1544721

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНОВ ЛЕНИНА, ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ И
ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА

На правах рукописи

БУТКЕВИЧ ИГОРЬ КОНСТАНТИНОВИЧ

УДК 621.594.71

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КРИОГЕННЫХ ГЕЛИЕВЫХ СИСТЕМ.

05.04.03 - Машины и аппараты
холодильной и криогенной
техники и систем
кондиционирования

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени доктора технических наук

Москва 1994

Работа выполнена в Балашихинском ордена Ленина научно-производственном объединении криогенного машиностроения имени 40-летия Октября

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Б.А.Иванов,

доктор технических наук, профессор В.Е.Кейлин,

доктор технических наук Дьячков Е.И.

Ведущая организация – Институт ядерного синтеза Российского научного центра "Курчатовский институт"

Защита диссертации состоится "15" июня 1994. г. в 14 час на заседании специализированного совета Д.053.15.11 в Московском государственном техническом университете им.Н.Э.Баумана по адресу:107005, Москва Б-5, Лефортовская наб. д. 1, корпус факультета "Энергомашиностроение".

Ваш отзыв на автореферат просим направлять по адресу: 107005, Москва Б-5, 2-я Бауманская ул. д. 5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю специализированного совета Д.053.15.11 Ю.Г.Гуревичу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана

Автореферат разослан 14 мая 1994 г.

Ученый секретарь специализированного совета доктор технических наук профессор Ю.Г.Гуревич

1544721

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Криогенные гелиевые системы (КГС) относятся к наиболее низкотемпературной области криогенной техники и находят применение во многих отраслях народного хозяйства, особенно использующих эффект сверхпроводимости. Техническая сверхпроводимость (СП) по праву относится к одному из авангардных направлений научно-технического прогресса. Несмотря на открытие явления высокотемпературной сверхпроводимости, низкотемпературные сверхпроводящие устройства (СПУ) продолжают находить все более широкое применение в различных отраслях науки и техники, некоторые из которых, как например, термоядерная энергетика или физика высоких энергий очевидно не достигли бы современного уровня без использования СП магнитных систем.

Расширение областей применения СПУ потребовало решения новой научно-технической задачи - создания специальных криогенных гелиевых систем (КГС) для их охлаждения на температурном уровне 4,2 К и ниже.

1544721

Балашихинское НПО Криогенного машиностроения в 1970 - 1980-е годы решало задачи создания КГС для опытного участка СП кабеля длиной 100 м (СПК-100), первой термоядерной установки с СП магнитами Токамак-7, самой крупной термоядерной установки с Nb_3Sn сверхпроводящими магнитами Токамак-15, одного из крупнейших в мире ускорителей элементарных частиц на 3000 ГэВ (УНК-3000), и наконец крупнейшей в мире криогенной системы для международного термоядерного реактора (ИТЭР) (до 100 кВт на температурном уровне 4,4К). Каждая из этих систем - уникальна по выполняемым задачам, режимам работы, типам и характеристикам криостатируемых объектов.

При создании КГС крупных СПУ возникает ряд новых научно-технических проблем, обусловленных уникальностью и высокой стоимостью изделий, требованиями высокой надежности, эффективности и автоматизации, многорежимностью работы системы, сжатыми сроками создания, энерго и трудоемкостью натурных испытаний. Специфической особенностью КГС является то, что основное время их работы протекает в нерасчетных стационарных и нестационарных режимах, что обусловлено как специфическим регламентом работы СПУ, так и тем, что их создание протекает в условиях неполноты постоянно меняющихся (уточняющихся) исходных данных, окончательное значение которых, в силу объективных

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1544721
Буткевич И.К. Моделировани
МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

причин, появляется только на стадии совместных, комплексных испытаний КГС с объектами криостатирования.

В связи с этим потребовалось провести комплекс работ по исследованию как статических режимов криостатирования, так и переходных режимов захолаживания, отогрева и регулирования криогенных гелиевых систем.

Работа выполнялась по тематическим планам научно-исследовательских работ НПО Криогенмаш в рамках решения проблемы: "Разработка научных основ создания систем криогенного обеспечения сверхпроводящих устройств" в соответствии с постановлениями: № 84-270 от 11.10.78; № 23-5 от 04.01.80; № 831/196 от 16.07.87 и № 317-81 от 07.03.88, распоряжением № 1096РОТ от 22.05.85, а также постановлениями ГКНТ: № 500 от 21.12.70; № 550 от 19.12.75; №415 от 18.11.75; №450 от 15.12.76 и координационным планам АН СССР (проблема I.9.6).

Цель работы: разработать научно-методические основы расчетно-экспериментального исследования и испытания крупных, полупромышленных криогенных, гелиевых систем с учетом переходных режимов работы, высоких требований по эффективности, надежности и автоматизации. Для достижения этой цели необходимо провести комплекс научных исследований со следующими задачами: выявить особенности и систематизировать КГС в рамках единой классификации, обобщить требования, предъявляемые криостатируемыми объектами (КО) к КГС; разработать методику расчета режимов работы КГС, основанную на широком использовании физико-математического моделирования основных элементов КГС; исследовать установившиеся и переходные режимы КГС и определить для них оптимальные схемные решения и режимные параметры; предложить возможные пути форсирования холодопроизводительности КГС; разработать ресурсосберегающую методику испытаний на базе имитационного моделирования; исследовать характеристики КГС, как объектов управления, и сформулировать основные требования к системе автоматизированного управления; показать пути совершенствования КГС крупных СПУ; основные выводы и рекомендации проверить в условиях натурных испытаний и эксплуатации.

Научная новизна. Впервые проведено расчетно-экспериментальное исследование КГС различного типа и назначения, в процессе которого разработаны оригинальные методы и методики исследований и испытаний, получены характеристики и научно обос-

нована перспективность КГС с рефрижераторами с избыточным обратным потоком (РИОП). Разработана методика расчета режимов работы КГС, отличающаяся дифференцированным подходом к задаче моделирования различных элементов КГС на различных стадиях разработки и создания КГС, в частности: использованием численно-аналитических методов как в линейном, так и нелинейном приближении; квазидинамических моделей теплообменных аппаратов для расчета переходных процессов в КГС; линеаризованных сосредоточенных моделей динамики для исследования алгоритмов функционирования и управления. Теоретическим и экспериментальным путем обнаружены новые эффекты, характерные для КГУ с нерегулируемыми турбодетандерами (повышение производительности в рефрижераторном режиме при снижении давления перед турбодетандерным агрегатом, неоднозначность характеристики КГУ: Q - G), впервые получены расчетные и экспериментальные характеристики одно- и двухконтурных КГС в установившихся и переходных режимах, в том числе характеристики двухконтурных КГС с РИОП с различными ступенями окончательного охлаждения. Разработаны ресурсосберегающая расчетно-экспериментальная методика натурных испытаний КГС и криогенного оборудования, использующая математическое моделирование и синтез расчетно-экспериментальных характеристик элементов системы, а также методики экспериментального исследования и испытаний КГС, использующие методы нестационарного режима и переходных характеристик, позволившие, в частности, дифференцировать источники тепловых потерь.

Практическая значимость. Работа в целом решает задачу создания эффективных, автоматизированных криогенных гелиевых систем, сокращения сроков их разработки и испытаний. Исследована новая, перспективная двухконтурная КГС с РИОП, позволившая поднять уровень унификации криогенного оборудования без ущерба качества, снизить затраты на разработку и сократить сроки создания новых КГС СПУ. Разработан алгоритм создания КГС СПУ, положенный в основу программных средств САПР криогенных систем сверхпроводящих устройств. Проведены исследования и оптимизация схемных решений с учетом переходных режимов, позволившие сократить время захолаживания КГС совместно с СПУ, а также разработать методы форсирования холодопроизводительности различных КГС, нашедших применение при испытании и эксплуатации различных СПУ (СПК-100, СПМС Т-15). Разработаны алгоритмы фун-

кционирования КГС в стационарных и переходных режимах работы, определены наиболее целесообразные контуры регулирования, сформулированы основные требования к системе автоматизированного управления.

Разработанные методики и рекомендации использовались при проектировании, испытаниях и эксплуатации КГС, в частности: при разработке схемных решений, подборе состава оборудования и разработке алгоритмов функционирования КГС Токамак-15, УНК-100, СКМ и др. в НПО Криогенмаш; при испытании КГУ и КГС в составе криогенных комплексов СПК-100, ГСПК-50, Токамак-7, СЭД, СИМС, Токамак-15 в НПО Криогенмаш, СКТБ ВКТ Мосэнерго, ИАЭ им. И.В.Курчатова, ВНИИЭМ, ИФВЭ; для ускорения режима захолаживания КГС СИМС, Токамак-7, Токамак-15 в ИАЭ им. И.В.Курчатова; для форсирования холодопроизводительности КГС СПК-100, СИМС, Токамак-15 в СКТБ ВКТ Мосэнерго, ИАЭ им. И.В.Курчатова.

