 13. Транспортабельный модуль ожижителя гелия ОГ-2400



Фото 14. Криомодуль КГУ 18000/4,5 (18 кВт на 4,5 К) фирмы «Air Liquide»: а, б — вертикальный и горизонтальный блоки

8. БЕЗМАШИННЫЕ КРИОГЕНЕРАТОРЫ

Внедрение сверхпроводимости в медицину, в частности в ЯМР-томографию, дало импульс развитию противоположного направления в гелиевой криогенной технике — созданию гелиевых криоохладителей малой производительности для обратной конденсации паров гелия в криостатах, предназначенных для охлаждения медицинских приборов. Лидером в этом направлении стала фирма «Cryomech». Выпускаемые ею гелиевые рефрижераторы на базе криогенных газовых машин (КГМ) типа Мак-Магона и пульсационных труб, дополненные впоследствии оживителями гелия производительностью 12 и 18 л/сутки (LHeP12 и LHeP18) с криоохладителями на пульсационных трубах (фото 15), отличаются высоким уровнем надёжности, простотой обслуживания, отсутствием вибраций, транспортабельностью. Сегодня эти оживители гелия успешно применяются в лабораториях НИИ и вузов, где потребность в жидком гелии достаточно ограничена.



Фото 15. Оживитель гелия фирмы «Cryomech» на базе КГУ (Cryocooler) с пульсационными трубами

9. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИОАГЕНТОВ

То, что и в области гелиевой криогенной техники, как и в других теплоэнергетических отраслях науки и техники, на смену визуальным датчикам контроля пришли датчики с электрическим выходным сигналом трудно «обосновать» влиянием сверхпроводимости. Хотя бесспорно усложнение КГС и требование обязательной их автоматизации ускорило этот процесс. Однако специфика криостатирования СП-устройств, связанная с повышенными требованиями к интенсивности теплоотдачи и малому градиенту температур вдоль криостатирующего потока гелия, потребовала необходимости контроля за расходом и состоянием потока двухфазного и закритического гелия. Возника-

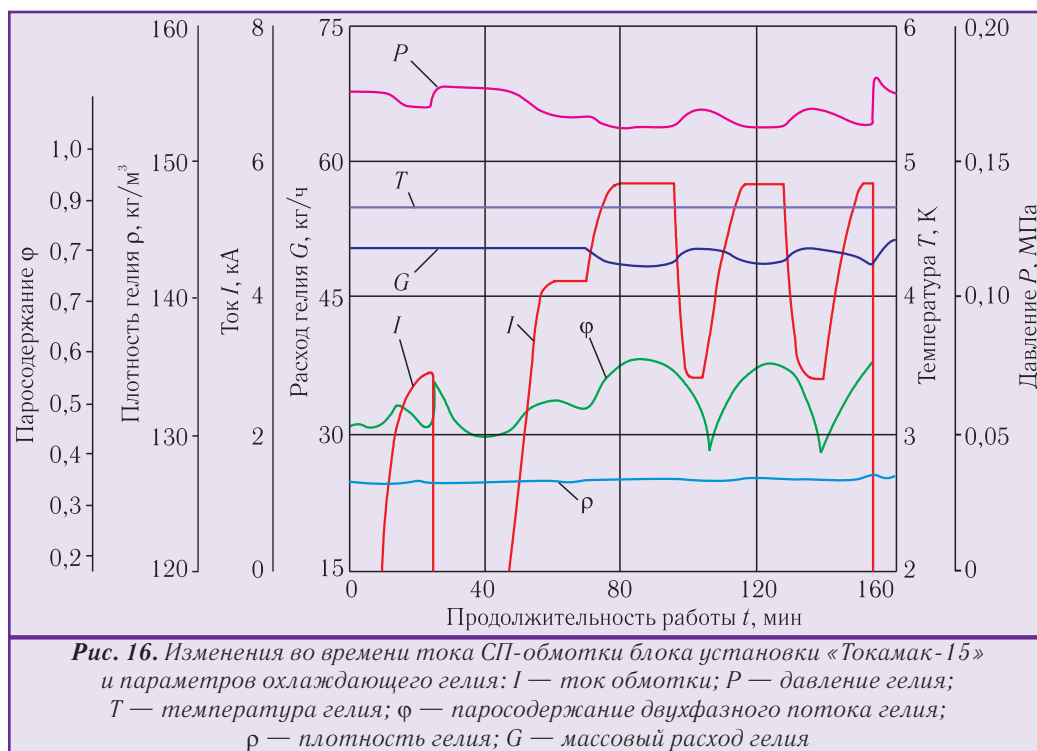
емые изменения содержания пара в потоке двухфазного гелия, приводящие к изменениям структуры потока, колебаниям скорости и расхода двухфазного гелия, а также к появлению термоиндуцированных колебаний в потоках двухфазного и закритического гелия, вызывало нарушение работоспособности сверхпроводящих устройств.

