

УДК 621.59

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

ОСОБЕННОСТИ ОДНО- И ДВУХКОНТУРНЫХ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ СИСТЕМ

Сверхпроводящие устройства (СПУ) как объекты криостатирования характеризуются малыми удельными тепловыми нагрузками и значительными их колебаниями. При создании криогенных гелиевых систем (КГС) для СПУ стремятся к минимальным затратам энергии. Кроме этого в КГС применяют такие схемы, чтобы оптимальный режим их работы не зависел от условий работы криостатируемых объектов. Такими системами являются двухконтурные КГС с рефрижераторами с избыточным обратным потоком (РИОП). Использование в ступени окончательного охлаждения РИОП детандера позволило не только приблизить эффективность двухконтурных КГС с РИОП в расчётном режиме к одноконтурным КГС с рефрижераторными установками с многоступенчатым расширением, но и превзойти последние при изменении тепловой нагрузки в широком диапазоне её значений.

Ключевые слова: Гелий. Сверхпроводящее устройство. Криогенная гелиевая система. Контур криогенной системы. Ступень предварительного охлаждения. Ступень окончательного охлаждения. Рефрижератор с избыточным обратным потоком. Детандер. Эжектор. Криостатирование.

I.K. Butkevich

FEATURES ONE- AND TWO-CIRCUIT CRYOGENIC HELIUM SYSTEMS

The superconducting devices (SCD) as objects of cryostatting are characterized by small specific thermal loadings and their significant variations. At creation cryogenic helium systems (CHS) for cryostatting SCD aspire to the minimal expenses of energy. Except that in CHS apply such circuits that the optimum mode of their work didn't depend on operating conditions of cryostatting objects. Such systems are two-circuit CHS with refrigerators with excess reverse flow (RERF). Use the RERF in step of final cooling of expander has allowed not only to approach the efficiency of two-circuit CHS with RERF in settlement mode to one-circuit CHS with refrigerator installations with multistage expansion, but also to surpass the last during change of thermal loading in wide range of its values.

Keywords: Helium. Superconducting device. Cryogenic helium system. Contour of cryogenic system. Step of precooling. Step of final cooling. Refrigerator with excess reverse flow. Expander. Ejector. Cryostatting.

1. ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о сравнительном анализе одно- и двухконтурных криогенных гелиевых систем (КГС) неоднократно рассматривался в специальной литературе. Почему же возникла потребность в двухконтурных схемах, чем нас не устраивают одноконтурные схемы? Ещё в 1972 г. было обращено внимание в [1] на низкую эффективность работы одноконтурных схем в некоторых режимах криостатирования.

Известно, что существует жёсткая связь между оптимальными параметрами криогенной установки (КУ), соответствующими экстремальным значениям её характеристик. Даже в наиболее простой криогенной гелиевой установке (КГУ) имеются (рис. 1) чётко вы-

раженные экстремумы холодопроизводительности Q_x и удельных затрат энергии N от относительного расхода гелия в детандерной ступени предварительного охлаждения \bar{G}_D [2]. Существует также оптимальное значение величины расхода гелия, поступающего в ступень окончательного охлаждения (СОО): $\bar{G}_{\text{СОО}} = 1 - \bar{G}_D$. С другой стороны, расход гелия в СОО (в простейшем случае) определяется необходимым его расходом через объект криостатирования: $G_{\text{КО}} = Q_{\text{КО}} / q_{\text{КО}}$, где величина удельной тепловой нагрузки $q_{\text{КО}}$ зависит от условий работы криостатируемого объекта. Чаще всего при криостатировании сверхпроводящих устройств (СПУ) требуется обеспечить весьма малый нагрев гелия в криостатируемом объекте (0,5–1,5 К), что приво-

дит к значительному превышению необходимого расхода через объект криостатирования $G_{\text{кю}}$ над оптимальным расходом ступени окончательного охлаждения криогенной установки $\bar{G}_{\text{соо}}$.