Материалы диссертационной работы использованы автором в курсах лекций "Криогенные системы", "Криогенная техника", "Технический уровень и надежность криогенных систем", читаемых в МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре Э-4.

Методы исследований. В условиях неполноты и невысокой точности исходных данных использовано физико-математическое моделирование работы теплообменных аппаратов в одномерной постановке с учетом основных особенностей криогенных теплогидродинамических процессов, что позволяет получить относительно простые численно-аналитические решения с минимальными затратами машинного времени и достаточной точностью, а также физическое моделирование и натурные испытания КГС (КГУ) в рабочих условиях с целью проверки достоверности физико-математических моделей, параметров рассчитанных режимов работы КГС и разработанных методик расчета и испытаний.

К защите представляются следующие положения.

1. Расчетные и экспериментальные данные по расчету параметров КГС в установившихся и переходных режимах работы.

2. Результаты теоретического и экспериментального исследования отдельных модулей КГС (блоков очистки, ожижителей, рефрижераторов) и одноконтурных КГС.

3. Результаты теоретического и экспериментального исследования РИОП и двухконтурных КГС с РИОП.

4. Методы форсирования холодопроизводительности одно- и

двухконтурных КГС.

5. Алгоритмы функционирования КГС в режимах криостатирования и захолаживания КО.

6. Расчетно-экспериментальные методики испытания КГС и их модулей.

Внедрение результатов работы. Результаты работы были использованы при создании и испытании КГС термоядерной установки Токамак-15, при создании КГС для ускорителя элементарных частиц УНК-3000, при разработке концептуального проекта КГС опытного термоядерного реактора ИТЭР, при испытании и эксплуатации криогенного оборудования СПК-100, ГСПК-50, СЭД, Токамак-7.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на Всесоюзных конференциях по криогенной технике (Балашиха, 1973, 1982 гг.; Москва, 1987 г.), на XIV международном конгрессе по холоду (Москва, 1975 г.), на Всесоюзной конференции по холоду (Ташкент, 1977 г.), на Всесоюзных конференциях по техническому использованию сверхпроводимости (Алушта, 1975 г.; Ленинград, 1984 г.), на Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1980, 1985 гг.), на Всесозных конференциях по инженерным проблемам термоядерных реакторов (Ленинград, 1974, 1981, 1984, 1990 гг.), на Всесоюзном научно-техническом совещании "Научно-технические и технологические вопросы создания сверхпроводникового электротехнического оборудования" (Москва, 1984 г.), на III и IV международных семинарах ИКФА "Возможности и ограничения сверхпроводящих магнитов ускорителей" (Протвино, 1981 г.; Лос-Аламос, 1986 г.), на международной конференции SOFT-16 (Лондон, 1990 г.), на международной конференции МТ-12 (Ленинград, 1991 г.), на международной конференции "Криогенная техника - науке и производству" (Москва, 1991 г.), на международной конференции ICEC-14 (Киев, 1992 г.), на ряде общесоюзных и международных семинарах и симпозиумах.

Публикации. Материалы диссертации отражены в 25 статьях, 17 докладах и 12 авторских свидельствах на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения и выводов по работе, списка использованной литературы (377 наименования) и включает 456 стр., в том числе 245 стр. основного текста, 135 рисунков, 25 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, показана ее научная новизна и практическая значимость, приведены примеры внедрения результатов работы.

В первом разделе приводится обзор состояния вопроса и постановка задачи исследований. Анализируются различные сверхпроводящие устройства, обладающие, тем не менее, общими особенностями, характеризующими их как криостатируемые объекты. Отмечаются недостатки и преимущества циркуляционных и погружных систем криостатирования СПУ, формулируются основные требования, предъявляемые современными СПУ, как объектами криостатирования, к КГС: высокая эффективность в широком диапазоне режимных параметров при переменном характере тепловой нагрузки, высокая надежность при длительном цикле непрерывной работы (до 8000 ч), высокий уровень автоматизации.

Рассмотрены различные типы КГС, проведено их обобщение в рамках предложенной классификации по: типу термодинамической системы, количеству контуров, режимам работы, типу циркуляционного устройства. Проанализированы основные преимущества и недостатки одноконтурных и двухконтурных КГС с криогенными насосами, показана перспективность сателлитных (с РИОП) двухконтурных КГС.

Рассмотрены основные направления исследования КГС, особое внимание обращено на работы, связанные с анализом и оптимизацией одно- и двухконтурных КГС (Dean J, Беляков В.П., Агеев А.И., Агапов Н.Н., Jensen J., Arp V., Rode C., Brown D., Краковский Б.Д., Пуртов Н.А. и др .) и исследованию работы КГС (КГУ) в квазистационарных и переходных режимах (Новотельнов В.Н., Краковский Б.Д., Козлов В.Н., Вайнштейн Г.Е., Jensen J., Подольский А.Г., Белушкин В.А., Веремчук С.И., Зуев М.А., Аринин А.Ф., Романишин В.Ф. и др.).

Обзор этих исследований показал, что до проведения настоящей работы не были решены вопросы обобщенного подхода к исследованию и испытанию КГС, как больших технических систем, учитывающих специфику, связанную с совместной работой КГС и криостатируемого объекта, широким температурным интервалом (от 300 до 4.2 и ниже К) работы криогенного оборудования, скоростями переходных режимов.

По результатам исследований необходимо разработать методы расчета и испытаний КГС как стационарных, так и в переходных режимах работы, определить принципы построения КГС, учитывающие требования переходных режимов, в частности захолаживания, обосновать перспективные направления совершенствования КГС , выработать основные требования к системе автоматизированного управления КГС.

Во втором разделе предложен укрупненный алгоритм создания КГС. Показана роль математического моделирования на всех стадиях создания КГС, при этом отмечается, что требуемая точность матмоделей (а следовательно и их сложность) существенно зависит от этапов исследования, проектирования и испытания и задач, решаемых с их помощью, а также от точности и полноты исходной информации. Описаны расчетно-теоретические зависимости основных аппаратов (теплообменников разного типа) и машин, из которых состоит криогенная гелиевая система, удовлетворяющие основным требованиям имитационного моделирования: быстродействие; простота, надежность и адекватность объекту; единство методического подхода к описанию статического и динамического режимов; модульный принцип построения с учетом необходимости взаимостыковки моделей при компановке модуля более высокого структурного уровня. Все модели разбиты на две категории: инерционные с распределенными параметрами и безинерционные с сосредоточенными параметрами, что позволяет использовать для последних алгебраические уравнения сохранения. При упрощении матмоделей инерционных звеньев (теплообменных аппаратов) учитываются особенности и специфика работы теплообменных аппаратов в криогенных гелиевых системах, а также классы процессов в них протекающих: быстрые, для которых характерные времена τ^* изменения параметров на входе в элемент соотносятся с релаксационным временем τ_p этого элемента как: $\tau^* \simeq \tau_p$, медленные с $\tau^* \gg \tau_p$ и статические (или квазистатические): $\tau^* \to \infty$, для которых динамическими составляющими можно пренебречь. Принимается ряд допущений, типичных для любых теплообменников, а также специфичных для теплообменников, работающих в составе КГС: одномерность потоков, пренебрежение аксиальной теплопроводностью стенки, пренебрежение изменением кинетической энергии и энергии положения и скоростной составляющей $(\partial W/\partial \tau)$ в уравнении движения, а для аппаратов с

малым Δp – работой сил трения, использование модели идеального газа в диапазоне температур 300 – 40 К, а при описании переходных режимов в этом температурном интервале пренебрежение аккумуляцией холода потоками криоагента и эффектами накопления массы. Зависимости α и К от Т учитываются функционально, а от G и p – только параметрически, для температурного уровня $T < 20$ К пренебрегают теплоемкостью материала стенок.

Для исследования квазистатических режимов работы КГУ был использован метод расчета системы уравнений (для двухпоточного теплообменника):

$$G_S\, c_{pS}\, \frac{dT_S}{dl} = K\,(T_R - T_S) + \frac{Q_S}{F}$$
$$G_R\, c_{pR}\, \frac{dT_R}{dl} = K\,(T_S - T_R) + \frac{Q_R}{F} \qquad (1),$$

дающий после интегрирования и преобразования (во избежание фиктивного вырождения решения) квазилинейную систему относительно любой пары искомых температур:

$$T_1\, V_1\, U_R + T_3 - T_4(1 + V_1\, U_R) = -T_{QS}\, V_2\, U_R - T_{QR}(1 + V_2\, U_R)$$
$$T_1(V_1\, U_S - 1) + T_2 - T_4\, V_1\, U_S = T_{QS}(1 - V_1\, U_S) - T_{QR}\, V_2\, U_S \qquad (2)$$

где: $U = 1/Gc_p$; $T_Q = QU$; $V_0 = \exp KF(U_R - U_S)$; $V_1 = (V_0 - 1)/(U_R - U_S)$; $V_2 = [(V_1/KF) - 1]/(U_R - U_S)$; T_1, T_2, T_3, T_4 – температуры в четырех точках теплообменника; при $U_R = U_S$: $V_0 = 1$, $V_1 = KF$ и $V_2 = KF/2$.