Всё это потребовало создания прибора, способного контролировать не только давление, температуру и расход однофазного потока гелия, но и параметры двухфазного потока гелия вплоть до его паросодержания. Такой прибор был создан [11,12] и впервые испытан при исследовании опытной СП-катушки СПМ тороидального поля «Токамак-15». Для этих целей был создан корреляционный расходомер с СВЧ-датчиками плотности и паросодержания. Высокая чувствительность и безынерционность СВЧ-датчиков обеспечивают высокую точность измерения скорости и расхода как однофазного, так и двухфазного потоков гелия. Причём расходомеры такого типа измеряют как объёмный, так и массовый расходы, так как плотность потока с высокой точностью определяется по резонансной частоте СВЧ-датчика. Для контроля потока гелия, охлаждающего крупные СП-обмотки, была разработана система диагностики потока гелия, основанная на использовании комплексных измерительных модулей. Такой модуль получил название «ПРОТЭЖЕ» по аббревиатуре символов измеряемых параметров: давление, плотность, температура, расход (P, ρ, T, G). Использование такого модуля позволило контролировать (обнаруживать и предупреждать) переход СП-обмотки в нормальное состояние. Впервые «ПРОТЭЖЕ» был применён при испытании сверхпроводящих обмоток блоков установки «Токамак-15». На рис. 16 представлены наиболее типичные результаты испытаний [13].

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бурное развитие прикладной (технической) сверхпроводимости во второй половине прошлого столетия определило качественный скачок в области гелиевой криогенной техники. Современное состояние КГУ, КГС и их оборудования полностью обязано большому количеству проектов (в том числе и нереализованных) сверхпроводящих устройств, предъявляющих такие требования к криогенным системам, как высокая энергетическая эффективность, повышенная надёжность, немислимая ранее огромная единичная холодопроизводительность криомодулей, пониженный температурный уровень вплоть до 1,8 К.

При этом нельзя не отметить, что темпы развития гелиевой криогенной техники, появление новых идей и их реализация в конкретных конструкциях машин, аппаратов, установок и систем, ничуть не уступали темпам появления новых проектов по техническому использованию сверхпроводимости. Характерно, что если в «до сверхпроводящий период» развития гелиевой криогенной техники выпускнику вуза, приходящему в научно-исследовательскую лабораторию или на



производство по получению жидкого гелия, говорили: «забудь то, чему тебя научили, потому что это все «дела далекого будущего», то сегодня ситуация изменилась настолько, что вузовская наука не успевает за бурным развитием прикладной науки и криогенной техники, и чаще молодой специалист слышит «забудь то, чему тебя научили, потому что это все «дела давно минувших дней».

Претерпели принципиальные изменения схемные решения КГС. Появились двухконтурные криогенные системы, в том числе с сателлитными рефрижераторными установками (РИОП) и реализацией высокого уровня надёжности за счёт использования неоднородного резервирования установок и машин (детандеров) созданием запаса необходимого количества жидкого гелия. Были разработаны винтовые компрессоры для сжатия гелия, центробежные криогенные нагнетатели и циркуляционные насосы. На смену традиционным витым теплообменным аппаратам из гладкой трубки пришли высокоэффективные теплообменники из трубки, оребрённой проволокой, пластинчато-ребристые и матричные теплообменники. Появились новые приборы для комплексного измерения параметров гелия, а также системы автоматического регулирования параметров КГС и КГУ как в стационарном, так и пусковом режимах работы.

Наиболее полно последние достижения криогенной техники на гелиевом уровне температур, связанные с развитием прикладной сверхпроводимости, нашли в криогенной системе БАК и проектах крио-

генных комплексов УНК-3000 [3] и ИТЭР.

