

УДК 621.59(075.8)

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

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКОГО УРОВНЯ НАДЁЖНОСТИ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ СИСТЕМ

Расширение сфер применения криогенных гелиевых установок (КГУ) и систем (КГС), а также необходимость обеспечения их конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках требуют повышения надёжности. Рассматриваются основные приёмы достижения высоких показателей надёжности КГУ и КГС. Показано, что наиболее эффективным является повышение надёжности КГС за счёт использования резервуара с жидким гелием в качестве неоднородного резерва с одновременным обеспечением ремонта отказавшего оборудования. Отмечается, что такое резервирование наиболее эффективно для двухконтурных криогенных гелиевых систем с рефрижераторами с избыточным обратным потоком.

Ключевые слова: Криогеника. Гелий. Ожижитель гелия. Рефрижератор. Надёжность. Однородное и неоднородное резервирование. Интенсивность отказов и восстановления. Коэффициент готовности. Турбодетандер. Резервуар для жидкого гелия.

I.K. Butkevich

ENSURING OF HIGH SAFETY LEVEL OF CRYOGENIC HELIUM SYSTEMS

Broadening application range in cryogenic helium plants (CHP) and systems (CHS) and the necessity to provide for their competitiveness on the domestic and foreign markets require safety increase. The major ways of reaching high CHP and CHS safety level are considered. It is shown that the most effective is the increase of CHS safety at the expense of a tank charged with liquid helium as a heterogeneous reserve with a simultaneous defected equipment repair. It is mentioned that such reservation is the most effective for two-circuit cryogenic helium systems with refrigerators having excess reverse flow.

Keywords: Cryogenics. Helium. Helium liquefier. Refrigerator. Safety. Homogeneous and heterogeneous reservation. Failure and recovery rate. Availability. Turboexpander. Liquid helium tank.

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокий уровень надёжности криогенных гелиевых систем и установок — одно из основных требований при их создании и эксплуатации, так как этим самым обеспечивается их конкурентоспособность на внутреннем и международном рынках. Однако оценивать надёжность безотносительно к затратам, с помощью которых она создаётся, не имеет смысла. Поэтому преимущество всегда имеют те технические системы, которые при равных показателях надёжности нуждаются в минимальных затратах на их обеспечение. И криогенные системы не являются исключением. При создании криогенных гелиевых систем (КГС) и установок (КГУ), как правило, используют два приёма для достижения высокого уровня надёжности: повышение надёжности отдельных составляющих (машин, аппаратов, изоляции, системы измерения и автоматизации и т.д.) и применение резервирования агрегатов, блоков, установок и систем в целом.

Из широкой номенклатуры показателей надёжности [1] в криогенном гелиевом машиностроении чаще всего используются: вероятность безотказной работы P , наработка на отказ T , интенсивность отказов $\lambda=1/T$, среднее время восстановления $T_{\text{в}}$, интенсивность восстановления $\mu=1/T_{\text{в}}$, коэффициент готовности $K_{\text{г}}$, нагруженный («горячий») или ненагруженный («холодный») резервы, резервирование с восстановлением или без него.

Вероятность безотказной работы, как правило, применяется для характеристики коммерческих ожижителей гелия, так как является статистической величиной и означает, например, при $P=0,9$, что в пределах заданной наработки у 90 из 100 ожижителей отказ не возникнет. Для уникальных криогенных систем, которые существуют обычно в одном экземпляре, этот показатель обычно не используется.

Для оценки безотказности применяют интенсивность отказов, а для характеристики ремонтпригодности — интенсивность восстановления.

В качестве комплексного показателя надёжности обычно используется коэффициент готовности, характеризующий «готовность объекта к применению по назначению только в отношении его работоспособности» [1]. Следовательно, значение $K_r=0,9$ будет означать, что из 100 ч эксплуатации ожидаемый срок безаварийной работы составит 90 ч.

В КГС для обеспечения надёжности чаще всего прибегают к ненагруженному резервированию, когда резервный элемент вводится в эксплуатацию только после выхода из строя основного элемента. Однако иногда применяют и нагруженный резерв, когда резервное оборудование постоянно находится в режиме основного оборудования. Обычно такой резерв эффективен в тех случаях, когда его удаётся сочетать с технологической схемой системы [2].

Обычно условия эксплуатации КГС и КГУ позволяют восстанавливать вышедшее из строя оборудование, если не сразу после отказа, то, по крайней мере, во время продолжающегося функционирования криогенной системы. Однако существуют системы, когда ремонт оказывается невозможен. К таким системам, в частности, относится та часть КГС УНК-3000 [3], которая расположена в туннеле, в зоне повышенной радиации.

2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫСОКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ КГС

При создании криогенных гелиевых систем и установок, также как и при разработках любых других технических систем, существует множество приёмов повышения их надёжности. К ним относятся, в частности, использование более совершенных конструктивных и технологических решений, применение новых материалов, повышение точности изготовления и др.

В качестве примера внедрения новых конструктивных решений, характерных для криогенной техники и демонстрирующих связь многих вышеперечисленных факторов друг с другом, а также с затратами на изготовление и эксплуатацию, можно рассмотреть эволюцию криогенной изоляции криогенных блоков КГУ. Первые КГУ имели высоковакуумную изоляцию с поддержанием вокруг аппаратов глубокого вакуума порядка $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Теплообменные аппараты изготавливались из меди. Неразъёмные соединения их друг с другом, а также с криогенной арматурой, сборником жидкого гелия и детандерами осуществлялись методом пайки серебряным (ПСР) или оловянно-свинцовым (ПОС) припоями. Надёжность этих соединений (особенно с помощью ПОС) была недостаточно высокой, и периодически из-за этого в процессе эксплуатации (как правило при криогенных температурах) возникали незначительные течи, поиск и устранение которых требовали немалых трудозатрат. Иногда эта работа выводила КГУ из строя на несколько недель, а иногда и месяцев.

Для повышения надёжности изоляции криогенных блоков использовалась, так называемая, дьюар-

ная изоляция. В ней высокий вакуум поддерживался в межстенном пространстве, заключённом между наружным теплым кожухом и внутренней холодной обечайкой, которая служила одновременно и тепловым экраном. Вокруг же теплообменных аппаратов и другого криогенного оборудования создавался относительно неглубокий вакуум ($1 \cdot 10^{-1}$ мм рт. ст.), нарушение которого за счёт негерметичности соединений было легко восстанавливать включением форвакуумного насоса. Эта конструкция позволила значительно повысить надёжность криогенной изоляции, однако её реализация повлекла за собой удорожание криогенного блока и появление дополнительных требований к помещению, например, наличие большой высоты до подкрановых путей или глубокой монтажно-ремонтной ямы. Это явилось следствием размещения аппаратов и машин в криогенном блоке со строгим соблюдением температурных зон: сверху — тепло, а снизу — холод для предотвращения теплопереноса за счёт конвективного теплообмена. Кроме этого, при обеспечении надёжности этого типа изоляции, повышалась роль человеческого фактора, так как внутренняя обечайка для снижения теплопереноса по ней за счёт теплопроводности выполнялась тонкостенной, что обусловило строго определённую последовательность вакуумирования. Тем не менее, несмотря на вышеупомянутые недостатки, эта изоляция требовала меньших затрат при эксплуатации и применялась во всех КГУ.

После замены меди на нержавеющую сталь в элементах внутренней обвязки криогенного блока и естественной замены пайки на аргоно-дуговую сварку надёжность неразъёмных соединений возросла. В связи с этим практически исчезла их зависимость от температуры и, тем самым, отпала возможность появления так называемых «холодных течей». Это позволило вернуться к высоковакуумной изоляции, что повлекло за собой не только удешевление конструкции криогенного блока и помещения для его размещения, но и снизило затраты на эксплуатацию с общим повышением показателей надёжности за счёт большей заводской готовности криогенного блока [4].

3. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ОДНОРОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Из общей теории надёжности известно, что резервирование однородными элементами позволяет снизить интенсивность отказов резервируемого узла (блока, агрегата, установки) в $(u+1)$ раз, где u — количество резервных единиц, при том, что резерв — ремонтируемый. В этом случае интенсивность отказов

$$\lambda_{рез} = \lambda / (u + 1).$$

При использовании ремонтируемого резерва зависимость становится более сильной. Даже при одном резервном элементе и при условии, что ремонт начинается сразу после отказа и ввода в эксплуатацию резервного элемента интенсивность отказов

$$\lambda_{\text{рем.рез}} = 2\lambda^2 / (3\lambda + \mu),$$

где λ — интенсивность отказов нерезервируемого элемента; μ — интенсивность восстановления.

