

УДК 621.59(075.8)

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

## СПОСОБЫ ФОРСИРОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ СИСТЕМ

*Большой опыт, накопленный в процессах создания, исследования, испытаний и эксплуатации криогенных гелиевых систем (КГС) различного назначения, указывает на целесообразность как длительного, так и кратковременного форсирования производительности КГС и криогенных гелиевых установок (КГУ). Отмечается, что если такая возможность предусмотрена заранее, это позволяет значительно проще и с меньшими затратами решить ряд проблем, возникающих при согласовании параметров КГС с криогенными потребителями. Рассматриваются основные приемы форсирования КГС (КГУ), обращается внимание на зависимость степени форсирования от регламента работы.*

**Ключевые слова:** Криогеника. Гелий. Холодопроизводительность. Сверхпроводящее устройство. Закачной компрессор. Турбодетандерный ожижитель.

**I.K. Butkevich**

## FORCING WAYS OF CRYOGENIC HELIUM PLANTS

*The great experience received in the process of development, analysis, testing and exploitation of cryogenic helium systems (CHS) for different purpose, explains the necessity of long and also short term of CHS forcing and cryogenic helium plants (CHP) manufacturing. It is mentioned that if such possibility is foreseen, it allows solving more easily and with less expenses many problems, appearing during the coordination of CHS settings with cryogenic consumers. The main methods of CHS (CHP) forcing are taken into consideration and it is paid attention to the dependence of the forcing degree on the work order.*

**Keywords:** Cryogenics. Helium. Refrigerating capacity. Superconducting device. Pumping compressor. Turboexpanding liquefier.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость форсирования холодопроизводительности криогенных гелиевых установок (систем) возникает по разным причинам. Основными из них являются: повышенные тепловые нагрузки потребителя по сравнению с расчетными; пониженная холодопроизводительность криогенной гелиевой установки (КГУ) или системы (КГС) по сравнению с техническим заданием; возникновение новых потребителей в процессе эксплуатации; появление непредвиденных потерь холодопроизводительности; увеличение тепловой нагрузки потребителя в процессе эксплуатации; сложности выхода на рабочий режим на стадии захождения.

Рассмотрим каждую из этих причин несколько подробнее.

**Повышенные тепловые нагрузки** чаще всего возникают из-за того, что криостатируемые устройства, как правило, являются объектами экспериментальными, в которых фактор незнания является достаточно большим. И поэтому одна из задач их исследования и испытания — как раз определение истин-

ной величины тепловой нагрузки и источников тепловых потерь. Практически во всех сверхпроводящих устройствах (СПУ), для которых создавались КГС, работающие на температурном уровне 4,5 К и ниже, тепловые нагрузки существенно отличались от первоначально заданных. Другое дело, что далеко не всегда они выходили за пределы возможностей созданной КГС, как, например, КГС СПК-100 [1], когда повышенный теплоприток по тоководам значительно превысил возможности КГС. В связи с этим обычно и разработчик СПУ, и разработчик КГС закладывают определённые запасы. Тем не менее, как было показано в [2], значительные запасы по холодопроизводительности могут привести, особенно в одноконтурных КГС, к большому перерасходу энергии.

**Пониженная холодопроизводительность** КГС (КГУ) может возникнуть как вследствие «незнания» (применение новых типов аппаратов, машин, теплоизоляции и т.д.), так и ввиду неумышленного брака или откровенной небрежности разработчика, изготовителя, контролера. Причина «незнания» наиболее характерна для криогенных гелиевых систем, так как они и по сей день являются типичными представите-

лями новой техники из-за практического отсутствия тиражирования. В связи с её энергоёмкостью и невозможностью проведения комплексных исследований на площадке изготовителя, как правило, они совмещаются с первым испытанием и самого криостатируемого объекта. Ярким примером такой ситуации явилась КГС установки «Токамак-15». Потребовалось три пуска КГС для приближения холодопроизводительности к расчётному значению [3], в процессе которых производилась доработка регламента работы системы очистки, конструкций турбодетандеров и одного из теплообменников.

**Возникновение новых потребителей** в процессе проведения НИР — весьма естественное явление. Обычно это небольшие потребители жидкого гелия, которые нуждаются в нём для решения каких-то частных задач, появляющихся в процессе комплексного исследования. Однако не всегда эта дополнительная потребность укладывается в рамки запасов по холодопроизводительности.