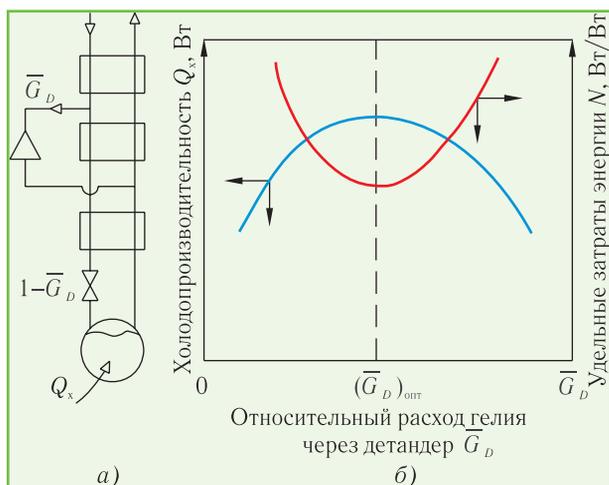


Рис. 1. Оптимальное распределение потоков криоагента между детандерной СПО и дроссельной СОО для КГУ с одной детандерной СПО: а — схема КГУ; б — влияние расхода криоагента через детандерную СПО на Q_x и N

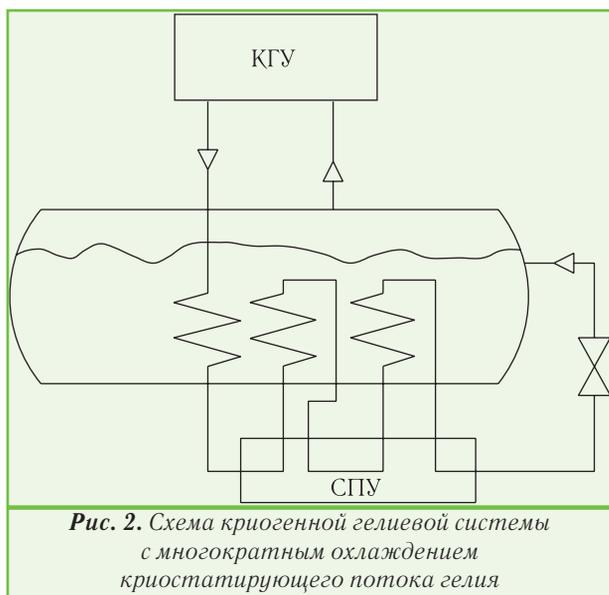


Рис. 2. Схема криогенной гелиевой системы с многократным охлаждением криостатирующего потока гелия

В связи с этим важно ответить, можно ли в рамках одноконтурной схемы решить задачу криостатирования такого объекта при минимальных затратах работы? В [1] было предложено для решения этой задачи использовать схему криостатирования с многократным охлаждением потока гелия (рис. 2). Смысл её заключается в том, что после нагрева на допустимую величину при криостатировании объекта криоагент выводится из него, вновь охлаждается до первоначального состояния в ванне КУ, снова охлаждает часть объекта и т.д. Теоретически таким способом можно обеспечить любой минимальный нагрев криоагента в объекте криостатирования. Однако такой способ не нашёл применения, так как он обладает рядом недостатков: наличием дополнительных потерь от

теплообмена и теплопритоков к криогенным трубопроводам, конструктивной сложностью, невозможностью реализации в протяжённых системах. Вот тут и проявляются преимущества двухконтурной криогенной системы. Независимость расходов в контурах криогенерации и криостатирования позволяют эффективно реализовать практически любую величину удельной тепловой нагрузки.

2. ВАРИАНТЫ СХЕМ КГС

Наибольшее распространение получили одно- и двухконтурные КГС. Под контуром КГС будем понимать совокупность криооборудования, объединённого одним расходом технологического потока криоагента.

В идеальном случае, т.е. при отсутствии термодинамических потерь, изменение расходных параметров в одном контуре не должно отражаться на таковых в другом контуре. В качестве простейших одно- и двухконтурных КГС рассмотрим схемы, изображённые на рис. 3. Очевидно, ни у кого не вызовут сомнения схемы: а — одноконтурная, б — двухконтурная. Схема «в» также двухконтурная, хотя в ней и нет материализованной стенки — границы, разделяющей контуры.

