

УДК 621.59

**И.К. Буткевич\***Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, ул. Косыгина, 2, г. Москва, 117334  
e-mail: butkevich@kapitza.ras.ru**КРИОГЕННЫЕ ГЕЛИЕВЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОБЪЕКТОВ СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ: СОЗДАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ**

*Различные объекты со сверхпроводящими устройствами начали разрабатывать с 60-ых годов прошлого века. Для их криостатирования требовались криогенные гелиевые системы (КГС) большой производительности. Создание таких систем представляло сложную научно-техническую проблему. В историческом аспекте рассматривается, как совершенствовались специалистами ОАО «Криогенмаш» (Балашиха Московской области, РФ) различные КГС. Изложены особенности КГС, созданных для перспективных криостатируемых объектов: сверхпроводящие кабели; установки для исследования процессов управляемого термоядерного синтеза «Токамак-7» и «Токамак-15»; криостаты для МГД-установок; оборудование со сверхпроводниками для ускорительно-накопительного комплекса. В процессах создания криогенного оборудования удалось сформировать концепцию разработки высокоэффективных КГС. Её воплотили в конструкции КГС последних моделей.*

**Ключевые слова:** Криогеника. Сверхпроводники. СП-кабели. СП-магниты. Криогенная гелиевая система. Ожижение. Рефрижерация. Детандер. Термоядерный синтез. Эффективность. Надёжность.

**I.K. Butkevich****CRYOGENIC HELIUM SYSTEMS FOR OBJECTS WITH SUPERCONDUCTING DEVICES: CREATION AND PERFECTION**

*Various objects with superconducting devices have started to develop since 60<sup>th</sup> years of the last century. For them cryostatting were required cryogenic helium systems (CHS) of the large productivity. Creation of such systems represented a difficult scientific and technical problem. In historical aspect is considered as were improved various CHS by experts of JSC «Cryogenmash» (Balashikha of Moscow area, Russian Federation). Features of CHS created for perspective cryostatting objects are stated: superconducting cables; units for research of processes of controlled thermonuclear synthesis «Tokamak-7» and «Tokamak-15»; cryostats for MGD-units; equipment with superconductors for accelerating-storage complex. During creation of the cryogenic equipment it was possible to generate the concept of development highly effective CHS. It succeeded to be realized in development CHS of last models.*

**Keywords:** Cryogenics. Superconductors (SC). SC-cables. SC-magnets. Cryogenic helium system. Liquefaction. Refrigeration. Expander. Thermonuclear synthesis. Efficiency. Reliability.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В 60-ых годах прошлого века были достигнуты значительные успехи в освоении технологий производства сверхпроводящих материалов в виде проволок и лент. В связи с этим появились возможности практического использования устройств со сверхпроводниками для создания комплексов, предназначенных для проведения фундаментальных исследований в обла-

сти управляемого термоядерного синтеза и физики высоких энергий. Другой важной областью технического применения сверхпроводников являлась энергетика высоких мощностей: МГД-генераторы, сверхпроводящие кабели; двигатели и генераторы с обмотками из сверхпроводников; криотрансформаторы, сверхпроводящие накопители энергии и др. [1,2].

Криостатирование этих объектов должно было осуществляться в области гелиевых температур. Для

\* Автор являлся непосредственным участником создания и испытания всех описываемых КГС, возглавляя научно-техническую лабораторию «Криогенные гелиевые системы» НПО «Криогенмаш» в 1970-1991 гг.

© И.К. Буткевич

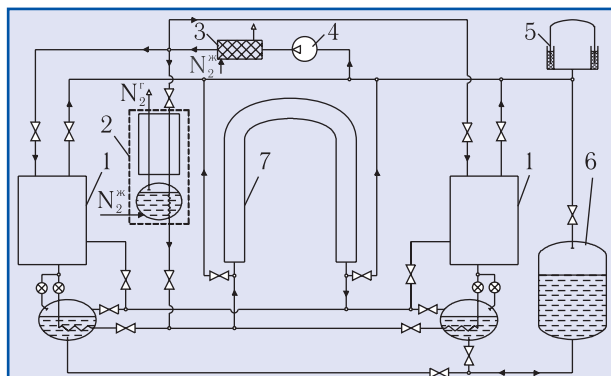
этого требовались криогенные гелиевые системы (КГС) большой производительности, которые могли бы работать как в режимах рефрижерации или ожижения, так и при их комбинировании. Создание такого, в большинстве случаев уникального, оборудования представляло сложную научно-техническую проблему.

В настоящей статье рассматриваются особенности и некоторые характеристики КГС, с помощью которых решалась указанная проблема. Для изложения большого объёма выполненных работ используется исторический аспект. Это позволяет поэтапно показать, как создавались и совершенствовались КГС этого класса.

## 2. ПЕРВЫЕ КГС ДЛЯ КРИОСТАТИРОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КАБЕЛЕЙ

Исторически сложилось так, что вначале ожижительные и рефрижераторные криогенные гелиевые установки промышленного назначения (КГУ-150/4,5; КГУ-250/4,5; КГУ-400(500)/4,5; КГУ-1600 и др.) создавались в НПО «Гелиймаш». Что же касается КГС специального назначения, потребность в которых обострилась в связи с бурным развитием исследований в области прикладной сверхпроводимости, то практически все они были созданы коллективом НПО «Криогенмаш».

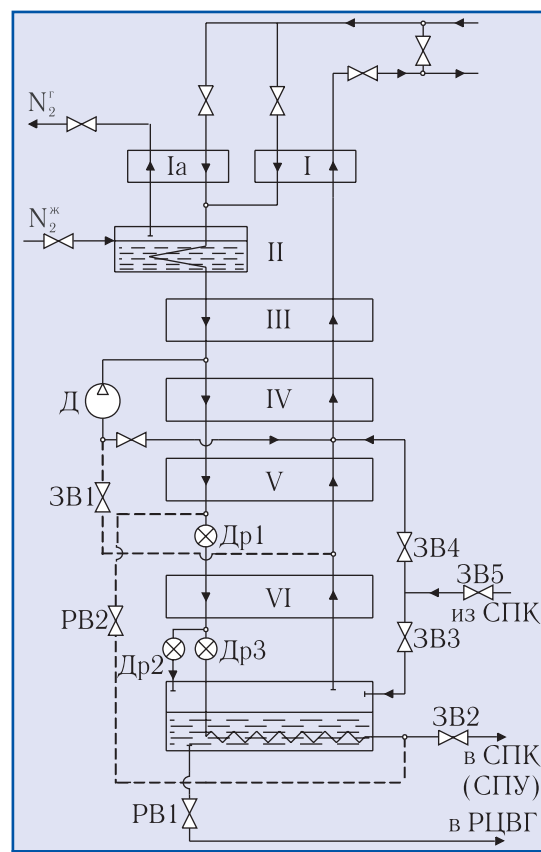
Первой такой КГС была установка для криостатирования опытного сверхпроводящего кабеля длиной 100 м (СПК-100), созданного в Энергетическом институте им. Кржижановского (ЭНИИ) (рис. 1). Она была укомплектована двумя КГУ-150/4,5 (150 Вт на температурном уровне 4,5 К), претерпевшими существенную доработку (рис. 2).