Несмотря на достаточно хорошую точность по определению температур теплообменника, эта модель не обеспечивает необходимую точность энергетических характеристик при расчете системы параллельно-последовательно соединенных теплообменных аппаратов, особенно в области $T < 20$ К. Это, а также возможность получения принципиально некорректного решения из-за искусственной линеаризации распределенных параметров, обусловило необходимость использование нелинейной модели теплообмена. Анализ температурно-энтальпийных зависимостей T(I) для гелия показал, что для достижения разумной точности ($\leq$ I%) для большинства теплообменных аппаратов достаточно ограничиться третьей степенью полиномиальной аппроксимации. Зависимость,

использующая четырехпараметрический набор может выглядеть так:

$$T(1)=T_m+(a-b+c)(1-1_m)+(b-3c)\frac{(1-1_m)^2}{(1_n-1_m)}+2c\frac{(1-1_m)^3}{(1_n-1_m)^2} \qquad (3),$$

где индексы m и n соответствуют двум опорным точкам теплообменника, а коэффициенты имеют следующий вид:

$$a=\frac{T_n-T_m}{1_n-1_m}\ ;\ b=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{c_{pn}}-\frac{1}{c_{pm}}\right);\ c=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{c_{pn}}-\frac{1}{c_{pm}}\right)-a.$$

Выбранную аппроксимацию свойств T(1) необходимо дополнить конкретным видом функции K(T):

$$(KF)^{-1}=A+(4B-3A-C)\xi+2(A+C-2B)\xi^2 \qquad (4),$$

где $\xi=\frac{1_S-1_1}{1_2-1_1}=\frac{1_R-1_4}{1_3-1_4}$ – новая переменная.

Интегрирование системы (I) приводит к двум алгебраическим уравнениям (пренебрегая теплопритоком из-вне):

$$G_S\,(1_1-1_2)=G_R\,(1_4-1_3)$$

$$\int_2^1\frac{d\xi[A+(4B-3A-C)\xi+2(A+C-2B)\xi^2]}{z+(U-V+W)\xi+(V-3W)\xi^2+2W\xi^3}=1 \qquad (5),$$

где $z=\frac{T_1-T_4}{G_S(1_1-1_2)}$; $U=\frac{T_4-T_3}{G_R(1_4-1_3)}-\frac{T_1-T_2}{G_S(1_1-1_2)}$;

$$V=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{G_R}\left(\frac{1}{c_{p3}}-\frac{1}{c_{p4}}\right)-\frac{1}{G_S}\left(\frac{1}{c_{p2}}-\frac{1}{c_{p1}}\right)\right];$$

$$W=\frac{1}{2}\left[\frac{1}{G_R}\left(\frac{1}{c_{p3}}+\frac{1}{c_{p4}}\right)-\frac{1}{G_S}\left(\frac{1}{c_{p1}}-\frac{1}{c_{p1}}\right)\right]-U\ ;$$

$$A=(KF)^{-1}\Big|_{\xi=0}\ ;\quad B=(KF)^{-1}\Big|_{\xi=1/2}\ ;\quad C=(KF)^{-1}\Big|_{\xi=1}$$

Предложенные решения нелинейной модели были обощены на различные типы теплообменных аппаратов и позволили создать программу расчета на ЭВМ режимов работы КГС, удовлетворяющую двум взаимно-противоположным требованиям: высокая точность и высо-

кое быстродействие.

Для расчета переходных режимов КГС (КГУ) необходимо использование динамической модели теплообменных процессов. Однако такие наиболее распространенные режимы работы КГС как захолаживание и отогрев могут быть отнесены к медленным процессам. Учитывая эту особенность была разработана квазидинамическая модель теплообмена, сущность которой сводится к аналитическому решению статической задачи при $\frac{\partial}{\partial \tau}=0$ с определением некоторого вектора $\overline{Y}$ ассимптотических значений параметров на выходе, определению поправок к $\overline{Y}$, связанных с динамическими составляющими в предположении, что эти составляющие много меньше характерных статических членов, по коэффициентам при динамических производных и параметрах статических зависимостей определению приближенных значений времен запаздывания, после чего статические функции от запаздывающих аргументов могут интерпретироваться как квазидинамические решения. Исходная система (для двухпоточного теплообменника) выглядит так:

$$G_S c_{pS}\frac{\partial T_S}{\partial x} - \alpha_S F_S(T_W-T_S) = -Q_S = -(M_S c_{pS}\frac{\partial T_S}{\partial \tau} + \hat{Q}_S)$$

$$G_R c_{pR}\frac{\partial T_R}{\partial x} + \alpha_R F_R(T_W-T_R) = Q_R = M_R c_{pR}\frac{\partial T_R}{\partial \tau} + \hat{Q}_R \qquad (6)$$

$$\alpha_S F_S(T_S-T_W) + \alpha_R F_R(T_R-T_W) = Q_W = M_W c_W\frac{\partial T_W}{\partial \tau} + \hat{Q}_W$$

Базисные значения температур выходных потоков $T_2=T_S\,|_{x=1}$ и $T_4=T_R\,|_{x=0}$ определяются по зависимостям:

$$T_2=T_1+\frac{U_S V}{D}(T_3-T_1);\quad T_4=T_3-\frac{U_R V}{D}(T_1-T_3) \qquad (7),$$

где $U_S=\frac{KF}{G_S c_{pS}}$; $U_R=\frac{KF}{G_R c_{pR}}$; $KF=\frac{\alpha_S F_S \alpha_R F_R}{\alpha_S F_S+\alpha_R F_R}$; $D=1+U_R V$;

$V=\tilde{V}\,|_{x=1}$, а $\tilde{V}(x)=(\exp(Ux)-1)/U$ и $U=U_R-U_S$.

Поправки к выходным температурам – по зависимостям:

$$\Delta T_2 = -\int_0^1 dx\{\omega_S[1-\frac{U_S\tilde{V}(1-x)}{D}] + \omega_R\frac{U_S}{D}[V-\tilde{V}(1-x)]\}$$

$$\Delta T_4 = -\int_0^1 dx\{\omega_S\frac{U_R\tilde{V}(1-x)}{D} + \omega_R\frac{1+U_R\tilde{V}(1-x)}{D}\} \qquad (8)$$

где: $\omega_S = \dfrac{Q_S + \dfrac{\alpha_S F_S}{\alpha_S F_S + \alpha_R F_R} Q_W}{G_S c_{pS}}$,

$$\omega_R = \frac{Q_R + \dfrac{\alpha_R F_R}{\alpha_S F_S + \alpha_R F_R} Q_W}{G_R c_{pR}} \quad ;$$

причем значения ω целесообразно представить в виде $\omega=\omega^{Д}+\omega^{СТ}$. Аналогичным образом разделяются и $\Delta T=\Delta T^{Д}+\Delta T^{СТ}$.

Вычисление $\Delta T^{СТ}$ ведется в предположении $\omega^{СТ}=const.$, предполагая нецелесообразность учета координатной распределенности малых величин $q^{СТ}$, а при вычислении $\Delta T^{Д}$ рассматриваются времена $\tau > \tau_W$, тогда:

$$\omega_S^{Д} = \tau_S^{Д}\frac{\partial T_S}{\partial \tau} + \tau_W U_S\frac{\partial T_R}{\partial \tau}$$

$$\omega_R^{Д} = \tau_R^{Д}\frac{\partial T_R}{\partial \tau} + \tau_W U_R\frac{\partial T_S}{\partial \tau} \qquad (9),$$

где $\tau_S = \dfrac{M_S}{G_S} + \tau_W \dfrac{(\alpha_S F_S)^2}{G_S c_{pS}(\alpha_S F_S + \alpha_R F_R)}$;

$$\tau_R = \frac{M_R}{G_R} + \tau_W \frac{(\alpha_R F_R)^2}{G_R c_{pR}(\alpha_S F_S + \alpha_R F_R)} \quad ;$$

$$\tau_W = \frac{M_W c_W}{\alpha_S F_S + \alpha_R F_R} \quad .$$

Основное преимущество разработанного метода заключается в том, что предлагается раздельное решение статики и динамики, причем статика может решаться по любой точной модели и только динамические поправки ищутся в линейном приближении. Это упрощает процесс и сокращает время счета без существенной потери точности результата, а введение запаздывающего аргумента исключает неустойчивость решения при любых изменениях

входного параметра.