Однако всё в этом мире взаимосвязано и совершенно очевидно, что без вышеупомянутых достижений криогенной техники немыслимы были бы ни Токамаки Т-7, Т-15 и «Тоге-Супра» со сверхпроводящими магнитами, ни ускорители «Нега» и «Doublер» и тем более такие грандиозные проекты современности, как БАК и ИТЭР. Неслучайно открытию сверхпроводимости предшествовало создание в 1908 г. тем же Камерлинг-Оннесом первого гелиевого ожижителя. Поэтому, перефразировав В.В. Маяковского, можно утверждать, что «сверхпроводимость и криогенная техника — близнецы-братья».

ЛИТЕРАТУРА*

1. Сверхпроводящие машины и устройства/ Под редакцией С. Фонера и Б. Шварца — М.: Мир, 1977. — 763 с.
2. Сверхпроводящие магнитные системы для токамаков/ Под редакцией Н.А. Черноплекова. — М.: ИздАт, 1997. — 168 с.
3. Cryogenic cooling and maintenance of the superconducting magnets of big accelerators/ I.K. Butkevitch, N.M. Grigorenko, I.E. Dudkin et al.// Proc. of III ICFA workshop on possibilities and limitations for superconducting accelerator magnets, Protvino, USSR, 19-23 October, 1981. — P. 135-146.
4. Ступени сжатия и предварительного охлаждения гелиевых криогенных установок/ Г.К. Лавренченко, И.К. Буткевич, Л.Т. Караганов и др.// Криогенное и вакуумное машиностроение. — М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1983. — 32 с.
5. Некоторые результаты испытаний крупной рефрижераторной установки/ Н.А. Афанасьев, И.К. Буткевич, С.П. Горбачев и др.// Химическое и нефтяное машиностроение. — 1973. — № 11. — С. 12-15.
6. Буткевич И.К. Особенности одно- и двухконтурных криогенных гелиевых систем// Технические газы. — 2009.

* Информация, приводимая автором по криогенным гелиевым системам БАК и ИТЭР, взята из различных статей, докладов на конференциях и рабочих совещаниях, опубликованных на соответствующих сайтах в интернете, а также некоторых рабочих материалов, имеющихся у автора как члена международной рабочей группы экспертов по криогенной системе ИТЭР на стадии её концептуального проекта.

— № 6. — С. 13-16.

7. Rode C., Brindza P., Richied D./ Energy Doubler Satellite Refrigerator Magnet Cooling System// Advances in Cryogenic Engineering. — 1980. — V. 25. — P. 326-334.

8. Буткевич И.К. Обеспечение высокого уровня надежности криогенных гелиевых систем// Технические газы. — 2010. — № 2. — С. 15-19.

9. Криогенная система ИТЭР/ И.К. Буткевич, В.Д. Коваленко, Е.Д. Микитенко и др.// Научно-технический сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Термоядерный синтез». — 1991. — Вып. 1. — С. 1-23.

10. Буткевич И.К. Криогенные гелиевые системы для объектов со сверхпроводящими устройствами: создание и совершенствование// Технические газы. — 2009. — № 4.

— С. 38-46.

11. Измерение параметров потоков сплошных сред при помощи системы ПРОТЭЖЕ/ И.К. Буткевич, А.А. Груненко, Б.В. Калинин и др.// Химическое и нефтяное машиностроение. — 1995. — № 4. — С. 9-14.

12. Высокочастотные резонансные измерители параметров двухфазных и однофазных потоков/ А.М. Архаров, А.Г. Гречко, С.Б. Главатских и др.// Вестник МГТУ, Машиностроение. — 1993. — № 3. — С. 80-94.

13. О результатах испытаний опытного блока СМС установки «Токамак-15». Отчет НИР/ Руководитель темы Г.И. Кикнадзе, ГР № У-87437, Инв. № 50.05/83. — М.: Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, 1983. — 60 с.


 **FRUNZE**
ОСНОВАНО В 1896 ГОДУ


ПАО «Сумское НПО им.М.В.Фрунзе» -
одно из старейших предприятий в мире
по изготовлению поршневых компрессоров

- широкая номенклатура;
- высокая эффективность и надежность;
- большой ресурс работы;
- автоматизированная система контроля, управления и защиты;
- гарантийное обслуживание.

www.frunze.com.ua

ОПЫТ, которому можно доверять!

 Украина, 40004, г.Сумы, ул.Горького, 58
www.frunze.com.ua
управление продаж:
т. +38 0542 78 84 64, ф. +38 0542 22 63 62
отдел маркетинга:
т. +38 0542 78 05 71

 Представительство в России, г.Москва
т. +7 495 745 88 30, ф. +7 495 745 88 31