**Рис. 1. Технологическая схема КГС СПК-100:**  
1 — КГУ; 2 — теплообменный блок; 3 — блок низкотемпературной очистки гелия; 4 — компрессоры 302ГП-6/30; 5 — газгольдер; 6 — криогенный резервуар для жидкого гелия РЦВГ-1,25/0,7; 7 — СПК-100

Это была первая КГС с дистанционно управляемой электроприводной криогенной арматурой в достаточно сложной, разветвленной системе криогенных трубопроводов.

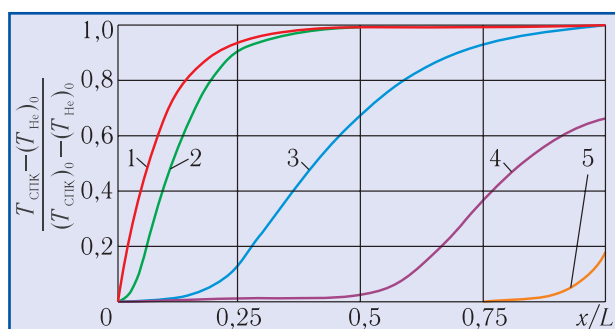
При последующей доработке КГС учитывались



**Рис. 2. Схема модернизированной КГУ-150/4,5 для КГС СПК-100:** I, Ia — теплообменники предварительного охлаждения гелия; II — азотная ступень предварительного охлаждения гелия; III-VI — рекуперативные гелиевые теплообменники; Д — детандер; Др1-Др3 — дроссельные вентили; ЗВ1-ЗВ5 — запорные вентили; РВ1, РВ2 — регулирующие вентили

установленные в ходе экспериментов реальные особенности СПК-100 как объекта криостатирования. При этом в первую очередь принималось во внимание следующее: температурный диапазон криостатирования 4,5...10 К достаточно широк; характер тепловой нагрузки — смешанный, что обусловило ожижительно-рефрижераторный режим работы КГС (причём со значительной долей ожижительной нагрузки, определяемой расходом гелия для охлаждения тоководов).

Так как СПК-100 являлся протяжённым объектом криостатирования, это наложило отпечаток на режим его захлаживания. В связи с тем, что температурный фронт формировался на коротком участке кабеля (рис. 3) в течение основного времени захлаживания до 80 К (около 24 ч), из СПК выходил тёплый гелий, который невозможно было использовать в регенеративном теплообменнике [3]. Проблема была решена благодаря созданию специального теплообменного блока, где гелий, поступающий на захлаживание кабеля, предварительно охлаждался жидким азотом и его парами (см. рис. 1). Эта же особенность вызвала доработку ступени окончательного охлаждения (СОО) КГУ с целью максимальной реализации холодопроизводительности поршневого детандера в режиме захлаживания (см. рис. 2).



**Рис. 3.** Распределение температур по длине СПК в процессе его захлаживания для различных моментов времени:  $T_{СПК}$  — текущая температура СПК;  $(T_{СПК})_0$  — исходная температура СПУ;  $(T_{He})_0$  — температура гелия, входящего в СПК;  $L$  — полная длина СПУ;  $x$  — расстояние рассматриваемого сечения от начала СПК; 1-5 — распределение температур в моменты времени  $\tau_5 > \dots > \tau_1$

В процессе испытаний КГС с СПК было установлено, что использование двух параллельно работающих КГУ представляло собой неудачное решение, так как с их помощью крайне сложно было обеспечивать стабильную работу комплекса. Кроме этого, повышенной (по сравнению с проектной) оказалась тепловая нагрузка от тоководов.

Обе эти трудности были успешно преодолены. Первая — за счёт разделения функций, выполняемых КГУ: одна применялась только для криостатирования тоководов, т.е. работала в чисто квазиожигительном режиме без возврата обратного холодного потока гелия, а другая — в рефрижераторном режиме. Вторая — форсированием холодопроизводительности рефрижераторной КГУ за счёт подлива жидкого гелия, предварительно накапливаемого в гелиевом резервуаре (РЦВГ-1,25/0,7), которым была укомплектована КГС СПК-100 (см. рис. 1). Таким образом, фактически в КГС СПК-100 впервые был реализован рефрижераторный режим с избыточным обратным потоком.

Представляет интерес ещё одна работа, выполненная на заключительном этапе испытаний СПК-100. Для повышения кратности циркуляции гелия через каналы кабеля был использован циркуляционный эжектор [4]. Это позволило поднять среднюю температуру криостатирования, сохранив при этом максимальное значение температуры на уровне около 10 К, и тем самым повысить холодопроизводительность КГС настолько, что удалось обеспечить необходимые параметры испытаний без использования запаса жидкого гелия.

В НПО «Криогенмаш» для экспериментальной проверки внесённых изменений был создан полномасштабный испытательный стенд на базе этой КГС. На нём были тщательно исследованы и отработаны основные режимы её работы. Позже он с успехом применялся для испытания гибкого сверхпроводящего кабеля длиной 50 м (ГСПК-50), изготовленного Всесоюзным институтом кабельной промышленности.