Для исследования переходных режимов теплообменного аппарата как объекта регулирования, когда возмущающие и регулирующие воздействия как правило малы, используется линеаризованная модель динамики, в которой теплообменник рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами. При этом вводятся дополнительные допущения: коэффициенты теплоотдачи приняты постоянными по длине, но параметрически зависящими от расхода теплия, распределение температур по координате принимается из зависимостей для теплообмена в статике и носит экспоненциальный характер, давление считается распределенным по линейному закону, уравнение движения заменяется уравнением расхода через граничное сечение, теплообменник представлен в виде совокупности гидравлических и тепловых емкостей. Исходная система уравнений сохранения энергии, массы и движения с учетом принятых допущений, линеаризованная вблизи некоторой траектории движения по параметрам G, p, T, сосредоточенным по пространственной координате, выглядит так:

$$S\int_0^L \frac{\partial}{\partial\tau}\left[\frac{\partial(u\rho)}{\partial p}\Delta p+\frac{\partial(u\rho)}{\partial T}\Delta T\right]dx+\Delta G_{вых}1_{вых}+G_{вых}\left(\frac{\partial 1}{\partial p}\Delta p_{вых}+\right.$$

$$\left.+c_{p_{вых}}\Delta T_{вых}\right)-\Delta G_{вх}1_{вх}-G_{вх}\left(\frac{1}{p}\Delta p_{вх}+c_{p_{вх}}\Delta T_{вх}\right)=\int_0^L \alpha P(\Delta T_W-\Delta T)dx$$

$$S\int_0^L \left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\frac{\partial p}{\partial\tau}+\frac{\partial\rho}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial\tau}\right)dx = G_{вх}-G_{вых} \qquad (10)$$

$$\rho_W S_W\int_0^L c_W\frac{dT_W}{d\tau}dx = \sum_{j=1}^{N}\int_0^L \alpha_j P_j[T_j(x,\tau)-T_W(x,\tau)]dx$$

Для двухпоточного теплообменника:

$$a_1\dot{p}_{вх}+a_2\dot{p}_{вых}+a_3\dot{T}_{вх}+a_4\dot{T}_{вых}=a_5p_{вх}+a_6T_{бх}+a_7p_{вых}+a_8T_{вых}+a_9G_{вх}+$$
$$+a_{10}G_{вых}+a_{11}\Delta T$$
$$a_{12}\dot{p}_{вх}+a_{13}\dot{T}_{вх}+a_{14}\dot{p}_{вых}+a_{15}\dot{T}_{вых}=G_{вх}-G_{вых} \qquad (11)$$
$$a_{16}T_W=a_{17}\overline{\Delta T}_S+a_{18}\overline{\Delta T}_R$$

Коэффициенты системы (II) получаются из (IO). Например:

$$a_1 = S \int_0^L \frac{\partial (\rho)}{\partial p} dx$$

Для описания безинерционных элементов были использованы известные алгебраические зависимости, учитывающие специфику работы криогенных машин и арматуры с использованием эмпирических коэффициентов, полученных в процессе автономных или модельных испытаний. Например кпд турбодетандеров может определяться по зависимости:

$$\eta = Ax_s - Bx_s^5 \quad , \text{ где}$$

A и B - эмпирические коэффициенты, а x_s - коэффициент окружной скорости.

Разработанные методы решения модифицированных моделей теплообменников в сочетании с моделями криостатируемых объектов позволяют исследовать поведение системы в широком диапазоне параметров гелия и построить алгоритм ее функционирования во всех режимах с малыми затратами машинного времени.

Третий раздел посвящен расчетно-экспериментальным исследованиям различных одноконтурных КГС. Исследования проведены на конкретных КГС: СПК-IOO, установки Токамак-7, СИМС, МГДЭС-IOO и установках их комплектующих: КГУ I50/4,5, ОРГ IOO-250/4,5, ОРГ 300-I200/4,5, ОГ-300. Разработаны алгоритмы расчета как квазистатических, так и динамических режимов работы одноконтурных КГС. В результате расчетно-экспериментального исследования турбодетандерных КГУ (с нерегулируемыми турбодетандерами) показана возможность регулирования таких установок методом снижения давления перед турбодетандером I ступени (рис.I), что позволило обеспечить эффективную работу системы во всем диапазоне характеристик (от ожижительного до рефрижераторного режима). Кроме того обнаружена еще одна особенность турбодетандерных КГУ с нерегулируемыми турбодетандерами - неоднозначность характеристик с явно выраженным максимумом по Q. Видно (рис.I), что одному значению Q могут соответствовать два значения x: x_1 и x_2. Сочетание Q и x_1 характеризуется более низким температурным уровнем работы турбодетандеров, неоптимальным соотношением потоков в КГУ, пониженной производительностью. Показано, что попадание в эту неэффективную зону работы возможно как в процессе захолаживания, так и в

номинальном режиме работы при кратковременном возрастании тепловой нагрузки. Предлагается алгоритм возврата установки (системы) к эффективному (Q-x_2) режиму работы путем увеличения величины дроссельного потока гелия. Разработан алгоритм эффективного функционирования турбодетандерной КГУ во всем диапазоне характеристики от чисто ожижительного до рефрижераторного режима работы путем введения контуров регулирования давления и температуры перед первой ступенью турбодетандерного агрегата.

На примере криостатирования СПУ с токовводами, а также работы КГС с дроссельно-эжекторной ступенью окончательного охлаждения продемонстрирована необходимость определения рабочего режима КГС путем совместного решения уравнений характеристик КГУ и потребителя (КО) (рис.2). Исследован режим форсирования одноконтурных КГС методом подлива жидкого гелия в сборник КГУ при различном количестве работающих детандеров. (рис.3). Показана эффективность этого метода форсирования, неоднократно использованного при испытании различных СПУ.

Особый интерес представляли режимы захолаживания КГС совместно с СПУ. Характерным моментом режима захолаживания (особенно ниже 80 К) является необходимость форсирования холодопроизводительности КГУ. В идеальном цикле с повышением температурного уровня работы КГУ ее холодопроизводительность должна возрастать пропорционально температурному уровню реализации холода, однако наличие термодинамических потерь, особенно от "обращенного теплообмена" в СОО и ограничений, связанных с производительностью реальных машин и гидравлическим сопротивлением аппаратов резко искажает такой характер изменения холодопрозводительности (рис.4). Были проанализированы схемные решения, исключающие "обращенный" теплообмен в СОО, и предложены варианты схем, обеспечивающие существенное повышение холодопроизводительности КГУ на повышенном температурном уровне реализации холода, в том числе и с использованием детандера в СОО (рис.5).

В связи с тем, что при работе с реальными СПУ возникает необходимость регулирования КГС как по величине полной (Q), так и удельной (q) холодопроизводительности, а одноконтурные КГС имеют достаточно узкий диапазон оптимальных параметров, представляло интерес исследовать их регулировочные

характеристики. Как и следовало ожидать из общих термодинамических соображений, результаты исследований конкретных КГУ, обобщенные на класс одноконтурных КГС, продемонстрировали рост удельных энергозатрат при регулировании по q (рис.6). Расширение зоны эффективного регулирования можно обеспечить использованием в СОО КГС циркуляционного эжектора, снижающего однако общий уровень эффективности системы из-за невозможности (как правило) использования в СОО детандера или промежуточного дросселирования. Кардинальным путем расширения зоны эффективного регулирования является разрушение материальной и тепловой связей между КО и криогенерирующей установкой, что реализуется в двухконтурных схемах КГС с РИОП.

В заключительной части раздела исследуется влияние модульности компрессорного оборудования на регулировочные характеристики КГС при различном регламенте работы последних. Показано, что практически независимо от регламента работы целесообразно увеличение модульности компрессорного оборудования до 2-3-х, а создание регулируемых компрессоров позволяет тем сильнее снизить затраты, чем больше неравномерность загрузки компрессорного оборудования и длительнее время его работы в году.

1544721

В четвертом разделе рассмотрены характеристики КГС с РИОП. Обобщены основные свойства, которым должны удовлетворять КГС СПУ, к ним в т.ч. относятся: независимость эффективности КГС от величины тепловой нагрузки, простота изменения расходных параметров криоагента через СПУ, обеспечение высокого уровня надежности с минимальными затратами, устойчивость регулировочных характеристик, использование, для различных КО, типовых рядов криогенного оборудования.