Расходные параметры двух контуров (в идеальном случае) не зависят друг от друга, а определяются только суммарной или удельной тепловыми нагрузками. Согласно указанному выше определению схема «г» является трёхконтурной, хотя промежуточный контур II с насосом Н и криососудом 1 термодинамически и функционально неоправдан и применяется только для удобства эксплуатации, например, для периодического пополнения криососуда 2 из сосуда 1. Поэтому подобные схемы представляется более корректным отнести к двухконтурным. В схеме «д» используется вариант КГС с избыточным обратным потоком, позволяющим существенно снизить потери от теплообмена. Он получил в последнее время широкое распространение. Здесь КУ₁ выполняет роль оживителя, поставляя жидкий криоагент в количестве $G_{\text{ж}}$ в контур II (в установку КУ₂). Замыкание контура I осуществляется через контур II. Схема «е», несмотря на её кажущееся сходство со схемой «в», в отличие от последней, является одноконтурной, так как изменение параметров криоагента в КУ неизбежно приводит к изменению расхода через криостатируемый объект.

3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОДНО- И ДВУХКОНТУРНЫХ КС

Таким образом, первым и основным недостатком одноконтурной системы является принципиальная возможность рассогласования оптимальных параметров КУ и, необходимых для его функционирования, параметров криостатируемого объекта (КО). Однако даже если этот недостаток в процессе проектирования устранить и тем самым согласовать параметры КУ и КО в оптимальном режиме работы, это ещё не означает, что КГС будет работать с минимальными затратами энергии. Криогенные системы являются типичными образцами новой техники, при создании

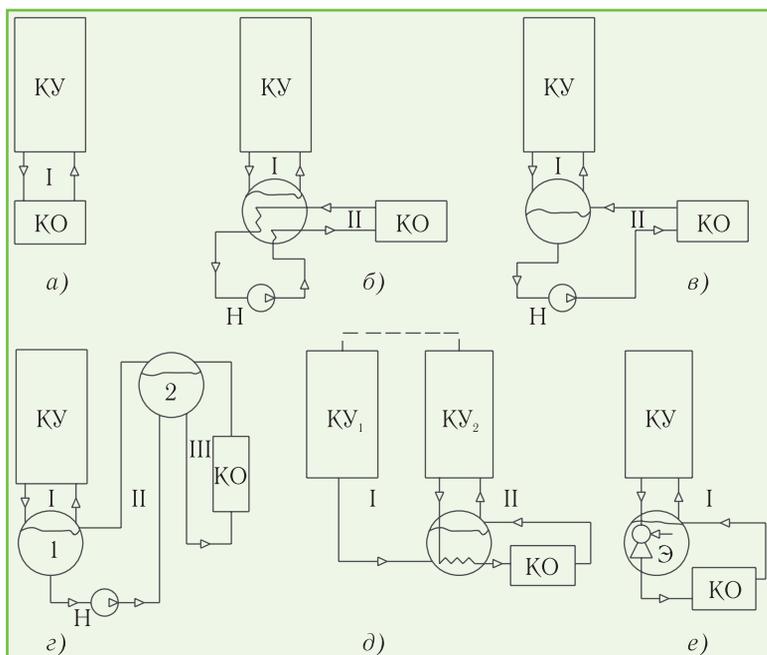


Рис. 3. Схемы одно- и двухконтурных КГС: а, е — одноконтурные; б, в, г, д — двухконтурные (г — по конструктивному признаку — трёхконтурная); I-III — обозначения контуров; КО — криостатируемый объект; Н — насос; Э — эжектор

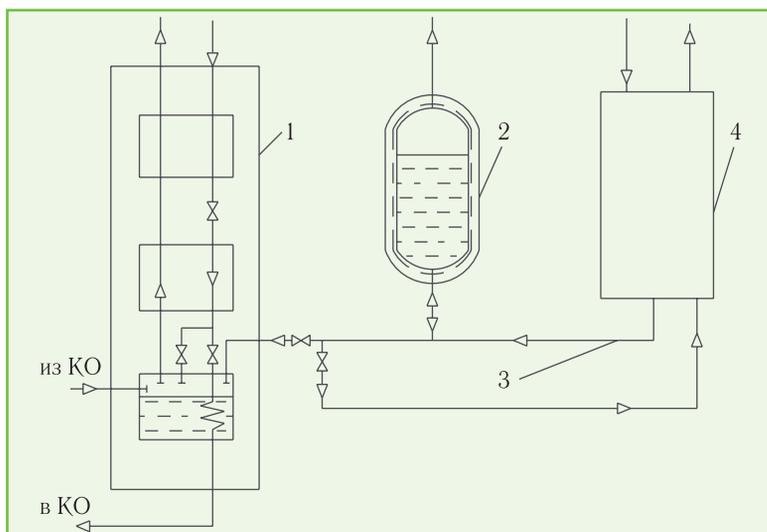


Рис. 4. Двухконтурная КГС с РИОП: 1 — РИОП; 2 — криососуд-накопитель жидкого гелия; 3 — криогенный коллектор; 4 — ожижитель гелия