### 3. ОСОБЕННОСТИ КГС ДЛЯ КРИОСТАТИРОВАНИЯ СПУ С СОСРЕДОТОЧЕННОЙ МАССОЙ

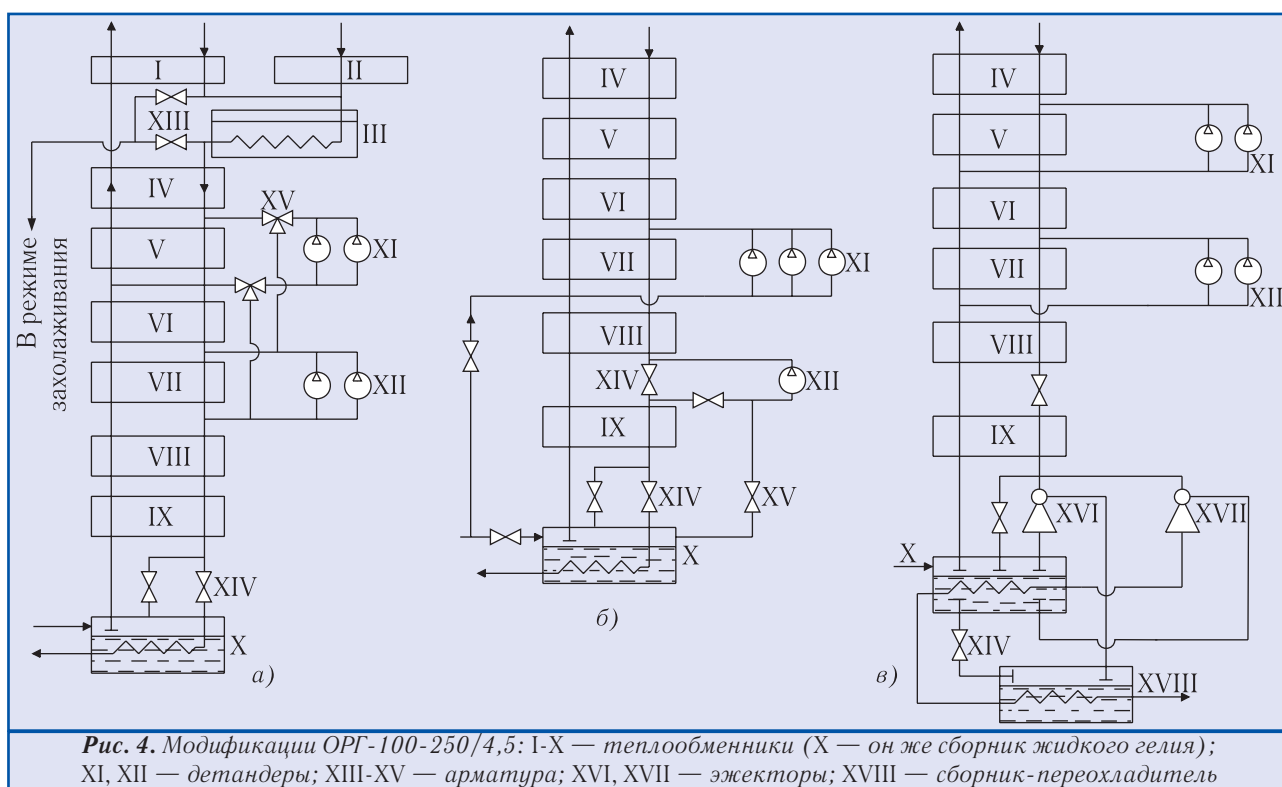
Все последующие сверхпроводящие устройства (СПУ), для которых разрабатывались КГС, являлись прокачными (иногда их называют циркуляционными) объектами криостатирования, но с сосредоточенной массой (в отличие от СПК). К ним предъявлялись свои довольно сложные требования как к реализации режимов криостатирования, так и, особенно, режимов захлаживания. Прежде всего, это было связано с необходимостью поддержания заданного темпа захлаживания и разности температур между входящим и выходящим гелием (обычно не более 40...50 К). Вызывалось это особенностями конструкции СПУ и в основном различием в коэффициентах температурного расширения применяемых в СПУ материалов (от меди до различных смол, используемых для компаундирования СП-обмоток магнитов и электрических машин). Кроме того, для обеспечения работы таких СПУ требовалось поддерживать минимальный температурный уровень криостатирования, что определялось необходимостью снижения температуры разрушения сверхпроводимости с ростом магнитных полей. Это требование трансформировалось для КГС в снижение температуры ниже температуры кипения гелия в сборнике КГУ (4,4-4,5 К), а также в обеспечение малого температурного градиента (часто не более 0,2-0,3 К). Для этого приходилось увеличивать расход гелия через СПУ до уровня, существенно превышающего оптимальные значения расходов через СОО КГУ.

Технологические, конструктивные и режимные характеристики КГС последующих поколений в основном были ориентированы на учёт именно этих особенностей СПУ как объектов криостатирования.

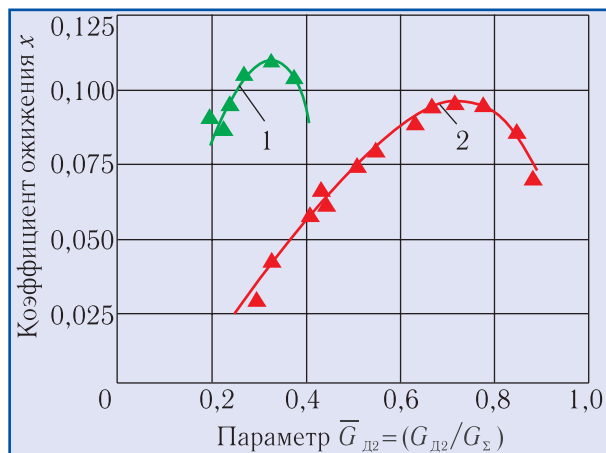
КГС, созданные для криостатирования стендовых СП-двигателя и генератора, СП-магнитов тороидального поля установки «Токамак-7» и блока токовых вводов стенда испытания магнитных систем (СИМС) базировались на КГУ с поршневыми детандерами.

Во всех трёх КГС использовалась специально разработанная установка ОРГ-100-250/4,5 (ожижитель-рефрижератор гелиевый для получения 100 л/ч жидкого гелия и выработки 250 Вт холода при 4,5 К). Она была создана в трёх модификациях (см. рис. 4). Все модификации имели азотную ступень предварительного охлаждения (СПО).

В первой модификации КГС, изображённой на рис. 4,а, имелись две СПО с поршневыми детандерами и дроссельная СОО. Установка потребляла 200 кг/ч сжатого до 3 МПа гелия. Система предназначалась для криостатирования СП-двигателя и генератора при работе в ожижительном режиме. В оптимальном режиме (давление нагнетания  $P_k=2,7$  МПа,  $T_{вх,Д1}=64$  К,  $T_{вх,Д2}=25$  К) установка ожижала около 180 л/ч гелия при коэффициенте ожижения  $\chi=0,11$ . Характеристика ожижительного режима установки представлена на рис. 5. В качестве расширительных машин были использованы четыре поршневых детан-



дера типа ДПГ-4 (по два в каждой СПО) установки КГУ-150/4,5.