Максимально этим качествам удовлетворяет двухконтурная КГС с РИОП, где практически исключена тепловая и материальная связь КО и основного криогенерирующего контура (рис.7). А в силу специфического поведения теплоемкости гелия удается за счет избыточного обратного потока резко сократить термодинамические потери от теплообмена и обеспечить высокую термодинамическую эффективность КГС, приближающуюся к эффективности одноконтурных систем. Расчетным путем оптимизированы (по энергетическому критерию) параметры цикла РИОП для криостатирования КО при $T \simeq 4{,}5$ К: расход, давление и температурный

МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

уровень избыточного потока гелия. Оптимальное давление прямого потока составляет 2,0-2,5 мПа, а температура подпиточного потока 6...8 К для дроссельного РИОП и I2...I5 К для РИОП с детандерной СОО. Однако, в связи со слабо выраженным оптимумом по температуре и соображениям, связанными с удобством эксплуатации, обосновывается целесообразность подпитки РИОП жидким гелием ($T_{подп.} \simeq 4{,}3...4{,}5$ К).

В связи с широкой номенклатурой КО проведен анализ различных схем КГС с РИОП для криостатирования СПУ в более широком диапазоне температур $3{,}2 \leq T \leq I2$ К (рис.8). Разработаны алгоритм и программа расчета СОО РИОП с двумя эжекторами: циркуляционным и откачным, исследованы характеристики РИОП с эжекторной СОО. Показано, что минимально-достижимый температурный уровень достигается при величине подлива существенно меньшей, чем это необходимо для обеспечения режима с минимальными энергозатратами, снижение давления перед струйным аппаратом сближает эти характеристики, хотя и повышает минимально-достижимый температурный уровень. В качестве альтернативной рассмотрена СОО РИОП с детандером и криогенным нагнетателем, хотя появление двух машин практически сводит на нет одно из основных преимуществ КГС с РИОП - высокий уровень надежности.

Использование двухконтурной КГС с РИОП позволяет обосновать типовые технические решения, положенные в основу гибкой криогенной технологии. Отдельные единицы криооборудования приобретают свойства модулей, большинство которых может использоваться в КГС различного назначения практически без изменений, за исключением РИОП, схема и производительность которых должны соответствовать параметрам конкретного КО. Основным принципом, положенным в основу объединения технологического оборудования в типовую структуру КГС, является относительная самостоятельность модулей, заключающаяся в возможности автономных поставки и испытаний (вплоть до режимных) и блочного построения системы управления.

В разделе пятом рассматриваются особенности экспериментального исследования и испытаний КГС, как типичного представителя большой технической системы (БТС). Как всякая БТС, КГС не допускает проведение такого объема натурных испытаний, которые обеспечили бы получение полного набора искомых

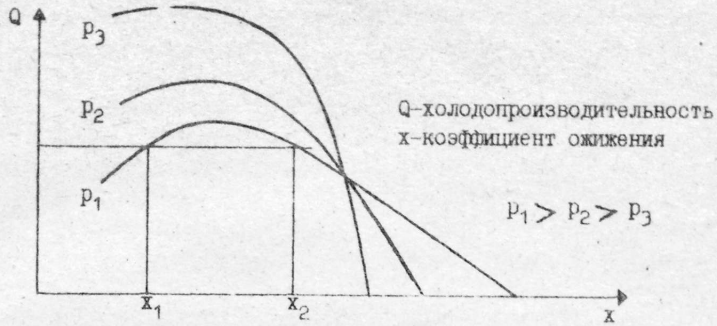


Рис. I. Типовая характеристика турбодетандерной КГУ.

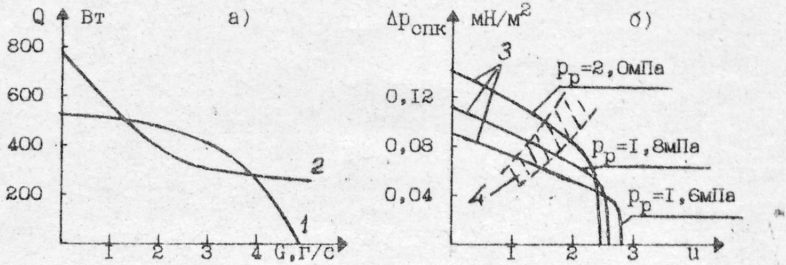


Рис. 2. Характеристики криогенной системы СПК-100: а)- в дроссельном режиме работы; б)- в режиме с циркуляционным эжектором; I-холодопроизводительность КГС, 2-тепловая нагрузка СПК-100, 3-регулировочные характеристики эжектора, 4-гидравлическая характеристика СПК-100; G-расход на токовводы, u-коэффициент эжекции.

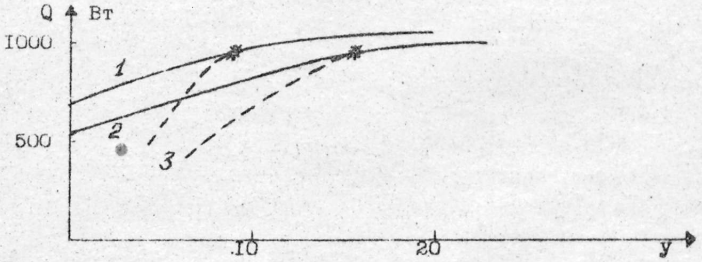


Рис. 3. Характеристика ОРГ 100-250/4,5 с подливом жидкого гелия; I-с детандером в СОО; 2-с дросселем в СОО; 3-с отключенными детандерами в СПО; *-отключение детандеров СПО; $y = G_{подл}/G_{РИОП}$.

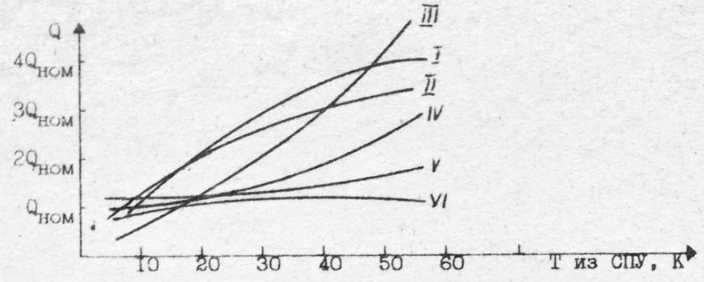


Рис. 4. Холодопроизводительность КГУ на переменном температурном уровне (в режиме захолаживания); 1-VI-варианты схем по рис.5.

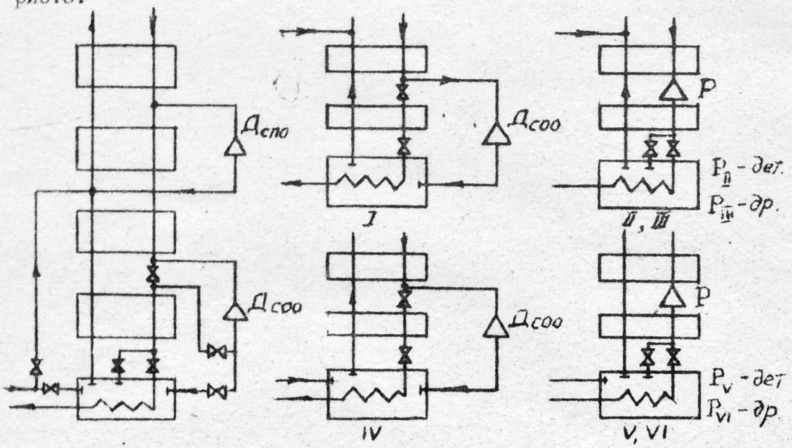


Рис. 5. Варианты схем для захолаживания СПУ (исследованы на примере захолаживания СИМСа с помощью КГУ ОРГ 100-250/4,5)

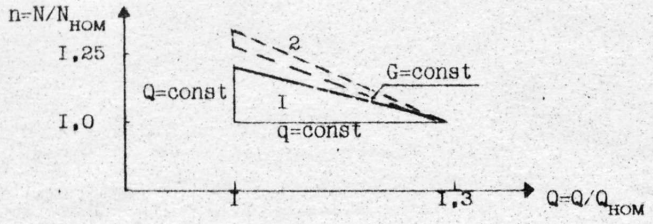


Рис. 6. Регулировочные характеристики одноконтурных КГС; I-с регулируемой производительностью компрессора; 2-с нерегулируемым компрессором.