которой достаточно высокий уровень незнания её особенностей обычно компенсируется значительными «запасами», что приводит, как правило, в процессе эксплуатации к неоптимальному режиму работы и рассогласованию параметров реального объекта и криогенной установки. Кроме этого, с учетом характеристик криостатируемых объектов, тепловая нагрузка которых, как правило, является переменной величиной в зависимости от режима работы, даже оптимизированная одноконтурная криогенная система по интегральным эксплуатационным затратам энергии весьма далека от минимальных [3].

Первая проблема (увеличение кратности циркуляции) легко решается в классической двухконтурной системе с циркуляционным криогенным насосом, в которой реализуется независимость расходов крио-

агента в контуре криогенерации и контуре криостатирования. Это даёт возможность обеспечить как оптимальный расход криоагента в КУ (контуре криогенерации), так и необходимый расход в контуре криостатирования, определяемый условиями работы криостатируемого объекта. В современных одноконтурных КГС одним из путей расширения зоны эффективной работы является использование циркуляционного эжектора, позволяющего увеличить $G_{КО}$ по сравнению с $\bar{G}_{СОО}$ [4]. Вместе с тем, применение эжектора не позволяет в СОО реализовать эффективный процесс расширения в детандере, что увеличивает удельные затраты энергии.

Однако остаётся нерешённой вторая проблема — переменность тепловой нагрузки объекта криостатирования. Её решение требует обеспечения независимости работы контура криогенерации не только от расхода криоагента в нём, но и от колебания тепловой нагрузки в последнем. Особенно удачным это решение представляется для двухконтурной схемы с рефрижератором с избыточным обратным потоком (РИОП) (рис. 4).

4. ДВУХКОНТУРНАЯ КГС С РИОП

Роль основного криогенератора в КГС с РИОП выполняет ожижитель гелия. Для обеспечения его независимости от тепловой нагрузки потребителя в системе обязательно присутствует криососуд-накопитель, который, являясь криогенным аккумулятором, позволяет ожижителю работать постоянно в оптимальном режиме ожижения. Ожижитель обычно проектируется на некоторое среднее значение производительности по жидкому гелию. При уменьшении тепловой нагрузки потребителя (сокращении необходимой величины подлива) избыток ожижаемого гелия пополняет сосуд-накопитель, а при её увеличении сверх производительности ожижителя из накопителя добавляется недостаток жидкого гелия, который поступает в сборник РИОП.

СОО РИОП выполняется как в дроссельном, так и в детандерном варианте (рис. 5). При оптимальной величине подлива $y = (G_{подл} / G_{компр})$ [3] удельные энергозатраты в криогенных гелиевых системах с РИОП, имеющем детандерную СОО, приближаются при $y_{опт} = 0,03$ к энергозатратам, характерным для одноконтурных КГС с многоступенчатыми рефрижераторами (270 Вт/Вт). КГС с РИОП, содержащим дроссельную СОО, имеет худшие показатели (около 380 Вт/Вт при $y_{опт} = 0,1$). Тем не менее высокая надёжность таких систем и возможность использования дроссельно-эжекторных СОО РИОП (см. рис. 5) определяют перспективность их применения.

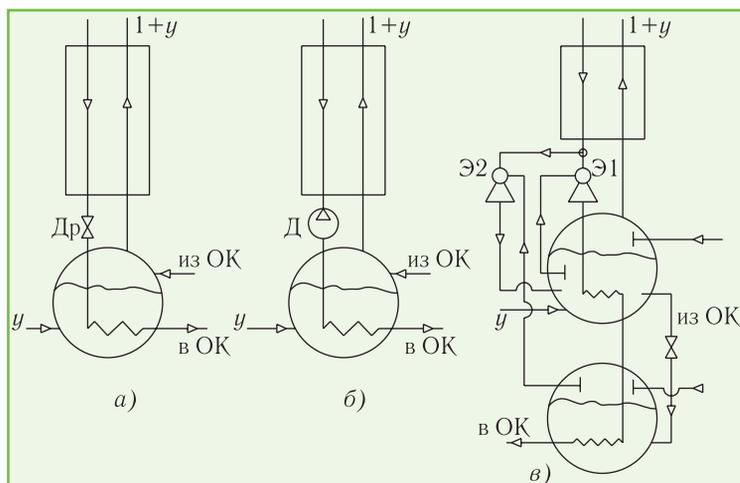


Рис. 5. Различные варианты исполнения СОО РИОП:
 а — дроссельная; б — детандерная;
 в — дроссельно-эжекторная; Э1, Э2 — эжекторы

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Достаточно сильная зависимость удельных затрат энергии от доли подливаемого жидкого гелия у РИОП с дроссельной СОО и значительно более слабая для РИОП с детандерной СОО [2] определяют требования к оборудованию, обеспечивающему в КГС с РИОП сохранение высокой эффективности при колебаниях тепловой нагрузки. Для РИОП с дроссельной СОО желательное использование компрессоров с эффективным регулированием производительности в диапазоне, близком к диапазону колебания тепловой нагрузки криостатируемого объекта. Что касается РИОП с детандерной СОО, то достаточно эффективное регулирование можно обеспечить только за счёт изменения доли подливаемого гелия, т.е. без изменения расхода гелия, поступающего в РИОП из компрессора, а только за счёт варьирования количества подливаемого гелия. Это означает, что практически идеального регулирования можно добиться, применяя регулируемый компрессор и поршневой детандер с плавным изменением числа оборотов кривошипа (для КГС малой и средней производительности). Но и в

случае применения нерегулируемого компрессора и турбодетандера в СОО РИОП (для крупных КГС) можно также получить достаточно эффективные регулировочные характеристики.

Таким образом, двухконтурные криогенные системы с РИОП и сосудом-накопителем, реализующие независимую работу контура криогенерации от расходных параметров криоагента и колебаний тепловой нагрузки в контуре криостатирования, позволяют обеспечить наиболее эффективный режим криостатирования большинства современных СПУ и других криостатируемых объектов.

В качестве примера успешной реализации такой КГС можно назвать криогенные гелиевые системы установки «Токамак-15» (Россия) [4] и ускорителя «Теватрон» в лаборатории Ферми (США) [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Dean J.W. Refrigeration Systems for D.C. and Pulsed Superconducting Magnets in High Energy Physics// Proc. of the 4th Int. Conf. on Magnet Technology. — 1972. — P. 682-688.
2. Криогенные системы: В 2 т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
3. Научно-технические основы разработки гелиевых систем криогенного обеспечения ОАО «Криогенмаш»/ И.Ф. Кузьменко, И.М. Морковкин, Ю.И. Духанин, К.В.Безруков// Технические газы. — 2009. — № 3. — С. 25-29.
4. Сверхпроводящие магнитные системы для токамаков/ Под редакцией Н.А. Черноплекова. — М.: ИздАТ, 1997. — 168 с.
5. Rode C., Brindza P., Richied D. Energy Doubler Satellite Refrigerator Magnet Cooling System// Advances in Cryogenic Engineering. — 1980. — Vol. 25. — P. 326-334.

Повышение квалификации по специальности
"Криогенная техника и технология",
организуемое Украинской ассоциацией производителей технических газов "УА-СИГМА" на базе Одесской государственной академии холода

- изучаемые дисциплины: термодинамические процессы, циклы и схемы криогенных воздухоразделительных установок; снижение энергопотребления при эксплуатации ВРУ и новые технологии разделения воздуха; современные приборы контроля и автоматизация криогенных ВРУ; компрессорное оборудование ВРУ; охрана труда при производстве и использовании продуктов разделения воздуха;
- форма обучения — очно-заочная;
- начало обучения — 15,16 марта 2010 г. (установочные занятия);
- период самостоятельного обучения по предоставленным слушателям методическим материалам и учебным пособиям — 17 марта-12 апреля 2010 г.;
- лекционно-лабораторная и экзаменационная сессия — 13-16 апреля 2010 г.;
- контингент — инженеры и техники;
- по окончании выдается свидетельство Министерства образования и науки Украины

Условия приема по контактному тел./факсу: +380 (48) 777-00-87
 и e-mail: uasigma@paco.net.
 Наш сайт: www.uasigma.odessa.ua