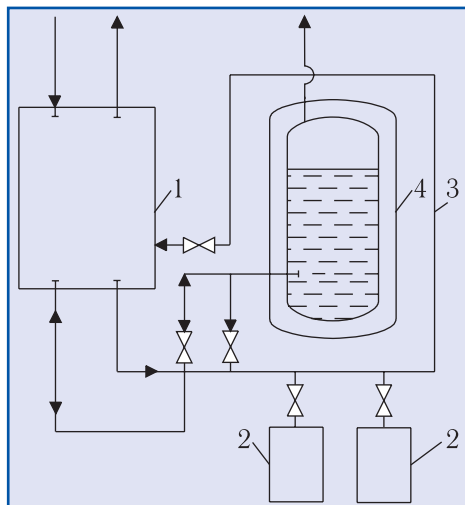


Система обладала тремя особенностями, две из которых применены впервые, а одна — возможность форсирования холодопроизводительности с помощью подлива жидкого гелия — уже использовалась в КГС СПК-100. Здесь впервые был реализован принцип криогенного коллектора, который впоследствии применялся практически во всех крупных КГС. Принцип характеризуется тем, что гелий в СОО дросселируется в сборник жидкого гелия не непосредственно, а пройдя достаточно протяжённый криогенный трубопровод, причём ожигаемая часть криопродукта отбирается (см. рис. 6) в криостатируемый объект в самой приближенной к потребителю точке коллектора.

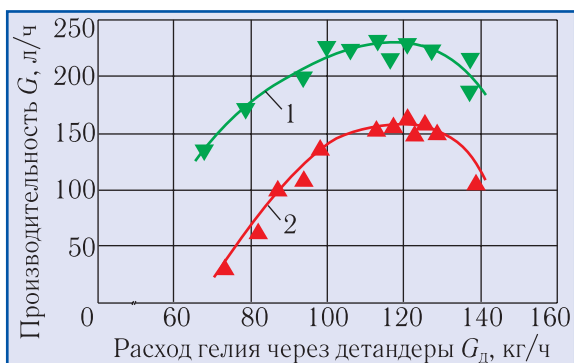
Использование такой схемы позволяет подавать в криостатируемый объект гелий с параметрами, максимально приближёнными к параметрам гелия, выходящего из установки (в случае жидкого гелия — с меньшим паросодержанием). Эта вынужденная мера определяется требованиями обеспечения заданных параметров гелия на входе в криостатируемый объект при достаточном удалении объекта от КГУ и наличии тепловых потерь в криогенных коммуникациях между криостатируемым объектом и КГУ. Таким образом, криогенный коллектор реализует не столько функцию «доставки» криоагента (гелия) к потребителю, сколько обеспечение заданных параметров криоагента на входе в объект криостатирования. Вторая особенность этой КГС обусловлена необходимостью поддержания ограниченного темпа захлаживания криостатируемого объекта (до 80 К) и предотвращения превышения допустимого максимального градиента температур в заданных двух точках потребителя. С этой целью из установки отводится два потока гелия (до и после азотной ступени предварительного охлаждения), за счёт смешения которых достигается как необходимый темп захлаживания, так и допустимый градиент температур (см. рис. 4,а).

Вторая модификация установки предназначалась для криостатирования тоководов СИМС и также ориентировалась на работу в ожигительном режиме. Ее принципиальное отличие заключалось в том, что количество детандерных ступеней предварительного охлаждения было сокращено до одной, а дроссельная СОО была преобразована в детандерно-дроссельную (рис. 4,б) [5]. При этом три детандера ДПГ-4 использовались в СПО, а вместо четвёртого был установлен специально разработанный детандер с электромагнитным приводом клапанов [5] для работы в около-

критической области параметров гелия. Это позволило увеличить производительность в ожижительном режиме до 200 с лишним л/ч (рис. 7) при значении оптимальных температур перед детандерами соответственно:  $T_{\text{вх,Д1}}=32\text{ К}$ ,  $T_{\text{вх,Д2}}=8\text{--}9\text{ К}$ .



**Рис. 6.** Схема КГС с криогенным коллектором: 1 — КГУ; 2 — криостатируемые объекты; 3 — криогенный коллектор; 4 — РЦВГ



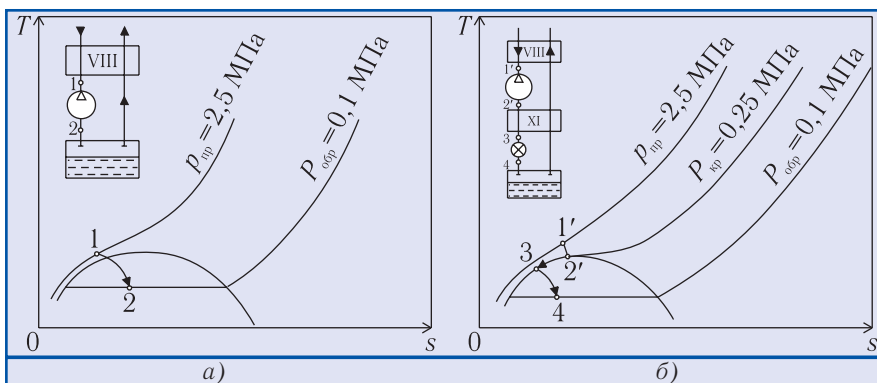
**Рис. 7.** Характеристика КГС ОРГ-100-250/4,5, работающей в ожижительном режиме с разными СОО: 1 — с детандерной; 2 — с дрессельной

Отличие использованной в ОРГ-100-250/4,5 дрессельно-детандерной СОО (рис. 8,б) от традиционной (рис. 8,а) заключается в том, что в первой гелий расширяется в детандере до критического давления, оставаясь в однофазном состоянии в цилиндре поршневого детандера, а затем дресселируется до давления сборника (потребителя). Это вызвано тем, что в результате исследования зависимости изоэнтропного КПД детандера, используемого в ОРГ, от влагосодержания гелия в цилиндре машины, было обнаружено снижение КПД с увеличе-

нием доли жидкости. Использование на заключительной стадии процесса расширения дрессельного вентиля, имеющего в этой зоне достаточно высокий термодинамический КПД, позволило даже несколько увеличить производительность установки по сравнению с вариантом расширения гелия в двухфазной области его параметров непосредственно в цилиндре детандера. Во всем остальном (криогенный коллектор, схема для захлаживания, возможность форсирования подливом жидкого гелия) криогенная система СИМС не отличалась от системы базовой модификации ОРГ-100-250/4,5.

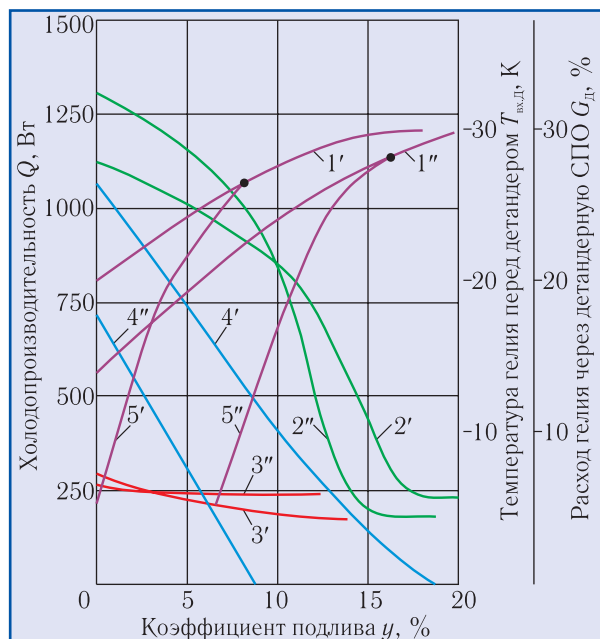
Использование этой модификации в смешанном режиме работы с форсированием холодопроизводительности с помощью подлива жидкого гелия из РЦВГ-1,25/0,7 позволило провести испытания опытного СП-магнита установки термоядерного синтеза «Токамак-15» до ввода в строй основной КГУ стэнда (см. ниже). В этом режиме постепенно сокращался расход гелия через детандерную СПО за счёт увеличения его расхода в СОО (рис. 9), что производилось за счёт увеличения оборотов вала детандера СОО.

Третья модификация ОРГ-100-250/4,5 предназначалась для работы в смешанном режиме в составе КГС установки «Токамак-7». Модификация, по сравнению с базовой схемой, подвергалась в этом случае и СОО, выполненная в дрессельно-эжекторном варианте. Использование в этой ступени циркуляционного и откачного эжекторов позволяло осуществлять криостатирование СП-магнитов установки «Токамак-7» на более низком температурном уровне при одновременном увеличении кратности циркуляции гелия через СП-магниты (рис. 4,в). Режимные параметры дрессельно-эжекторной ступени:  $P_k=2,8\text{ МПа}$ ,  $G_k=60\text{ г/с}$ ,  $P_{\text{п.э}}=1,82\text{ МПа}$ ,  $G_{\text{к.о}}=57\text{ г/с}$  (против 29 г/с при работе в чисто дрессельном режиме),  $T_{\text{вх,Д1}}=50\text{ К}$ ,  $T_{\text{вх,Д2}}=24,5\text{ К}$ ,  $T_{\text{вх,к.о}}=3,98\text{ К}$ ,  $T_{\text{вых,к.о}}=4,44\text{ К}$ , где  $P_{\text{п.э}}$  — давление перед эжектором;  $G_{\text{к.о}}$  — расход гелия через криостатируемый объект;  $T_{\text{вх,Д1}}$ ,  $T_{\text{вх,Д2}}$  — температуры на входе в детандеры XI и XII, соответственно;  $T_{\text{к.о}}$ ,  $T_{\text{вых,к.о}}$  — температуры жидкого гелия на входе в криостатируемый объект и на выходе из него. При этих па-



**Рис. 8.** Схемы детандерных СОО КГУ: а — с двухфазным детандером; б — с однофазным детандером; VIII, IX — теплообменники; 1-2 — процесс расширения в детандере двухфазного потока гелия; 1'-2' — процесс расширения в детандере газообразного (однофазного) гелия; 3-4 — процесс расширения в дрессельном вентиле

раметрах холодопроизводительность установки составила 340 Вт [5].



**Рис. 9.** Характеристика ОРГ-100-250/4,5, работающей с подливом жидкого гелия и с одной детандерной СПО, потребляющей 200 кг/ч гелия; ● —  $G=0$ ; 1 —  $Q=f(y)$ ; 2 — температура перед детандером СПО  $T_{вх,д}=f_2(y)$ ; 3 — температура перед детандером СОО  $T_{вх,д}=f_3(y)$ ; 4 —  $G_{д}=f_4(y)$ ; 1', 2', 3', 4' — с детандерной СОО; 1'', 2'', 3'', 4'' — с дроссельной СОО; 5', 5'' — режимы работы рефрижератора с избыточным обратным потоком (РИОП) без детандерной СПО

#### 4. КГС НА БАЗЕ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВОК

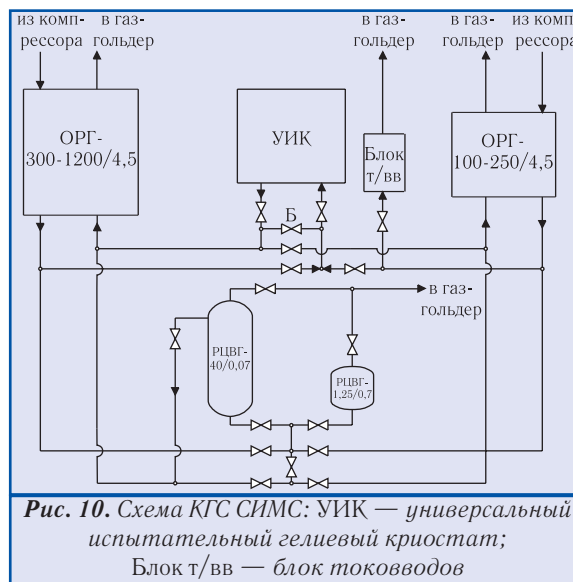
Следующим поколением КГС стали системы на базе турбодетандерных КГУ. В этих установках НПО «Криогенмаш» были реализованы все схемно-технологические решения, проверенные на системах предыдущих поколений. Их особенность — использование детандерных СОО (как с поршневыми, так и с турбодетандерами); дроссельно-эжекторных СОО; криогенного коллектора; схемы с жидким азотом, позволяющей осуществлять плавное регулирование температуры при захлаживании.