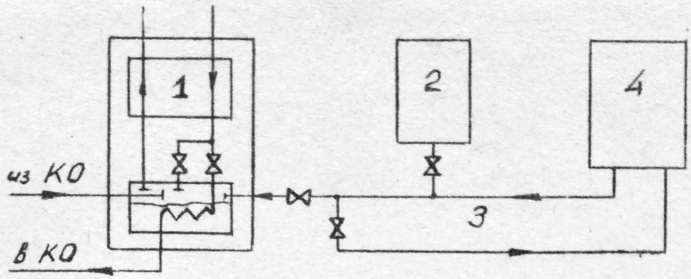
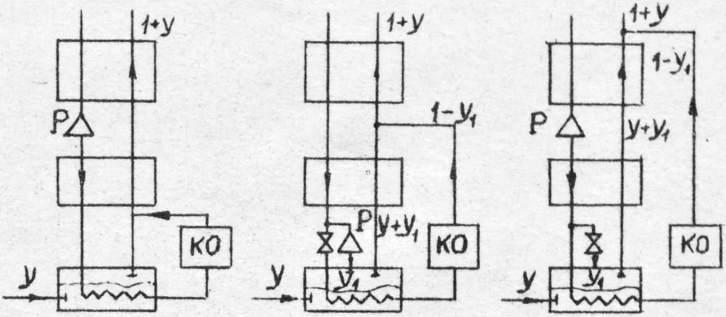


Рис. 7. Принципиальная схема двухконтурной КГС с РИОП; I-РИОП, 2-оперативный криососуд жидкого гелия, 3- криогенный коллектор, 4-ожижитель гелия.



а)Р-дроссель
б)Р-детандер
в)Р-дроссель
г)Р-детандер
д)Р-детандер

Рис. 8. Схемы РИОП для криостатирования различных СПУ

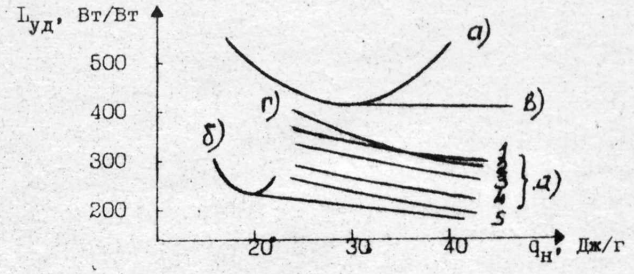


Рис. 9. Характеристики РИОП для схем по рис.8; I,2,3,4,5 – соответственно $\Delta p_{ко}$=1,5;1,0;0,5;0,3;0,I мПа.

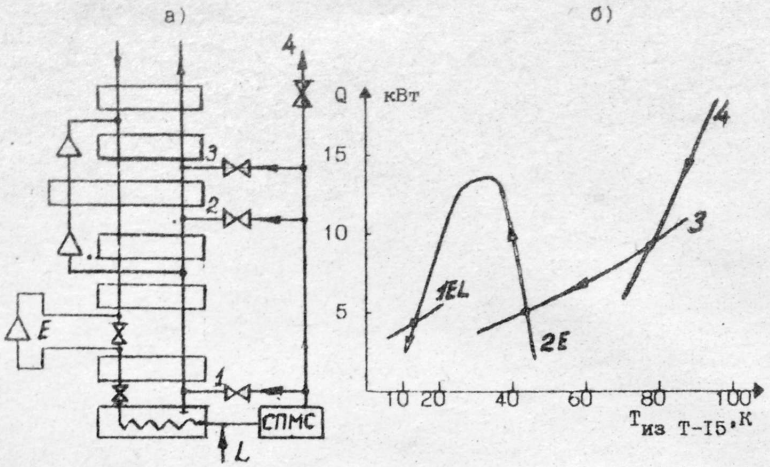


Рис. 10. Характеристика КГС при захолаживании СПМС Т-15; а)-варианты схем ОГ-800; б)-соответственно их холодопроизводительность; 1,2,3,4-места ввода обратного потока в ОГ; Е-схема с детандером в С00; L-схема с подливом от ОГ-800 №2.

оценок. Вместе с тем в результате режимных испытаний КГС необходимо определить весь спектр действительных параметров системы, уточнить алгоритмы ее функционирования и регламент ее работы. Это оказывается возможным при наличии математических моделей КГС и ее частей (модулей), адекватных реальному обекту и уточненных в процессе автономных испытаний. Для сокращения затрат при проведении автономных испытаний КГС и ее модулей предлагается расчетно-экспериментальный метод, использующий имитационное моделирование в сочетании с натурным экспериментом. При наличии математической модели, адекватной испытываемому объекту с точностью до некоторых коэффициентов, задачей автономных испытаний является определение этих коэффициентов. Особенностью КГС, как объекта испытаний, является то, что в большинстве случаев удается выбрать такие коэффициенты (теплопритока, гидравлики, эффективности теплообмена, кпд машин и др.), которые в пределах изменения режимных параметров можно считать величинами постоянными. Однако не всегда удается определить искомые коэффициенты непосредственными измерениями. Это связано с тем, что при большом количестве

измеряемых параметров в условиях натурных испытаний вероятность того, что все измерения достоверны достаточно мала. Как правило это определяется двумя причинами: установочными погрешностями, которые могут быть следствием как ошибок, так и уровня "незнания", а также тем, что система измерения на стадии автономных испытаний также находится в состоянии отладки и испытаний и не исключены ошибки в монтаже и "сбои" в измерительных цепях и комплексах. В условиях недостаточности экспериментальной информации для облегчения и повышения достоверности поиска источников потерь и определения эмпирических коэффициентов целесообразно до проведения испытаний, расчетным путем оценить влияние основных видов потерь (теплообмена, утечек криоагента, теплопритока, эффективности детандеров) на такие характеристики КГС, как холодопроизводительность (скорость ожижения), термодинамический кпд, удельные затраты энергии, а также на распределение характерных параметров (как правило температур) вдоль теплообменного столба КГУ (по характерным точкам цикла). Обязательным этапом, предшествующим анализу результатов испытаний, является анализ достоверности экспериментальной информации. Здесь невозможно дать исчерпывающие рекомендации и его успех во многом зависит от опыта и профессиональной интуиции испытателя, однако в работе приведены типовые ситуации и ряд приемов, позволяющих уменьшить уровень информационной неопределенности и выделить показания приборов, которым можно доверять с вероятностью близкой к единице. Затем, используя эти показания в качестве базовых, ведется процесс "информационного" поиска, основанный на расчете характеристик и распределения температур при различных комбинациях вероятных потерь и их сравнении с результатами испытаний. Заключительным этапом расчетно-экспериментального метода испытаний является расчет характеристик системы по уточненной модели.

Другой особенностью КГС является сложность определения тепловой характеристики системы криостатирования традиционным методом теплового баланса, связанная с точностью определения температур, расходов, паросодержания. Большинство СПУ работают в узком диапазоне температур, соизмеримом с суммарной погрешностью системы измерений, кроме того сложная, разветвленная конструкция большинства КГС, наличие отводов к измери-

тельным и предохранительным устройствам, использование пневмоуправляемой арматуры создают предпосылки к существенному увеличению тепловых потерь в коммуникациях КГС и КО при протекании через них криоагента (гелия) по сравнению с теплопритоком через изоляцию и тепловые мосты. В этом случае известный метод теплового баланса не позволяет разделить два источника тепловых потерь: статический и динамический. Использование метода нестационарного нагрева позволяет разрешить эти проблемы. Суть метода заключается в определении теплопритока к объекту по темпу его естественного отогрева. В общем случае теплоприток к объекту при его нагреве определится как сумма:

$$Q = Q_{He} + Q_{м} \text{ , где}$$

Q - суммарный тепловой поток в зону криогенных температур;

Q_{He} - тепловой поток, аккумулированный гелием:

$$Q_{He} = M_{He} c_p \frac{dT}{d\tau} - M_{He}(c_p - c_v)\left(\frac{T}{p}\right)_v \frac{dp}{d\tau}$$

$Q_{м}$ - тепловой поток, аккумулированный конструктивными материалами:

$$Q_{м} = \sum_{j=1}^{m} M_j c_j \frac{dT_j}{d\tau}$$

Наибольшие сложности возникают при определении $Q_{м}$, поэтому для уменьшения погрешности этого метода целесообразно измерения начинать непосредственно от минимального температурного уровня (4,5...5 К), тогда для большинства СПУ в силу уменьшения $c_{м}$ с понижением температуры погрешность в определении Q от неточности определения $Q_{м}$ составит не более 5-7%. Значение Q_{He} достаточно точно можно определить, организуя в каналах объекта процесс изохорного или изобарного нагрева:

$$(Q_{He})_{v=const} = M_{He} c_v \frac{dT}{d\tau} = M_{He} c_v \frac{\Delta T}{\Delta\tau} ;$$

$$(Q_{He})_{p=const} = M_{He} c_p \frac{dT}{d\tau} = \frac{pVc_p \ln(T_к/T_н)}{ZR\Delta\tau} = \frac{pV}{ZR} \frac{c_p \ln\frac{M_н}{M_н - \Delta M_н}}{\Delta\tau} ;$$

где ΔM - масса гелия, покинувшая испытуемый объект в процессе изобарного нагрева за время $\Delta\tau$, легко определяемая любым традиционным способом (например по изменению объема газгольдера).