**Непредвиденные потери холодопроизводительности** чаще всего связаны с возникающим увеличением теплопритоков. Например, в КГС стенда испытания магнитных систем (СИМС) такие теплопритоки были вызваны появлением термоиндуцированных колебаний в потоке гелия в криогенном коллекторе при температуре около 5 К, а в КГС установки «Токамак-15» увеличенными теплопритоками к криогенным гелиевым трубопроводам, выполненным с нарушением технологии изготовления [3].

**Увеличение тепловой нагрузки** криостатируемого объекта в процессе эксплуатации также связано, как правило, с ростом теплопритоков к криостату, хотя не исключена и необходимость изменения режима испытаний, приводящего к возрастающим тепловым нагрузкам. Интересным примером роста теплопритоков к криостату в процессе испытаний может служить увеличение тепловой нагрузки на КГС в конце испытаний (продолжительность кампании около 1500 ч) более чем в 1,5 раза, что объяснялось повышением радиационной составляющей теплового потока из-за намерзания остаточного воздуха (за счёт негерметичности вакуумной полости криостата) на криогенных поверхностях [3].

**Сложности выхода на рабочий режим** в процессе захлаживания, которые наблюдались при первых пусках КГС установки «Токамак-7» и КГС СИМС [3], кроме вышеперечисленных причин, связаны с увеличением доли ожижительной тепловой нагрузки в рефрижераторных жидкостных КГС, что требует перестройки режима работы КГУ [4].

Таким образом, необходимо при разработке и создании КГС предусматривать возможность её форсирования.

## 2. ОРГАНИЗАЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОГО ФОРСИРОВАНИЯ

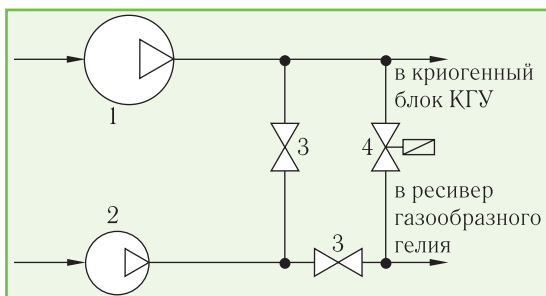
Большинство указанных причин требуют длительного форсирования или, другими словами, на

протяжении всей рабочей кампании увеличения производительности КГС (КГУ). Такое форсирование наиболее просто обеспечить увеличением количества сжатого гелия, поступающего в установку. Это значит, что при создании КГС необходимо предусматривать наличие в системе дополнительного компрессора или возможность увеличения производительности штатного компрессора, комплектуемого систему. При этом возникает вопрос: «Какой производительности должен быть такой компрессор?» Очевидно, его производительность зависит от возможностей криогенного блока КГУ, определяемых пропускной способностью теплообменных аппаратов и возможностью форсирования расширительных машин (детандеров).

Здесь следует различать две категории КГУ по регламенту их работы: с коротким и длительным временем непрерывной эксплуатации. Первую категорию обычно составляют ожижители гелия малой и средней производительности, обеспечивающие потребности в нём научно-исследовательских предприятий. Время их непрерывной работы ограничивается односменным режимом (6-10 ч в день), при одном-трёх пусках в течение недели (а иногда и реже). Ко второй группе относятся, как правило, КГУ, работающие в составе крупных КГС, предназначенных для криостатирования, скажем СПУ, или любых других объектов, требующих длительного времени непрерывной работы (от нескольких суток до нескольких месяцев). К этой же категории можно отнести и коммерческие ожижители гелия, заполняющие транспортные сосуды жидким гелием, предназначенным для продажи.

Для установок первой категории характерно относительно большое время «непродуктивной» работы, а именно — время пуска и захлаживания. Обычно оно составляет от 30 до 20 % всей рабочей кампании. Понятно, что любой запас по теплообменным аппаратам и их гидравлическому сопротивлению приводит к увеличению теплоёмкой массы как металла, так и гелия, что неизбежно удлиняет пусковой период. Поэтому в случае КГУ этого типа попытка предусмотреть возможности значительного форсирования может привести не к увеличению, а, наоборот, к снижению средней скорости ожижения. Как правило, в таких КГУ теплообменные аппараты позволяют увеличивать на 10-15 % расход гелия, поступающего в установку, без значительного увеличения гидравлического сопротивления и снижения эффективности теплообмена. Такое форсирование достигается подключением так называемого «закачного» компрессора 2 в линию основного технологического компрессора 1, как показано на рис. 1. Это оказывается возможно, так как в режиме пуска и ожижения закачка гелия в ресивер обычно не требуется, а аварийные ситуации удаётся локализовать перепуском избытка гелия из линии нагнетания в ресивер через закачной клапан 4 (см. рис. 1). Производительность закачного компрессора обычно составляет 10-15 % от производительности основного компрессора, что

позволяет форсировать ожижитель в течение всего времени ожижения. Перед остановкой закачной компрессор вновь переключается с помощью вентилей 3 на линию закачки для выполнения своих основных функций. Иногда этот приём используется для компенсации падения производительности основного компрессора, связанного с износом его клапанов, поршневых уплотнений и т.д. Однако для реализации такого форсирования требуется ещё одно условие, а именно возможность увеличения пропускной способности детандера с сохранением его эффективности. Это обуславливает необходимость создания поршневых детандеров с регулируемой частотой вращения коленвала или регулируемой величиной отсечки впуска. В этом случае практически удаётся увеличить количество ожижаемого гелия пропорционально увеличению его расхода на входе в КГУ. Возможность такого форсирования имеется и в турбодетандерных ожижителях гелия с нерегулируемыми детандерами. Однако из-за отклонения соотношения потоков гелия в детандерной ступени предварительного охлаждения (СПО) и ступени окончательного охлаждения (СОО) от оптимального увеличение количества ожижаемого гелия в таком режиме будет существенно меньше.

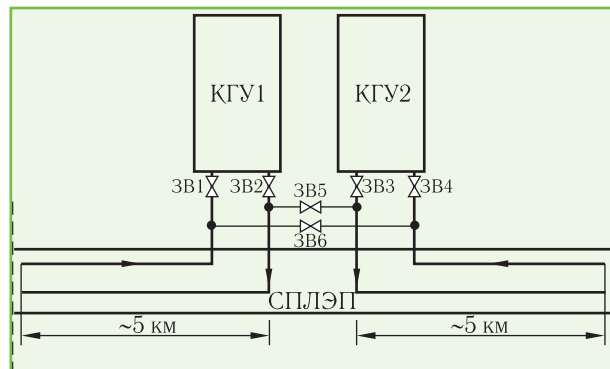


**Рис. 1.** Схема включения закачного компрессора в состав КГС: 1 — основной технологический компрессор; 2 — закачной компрессор; 3 — запорные вентили; 4 — закачной клапан

Для установок с длительным временем непрерывной работы проблемы увеличения времени пуска и захлаживания не существует, так как в случае криостатирования СПУ скорость захлаживания ограничивается конструкцией последних. В коммерческих ожижителях время захлаживания обычно много меньше времени ожижения. Поэтому принципиальных ограничений не существует.

Рассматривая проблему форсирования таких КГС совместно с решением проблем надёжности, а также учитывая нерегулируемость современных гелиевых турбодетандеров, чаще всего идут по пути удвоения холодопроизводительности. Для этого в КГС предусматривается ещё один технологический компрессор. Что же касается теплообменных аппаратов криогенного блока, то они способны пропустить удвоенный расход гелия без существенного ухудшения своих характеристик. Однако криогенный блок снабжается дополнительным турбодетандерным агрегатом. Иллюстрацией такого решения проблемы могут служить

ряд проектов СП-линий электропередач (ЛЭП) американских специалистов, в которых, как следует из рис. 2, отрезок СП ЛЭП длиной порядка 10 км разбивается на два плеча по 5 км. Каждое плечо криостатируется КГУ, расположенными рядом на одной криогенной станции. КГС выполнена так, что в случае отказа одной из двух КГУ другая способна удвоить свою холодопроизводительность за счёт подключения дополнительных турбодетандеров и обеспечить криостатирование уже всего десятикилометрового участка СП ЛЭП. Такой резерв в теории надёжности носит название «горячего» резерва.

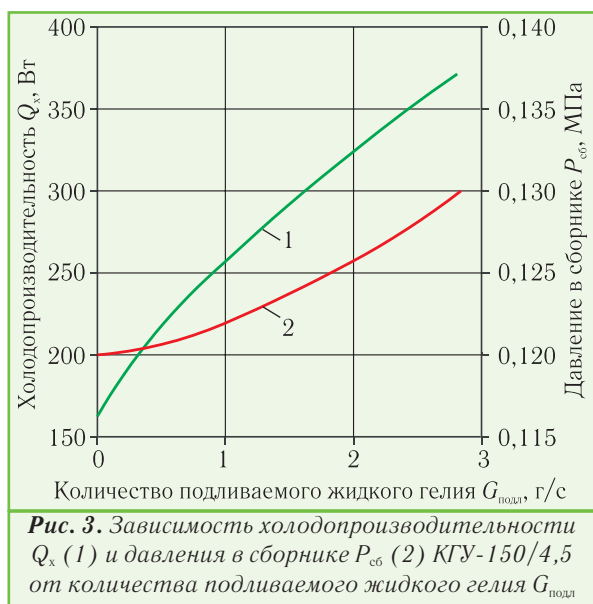


**Рис. 2.** Схема криостатирования протяженной СП-линии электропередач (СП ЛЭП): КГУ1, КГУ2 — криогенные установки, каждая из которых предназначен для криостатирования «плеча» длиной примерно 5 км; 3В1-3В4 — запорные вентили для отключения отказавшей КГУ; 3В5, 3В6 — запорные вентили для подключения «плеча» к работающей КГУ, удвоившей свою холодопроизводительность

Ещё одним приёмом длительного форсирования является увеличение холодопроизводительности КГУ за счёт перевода дроссельной СОО в режим детандерной СОО. Включение в работу детандера в СОО в идеальном случае без изменения расхода сжатого гелия, поступающего в КГУ, позволяет увеличить холодопроизводительность установки в ожижительном режиме почти на 50 %, а в рефрижераторном — на 25 % [5]. Однако в реальных установках, особенно с нерегулируемыми детандерами, сложность перераспределения потоков гелия между СПО и СОО для обеспечения нового оптимального режима несколько снижает эти показатели [3]. Надо признать, что разработчики КГУ (КГС) редко используют этот приём, так как слишком привлекательным является создание высокоэффективной КГУ с детандерной СОО на номинальную холодопроизводительность. Тем не менее на практике из соображений надёжности и простоты регулирования в режимах с пониженной тепловой нагрузкой часто отключают детандер в СОО, предпочитая рассматривать его как резерв для необходимого форсирования холодопроизводительности [3].

### 3. РЕАЛИЗАЦИЯ КРАТКОВРЕМЕННОГО ФОРСИРОВАНИЯ

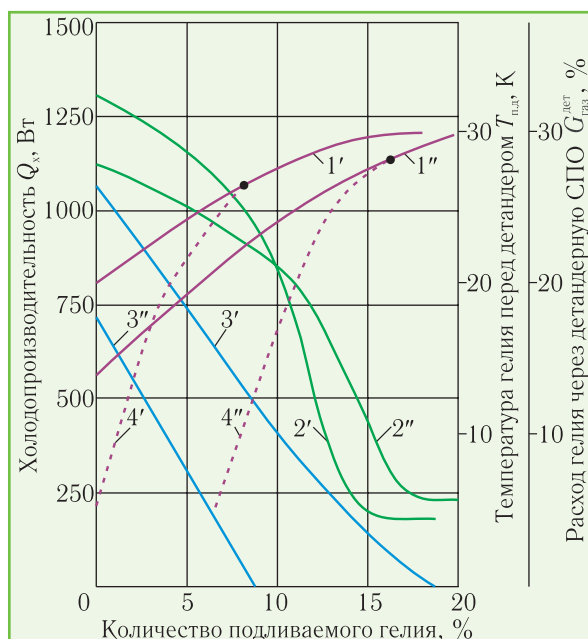
Само понятие «кратковременное форсирование» весьма условно, так как, на самом деле, может продолжаться достаточно долго, по крайней мере, в течение всей рабочей кампании. Однако по принципу организации рабочего процесса оно всегда имеет некое ограничение, которое определяет завершение этого режима. Таким приёмом форсирования является подлив жидкого гелия из хранилища в сборник КГУ. Его применяют исключительно для увеличения рефрижераторной составляющей холодопроизводительности установки. Естественным ограничением продолжительности такого режима является располагаемый запас жидкого гелия, который, в свою очередь, определяется объёмом сосуда жидкого гелия, комплектуемого КГС, и возможностями его накопления (ожижения или заполнения привозной жидкостью). Термодинамически смысл такого приёма заключается в замещении холодопроизводительности детандерной СПО холодом испаряющейся жидкости, что позволяет сократить расход гелия в СПО за счёт увеличения расхода в СОО и, следовательно, его подачу в криостатируемый объект без нарушения параметров криостатирующего потока гелия. В пределе весь поток гелия, поступающий в КГУ, может направляться в криостатируемый объект как в классическом варианте рефрижератора с избыточным обратным потоком. В этом случае максимальная величина холодопроизводительности будет достигаться при оптимальной величине подлива, зависящей от типа СОО КГУ (дроссельная или детандерная) [2,5].



На самом деле, очень часто ограничением величины подлива, особенно в КГУ с дроссельной СОО, является производительность закачного компрессора. Действительно, появляющийся в системе избыток испаряющегося гелия необходимо вывести из системы для сохранения параметров её работы. Гелий слишком дорогой криоагент, чтобы выбрасывать его в атмосферу. Поэтому его закачивают в ресивер. Однако

производительность закачного компрессора может быть меньше оптимальной величины подлива. Как показывает опыт проектирования и эксплуатации КГС, появление необходимости в таком форсировании возникает неожиданно из-за причин, обычно не предусматриваемых при создании системы. Другим ограничением часто является возрастание давления в сборнике жидкого гелия КГУ в связи с увеличением величины обратного потока гелия. Это приводит к повышению температуры криостатирования, что не всегда допустимо. На рис. 3 представлена зависимость роста холодопроизводительности  $Q_x$  и давления в сборнике  $P_{co}$  установки КГУ-150/4,5 от количества подливаемого гелия.

Представляет интерес характер изменения параметров КГУ, работающей в рефрижераторном режиме, от величины подлива. Следует учитывать, что для данной КГУ заранее такой режим не предусматривался. Такие характеристики для установки ОРГ 100-250/4,5 приведены в [1]. Изобразим их на рис. 4 для более подробного анализа. Установка была спроектирована для работы в смешанном режиме, а исследованная модификация первоначально предназначалась для криостатирования тоководов СИМС [1], т.е. для работы в ожигительном режиме. Она работала по циклу с азотной и детандерной СПО и детандерно-дроссельной СОО [3], причём в детандерной СПО применялись три классических двухклапанных порш-





невых детандера, работающих параллельно, а в СОО — поршневой детандер с электромагнитными клапанами и плавным регулированием частоты вращения коленвала. Когда появилась необходимость использовать эту установку для криостатирования опытного СП-магнитного блока установки «Токамак-15» было принято решение о форсировании ОРГ 100-250/4,5 подливом жидкого гелия предварительно накапливаемого в сосуде РЦВГ-1,25/0,7. Рис. 4 показывает, как растёт холодопроизводительность КГУ от величины подлива с одновременным сокращением расхода гелия через детандерную СПО. Наличие трёх детандеров в СПО позволило достаточно плавно уменьшать этот расход путём последовательной остановки детандеров вплоть до полной остановки всех трёх машин. Увеличение расхода через детандерную СОО достигалось увеличением частоты вращения вала низкотемпературного детандера. Как видно, такое форсирование позволило увеличить холодопроизводительность установки с дроссельной СОО в рефрижераторном режиме более чем в два раза.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании КГУ и КГС целесообразно заранее учитывать возможность их форсирования. Причём, в зависимости от регламента работы, требований к скорости захлаживания, а также обеспечения необходимых параметров надёжности, увеличение холо-

допроизводительности может колебаться от 10 до 100 %. В КГС всегда целесообразно предусматривать для этих целей наличие дополнительного компрессора и возможность его подключения к основной технологической коммуникации, а также сосуда с жидким гелием, запас которого обеспечил бы необходимое форсирование КГУ в течение всей рабочей кампании.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Буткевич И.К. Криогенные гелиевые системы для объектов со сверхпроводящими устройствами: создание и совершенствование// Технические газы. — 2009. — № 4. — С. 19-27.
2. Буткевич И.К. Особенности одно- и двухконтурных криогенных гелиевых систем// Технические газы. — 2009. — № 6. — С 13-16.
3. Сверхпроводящие магнитные системы для токамаков/ Под редакцией Н.А. Черноплекова. — М.: ИздАТ, 1997. — 335 с.
4. Буткевич И.К. Особенности режимов работы криогенных установок и систем// Технические газы. — 2009. — № 5. — С. 42-45.
5. 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.



**ОСНОВАНО В 1896 ГОДУ**

**ОАО "Сумское НПО им.М.В.Фрунзе" -**  
одно из старейших предприятий в мире  
по изготовлению тяжелых поршневых компрессоров

[www.frunze.com.ua](http://www.frunze.com.ua)



- широкая номенклатура;
- высокая эффективность и надежность;
- ресурс работы до капитального ремонта - 40 тыс. часов;
- автоматизированная система контроля, управления и защиты;
- гарантийное обслуживание.

Ваше точное попадание в цель -



размещение заказов в ОАО



Украина, 40004, г.Сумы, ул.Горького, 58  
[www.frunze.com.ua](http://www.frunze.com.ua), [snpo@frunze.com.ua](mailto:snpo@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