С учётом указанного была создана установка ОРГ-300 (300 л/ч жидкого гелия), в которой была применена типичная схема турбодетандерных КГУ с последовательным включением двух турбодетандеров. Давление на входе в установку — 1,6 МПа, так как в качестве компрессора использовался двухступенчатый винтовой компрессорный агрегат ВКА-40/16 (40  $\text{нм}^3/\text{ч}$  и 1,6 МПа). Поршневой детандер СОО в этой установке включён так же, как в ОРГ-100-250/4,5, т.е. работает в однофазной области параметров гелия. Надо заметить, что давление 1,6 МПа является достаточно типичным и для зарубежных турбодетандер-

ных КГУ, создаваемых на базе двухступенчатых винтовых компрессоров.

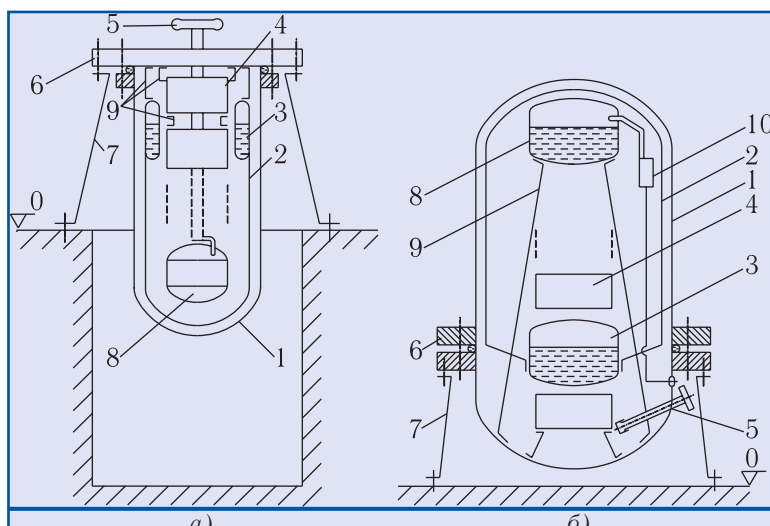
Установка предназначалась для КГС МГДЭС-100 (МГД-генератора). СП-магниты МГД-генератора занимают особое место в ряду СПУ, так как являются погружными криостатируемыми объектами и требуют для своей работы больших количеств жидкого гелия. Так, криостат для МГДЭС-100 имел общий гидравлический объём около 30  $\text{м}^3$ , а для МГДЭС-500 — 150  $\text{м}^3$ . КГС МГДЭС-100 обеспечивала устойчивый режим захлаживания 150-тонной массы магнита с допустимым температурным «перекосом» не более 40 К в три этапа: от 300 до 80 К, от 80 до 10 К и от 10 до 4,5 К. На первом этапе использовалась система предварительного охлаждения ОГ-300 и циркуляционные эжекторы, в которых производилось смешение тёплого и холодного (после азотной системы) гелия; на втором этапе включались турбодетандеры СПО (с возможностью подключения и резервных машин), на третьем ОГ-300 уже работала в штатном режиме с детандерной СОО. В режиме охлаждения холодопроизводительность достигала 1,5 кВт, а в режиме накопления жидкого гелия — 300 л/ч. В установившемся режиме потребности в жидком гелии (для компенсации тепловой нагрузки) снижались, и ожижитель переходил в режим работы с дроссельной СОО, обеспечивая 200 л/ч жидкого гелия.

Для МГДЭС-500 была создана КГС на базе двух КГУ типа ОГ-400, по схемам и особенностям работы не отличавшихся от ОГ-300.



**Рис. 10.** Схема КГС СИМС: УИК — универсальный испытательный гелиевый криостат; Блок т/вв — блок токовводов

Установка ОРГ-300-1800/4,5 («Пингвин-2») — прообраз крупных отечественных турбодетандерных КГУ, имеет при  $P_k=2,5$  МПа общий расход гелия  $G_k=3600$   $\text{нм}^3/\text{ч}$ . КГУ является основной установкой КГС СИМС (рис. 10) [5], с помощью которой обеспечивалось испытание СП-магнитов установки «Томак-15», в том числе и при пониженных температурах. Установка могла работать с детандерной или дроссельно-эжекторной СОО, реализуя режимы как



**Рис. 11.** Компонка и теплоизоляция криогенных блоков: а — традиционная; б — транспортабельная; 1 — вакуумный кожух; 2 — азотный экран; 3 — азотная ванна; 4 — теплообменники; 5 — арматура криогенная длинноштоковая с ручным (или электро-) приводом; 6 — плита несущая; 7 — рама опорная; 8 — сборник жидкого гелия; 9 — тяги-подвески, ноги опорные; 10 — арматура криогенная с холодным пневмоприводом

нетрадиционная компоновка криогенного оборудования (см. рис. 11), позволявшая поставлять (благодаря транспортабельности) криогенные блоки в состоянии максимальной заводской готовности. Она оказалась возможной благодаря второму достижению — разработке и созданию запорной и регулирующей пневмоприводной криогенной арматуры. И третье — разработка, изготовление и испытание (в составе стендовой КГУ «Пингвин-1») клееных матричных теплообменников. Испытания дали хорошие результаты, но, к сожалению, изменение технологии изготовления присадочного материала привело к нарушению их герметичности в процессе термоциклирования. Поэтому уже в КГУ «Пингвин-2» их пришлось заменить на кожухотрубные аппараты из трубки, оребренной проволокой.

### 5. СОВРЕМЕННЫЕ ДВУХКОНТУРНЫЕ КГС

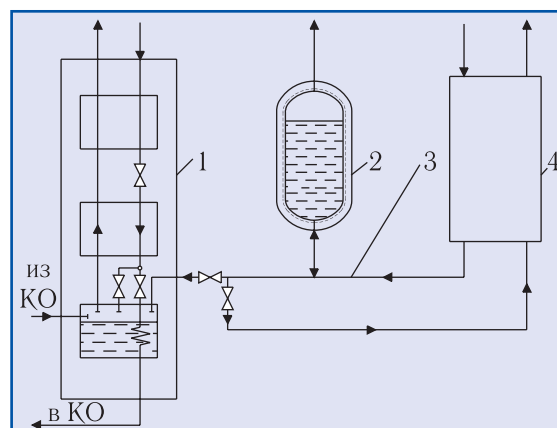
с повышенной холодопроизводительностью, так и с пониженным температурным уровнем. Укрупнённая схема КГС СИМС, представленная на рис. 10, включает помимо двух установок, параметры которых даны в таблице, два сосуда жидкого гелия РЦВГ-1,25/0,7 и РЦВГ-40/0,7, служащих для накопления жидкого гелия и, при необходимости, форсирования холодопроизводительности.

В процессе эксплуатации КГС СИМС (а в последствии и КГС установки «Токамак-15») наблюдались термоиндуцированные колебания, которые возникали при заполнении сосудов жидким гелием, удалённых на значительное расстояние от источника жидкого гелия. Проблему удалось решить в результате:

- уменьшения паросодержания в сливаемом в сосуд жидком гелии, что достигалось использованием криогенного коллектора, или переохлаждения жидкого гелия в дроссельно-эжекторной СОО;
- увеличения сечения трубопровода газосброса;
- изменения соотношения «тёплой» и «холодной» частей тупиковых гелиевых трубопроводов (для манометров и предохранительных устройств), что позволило исключить источник генерирования термоиндуцированных колебаний.

Нельзя не отметить три конструкторских достижения при разработке этой установки. Первое — это

Поколение современных отечественных КГС — это, в основном, двухконтурные системы, как показано на рис. 12, с рефрижераторами с избыточным обратным потоком (РИОП) [5,7,8]. В зарубежных крупных КГС предпочтение также отдаётся двухконтурным системам, но с криогенными циркуляционными



**Рис. 12.** Схема двухконтурной КГС с РИОП: 1 — оживительная КГУ; 2 — оперативный сосуд жидкого гелия; 3 — криогенный коллектор; 4 — рефрижератор с избыточным обратным потоком (РИОП)

#### Основные характеристики модификаций установок ОРГ

Параметры	Установка ОРГ-300-1800/4,5		Установка ОРГ-100-250/4,5	
	Модификации		Модификации	
	Детанд. СОО	Дроссельн. СОО	Детанд. СОО	Дроссельн. СОО
$G_{ож}/Q_{рефр}$ , (л/ч)/Вт	300/1200	200/700	100/400	100/200
$Q_{рефр}$ , Вт	1900	1100	750	500
$P_{к.}$ , МПа	2,5	2,5	2,5	2,5
$G_{к.}$ , кг/ч	600	600	200	200

насосами жидкого гелия, хотя встречаются и системы с РИОП, получившими название спутниковых рефрижераторов, например, КГС ускорителя «Tevatron».

В отечественных КГС с РИОП практически всегда присутствует аккумулятор жидкого гелия типа РЦВГ, выполняющий функцию «сглаживания» колебаний тепловой нагрузки. В такой системе ожижитель гелия эффективно работает с постоянной производительностью и минимумом управляющих воздействий. РЦВГ поддерживает работоспособность системы в случае выхода из строя ожижителя гелия на время его ремонта, обеспечивая тем самым высочайший уровень надёжности системы, что является одним из основных преимуществ двухконтурных КГС с РИОП.

Такое построение КГС позволило разработать типовые ряды криооборудования, что является ещё одним преимуществом КГС с РИОП. СПУ, для которых, в основном, создаются крупные КГС, имеют достаточно широкую номенклатуру как по конструктивному оформлению, так и по типу, температурному уровню и характеру тепловой нагрузки. При использовании КГС с РИОП только последний (его конструкция и режим работы) зависит от потребителя. Это позволило создать типовые ряды основного криогенного оборудования, из набора которых могут компоноваться КГС практически для любых СПУ. Для криостатирования разнообразных объектов с СПУ используются различные конфигурации СОО РИОП, представленные на рис. 13.

Типовой КГС последнего поколения является установка, созданная для «Токамак-15» [5]. В системе использованы два блока масло-влагоочистки МО-800 и два блока криогенной (низкотемпературной) очистки гелия НО-800, после которых гелий при температуре 80 К поступает в один из двух (один — резервный) ожижителей гелия ОГ-800 и в два РИОП: РГ-2000 и РГ-700/3,6. Первый работает с дроссельной СОО и предназначен для криостатирования систем обмоток тороидального и полоидального полей (СОТП и СОПП) при 4,5 К, а второй — с дроссельно-эжекторной СОО, применяемой для криостатирования инжекторов нейтралов. Впервые для улучшения качества очистки гелия от масла в МО-800 использован обратный поток гелия после НО-800 для понижения температуры прямого потока гелия в специально установленном теплообменном аппарате. В системе присутствуют также резервуар жидкого гелия РЦВГ-40/0,7 и блок предварительной очистки гелия от азота и неона НО-100 (рис. 14). Последний первоначально был выполнен по схеме РИОП с вымораживанием неона, но впоследствии — с адсорбционной системой очистки и возможностью работы в автономном режиме с детандером.

КГС «Токамак-15» обеспечивала необходимую холодопроизводительность (до 3 кВт при 4,5-6 К). Было осуществлено четыре рабочих компании со

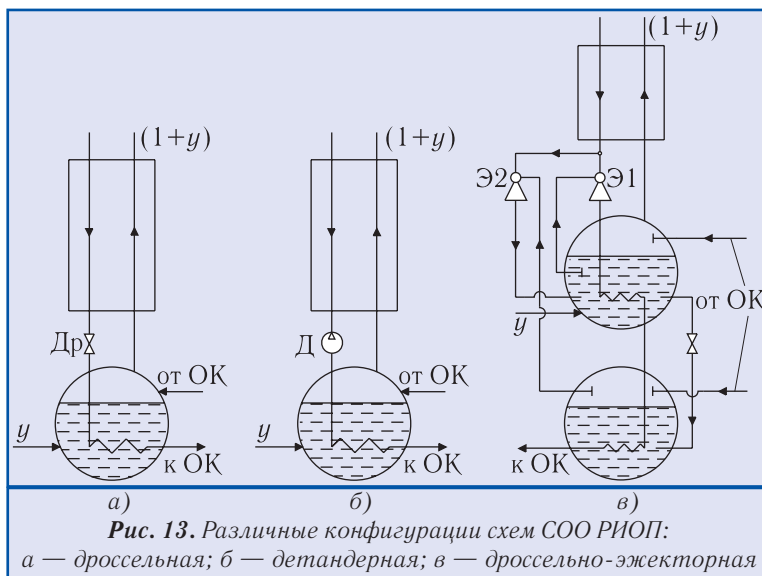


Рис. 13. Различные конфигурации схем СОО РИОП: а — дроссельная; б — детандерная; в — дроссельно-эжекторная

средней длительностью около 3200 ч при проектной продолжительности 750...1500 ч.

Принципиальная схема криогенной системы ускорительно-накопительного комплекса (КГС УНК-3000) [7] практически не отличается от предыдущей КГС. Однако в связи со значительной протяжённостью системы (распределённость на длине 20 км) и существенно большей холодопроизводительностью (до 40 кВт при 4,4 К) КГС УНК состоит из большого количества однородного криогенного оборудования и имеет в своем составе 20-километровый криогенный коллектор специфической конструкции. Особенность работы КГС УНК — потребность в

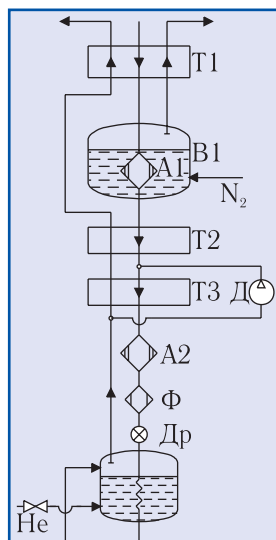


Рис. 14. Блок автономной очистки гелия от неона: Т1, Т2, Т3 — теплообменники; Д — детандер; А1, А2 — адсорберы; Ф — фильтр; В1 — азотная ванна

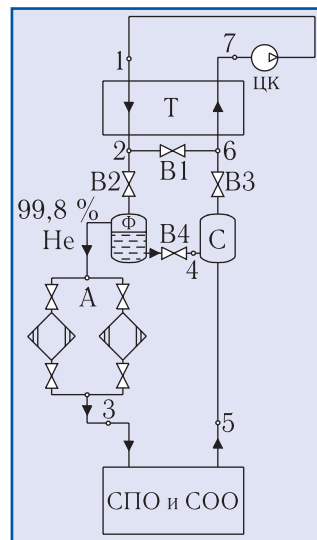


Рис. 15. Схема смешевой гелиевой установки с центробежным компрессором ЦК: А — адсорберы блока криогенной очистки, работающие при 95-90 К; В1, В2, В3, В4 — регулирующие вентили; Ф — фазоразделитель; Т — рекуперативный теплообменник



более низком температурном уровне криостатирования СП магнитной системы, что достигается (по проекту) работой двухступенчатых винтовых компрессоров, специально разработанных для этих целей с разрежением на всасывании.

Высокая холодопроизводительность КГС, требующая значительного количества винтовых компрессоров, снижающих общий показатель надёжности системы, побудила исследовать возможность использования турбокомпрессоров для сжатия гелия. Создание более или менее эффективного гелиевого компрессора требует значительного повышения окружных скоростей колёс, что приводит к необходимости применения таких высокопрочных материалов, как титан, для изготовления колёс компрессора. Другой путь — повышение плотности сжимаемого в турбокомпрессоре рабочего вещества. Это достигается либо понижением температуры сжатия, либо реализацией сжатия гелия в смеси с каким-либо существенно более тяжёлым агентом.

Второй путь может быть реализован за счёт смешения гелия, например, с низкотемпературным высокомолекулярным фреоном, что позволяет параметры сжимаемой смеси приблизить к параметрам воздуха. Использование такого хладагента даёт возможность в связи с положительным дроссель-эффектом его смеси с гелием отказаться от ступени внешнего предварительного охлаждения. Фреон после компримирования с гелием и охлаждения легко отделяется от гелия на температурном уровне СПО. Гелий после очистки продолжает охлаждаться в любой традиционной схеме КГУ (рис. 15). Такая работа была выполнена совместно с Одесским технологическим институтом холодильной промышленности [9]. Было получено расчётное и экспериментальное подтверждение принципиальной возможности реализации смесового сжатия, разработан проект турбокомпрессора. Следует отметить, что технические проблемы, связанные с разделением фреона и гелия и последующей очисткой гелия, а также стратификацией фреона и гелия на всасывании в компрессор, по крайней мере, на порядок легче решаемы, чем проблемы сжатия чистого гелия в турбомашинках.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сформулировать основные концептуальные решения ОАО «Криогенмаш», реализованные при создании КГС:

- двухконтурные криогенные гелиевые системы с рефрижераторами с избыточным обратным потоком, обеспечивающие высокую эффективность при переменной тепловой нагрузке и высокие показатели надёжности;
- криогенный коллектор для обеспечения требуемых параметров гелия на входе в криостатируемый объект (СПУ);
- высокоэффективные ступени окончательного

охлаждения с поршневыми (и турбо-) детандерами, работающими в околоскритической однофазной области параметров гелия;

- дроссельно-эжекторные ступени окончательного охлаждения для увеличения кратности циркуляции и понижения температуры криостатирования;
- использование запасов жидкого гелия для формирования холодопроизводительности КГС или резервирования с целью обеспечения высоких показателей надёжности;
- модульный принцип построения блоков влагонепроницаемости, блоков предварительного охлаждения и криогенной очистки, согласующихся по производительности с компрессорным модулем;
- нетрадиционная транспортная компоновка криогенных блоков, позволяющая максимально использовать преимущества заводской сборки и монтажа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляков В.П.** Криогенная техника и технология. — М.: Энергоиздат, 1982. — 272 с.
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. **Буткевич И.К., Филимонов В.Е.** Расчётно-экспериментальные исследования процесса захлаживания сверхпроводящего кабеля совместно с криогенной системой// Сб. тр. ЭНИН им. Кржижановского (Москва) «Захлаживание и криостатирование сверхпроводящего кабеля». — 1980. — С. 119-127.
4. Авторское свидетельство СССР № 820351. Система криостатирования сверхпроводящих электротехнических устройств с тоководами. МКИ F25B 9/00; H01B 12/00.
5. Сверхпроводящие магнитные системы для токамаков/ Под редакцией **Н.А. Черноплекова.** — М.: ИздАТ, 1997. — 168 с.
6. **Новотельнов В.И., Сулов А.Д., Полтараус В.Б.** Криогенные машины. — С.-Петербург: Политехника, 1991. — 335 с.
7. Cryogenic cooling and maintenance of the superconducting magnets of big accelerators/ **I.K. Butkevitch, N.M. Grigorenko, I.E. Dudkin etc.**// Proc. of III ICFA workshop on possibilities and limitations for superconducting accelerator magnets, Protvino, USSR, 19 - 23 October, 1981. — P. 135 - 146.
8. 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.
9. 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.