Раздел шесть посвящен результатам расчетно-экспериментального исследования двухконтурных КГС и их оборудования

(модули компримирования, очистки, ожижения, криостатирования). Основное внимание в этом разделе уделяется алгоритмам функционирования отдельных модулей, а также КГС в целом в режимах захолаживания и криостатирования.

Учитывая перспективность использования безгазгольдерных схем компримирования гелия, исследовалась работа таких систем сжатия в пусковых и стационарных режимах, выработаны рекомендации по их проектированию и регулированию.

По системе очистки исследованы способы оптимального регулирования по критерию минимальных затрат жидкого азота. Рекомендован способ регулирования по ΔT как более простой и практически столь же эффективный. Исследован алгоритм функционирования системы очистки и предварительного охлаждения в режиме захолаживания с заданным градиентом температур в СПУ ($\Delta T_{СПУ}$ = 50 К), выбраны контуры регулирования для типовой схемы модуля низкотемпературной очистки и предварительного охлаждения.

Выбор эффективных контуров поддержания параметров ожижителя гелия осуществляется в результате анализа статических и динамических характеристик ОГ. Анализ оптимальной характеристики типового турбодетандерного ОГ как в дроссельном, так и в детандерном режимах работы СОО позволил сформулировать алгоритм регулирования, заключающийся в том, что для поддержания максимальной холодопроизводительности ожижителя в зоне $Q < Q^*$ поддерживается постоянным давление перед I ступенью турбодетандерного агрегата ($p_{п/т/д} = p_{max}$), а при $Q > Q^*$ - температура ($T_{п/т/д} = T^*$) перед турбодетандерным агрегатом, регулируя давление ($p_{п/т/д} < p_{max}$). Если в режиме криостатирования ОГ независимо от колебания тепловой нагрузки потребителя работает практически в ожижительном режиме с небольшой долей рефрижераторной нагрузки, то в режиме захолаживания он используется как типичный рефрижератор. Это накладывает свой отпечаток как на схему, так и на состав оборудования ОГ. Организация работы ОГ в процессе захолаживания ставит ряд научно-практических задач, в том числе: возможность и необходимость использования резервного компрессорного и детандерного оборудования, определение необходимого количества и температурных уровней ввода потока гелия, возвращаемого из СПУ и условий перехода с одного ввода на другой, эффективность ис-

пользования парожидкостного детандера СОО в режиме захолаживания. Проведенный анализ позволил выработать рекомендации по плавному ведению режима захолаживания с использованием детандера в СОО и двух дополнительных вводов обратного потока из КО в ожижитель (рис. IO.).

Алгоритм функционирования системы криостатирования, основным модулем которой является РИОП, определяется типом КО и характером его тепловой нагрузки. Однако для дроссельных и дроссельно-эжекторных СОО РИОП удалось выработать основные принципы регулирования и определить возможные регулирующие органы и параметры регулирования, в результате чего поставлена задача создания регулируемых эжекторов и приборов для измерения паросодержания гелия.

В заключительной части этого раздела приведены характеристики двух наиболее крупных двухконтурных КГС с РИОП: установки Токамак-I5 и ускорительно-накопительного комплекса УНК-3000.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

I. Из анализа различных КО и их КГС установлено, что для крупных СПУ преимущественно используются циркуляционные системы криостатирования. Обобщены требования СПУ, как КО, предъявляемые к КГС: высокая эффективность в т.ч. при переменном характере тепловой нагрузки, высокая надежность при длительном цикле непрерывной работы, высокий уровень автоматизации. Проведено обобщение широкой номенклатуры КГС в рамках предложенной классификации, проанализированы преимущества и недостатки одно- и двухконтурных КГС, показано, что для криостатирования современных СПУ, работающих в условиях меняющейся тепловой нагрузки и создающихся в условиях недостаточности исходной информации, наиболее полно удовлетворяющими перечисленным требованиям являются двухконтурные КГС с РИОП.

2. КГС современного КО является большой технической системой, что определяет при создании КГС необходимость системного подхода, заключающегося, в частности, в учете взаимосвязи и взаимовлияния всех компонентов КГС и режимов работы системы, особенно режимов криостатирования и захолаживания. Предложены методы и алгоритмы расчета статических и динами-

ческих режимов работы КГС. Для эффективного использования модели и методы решений должны удовлетворять требованиям быстродействия и удовлетворительной точности, для чего разработаны численно-аналитические методы решения упрощенных моделей. Показано, что точность получаемых характеристик в большей степени зависит от достоверности и точности исходных данных, чем от точности математического описания и всегда существует некий доверительный интервал, ширина которого различна на разных стадиях создания системы.

3. В силу специфического поведения теплоемкости гелия, оптимальная температура избыточного обратного потока, вводимого в РИОП не должна понижаться ниже 6 К, однако из-за большего удобства работы, учитывая слабо выраженный оптимум, рекомендовано использование жидкого гелия, что позволяет комплектовать двухконтурную систему ожижителями и сосудами жидкого гелия общепромышленного назначения. Исследованы схемы РИОП с различными СОО, обеспечивающие эффективное криостатирование широкой номенклатуры КО в диапазоне температур $3{,}2 = T = 12$ К и давлений $0{,}1 = p = 2{,}0$ мПа.

4. Исследованы алгоритмы функционирования типовых модулей двухконтурной криогенной гелиевой системы с РИОП: компримирования, очистки и предварительного охлаждения, ожижения, рекомендованы наиболее эффективные контуры регулирования в режимах криостатирования и захолаживания. Показано, что разработанные модули могут практически без изменения тиражироваться в ряды оборудования по производительности (400, 800, 1600, 2400 кг/ч) для КГС практически любых криостатируемых объектов.

5. Разработана ресурсосберегающая методика испытаний КГС, широко использующая математическое моделирование и результаты автономных испытаний ее отдельных элементов и модулей. Показана необходимость, в условиях натурного эксперимента со сложной криогенной системой, оценки достоверности экспериментальных данных; предложены некоторые типовые приемы, облегчающие эту оценку.

6. Для определения тепловой нагрузки КО и криогенных соединительных коммуникаций, а также для выделения из суммы тепловых потерь составляющей стационарного теплопритока через теплоизоляционную систему предложен метод нестационарного

стогрева. Определен диапазон температур (Т = 10 К), в котором для большинства СПУ этот метод может быть использован с погрешностью не более 7-5%.

7. В результате проведенного расчетно-экспериментального исследования был открыт ряд новых эффектов и сделаны некоторые конкретные рекомендации:

- для исключения источников дополнительных тепловых потерь при разработке разветвленной криогенной гелиевой системы по возможности избегать: "штыковых" (байонетных) соединений, "теплых" тупиковых отводов, исключить использование традиционных (с теплыми импульсными трубками) измерителей давления и перепада давлений (расходов), а также, по возможности, теплых предохранительных устройств;
- для обеспечения экономичной эксплуатации КГС увеличивать модульность компрессорного оборудования до 2-3 независимо от регламента работы системы, а для обеспечения плавного регулирования производительности создать регулируемые гелиевые компрессоры с диапазоном регулирования до 50 %;
- ожижители гелия с нерегулируемыми турбодетандерами могут эффективно регулироваться при переходе в рефрижераторный режим путем снижения давления перед первой ступенью турбодетандерного агрегата;
- в процессе переходных режимов работы (захолаживания, возмущения по тепловой нагрузке) ожижитель гелия может попасть в неэффективную область работы, путь выхода из которой лежит через увеличение доли потока гелия, поступающего в СОО ("дроссельного" потока) вплоть до снижения давления перед турбодетандерным агрегатом ступени предварительного охлаждения.

Работа в целом создала предпосылки к появлению нового поколения криогенных гелиевых систем, предназначенных для криостатирования сверхпроводящих устройств, сокращению сроков их разработки и испытаний. Результаты работы использовались при проектировании КГС криокомплексов Токамак-15, УНК-3000, ИТЭР, а также при испытаниях и эксплуатации таких СПУ как СПК-100, ГСПК-50, Токамак-7, СИМС, Токамак-15.

Обозначения: c_p, c_v - изобарная и изохорная теплоемкость соответственно, Дж/кг.К; F - поверхность, $м^2$; G - расход, кг/с;

i - энтальпия, Дж/кг; K - коэффициент теплопередачи, Вт/м^{2}К; M - масса, кг; P - периметр, м; p - давление, Па; Q- тепловой поток, Вт; R - газовая постоянная, Дж/кгК; S - площадь поперечного сечения, м^2; T - температура, К; u - внутренняя энергия, Дж/кг; V - объем, м^3; x - координата, м; Z - коэффициент сжимаемости; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м^{2}К; τ, τ_0, τ^* - время, транспортное и характерное время соответственно, с; ρ - плотность, кг/м^3; η - кпд.