Понятно, что в случае если μ на порядок и более превышает λ , что обычно и наблюдается в КГС, интенсивность отказов резервируемого элемента с возможностью ремонта может быть снижена на несколько порядков.

В КГС этим приёмом обычно пользуются для повышения надёжности систем компримирования, маслоочистки, иногда отдельных приборов системы изме-

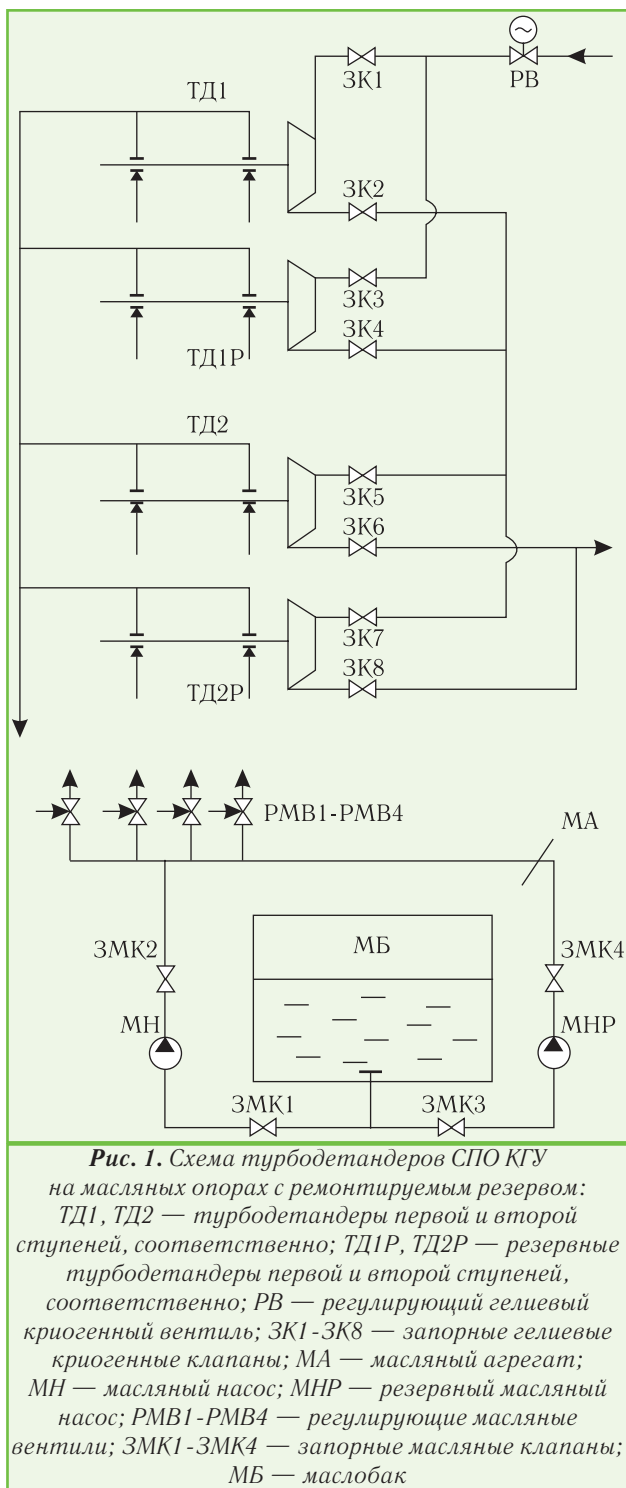


Рис. 1. Схема турбодетандеров СПО КГУ на масляных опорах с ремонтируемым резервом: ТД1, ТД2 — турбодетандеры первой и второй ступеней, соответственно; ТД1Р, ТД2Р — резервные турбодетандеры первой и второй ступеней, соответственно; РВ — регулирующий гелиевый криогенный вентиль; ЗК1-ЗК8 — запорные гелиевые криогенные клапаны; МА — масляный агрегат; МН — масляный насос; МНР — резервный масляный насос; РМВ1-РМВ4 — регулирующие масляные вентили; ЗМК1-ЗМК4 — запорные масляные клапаны; МБ — маслобак

рения. Но однородное резервирование в КГС не всегда позволяет достичь желаемого результата. В качестве примера можно рассмотреть ожижитель гелия с турбодетандерной системой предварительного охлаждения (СПО). Два последовательно расположенных турбодетандера на масляных опорах для обеспечения высокого уровня надёжности снабжены резервными машинами. Однако с введением резервных турбодетандеров появляется необходимость в дополнительной криогенной и тёплой арматуре, также обладающей своими показателями достаточной надёжности (рис. 1). В нашем примере появилось 8 криогенных запорных клапанов (ЗК1-ЗК8) и 4 запорных масляных клапана (ЗМК1-ЗМК4). Негерметичность любого из них может нарушить работоспособность системы.

Определим интенсивность отказов турбодетандерного агрегата (все цифры относительно условны) без резервирования как

$$\lambda_{\text{ТДАГР}} = 2\lambda_{\text{ТД}} + \lambda_{\text{МН}} + 4\lambda_{\text{РМВ}} + \lambda_{\text{РВ}} = 2 \cdot 0,3 \cdot 10^{-4} + 0,0001 + 4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot 10^{-4} = 2,5 \cdot 10^{-4}.$$

Зарезервируем масляный насос с возможностью его ремонта. Тогда

$$(\lambda_{\text{МН}})_{\text{рем.рез}} = [2\lambda_{\text{МН}}^2 / (3\lambda_{\text{МН}} + \mu_{\text{МН}})] + 4\lambda_{\text{ЗМК}} = [2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4} / (3 \cdot 10^{-4} + 0,1)] + 4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} = 0,4 \cdot 10^{-4}.$$

В результате улучшенное значение $\lambda_{\text{ТДАГР}} = 1,9 \cdot 10^{-4}$.

Если резервировать полностью турбодетандерный агрегат, что имеет смысл, так как выход турбодетандера из строя весьма вероятен по многим причинам, в том числе скрытым и в работе других узлов криогенной установки (например, в системе криогенной очистки), то, допуская возможность его ремонта в процессе эксплуатации, получаем:

$$\begin{aligned} (\lambda_{\text{ТДАГР}})_{\text{рем.рез}} &= 2[2\lambda_{\text{ТД}}^2 / (3\lambda_{\text{ТД}} + \mu_{\text{ТД}})] + \\ &+ 8\lambda_{\text{криоЗК}} + (\lambda_{\text{МН}})_{\text{рем.рез}} + 4\lambda_{\text{РМВ}} + \lambda_{\text{крио.рег.гел.арм}} = \\ &= 2[2 \cdot 3^2 \cdot 10^{-10} / (3 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 10^{-1})] + \\ &+ 8 \cdot 0,2 \cdot 10^{-4} + 0,4 \cdot 10^{-4} + 0,4 \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot 10^{-4} = \\ &= 3,6 \cdot 10^{-8} + 1,6 \cdot 10^{-4} + 0,4 \cdot 10^{-4} + \\ &+ 0,4 \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot 10^{-4} = 2,9 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Таким образом, введение для резервирования турбодетандеров дополнительной криогенной арматуры не позволило повысить надёжность системы. Из приведённого примера можно сделать вывод: резервирование элементов технической системы целесообразно тогда, когда в результате мероприятий по резервированию или не вводятся, или вводятся дополнительные элементы, суммарный уровень надёжности которых, по крайней мере, на порядок превосходит уровень надёжности резервируемых элементов.

Приведённый пример мог бы показаться надуманным, если бы он не нашёл подтверждения при эксплуатации КГС установки «Токамак-15». В СПО ожижителя ОГ-800 первоначально были предусмотрены резервные турбодетандеры, которые предполагалось также использовать для форсирования холо-

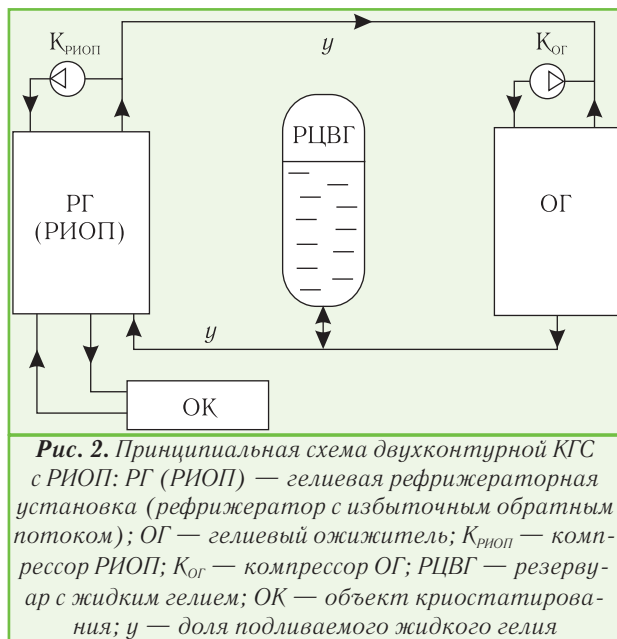
допроизводительности в режиме захлаживания. Однако, как показала опытная эксплуатация, «исключения резервных машин вместе с десятком регулирующих и запорных вентилей и их системой управления не только упростили обслуживание, но и существенно повысили надёжность системы ожижения» [5].

4. РЕЗЕРВИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Резервирование неоднородными элементами, иногда называемое схемно-технологическими мероприятиями по повышению надёжности, получило в криогенных гелиевых системах широкое распространение. В качестве такого резерва в КГС обычно используется сосуд с жидким гелием [2,4], объём которого определяется исходя из регламента работы системы и требуемого уровня её надёжности, а также других возможных функций, выполняемых таким сосудом, например, форсирования КГС [2]. Тем не менее необходимо учитывать, что эффект от такого резервирования существенно зависит от схемно-технологических показателей криогенной гелиевой системы.

В настоящее время в отечественной и зарубежной криогенной технике получили широкое распространение криогенные гелиевые системы с рефрижераторами с избыточным обратным потоком (РИОП). Рассмотрим, в первом приближении, показатели надёжности такой двухконтурной КГС в сравнении с одноконтурной системой.

Принципиальная схема двухконтурной КГС с РИОП изображена на рис. 2. Расчётная схема надёжности будет выглядеть так, как показано на рис. 3.



Отказ системы наступает при выходе из строя цепочки ОГ-РГ (РИОП), при этом ОГ зарезервирован РЦВГ, а в РГ с помощью РЦВГ зарезервирован детандер. Если положить, с большой степенью вероятности, надёжность РЦВГ равной 1, то можно оценить

надёжность такой двухконтурной схемы за период непрерывной работы скажем в 2000 ч. Для турбодетандерного ожижителя гелия данные по интенсивности отказов приведены в табл. 1 (все цифры относительно условны, но, по возможности, приближены к реальной ситуации).

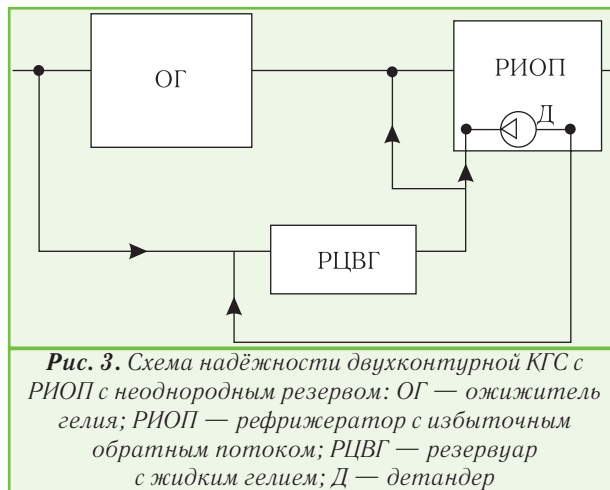


Таблица 1. Интенсивность отказов турбодетандерного ОГ

Оборудование	λ
Компрессор винтовой	0,00005
Теплообменники (8 шт.)	0,00001
Криоизоляция	0,00001
Турбодетандер «теплый»	0,00002
Турбодетандер «холодный»	0,00002
Турбодетандер СОО	0,00002
Арматура (5 шт.)	0,00001
САУ	0,0001
Итого: Ожижитель гелия	0,00035

Для ОГ, зарезервированного РЦВГ,

$$(\lambda_{\text{ОГ}})_{\text{рез.РЦВГ}} = \lambda_{\text{ОГ}} - [1 - \exp(-\lambda T)] / T =$$

$$= 0,00035 - [1 - \exp(-0,00035 \cdot 2000)] / 2000 =$$

$$= 0,00001.$$

Для РИОП с турбодетандером данные по отказам представлены в табл. 2

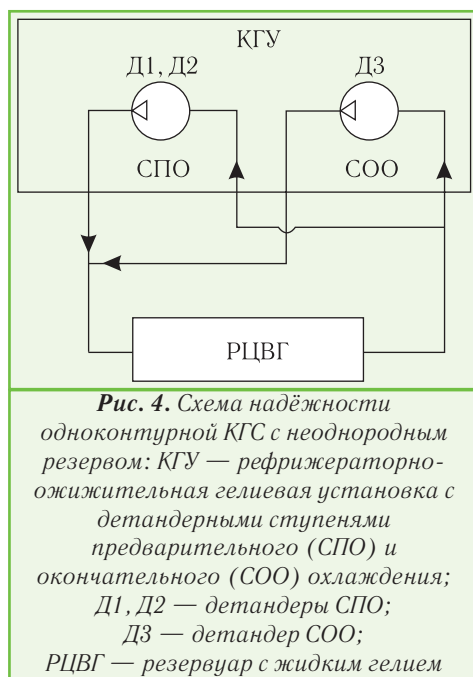
Таблица 2. Интенсивность отказов турбодетандерного РГ (РИОП)

Оборудование	λ
Компрессор винтовой	0,00005
Теплообменники (3 шт.)	0,00001
Криоизоляция	0,00001
Турбодетандер	0,00002
Турбодетандер, зарезерв. РЦВГ	0,0000004
Арматура (5 шт.)	0,00001
САУ	0,00002
РИОП (без резерва)	0,00016
РИОП с детандером, зарезерв. РЦВГ	0,00014

При допущении, что запаса гелия в РЦВГ хватает на любой ремонт, при $\mu_{\text{дет.РИОП}}=0,02$ и $K_T=0,99$

$$\lambda_{\text{П-ух конт.КГС}} \approx \lambda_{\text{РИОП}} = 0,00014.$$

Сравним полученные данные с интенсивностью отказов одноконтурной схемы, в которой используется КГУ со схемой, абсолютно идентичной схеме ожигителя в двухконтурной КГС с РИОП. Схема надёжности одноконтурной КГС представлена на рис. 4.



Интенсивность отказов без резервирования для одноконтурной схемы в первом приближении определяется интенсивностью отказов КГУ, т.е. $\lambda_{\text{КГУ}} = \lambda_{\text{ог}}$. С учётом этого, при $\lambda_{\text{ог}}=0,01$ и $K_T=0,966$

$$\lambda_{\text{КГС}} = \lambda_{\text{ог}} = 0,00035.$$

При резервировании детандеров КГУ с помощью РЦВГ $(\lambda_{\text{КГС}})_{\text{рез.РЦВГ}} \approx 0,00029$. На самом же деле для проведения ремонта турбодетандеров при работе ОГ в режиме РИОП потребуются по крайней мере дополнительно четыре криогенных запорных вентиля с $\lambda_{\text{арм}}=0,00001$. В итоге получаем: $(\lambda_{\text{КГС}})_{\text{рез.РЦВГ}}=0,00033$,

т.е. показатель оказывается близким к показателю надёжности без резервирования.

Это означает, что использование РЦВГ для резервирования в одноконтурной схеме, по крайней мере, малоэффективно. Отсюда следует, что более высоким оказывается уровень надёжности двухконтурной КГС с РИОП.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для обеспечения высоких показателей надёжности криогенных гелиевых систем, наряду с применяемыми традиционными способами, распространёнными в машиностроении, можно использовать неоднородное резервирование, которое является наиболее эффективным способом обеспечения высокой надёжности КГС. При этом для создания такого резерва лучше всего подходят криогенные сосуды жидкого гелия, обладающие интенсивностью отказов на несколько порядков меньше интенсивности отказа любого другого криогенного оборудования. Это позволяет значительно улучшить показатели надёжности двухконтурных КГС с РИОП, что повышает их преимущества перед одноконтурными системами [4,6].

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 27.002-89. Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.
- Буткевич И.К. Форсирование криогенных гелиевых установок// Технические газы. — 2010. — № 1. — С. 28-32.
- Криогенные системы: В 2т. Т.2. Основы проектирования аппаратов, установок и систем/ А.М. Архаров, И.А. Архаров, В.П. Беляков и др. — М.: Машиностроение, 1999. — 720 с.
- Буткевич И.К. Криогенные гелиевые системы для объектов со сверхпроводящими устройствами: создание и совершенствование// Технические газы. — 2009. — № 4. — С. 19-27.
- Сверхпроводящие магнитные системы для токамаков/ Под редакцией Н.А. Черноплекова. — М.: ИздАТ, 1997. — 168 с.
- Буткевич И.К. Особенности одно- и двухконтурных криогенных гелиевых систем// Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 13-16.