Индексы: S - прямой поток; R - обратный поток; W - стенка; вх - вход; вых - выход; д - динамический; ст - статический; к - конец; н - начало.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

I. Основные положения методики термодинамического анализа криогенных систем / Горбачев С.П., Буткевич И.К., Барышева А.И., Микитенко Е.Д. // Тез. докл. I Всес. конф. по криог. технике.- М., 1973.- С.122-123.

2. Инженерные методы расчета квазистатических и динамических режимов работы теплообменников криогенной системы / Буткевич И.К., Веремчук С.И., Зуев М.А. и др. // Межреспубликанский сб. "Хол. техника и технология".-К., Техника, 1979.- С.48-53.

3. Буткевич И.К., Зуев М.А., Романишин В.Ф. Нелинейная модель взаимодействия потоков криоагента в теплообменных аппаратах // Инж.-физич. журнал.- 1986.- т.51, №3.- С.383-388.

4. Буткевич И.К., Зуев М.А., Романишин В.Ф. Квазилинейная модель взаимодействия потоков криоагента теплоносителей в трехпоточном теплообменнике // Инж.-физич. журнал.- 1987.- т.53, №6.- С.937-942.

5. Буткевич И.К., Зуев М.А., Романишин В.Ф. Квазидинамическое моделирование теплообменных процессов // Инж.-физич. журнал.- 1989.- т.56, №1.- С.117-126.

6. Буткевич И.К., Романишин В.Ф., Костров А.Н. Моделирование динамических режимов работы сложных систем // Межвуз. сб. научн. тр. "Совр. пробл. гидродинамики и теплообмена в элементах энерг. установок и криог. технике".- М., ВЗМИ, - 1986.- С.91-99.

7. Буткевич И.К., Веремчук С.И., Зуев М.А. Теоретическое

и экспериментальное исследование квазистационарных режимов работы криогенных гелиевых установок // Тез. докл. Всес. конф. по холоду. Секц. I-II.- Ташкент., 1977.- С.5-6.

8. Базовые решения в системах криогенного обеспечения сверхпроводящих устройств./ Коваленко В.Д., Бармин Н.В., Буткевич И.К. и др. // Сверхпроводимость в технике.- Труды Всес. конф. по техн. исп. сверхпроводимости.- Л., 1984.- С.177-180.

9. Результаты исследования криогенной гелиевой системы для СПК-100./ Буткевич И.К., Веремчук С.И., Матвеев Н.А. и др. // Сверхпроводящие ЛЭП: Сб. научн. тр. ЭНИН.- М., 1979.- С.36-47.

10.Натурное исследование циркуляционного контура системы криогенного обеспечения сверхпроводящего кабеля СПК-100./ Добровольский Л.Н., Аринин А.Ф., Аринин В.Ф., Бендик Н.Г., Буткевич И.К. и др. // Межвуз. сб. науч. тр. "Совр. пробл. гидродинамики и теплообмена в элементах энерг. уст. и криог. техн.".-М., ВЗМИ, 1988.- С.29-35.

11.Создание и исследование криогенной гелиевой системы. / Буткевич И.К., Иньков А.П., Уткин В.Н. и др. // Хим. и нефт. машиностр.- 1980, №7.- С.7-9.

12.Результаты длительных испытаний криогенной гелиевой системы установки Токамак-7./ Буткевич И.К., Коваленко В.Д., Морковкин И.М. и др. // Тез. докл. III Всес. науч.-техн. конф. по криог. технике "Криог. техн. - 82".- М., 1982.- С.8-9.

13.Результаты испытаний криогенного комплекса СИМС./ Балашов Ю.А., Бармин Н.В., Буткевич И.К. и др. // Докл. III Всес. конф. по инж. пробл. термояд. реакторов.- М., 1984.- С.284-292.

14.Буткевич И.К., Микитенко Е.Д., Пуртов Н.А. Сравнительный термодинамический анализ двухконтурных криогенных гелиевых систем.// Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. "Криог. техн. - науке и производству".- М., 1991.- С.43.

15.Буткевич И.К., Пуртов Н.А., Микитенко Е.Д. Анализ схем рефрижераторов с избыточным обратным потоком для циркуляционных объектов криостатирования. // Межвуз. сб. науч. тр. "Совр. пробл. гидродинамики и теплообмена в элементах энерг. уст. и криог. техн."- М., МИП, 1989.- С.127-132.

16.Совершенствование ступеней окончательного охлаждения

со струйными аппаратами рефрижераторов с избыточным обратным потоком./ Добровольский Л.Н., Аринин А.Ф., Аринин В.Ф., Буткевич И.К. и др.// Межвуз. сб. науч. тр. "Совр. пробл. гидродинамики и теплообмена в элементах энерг. уст. и криог. техн."- М., МИП. 1989.- С.119-127.

17.Криогенные гелиевые системы для Токамаков. Опыт испытания и эксплуатации./ Блазнин Ю.П., Буткевич И.К., Горбачев С.П. и др. // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. "Криог. техн. - науке и производству".- М., 1991.- С.40.

18.Tokamak-15 cryogenic system. The results of the design and experimental researches. Operation experience./ Butkevitch I.K., Veremchuk S.I., Duhanin Yu.I. e.a. // Abstr. 12-th Intern. conf. on Magnet Technology.- L., USSR.- 1991.- P.387.

19.К вопросу разработки автоматизированной криогенной системы Токамак-15./ Буткевич И.К., Бармин Н.Ф., Веремчук С.И. и др. // Докл. III Всес. конф. по инж. пробл. термояд. реакторов.- М., 1984.- т.2.- С.61-68.

20.Cryogenic cooling and maintenance systems of the superconducting magnets of big accelerators./ Butkevitch I.K., Grygorenko N.M., Dudkin I.E. e.a. // Possibilities and Limitations for Supercond. accel. magnets: Proc. of ICFA Workshop.- Protvino, USSR.- 1980.- P.135-145.

21.Криогенная система ИТЭР./ Буткевич И.К., Коваленко В.Д., Микитенко Е.Д. и др. // Вопросы атомной науки и техники; науч.-техн. сб., серия Термоядерный синтез.- Вып.1.- М., 1991.- С.23-29.

22.Буткевич И.К., Курдюков .В.И., Романишин В.Ф. Оперативный анализ работы криогенных гелиевых систем в процессе испытаний.// Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. "Криог. техн. - науке и производству".- М., 1991.-С.44.

23.Tokamak-15 Cool down and Steady-state Operation Modes./ Butkevitch I.K., Veremchuk S.I.6 Duhanin Y.I. e.a.// Abstr. The 14-th Intern. Cryog. Eng. Conf.- Kiev, Ukraine.- June, 1992.- P.51.

24.Butkevitch I.K. The Large Cryogenic Helium Systems for Superconducting Magnets.// Abstr. The 14-th Intern. Cryog. Eng. Conf.- Kiev, Ukraine.- June, 1992.- P.78.

25.А.с. 820351 СССР, МКИ В 9/00, 12/00. Система криоста-

тирования сверхпроводящих электротехнических устройств с токовводами./ Буткевич И.К., Готвянский Н.Ф., Коваленко В.Д. и др. (СССР).- № 2581885; Заявл. 27.02.78, дсп.

26.А.с. 1207256 СССР, МКИ В 9/00. Способ управления режимом захолаживания криогенной гелиевой системы./ Буткевич И.К., Духанин Ю.И., Романишин В.Ф. и др. (СССР).- № 3787369; Заявл. 25.06.84, дсп.

27.А.с. 551906 СССР, МКИ В 9/00. Способ охлаждения криостатируемого объекта./ Буткевич И.К., Коваленко И.М., Морковкин И.М. и др. (СССР).- № 2162895; Заявл. 06.08.75. дсп.

28.А.с. 953387 СССР, МКИ В 49/00. Способ автоматического управления криогенной гелиевой системой./ Буткевич И.К., Гольман И.А., Марков В.М. и др. (СССР).- № 2986874; Заявл. 26.09.80.

29.А.с. 1312348 СССР, МКИ В 9/02. Эжекторная ступень криогенной установки./ Добровольский Л.Н., Буткевич И.К., Аринин А.Ф. и др. (СССР).- № 3946039; Заявл. 19.08.85.

30.А.с. 819525 СССР, МКИ В 9/00. Способ автоматического регулирования криогенной гелиевой системы./ Буткевич И.К., Веремчук С.И., Романишин В.Ф. и др. (СССР).- № 2769626; Заявл. 21.05.79.

Подписано к печати 22.04.94. Объем 2,0 п.л. Зак. 262. Тир. 100

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана