



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

98-6

На правах рукописи

Агеев Анатолий Иванович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРИТЕЛЕЙ**

01.04.20 — физика пучков заряженных частиц и ускорительная техника

**Диссертация**

в виде научного доклада  
на соискание ученой степени доктора технических наук

Протвино 1998

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г.Протвино).

Официальные оппоненты: доктор технических наук В.Е. Кейлин,  
доктор технических наук В.И. Деев, доктор технических наук Н.Н. Агапов.

Ведущая организация — Научно-производственное объединение  
“Электрофизика” им. Д.В. Ефремова (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_1998 г. в \_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д034.02.01 при Институте физики высоких энергий по  
адресу: 142284, г. Протвино Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Диссертация в виде научного доклада разослана “\_\_\_” \_\_\_\_\_1998 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д034.02.01

Ю.Г. Рябов

## Содержание

1. Общая характеристика работы	3
Актуальность темы . . . . .	3
Цель работы . . . . .	3
Научная новизна . . . . .	4
Практическая ценность . . . . .	4
Тезисы к защите . . . . .	5
Апробация работы . . . . .	5
2. Исследование сверхпроводящих магнитов как объекта криостатирования	6
2.1. Тепловые нагрузки криогенной системы . . . . .	6
2.2. Режимы захлаживания и отогрева . . . . .	9
2.3. Режим перехода сверхпроводящих магнитов в нормальное состояние .	10
2.4. Обобщенные требования к криогенным системам сверхпроводящего ускорителя . . . . .	11
3. Концептуальные основы криогенной системы сверхпроводящего ускорителя	12
3.1. Криогеника сверхпроводящей кольцевой системы . . . . .	12
3.2. Системы криообеспечения . . . . .	16
3.3. Обеспечение нестационарных режимов работы . . . . .	17
4. Исследование элементов криогенной системы	18
4.1. Теплофизическая модель сверхпроводящего магнита . . . . .	18
4.2. Исследование холодопроизводящих установок . . . . .	24
4.3. Защита сверхпроводящих магнитов при их переходе в нормальное состояние . . . . .	27
4.4. Некоторые приборы для теплофизического исследования СП-магнитов	27
5. Криогенные стенды УНК ИФВЭ, проект системы криогенного обеспечения	33
5.1. Стенд испытания СП-магнитов УНК и цепочки СП-магнитов УНК . .	33
5.2. Стенд калибровки серийных СП-магнитов . . . . .	35
5.3. Проект системы криогенного обеспечения УНК . . . . .	36
Заключение	43

# 1. Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Современный этап познания материального мира требует развития ускорительной базы физики высоких энергий, особенно ускорительных установок с пучками частиц высокой энергии и высокой интенсивности. Однако энергозатраты на питание обычных электромагнитов подобных ускорительных установок являются ограничивающим фактором по энергии заряженных частиц, и только сверхпроводящие технологии позволяют реализовать проекты суперускорителей.

По этой причине крупные ускорители Теватрон, ГЕРА и Нуклотрон созданы с использованием сверхпроводящих электромагнитов, в ускорителе ЛЭП применены сверхпроводящие резонаторы, проекты крупных ускорителей УНК, ЛНС и др. основываются на комплексном использовании сверхпроводящих технологий.

Современные сверхпроводящие (СП) магниты и другие СП-устройства имеют рабочую температуру  $1,8\div 4,5$  К, при которой цена холода является достаточно высокой, а криогенные установки достаточно сложными. Поэтому создание высокоэффективной и надежной криогенной системы сверхпроводящих ускорителей является задачей актуальной и своевременной.

## Цель работы

Основная цель диссертации — на основе исследований, выполненных при разработке проекта УНК, исследований в натуральных условиях элементов и узлов ускорителя, а также на основе анализа действующих и проектируемых сверхпроводящих ускорителей разработать криогенную систему, отвечающую следующим условиям:

- Высокая эффективность и надежность для крупных протяженных ускорителей.
- Безопасность и удобство в эксплуатации.

- Криогенная система сверхпроводящих ускорителей должна обеспечивать быстрые режимы захлаживания, отогрева, ремонта оборудования, что особенно важно в период “детской болезни” ускорителя, когда на начальном этапе эксплуатации происходит наладка, выявление и замена некачественного оборудования.

## **Научная новизна**

- Впервые в полном объеме разработаны концептуальные основы построения криогенных систем для ускорителей заряженных частиц с использованием сверхпроводящих технологий — нового научно-технического направления в области ускорительной техники.

- Разработаны новые схемные и конструктивные решения, позволяющие реализовать криогенную систему с высоким уровнем надежности и энергетической эффективности в стационарных и нестационарных режимах работы СП-ускорителя.

- Впервые обнаружено влияние осевой теплопроводимости в теплообменных аппаратах на эффективность работы сателлитных рефрижераторов криогенных систем ускорителя. Разработаны методики анализа, расчета и криостатирования криогенных систем с учетом этого эффекта. Показано, что гелиевые холодопроизводящие установки способны воспринимать импульсные нагрузки значительной величины.

- На основе экспериментальных и теоретических исследований составлена методика расчета пространственных температурных полей и термомеханических напряжений в объектах в процессе захлаживания и отогрева.

- Впервые в представленном объеме выполнено исследование для крупных промышленных СП-ускорителей следующих процессов: захлаживания, отогрева, перехода магнитов в нормальное состояние.

## **Практическая ценность**

Практическая ценность работы заключается прежде всего в том, что разработана криогенная система, обеспечивающая многоплановые режимы работы сложнейшего ускорительно-накопительного комплекса. Созданные экспериментальные стенды позволили не только испытывать модели и натурные образцы оборудования УНК, но и провести исследования собственно криогенной системы УНК.

Содержащиеся в диссертации материалы являются основой для модернизации действующих криогенных систем и реализации новых с использованием сверхпроводящих технологий.

Оказано значительное влияние на развитие криогенных технологий не только сверхпроводящих ускорителей, но и криогенных систем различных промышленных установок и установок физического эксперимента.

Проведенные исследования выявили ряд особенностей криогенных систем и сверхпроводящих элементов, которые уже внедрены в других проектах.

Составлены и внедрены расчетные методики как циклов и процессов криогенных технологий, так и элементов и устройств, работающих в криогенных условиях.

### **Тезисы к защите**

1. Разработаны требования как к сверхпроводящим конструкциям ускорителей и установок физического эксперимента, так и к криогенным системам ускорителей.
2. Определены концептуальные основы криогенной системы сверхпроводящих ускорителей. Выбраны принципиальные схемы, определены термодинамические циклы и схемные решения, обоснованы основные криогенные режимы сверхпроводящих ускорителей, обеспечивающие экономичную и надежную работу ускорителя в целом.
3. Исследованы криогенные процессы в сверхпроводящих магнитах как в стационарном режиме ускорителя заряженных частиц, так и в различных переходных процессах. В результате создана криогенная система сверхпроводящего магнита, удовлетворяющая всем требованиям работы ускорителя.
4. Изучены различные схемные решения для нестационарных режимов системы в целом. Результатом явился проект системы криогенного обеспечения, отличающейся не только высокой экономичностью, но и высокой надежностью.
5. Разработана и создана система защиты магнитов при переходе из сверхпроводящего в нормальное состояние, обеспечивающая неразрушение магнитов и эвакуацию гелия без его потери.
6. Разработаны методики расчета различных режимов и элементов криогенной системы сверхпроводящего ускорителя и методы физического эксперимента в условиях, приближенных к реальным условиям работы ускорителя.
7. Разработан, создан и опробован стенд испытания серийных магнитов УНК, криогенная система которого полностью моделирует криогенную систему ускорительно-накопительного комплекса.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертации опубликованы в виде статей, препринтов ИФВЭ и ОИЯИ, а также обсуждены на конференциях, совещаниях и научных семинарах, таких как:

- Рабочие совещания ICFA: Цукуба, 1992 г.; Брукхейвен, 1986 г.; Протвино, 1981 г.
- Европейские конференции по ускорителям: EPAC-92, Берлин, 1992 г.; EPAC-88, Рим, 1988 г.
- Международные конференции по ускорителям частиц высоких энергий: XIII - Новосибирск, 1986 г.; XI - Женева, 1980 г.; X - Серпухов, 1977 г.

- Международные конференции по криогенной технике: ICES-XII, Англия, 1988 г.; ICES-XI, Западный Берлин, 1986 г.; ICES-X, Хельсинки, 1984 г.
- 12 Международная конференция по магнитным технологиям МТ-12, Ленинград, 1991 г.
- Всесоюзные совещания по ускорителям заряженных частиц: XIV - Протвино, 1994 г.; XI - Дубна, 1988 г.; X - Дубна, 1986 г.; IX - Дубна, 1984 г.; VIII - Дубна, 1982 г.; VII - Дубна, 1980 г.
- Всесоюзные семинары по криогенной технике в МВТУ им. Баумана.
- Научные семинары в ИФВЭ и ЛВЭ ОИЯИ.

## 2. Исследование сверхпроводящих магнитов как объекта криостатирования

Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [5, 9, 13, 16, 19-22, 31, 37, 38 ].

### 2.1. Тепловые нагрузки криогенной системы

Статическая тепловая нагрузка азотного экрана и гелиевого сосуда сверхпроводящих (СП) магнитов определяется теплопритоками через остаточный газ, тепловым излучением и по тепловым мостам. Остаточное давление в изоляционном пространстве не должно превышать  $10^{-4}$  Па, и в этом случае теплоприток через газ пренебрежимо мал.

Тепловой поток излучением к гелиевому сосуду определяется размером поверхности последнего и его отражательной способностью, а также температурой поверхностей, излучающих на него энергию.

В общем виде теплоприток излучением между двумя поверхностями с разными температурами может быть определен с помощью выражения (2-1):

$$Q_{\text{изл}} = \tilde{N}_{1,2} F \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2-1)$$

Из этого выражения следует, что наличие экрана при температуре, промежуточной между гелиевой и температурой окружающей среды, существенно снижает тепловую нагрузку на гелиевом уровне, где цена производства холода очень велика. Так, например, применение экрана при азотной температуре снимает теплоприток к гелиевому сосуду почти в 300 раз. Следующий шаг в снижении теплопритоков излучением — применение дополнительных неохлаждаемых экранов с высокой отражательной способностью. С этой целью в ИФВЭ была разработана и внедрена в производство высокоэффективная многоэкранная вакуумная теплоизоляция, благодаря которой реальные теплопритоки излучением были доведены до расчетных значений около 1 Вт к гелиевой поверхности магнита УНК и 15 Вт к азотному экрану.

Теплоприток по опорам и мостам определяется с помощью выражения

(2-2):

$$Q_0 = \lambda(T_2 - T_1)F / L, \quad (2-2)$$

где  $\lambda$  — среднеинтегральный коэффициент теплопроводности в температурном интервале  $T_2 - T_1$ ;  $F$  — поперечное сечение подвески (растяжки);  $L$  — длина подвески.

При выборе материала опор основное внимание уделялось значению  $\lambda \cdot F$ . В результате для магнитов УНК был выбран титановый сплав ВТ5-1. Применение этого сплава, а также использование тепловых мостов между опорами и азотным экраном позволили получить значение  $Q_0 = 1$ Вт к гелиевому сосуду и 12 Вт к азотному экрану.

Тепловая нагрузка, определяемая циклом ускорителя, складывается из динамических тепловыделений в обмотке, тепловыделений в стенках пучковой трубы, гистерезисных тепловыделений в ярме, тепловыделений в бандаже от вихревых потоков, тепловыделений, обусловленных синхротронным излучением, и тепловыделения вследствие потерь частиц. Расчет значений этих величин является самостоятельной задачей. Здесь следует отметить, что относительная и абсолютная величина данных тепловыделений во многом зависит от режимов работы ускорителя. Так для коллайдеров тепловыделения, связанные с изменением магнитного поля, малы по сравнению со статическими теплопритоками.

В табл. 2-1 приведены значения теплопритоков и тепловыделений для СП-магнита УНК.

Таблица 2-1.

**Тепловыделения и теплопритоки в 6-метровом СП-диполе УНК (Вт).**

Статический теплоприток	4,5 К	80 К
Механические опоры	1	12
Экранно-вакуумная изоляция	0,6	15
Патрубок предохранительного клапана	0,1	4
Электрические провода	0,3	0,4
Тепловыделения от вихревых токов в бандаже	0,2	-
Гистерезисные тепловыделения в ярме	0,9	-
Тепловыделения в стенках камеры ионпровода	1,0	-
Динамические тепловыделения в обмотке	3,8	-
Суммарная тепловая нагрузка	7,9	31,4

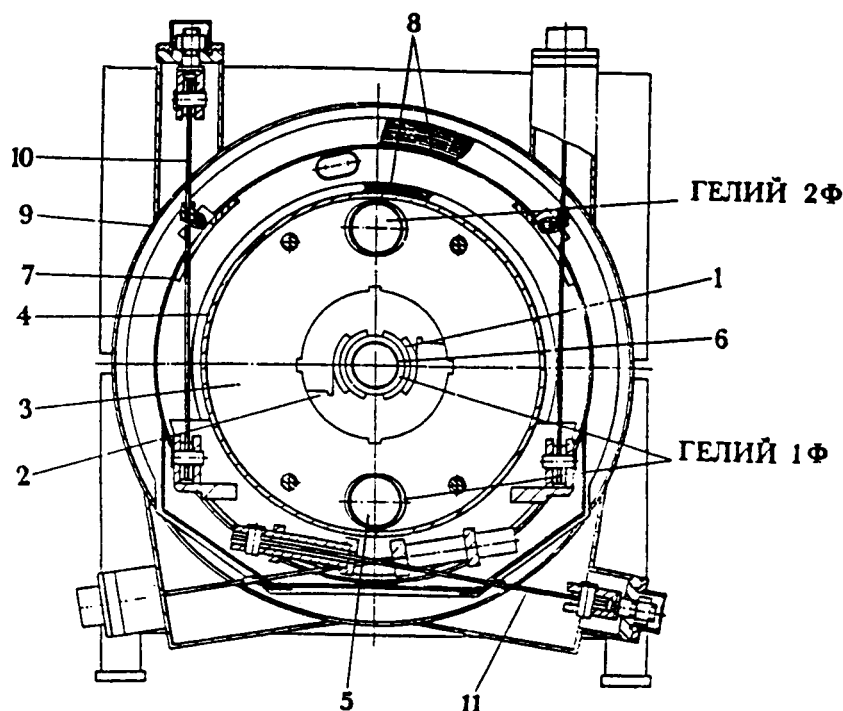
Из табл.2-1 следует, что наибольшая тепловая нагрузка при гелиевой температуре 3,8 Вт приходится на сверхпроводящую обмотку, причем ~ 80% данных тепловыделений имеют место в первом слое, обращенном к вакуумной камере, в которой тепловыделения имеют второе по величине значение. Вот почему в СП-магните необходимо организовать проток жидкого гелия между вакуумной камерой и СП-обмоткой.

Наибольшая составляющая тепловыделений — 5,9 Вт из 7,9 Вт — обусловлена динамическим циклом УНК. Поэтому в данном случае нецелесообразно стре-



миться к снижению статических теплопритоков за счет усложнения конструкции магнита. Однако в коллайдерах, где отсутствует быстроизменяющееся магнитное поле, снижению статических теплопритоков уделяется особое внимание. Плотность теплового потока к жидкому гелию очень незначительна (менее  $10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>), поэтому разница температур между СП-обмоткой и жидким гелием несущественна и в дальнейших расчетах может не учитываться.

На рис. 2.1 приведено поперечное сечение СП-диполя УНК. Тепло от обмотки и ионпровода снимается специально организованным потоком однофазного гелия, тепловыделения в бандаже — потоками однофазного и двухфазного гелия.



Р и с. 2-1. Поперечное сечение модели СП-диполя с холодным магнитным экраном в сборе с прокачным криостатом: 1 — обмотка; 2 — бандаж; 3 — магнитный экран; 4 — оболочка гелиевого объема; 5 — труба двухфазного гелия; 6 — ионпровод; 7 — азотный экран; 8 — супер-изоляция; 9 — вакуумный кожух; 10 — подвески; 11 — растяжки.

Применение однофазного гелия обеспечивает стабильное охлаждение СП-обмотки и ионпровода и предусматривает последовательное соединение по гелию групп магнитов. Количество групп и магнитов в группе тесно связано со схемой электрического питания магнитов.

В проекте УНК все СП-магниты разбиты на 24 самостоятельные цепочки, примерно по 110 магнитов в каждой цепочке. С учетом того, что квадруполь с корректирующими катушками и аварийными тоководами по тепловой нагрузке

примерно равен диполю, определен тепловой бюджет цепочки магнитов (табл.2-2).

Таблица 2-2.

**Тепловая нагрузка цепочки СП–магнитов и кольцевого СП–магнита в целом.**

Составляющие тепловой нагрузки	Тепловая нагрузка, Вт	
	T=4,5 К	T=80 К
110 магнитов	870	3450
Соединение магнитов, прямолинейные промежутки	40	300
Вентили и прочее	90	-
Итого на цепочку	1000	37500
Всего на СП–магниты (24 цепочки)	24000	90000
Расход гелия на охлаждение тоководов	30 г/с	

**2.2. Режимы захлаживания и отогрева**

Исследование процессов захлаживания и отогрева систем сверхпроводящих ускорителей связано как с выбором схемы оборудования системы криогенного обеспечения, так и с определением прочности элементов ускорителя при появлении в них температурных градиентов. Как показывает опыт эксплуатации действующих СП-ускорителей, при проектировании криогенной системы важно найти решения, сокращающие ремонтный период для замены вышедших из строя СП-магнитов.

В СП-ускорителях продольный размер последовательно соединенной по потоку гелия группы СП–магнитов (далее плечо магнитов) существенно больше их поперечного размера. Это позволяет с целью упрощения при определении времени захлаживания (отогрева) протяженных систем изучать только продольные тепловые процессы.

В основу анализа продольного распределения температуры в плече СП-магнитов заложены одномерные уравнения теплопроводности и гидравлики:

$$\sum_1^k [\rho_i f_i c_i(T)] \frac{\partial T}{\partial \tau} = \sum_1^k \lambda_i(T) f_{\lambda_i} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \alpha \Pi (T - T_g), \quad (2-1)$$

$$G(\tau) c_p(p, T_g) \frac{\partial T_g}{\partial z} = \alpha \Pi (T - T_g) + q_{oc}(T_0 - T_g), \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\xi \frac{\rho_g(p, T_g) [W(z)]^2}{2d_g}, \quad (2-3)$$

$$G(\tau) = \rho_g(p, T_g) f_g W(z). \quad (2-4)$$

Здесь (2-1), (2-2) — уравнения энергии для стенки и газа, (2-3), (2-4) — уравнения движения и неразрывности, обозначения общеприняты. На основе признака одномерности теплопроводность в поперечном направлении принята бесконечной.

Система уравнений (2-1)÷(2-4) решалась численно с использованием неявной схемы для уравнения (2-1) и метода Рунге-Кутты для остальных уравнений.

По данной методике был выполнен расчет режимов захлаживания и отогрева СП-диполей УНК с холодным ярмом для двух технологических периодов: планового, когда захлаживаются все магниты УНК, и ремонтного, когда отогревается и захлаживается только та группа магнитов, в которой находится некачественный магнит.

Плановый период захлаживания рассчитывался для двух этапов: захлаживание от 300 до 80 К и от 80 до 4,5 К. Расчетное время этого периода около 8 суток.

Исходя из структуры УНК, ремонтная группа выбрана из 110 магнитов, т.е. из одного плеча длиной 680 м. С учетом расходов и давлений, которые может обеспечить в ремонтный период система криогенного обеспечения УНК, получены расчетные профили температур по длине плеча СП-магнитов (рис. 2 - 3).

Из рис. 2-3 видно, что режим захлаживания характеризуется большей эффективностью по сравнению с отогревом (длина температурной волны меньше), что связано с особенностью зависимости теплоемкости материала от температуры. С целью обеспечения приемлемого времени ремонтного периода плечо магнитов разбивается по гелиевому потоку на 4 участка в режиме отогрева и на 2 участка в режиме захлаживания. Без учета поперечного распределения температур расчетное время отогрева с суммарным расходом через плечо  $G = 440$  г/с и захлаживания с  $G = 280$  г/с составит около 40 часов для каждого режима.

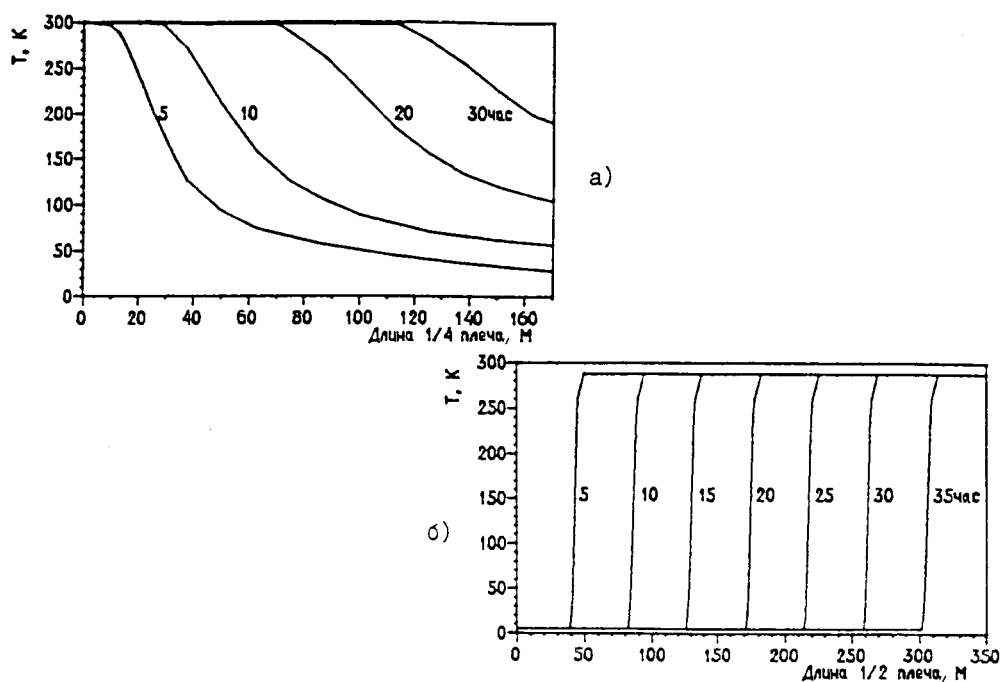
### **2.3. Режим перехода сверхпроводящих магнитов в нормальное состояние**

При эксплуатации СП-ускорителей возможны ситуации, при которых отдельные магниты или группы магнитов переходят в нормальное состояние (квенч-процесс). Такие ситуации наиболее вероятны для пуска наладочного периода в первые годы работы ускорителя.

Даже если во время перехода магнита в нормальное состояние включается система защиты, предусматривающая вывод запасенной энергии на внешние гасящие сопротивления, температура СП-обмотки быстро поднимается до 80 К. В случае некачественной работы системы защиты возможен нагрев обмотки и до 200 К.

Отсюда следует, что в любом случае в процессе квенча из-за испарения гелия давление в криостате магнита повышается.

Задачей криогенной системы СП-ускорителя является обеспечение неразрушения криостатов магнита в процессе квенча, а также эвакуация образовавшегося газообразного гелия без потерь в окружающую среду.



Р и с. 2-2. Температурные поля в плече УНК при отогреве (а) и захлаживании (б) в ремонтном периоде. Расходы гелия через 1 участок магнитов при отогреве — 110 г/с, при захлаживании — 140 г/с.

## 2.4. Обобщенные требования к криогенным системам сверхпроводящего ускорителя

На основании рассмотренных выше режимов сформулированы следующие требования к криогенным системам СП-ускорителей:

- Криогенная система должна обеспечить требуемыми температурными режимами кольцевой СП-магнит достаточно большой протяженности (для проекта УНК — более 20 км).

- Надежность криогенной системы должна быть высокой, время простоя по её вине не должно превышать времени простоя из-за любой другой системы.

- Криогенная система должна обладать высокой эффективностью, чтобы затраты на производство холода были минимальными.

- Затраты на эксплуатацию криогенной системы должны быть минимизированы также за счет высокой автоматизации.

- Криогенная система должна обеспечивать не только стационарный режим ускорения, но и режимы захлаживания, отогрева, ремонта СП-магнита, режим перехода магнитов в нормальное состояние. При этом время нестационарных режимов должно быть минимизировано.

### **3. Концептуальные основы криогенной системы сверхпроводящего ускорителя**

Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [1, 3, 4, 6 - 9, 14, 25, 29, 32].

#### **3.4. Криогеника сверхпроводящей кольцевой системы**

Под термином “криогеника сверхпроводящей кольцевой системы” в дальнейшем будет пониматься та часть криогенной системы, которая охлаждает непосредственно элементы СП-магнита: ионопровод, СП-обмотку, бандаж, экраны и опоры. Наиболее сложная часть криогеники СП-магнита — гелиевая.

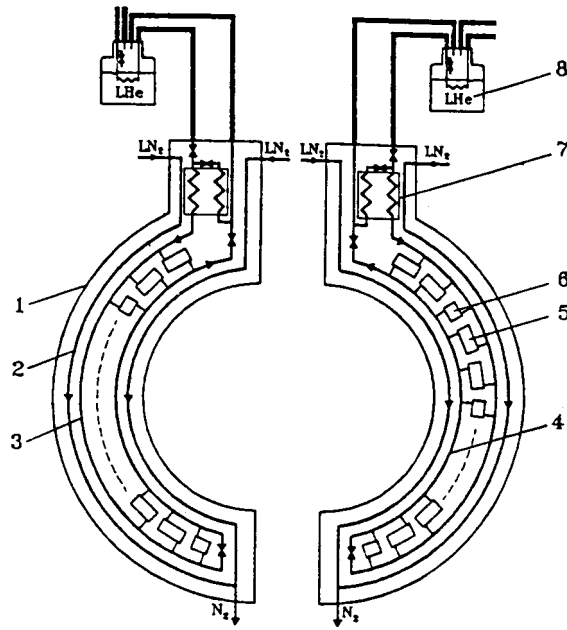
К настоящему моменту сложились три системы криогеники СП-магнита. Первая внедрена в ОИЯИ на ускорителе Нуклотрон и является примером использования непосредственно потока двухфазного гелия для криостатирования СП-обмотки. Кольцевой магнит разбит на 2 части, каждая из которых в отношении криогеники является самостоятельным звеном (рис. 3-1).

Жидкий гелий от внешней криогенной системы через коллайдер 3 подается на вход каждого магнита (всего в Нуклотроне 160 СП-диполей и квадруполей). Проходя через обмотку магнита и охлаждая ее, жидкий гелий превращается в двухфазный с содержанием пара на выходе из обмотки 0,35. Далее этот поток охлаждает железное ярмо магнита, после чего с паросодержанием 0,9 отводится в коллектор 4, соединяющий кольцевой СП-магнит с внешней криогенной системой. В этой схеме привлекают относительная простота исполнения и равномерная температура по длине обмотки, определяемая только давлением кипящего гелия.

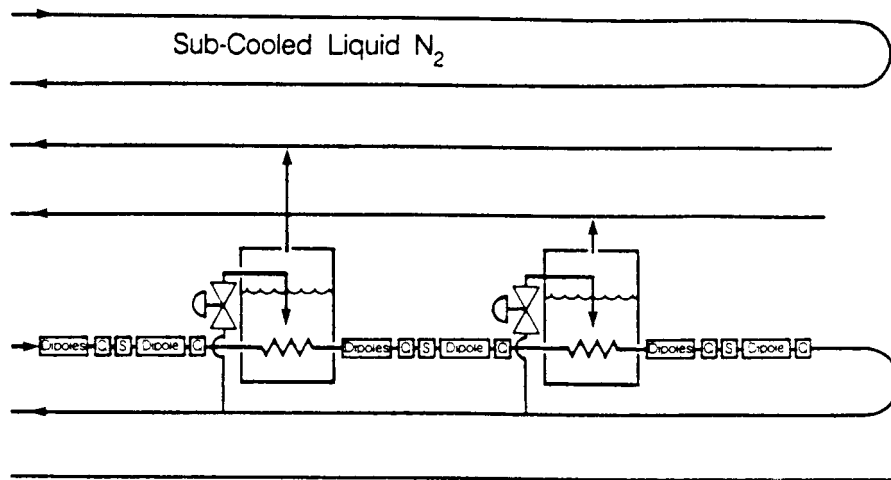
Вполне вероятно, что после детального изучения особенностей потоков двухфазного гелия подобные схемы могут найти применение и в крупных ускорителях с числом диполей и квадруполей в несколько тысяч.

Вторая система криогеники СП-магнита применяется в проектах SSC и LHC и предназначена для криостатирования СП-обмоток коллайдера. Как указывалось в главе 2, в этом случае отсутствуют мощные тепловыделения от динамического цикла ускорителя. В конструкциях магнитов предусмотрена сложная система опор и подвесок, внедрены многочисленные экраны при разных уровнях температур, т.е. сделано все для того, чтобы снизить теплопритоки непосредственно к СП-обмотке.

В результате теплопритоки к обмотке в коллайдерах в сотни раз меньше, чем теплопритоки и тепловыделения в ускорителях. Поэтому коллайдерная схема криостатирования СП-обмотки достаточно проста (рис. 3-2).



Р и с .3-1. Схема криостатирования СП-магнита НУКЛОТРОНа.  
 1— вакуумный кожух; 2 — теплозащитный экран; 3 — коллектор прямого потока; 4 — коллектор обратного потока; 5 — дипольный магнит; 6 — квадрупольный магнит; 7 — переохладитель; 8 — сепаратор.



Р и с. 3-2. Схема криостатирования СП-магнитов SSC.

Однофазный гелий охлаждает группу СП-обмоток, затем поступает в специальные переохладители, после которых направляется в следующую группу магнитов.

Наиболее сложной выглядит криогеника СП-кольцевой системы для протяженных ускорителей с динамическими тепловыделениями.

В результате проработок проектов Теватрон, ГЕРА, УНК для подобных случаев выбрана схема с одновременным использованием в СП-магните потоков однофазного и двухфазного гелия (рис. 3-3).

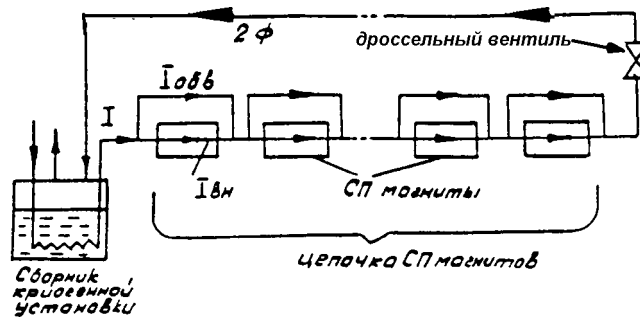
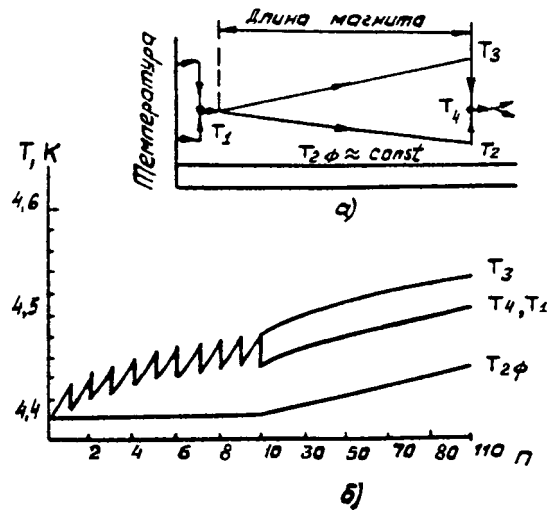


Рис. 3-3. Схема криостатирования СП-магнитов УНК.

Гелиевый однофазный поток 1, поступающий из криогенной гелиевой установки, на входе в каждый магнит разделяется на два потока —  $I_{вн}$  и  $I_{обв}$ . Поток  $I_{вн}$ , омывая СП-обмотку магнита, отводит тепло от нее, но при этом температура гелия возрастает на величину  $\Delta T$ . Поток  $I_{обв}$  проходит по обводным каналам вне обмотки магнита и охлаждается потоком двухфазного гелия 2ф. После каждого магнита потоки  $I_{вн}$  и  $I_{обв}$  смешиваются, в результате чего температура потока  $I_{вн}$  на входе в последующий магнит ниже, чем на выходе из предыдущего. После последнего магнита цепочки однофазный поток, проходя через дроссельный вентиль, превращается в двухфазный 2ф. Поток 2ф проходит последовательно через все криостаты цепочки, где охлаждает поток  $I_{обв}$ , затем поступает в криогенную установку, где вновь превращается в поток однофазного гелия.

Температурный режим сверхпроводящей обмотки определяется мощностью тепловыделений в ней, коэффициентом теплопередачи от обмотки к потоку гелия  $I_{вн}$  и температурой однофазного потока  $I_{вн}$ . В свою очередь, температура потока  $I_{вн}$  зависит от тепловой нагрузки и параметров потоков  $I_{обв}$  и 2ф.

На рис. 3-4а приведено изменение температур гелиевых потоков в пределах одного из магнитов в составе цепочки. Температура двухфазного потока  $T_{2ф}$  определяется давлением в сборнике криогенной установки (рис. 3-3) и перепадом давления по тракту двухфазного гелия. Для цепочки из 110 магнитов УНК ожидаемое изменение  $T_{2ф}$  не превышает 0,05 К по всей длине цепочки. Поэтому в пределах одного магнита температуру  $T_{2ф}$  можно принять постоянной. Понижение температуры обводного потока  $I_{обв}$  от  $T_1$  до  $T_2$  (рис. 3-4а) определяется коэффициентом теплопередачи между потоками  $I_{обв}$  и 2ф и поверхностью теплообмена между этими потоками. Повышение температуры однофазного потока  $I_{вн}$  от  $T_1$  до  $T_3$  зависит от величины воспринимаемой им тепловой нагрузки и от расхода потока. В магните УНК поток  $I_{вн}$  нагревается за счет динамических тепловыделений в обмотке и тепловыделений в вакуумной камере ионопровода (табл. 2-1). Наибольшее значение температура потока  $I_{вн}$  имеет на выходе из магнита. Именно по этой температуре  $T_3$  следует определять температурный режим СП-обмотки.



Р и с. 3-4. Изменение температур потоков гелия в пределах одного магнита (а) и по длине цепочки (б):  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$  — температура однофазного потока,  $T_{2\phi}$  — температура двухфазного потока.

На выходе из магнита однофазные потоки с температурами  $T_2$  и  $T_3$  смешиваются и после смешения имеют температуру  $T_4$ , с которой однофазный поток поступает в следующий магнит цепочки, где вновь разделяется на потоки  $I_{вн}$  и  $I_{обв}$ .

На рис. 3-4б приведены графики изменения температур  $T_1$ ,  $T_{2\phi}$ ,  $T_3$  и  $T_4$  по длине цепочки СП-магнитов. Графики получены для следующих условий: температура двухфазного потока на входе в сборник криогенной установки (рис. 3-3) — 4,4 К, удельная холодопроизводительность криогенной установки — 17 кДж/кг. Из рис. 3-4 видно, что максимальная температура  $T_3$  потока однофазного гелия  $I_{вн}$  будет иметь место на выходе из последнего магнита цепочки. Её значение для магнитов УНК составляет 4,55 К.

Разница температур  $\Delta T = (4,55 - 4,4) \text{ К} = 0,15 \text{ К}$  сравнима с разницей температур по длине одной ячейки магнитов в криогенной схеме коллайдера (рис. 3-2). Таким образом, схема на рис. 3-4 позволяет добиться такой же интенсивности охлаждения СП-обмотки, как и в коллайдере, где теплопритоки и тепловыделения в сотни раз меньше, чем в магнитах УНК. С другой стороны, несмотря на использование в СП-магните двухфазного потока, схема на рис. 3-3 является стабильной, устойчивой. Действительно, непосредственно для охлаждения СП-обмотки используется стабильный однофазный поток (рис. 2-1). Двухфазный поток протекает в специальных трубах (рис. 2-1), где отнимает тепло от однофазного. И даже если на каком-то участке двухфазного тракта возникнут неустойчивости, они вследствие большой поверхности охлаждения и незначительных удельных тепловых нагрузок при теплообмене никак не повлияют на эффективность теплообмена, а следовательно, и на эффективность криостатирования.



### 3.2. Системы криообеспечения

Здесь под системой криообеспечения понимается вся криотехника, обеспечивающая холодом систему криостатирования СП-кольцевого магнита, включая холод для экранов, применяемых в СП-магнитах.

Как правило, температурные уровни холода определяются при создании ускорителя и СП-магнита. При этом, конечно, учитываются современные и перспективные уровни развития технической сверхпроводимости и криогенной техники.

Наибольшее количество температурных уровней заложено в ЛНС: 1,9; 4,5 К и 50÷70 К. В остальных ускорителях, включая существующие проекты, как правило, обходятся двумя температурными уровнями: 4,4 и 50÷80 К.

В качестве хладагента для температурного уровня 1,9— 4,5 К используется гелий, единственный газ, который может быть рабочим телом в данной области температур. В ускорителе ГЕРА и проекте ЛНС гелий используется также и для охлаждения экранов при  $T=50\div70$  К. В ускорителях Теватрон, Нуклотрон и УНК для охлаждения экранов применяется жидкий азот, что объясняется скорее всего технологическими традициями, сложившимися в регионах расположения указанных ускорителей.

При определении холодопроизводительности системы криообеспечения необходимо учитывать не только тепловую нагрузку в стационарном режиме ускорения, но и нагрузки в режимах охлаждения, отогрева, быстрой реализации ремонтного периода и другие факторы, которые могут быть присущи каждому конкретному типу ускорителя.

Например, для ускорителей с динамическим магнитным циклом имеется понятие крейсерского режима криостатирования без пучка заряженных частиц при отсутствии динамического магнитного цикла. В таком режиме для УНК (табл. 2-1 и 2-2) нагрузка на криогенную систему снижается с 24000 Вт до 8400 Вт, т.е. почти в три раза. В коллайдерах изменение тепловой нагрузки при переходе на крейсерский режим, как правило, незначительно, и его можно не учитывать.

Структурная схема системы криообеспечения существенно зависит и от размеров ускорителя. Для небольшого по размерам ускорителя типа Нуклотрон целесообразно все криогенное оборудование скомпоновать в одном месте и криопродукты распределять по соответствующим трубопроводам. По всей видимости, пределом реализации такого решения является длина кольцевого ускорителя до 6 км (ускоритель ГЕРА). Но такой же по размерам ускоритель Теватрон уже имеет распределенную систему рефрижераторных станций и единый гелиевый ожижитель. Все элементы системы криообеспечения связаны в единую систему соответствующими трубопроводами. Однозначно, что подобными разветвленными системами невозможно управлять без автоматизированной системы управления.

Надежность системы криогенного обеспечения достигается несколькими способами.

Применение машин и аппаратов с повышенным ресурсом надежности и длительным временем работы. Это прежде всего относится к использованию в качестве компримирующих машин винтовых компрессоров и в качестве низкотемпературных расширительных устройств турбодетандеров, т.е. полная замена

механизмов с возвратно-поступательным движением (поршневые компрессоры и поршневые детандеры). Практически во всех вышеописанных ускорителях применяется данное решение.

Резервирование оборудования. Самое простое решение — полное дублирование всей системы криогенного обеспечения, но это нецелесообразно как по стоимости, так и конструктивно. Поэтому, как правило, резервируются прежде всего компрессоры. Степень резервирования определяется на основе анализа ресурса работы и данных по безотказной работе резервируемого оборудования. При компоновке системы криогенного обеспечения в едином месте целесообразно резервирование и непосредственно холодопроизводящих установок. Такое решение принято в ускорителях ГЕРА и Нуклотрон, где два постоянно работающих гелиевых рефрижератора резервируются третьим.

Схемные решения позволяют повысить надежность в тех случаях, где резервирование невозможно или нецелесообразно. Например, при разветвленной схеме системы криогенного обеспечения каждый рефрижератор обеспечивает свою достаточно протяженную цепочку магнитов. В этом случае резервирование рефрижераторов достигло бы фактора 1,5-2, что экономически нецелесообразно. В данном случае схема системы криогенного обеспечения строится таким образом, что при выходе из строя рефрижератора функции подачи холода на цепочку магнитов берут на себя рефрижераторы соседних магнитов (УНК, SSC). Еще одно схемное решение целесообразно для глубоко расположенных под землей тоннелей ускорителей. Непосредственно в тоннеле располагается только часть криогенного оборудования, без движущихся агрегатов, обладающая высокой степенью надежности. Остальное оборудование выносится на поверхность (УНК, LHC, SSC).

### 3.3. Обеспечение нестационарных режимов работы

Режимы захлаживания, отогрева, ремонтного периода, квенча обеспечивают совместной работой как криогеники СП-магнита, так и системы криогенного обеспечения.

Практически для всех протяженных ускорителей вводится так называемый квенч-коллектор достаточно большого объема. Этот коллектор также используется и при захлаживании, и при отогреве. Основная цель квенч-коллектора — принимать гелий, сбрасываемый из СП-магнитов, и передавать его в систему криогенного обеспечения.

Для быстрого проведения всех вышеуказанных режимов используется все соответствующее резервное оборудование системы криогенного обеспечения. При этом для того, чтобы криогеника кольцевого СП-магнита результативно приняла повышенный расход криопродуктов, единичные протяженные цепочки разбиваются на ряд самостоятельных, что существенно снижает гидравлическое сопротивление потоков криопродуктов. С этой целью используются специализированные вентили, соединенные с квенч-коллектором, либо предохранительные клапаны, предназначенные для эвакуации гелия из СП-магнитов во время квенч-процесса.

## 4. Исследование элементов криогенной системы

Для окончательного выбора конструкции сверхпроводящего магнита УНК, элементов системы криогенного обеспечения, а также собственно схемы криогенной системы УНК был выполнен большой объем научно-исследовательских работ. Здесь дано описание некоторых из тех исследований, которые, по мнению автора, оказали существенное влияние на принимаемые решения.

Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [2, 11, 13, 17, 21, 23, 24, 26-28, 30, 32, 33-36]

### 4.1. Теплофизическая модель сверхпроводящего магнита

При создании стенда калибровки серийных СП-магнитов стояла задача обеспечения максимального темпа испытаний. Для этого потребовалось рассчитывать режимы захлаживания и отогрева одиночного магнита при соизмеримых по времени продольных и поперечных тепловых процессах. Кроме того, при реализации режимов захлаживания и отогрева из-за появляющихся температурных градиентов в трубах гелиевого криостата развиваются термомеханические напряжения. Величины этих напряжений могут превысить допустимые, что, в свою очередь, приведет к разрушению криостата. Для решения этих задач была разработана методика расчета нестандартных трехмерных температурных полей, а также проведены экспериментальные исследования.

В основу расчетной методики были положены двумерное уравнение теплопроводности в твердом теле и одномерные уравнения энергии, движения и неразрывности для гелиевых потоков:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + q_v, \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial T_{gi}}{\partial z} = \frac{\alpha_i}{G_i C_p(P_i T_{gi})} \int_{\Omega} [T(\Omega_i) - T_{gi}] d\Omega, \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial p_i}{\partial z} = -\xi_i \frac{\rho_g(p_i, T_{gi}) w_i^2}{2d_{gi}}, \quad (4-3)$$

$$G_i = \rho_g \cdot w_i f_{gi} \quad (4-4)$$

Здесь  $\rho$  — плотность;  $f$  — площадь поперечного сечения канала охлаждения;  $C$  и  $C_p$  — теплоемкости стенки и хладагента;  $T$  и  $T_g$  — температуры стенки и хладагента;  $p$  — давление;  $\lambda$  — теплопроводность;  $\tau$  — время;  $z$  — продольная координата;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $G$  — расход;  $\Omega$  — периметр теплообмена;  $\xi$  — коэффициент гидравлических потерь на трение;  $d_j$  — эквивалентный диаметр;  $w$  — скорость хладагента;  $q_v$  — объемный источник тепловыделений;  $i$  — индекс канала.

Уравнение (4-1) описывает двумерный процесс в плоскости  $XU$ , перпендикулярной продольной оси магнита, а член  $q_v$  представляет собой изменение продольного теплового потока на участке  $\Delta Z$ :

$$q_v = \frac{\partial}{\partial z} q_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right]. \quad (4-5)$$

Граничные условия на поверхности каналов охлаждения

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Omega_i} = -\alpha_i (T - T_{gi}), \quad (4-6)$$

на торцах магнита

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\alpha_0 (T - T_{gex}), \quad (4-7)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = \alpha_L (T - T_{gвых}), \quad (4-8)$$

на поверхности гелиевой обечайки и на внутренней поверхности апертурной трубы

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (4-9)$$

где  $L$  — длина магнита;  $T_{вх}$  и  $T_{вых}$  — температуры газа на входе и на выходе из магнита.

Термомеханические напряжения в трубах гелиевого криостата рассчитывались по формуле

$$\sigma_K = (\Delta l_K - \Delta l_{\sigma}) E / L, \quad (4-10)$$

где  $\Delta l = \int_0^L \bar{\beta}(T)[T_0 - T(Z)]dZ$  — удлинение труб и гелиевой обечайки криостата;  $\bar{\beta}$  — среднеинтегральный температурный коэффициент линейного расширения от температуры окружающей среды  $T_0$  до текущей;  $E$  — модуль упругости.

Уравнения (4-1)—(4-10) решались численно. В уравнении (4-1) использовался метод конечных элементов, при определении  $q_v$  — метод контрольного объема, а в уравнениях (4-2) и (4-3) — метод Рунге-Кутты.

Для проверки расчетной модели и отработки режимов захлаживания и отогрева одиночного СП-магнита был изготовлен полномасштабный дипольный магнит, в котором установлены более 200 температурных датчиков, — теплофизическая модель СП-магнита. Датчики устанавливались в обмоточном блоке, ярье, каналах охлаждения, на апертурной трубе, на поверхности гелиевой обечайки и на азотном экране.

На рис. 4-1 показано одно из поперечных сечений с наибольшим количеством датчиков. Всего вдоль магнита было 14 сечений с датчиками. В качестве датчиков применялись резисторы ТВО-0,125.

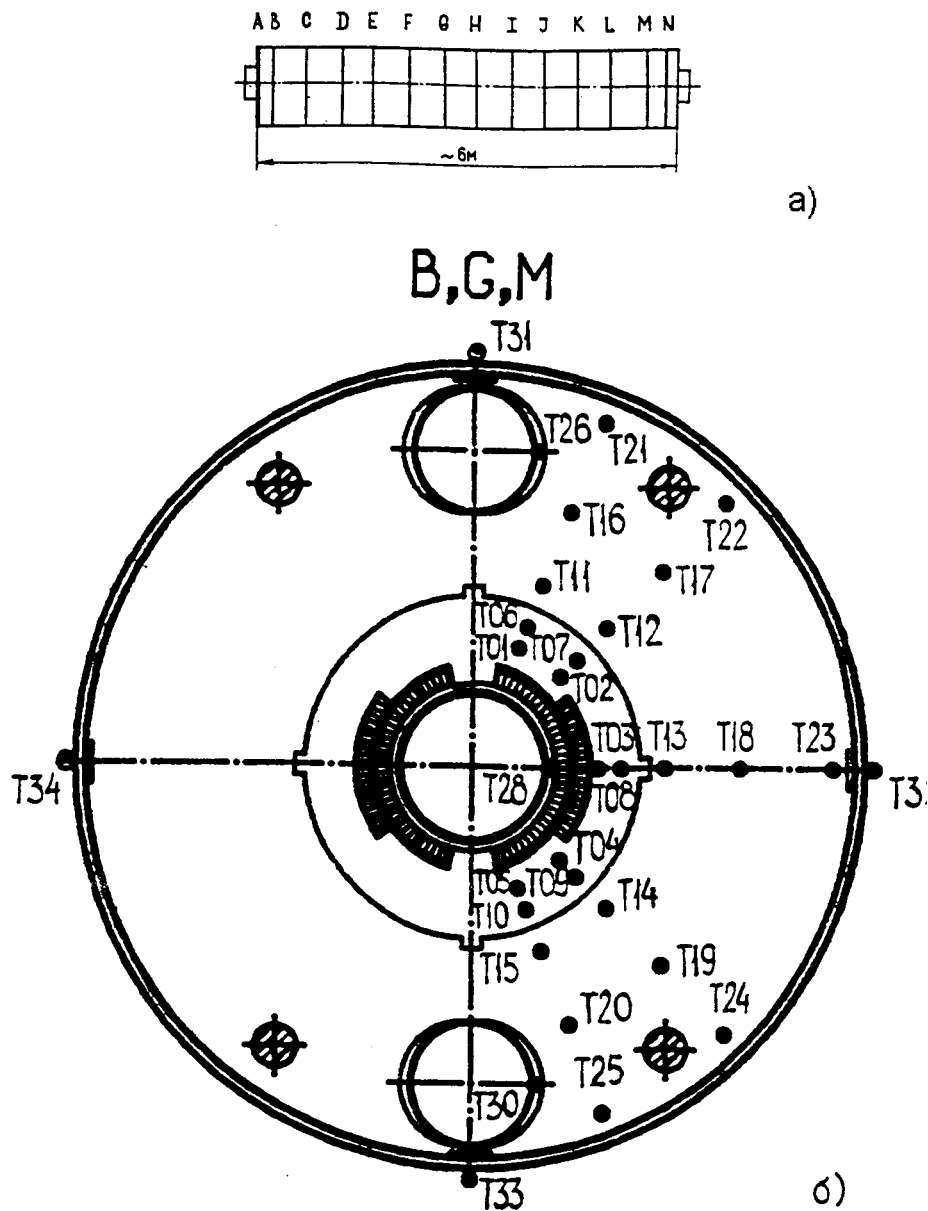
Процесс захлаживания дипольного магнита осуществлялся в два этапа: от 290 до 80 К и от 80 до 4,5 К. Гелий направлялся только в каналы прямого потока.

Сначала исследовался магнит с жестко связанной с фланцами гелиевого криостата апертурной трубой. При этом уже в начале процесса развившиеся в апертурной трубе термомеханические напряжения достигали принятых в эксперименте допустимых величин  $[\sigma] \leq 0,6\sigma_T$ , где  $\sigma_T$  — предел текучести, что потребовало регулировки режима охлаждения, а именно, снижения расхода гелия до величины 0,010 кг/с. Общее время захлаживания магнита составило более 12 часов.

В режиме отогрева трубы подвергались воздействию сжимающих напряжений, т.е. “работали” на устойчивость, и из-за малой величины допустимых напряжений  $[\sigma] \leq 5$  кгс/мм<sup>2</sup> в апертурной трубе продолжительность отогрева магнита превысила 24 часа.

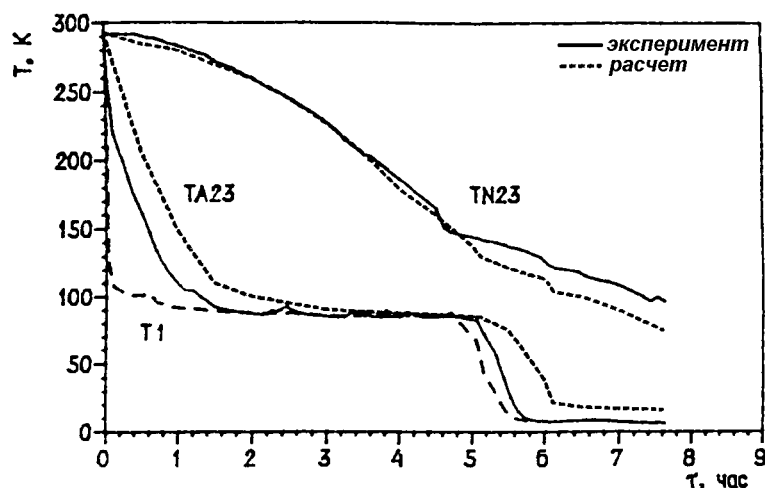
После этого была устранена жесткая связь апертурной трубы с фланцами гелиевой обечайки криостата, и определяющими для режимов стали напряжения в трубах двухфазного гелия, что позволило увеличить расход и сократить время захлаживания диполя до 8,5 часов, а отогрева — до 10 часов.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных двухэтапного процесса захлаживания диполя для этого случая, приведено на рис. 4-2. На первом этапе расход газообразного гелия составлял около 0,035 кг/с, а на втором — 0,010÷0,014 кг/с.



Р и с. 4-1. Расположение температурных датчиков с СП-диполе:  
а) продольное; б) в поперечных сечениях.

Особенностью процесса является существенное влияние теплоотдачи с торцевых поверхностей ярма магнита на формирование продольных и поперечных температурных полей. Причем продольный перепад температур по магниту (рис. 4-3а) увеличивался, а радиальный (рис. 4-3б) и азимутальный (рис. 4-3в) — уменьшались. Максимальный перепад температур вдоль магнита составил около 180 К, а по радиусу и углу — 20 и 40 К.

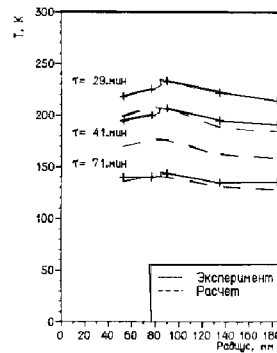
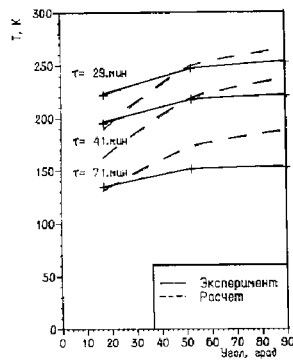
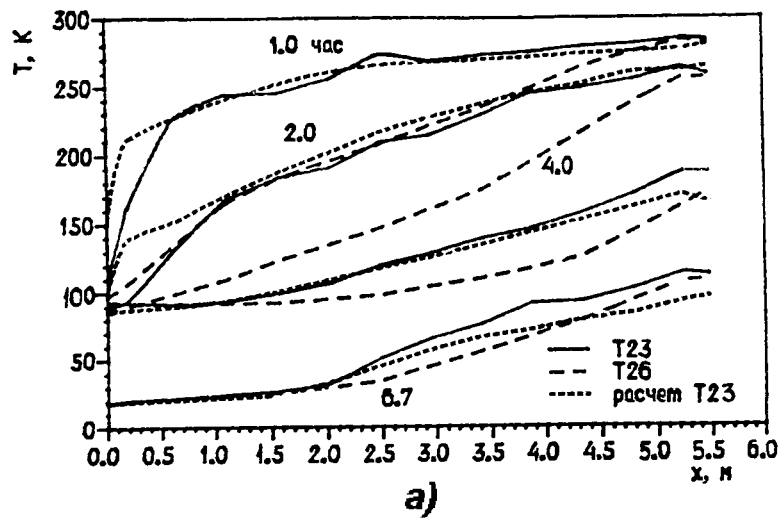


Р и с. 4-2. Изменение во времени измеренных и расчетных температур для точек T23 (см. рис .4-1) первого (А) и последнего (N) сечения СП-диполя в режиме захлаживания. T1 — температура потока на входе в диполь.

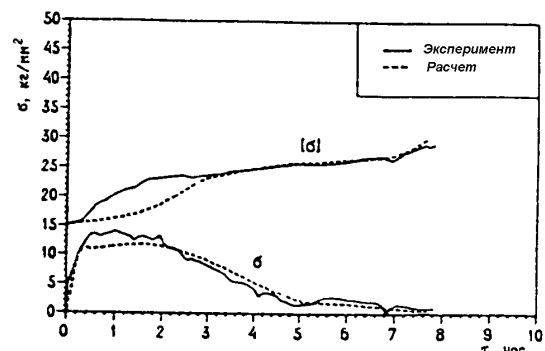
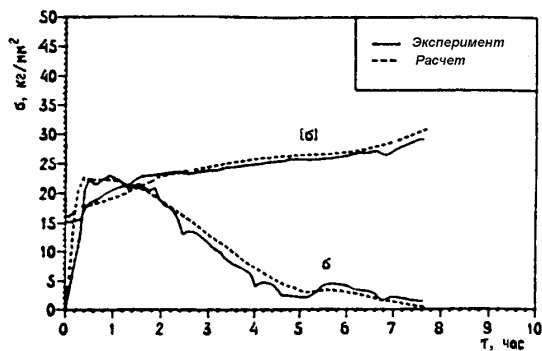
На рис. 4.4 представлены результаты численного расчета по уравнению (4-10) термомеханических напряжений в трубах гелиевого криостата в сравнении с напряжениями, определенными по экспериментально измеренным температурам, причем для апертурной трубы показаны возможные напряжения, так как она не имела жесткой связи с фланцами криостата. Видно, что при циркуляции гелия только по каналам прямого потока напряжения в апертурной трубе превышают допустимые.

Таким образом, устранение жесткой связи апертурной трубы с фланцами гелиевой обечайки криостата позволило увеличить расход хладагента через магнит до 0,035 кг/с, что практически соответствует значениям расхода для режимов стенда серийной калибровки СП-магнитов УНК. При этом термомеханические напряжения в трубах двухфазного потока будут оставаться ниже допустимых значений.

Удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных, полученных с помощью созданной методики, позволило подробно анализировать различные режимы захлаживания и отогрева СП-магнитов как для стенда серийной калибровки, так и для плеча УНК.



Р и с. 4-3. Измеренные и расчетные температурные распределения при захлаживании диполя: а — продольные для точек T23 (рис.4-1); б — по радиусу на угле  $75^\circ$ ,  $z = 0,18$  м; в — по углу на радиусе 135 мм,  $z = 0,18$  м.



Р и с. 4-4. Изменение термомеханических напряжений в апертурной трубе (а) криостата и в трубе двухфазного потока (б) в режиме захлаживания.



## 4.2. Исследование холодопроизводящих установок

Серийные гелиевые холодопроизводящие установки типа КГУ-400/4,5, используемые в стендах ИФВЭ, создавались для криостатирования объектов с постоянными тепловыделениями.

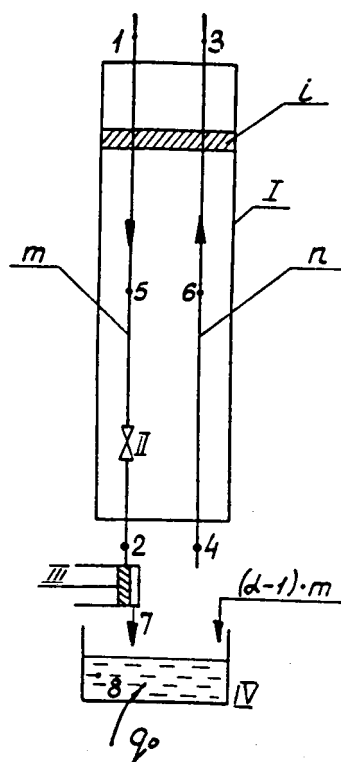
Исследование сверхпроводящих магнитов и различных элементов УНК должно было производиться не только при стационарных тепловыделениях и теплопритоках, но и при импульсных нагрузках различного характера. Поэтому была поставлена задача исследовать установку КГУ-400/4,5 в нештатных режимах, в которые входили как режимы с изменяющейся нагрузкой, так и различные аварийные ситуации.

### Основные результаты проведенных исследований:

1. Серийно выпускаемые установки способны воспринимать импульсную нагрузку.
2. При длительности импульса  $\tau \leq 1$  мин среднее значение импульсных тепловыделений равно холодопроизводительности установки. При  $\tau > 1$  мин среднее значение импульсной нагрузки уменьшается по сравнению с холодопроизводительностью. Составлены графики для определения мощности импульсной нагрузки.
3. Надежность работы серийно выпускаемых установок при выходе из строя детандеров может быть значительно повышена путем перевода таких установок в спутниковый режим работы (режим с введением в цикл добавочного потока жидкого гелия).

Подобная работа была проведена А.Н.Агаповым с сотрудниками на базе крупной серийной установки КГУ-1600/4,5. Результат повышения надежности системы криогенного обеспечения путем перевода криогенных установок в спутниковый режим был заложен в проекты Нуклотрон и SSC.

При создании проекта системы криогенного обеспечения УНК необходимо было найти оптимальные параметры для спутниковых рефрижераторов. Такая работа была выполнена с учетом уравнений энергетического баланса и условий теплопередачи в теплообменнике спутника (рис. 4-5, система уравнений (4-11)).



Р и с. 4-5. Принципиальная схема криоблока спутникового рефрижератора; I — теплообменника ; II — дроссельный вентиль; III — концевой детандер; IV — испаритель; m — прямой поток; n — обратный поток.

$$\left. \begin{aligned}
 i_3 &= \frac{i_1 + \alpha \cdot i_6 - i_5}{\alpha}, \\
 i_5 &= \frac{i_3 + \alpha \cdot i_1 - i_5}{\alpha}, \\
 i_2 &= i_1 - \alpha(i_3 - i_4), \\
 i_7 &= i_2 - \eta_g(i_2 - i_7)_s \\
 q_0 &= \alpha(i_4 - i_8) - i_7 + i_8
 \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \eta_c^s &= \frac{q_0 |\tau_e|}{\left(\frac{e_1 - e'_3}{\eta_k}\right) + (\alpha - 1) \cdot \frac{e_s}{\eta_0}}, \\
 d_i &= (e'_i - e''_i) / q_0, \\
 d_0 &= e_s \left(\frac{1}{\eta_0} - 1\right) \cdot (\alpha - 1) / q_0, \\
 \frac{KF}{q_0} &= \frac{I}{q_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{\Delta t_i}
 \end{aligned} \right\} \quad (4-11)$$

Здесь  $i, e$  — энтальпия и эксергия в соответствующих точках цикла;  $q_0$  — холодопроизводительность цикла, отнесенная к расходу через компрессор;  $\tau_e$  — эксергетическая функция;  $\eta_c^s$  — эксергетический КПД сателлита;  $d_i$  — относительные потери эксергии в элементе цикла;  $e'_i, e''_i$  — соответственно эксергия входа и выхода из  $i$ -элемента цикла;  $e'_3$  — эксергия обратного потока при  $p_n = 1,05 \text{ Па}$  и  $T_m = 300 \text{ К}$ ;  $d_0$  — относительные потери энергии, связанные с применением оживителя;  $\frac{KF}{q_0}$  — комплекс, характеризующий габариты теплообменника для единицы удельной холодопроизводительности сателлита;  $q_i$  — удельная тепловая нагрузка в  $i$ -элементе теплообменника;  $\Delta t_i$  — среднеарифметическая разность температур в  $i$ -элементе теплообменника.

Полученные результаты анализа позволили определить параметры сателлитного рефрижератора для стенда испытаний полномасштабного СП-магнита и цепочки магнитов. Этот рефрижератор был изготовлен по техническому заданию ИФВЭ в НПО Гелиймаш, Москва, и исследование его работы показало расхождение расчета с экспериментом. При анализе экспериментальных результатов определено, что теплообменники сателлита имеют высокий температурный КПД, и в этих условиях необходимо учитывать влияние осевой теплопроводности теплообменника и ряд других факторов, таких как неравномерное распределение потоков как в прямом, так и в обратном направлениях. Наиболее существенен фактор — осевая теплопроводность теплообменника (ОТТ), которая ранее не учитывалась при расчетах.

В результате теоретического анализа и экспериментальных исследований определены значения ОТТ испытанных конструкций, составлены программы расчета сателлитных рефрижераторов с учетом значений ОТТ, после чего в криогенных организациях страны была начата разработка теплообменников с пониженным

значением ОТТ. На основе подобной разработки, выполненной в НПО Гелиймаш, в ГНЦ ИФВЭ в настоящее время создаются теплообменники с нижним температурным уровнем 1,8К для испытательного стенда в ДЕЗИ и криогенной системы для сверхпроводящего сепаратора частиц (ИФВЭ).

#### **4.3. Защита сверхпроводящих магнитов при их переходе в нормальное состояние**

Как уже указывалось, при квенч-процессе происходит резкое испарение жидкого гелия в СП-магните, в результате чего возрастает давление в криостате СП-магнита. Если не принять эффективных мер по эвакуации испарившегося гелия, рост давления может привести к разрушению гелиевого сосуда.

Первым мероприятием является выбор предельного давления для стенок гелиевого криостата и его патрубков, до которого не происходит разрушения конструкции. Предельное давление для СП-магнитов УНК определено равным 20 бар.

Второе мероприятие — создание надежной и быстродействующей конструкции предохранительного клапана (ПК).

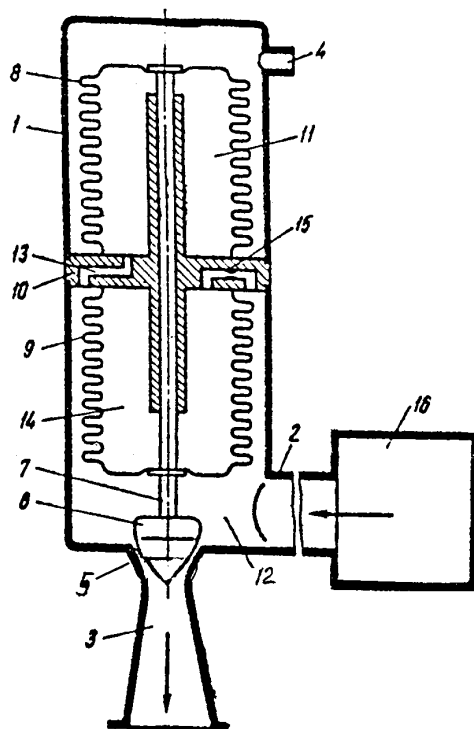
Были сформулированы следующие технические требования к ПК:

- Полное открытие клапана в течение 10 мсек в процессе квенча.
- Длительная и надежная работа при давлении в криостате СП-магнита до 20 бар и в диапазоне температур 4,5-300 К (квенч-процесс, режимы захолаживания и отогрева).
- Число срабатываний ПК до выхода из строя должно быть не менее 5000.
- Возможность быстрой замены ПК без нарушения режима криостатирования СП-магнитов.

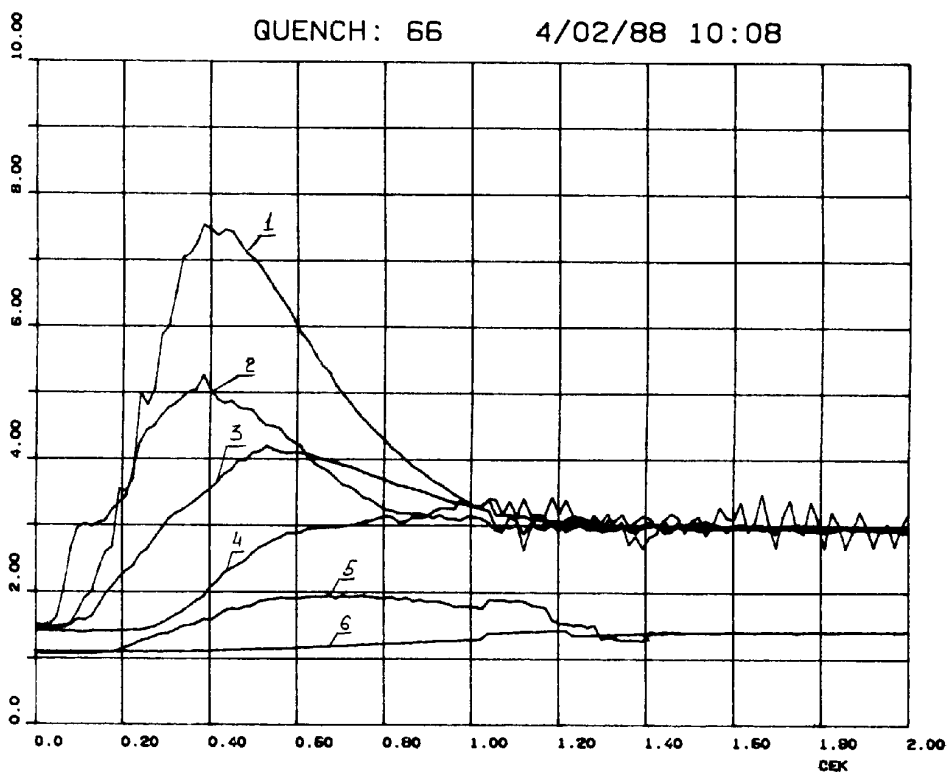
Были разработаны несколько конструкций ПК, отвечающих вышеперечисленным требованиям. Все конструкции защищены авторскими свидетельствами и патентами и успешно показали себя при испытании СП-магнитов. Одна из таких конструкций по авторскому свидетельству №1472735 приведена на рис. 4-6. Использование двух сильфонов 11 и 14 и дроссельного отверстия 15 позволило получить время полного открытия ПК менее 10 мсек. На рис. 4-7 показана временная зависимость развития давления в криостате СП-магнита и в системе эвакуации гелия.

#### **4.4. Некоторые приборы для теплофизического исследования СП- магнитов**

При теплофизических исследованиях СП-магнита возникли трудности, присущие только протяженным СП-системам. Как уже указывалось в главах 2 и 3, тепловая нагрузка на криогенную систему от одного магнита мала, но



Р и с. 4-6. Предохранительный клапан СП-магнита.



Р и с. 4-7. Давление в криостате СП-магнита (линия 1) при квенч-процессе.

гелиевый поток через один магнит выбирается исходя из необходимости криостатирования цепочки магнитов длиной несколько сотен метров при малой разнице температур на входе и выходе цепочки.

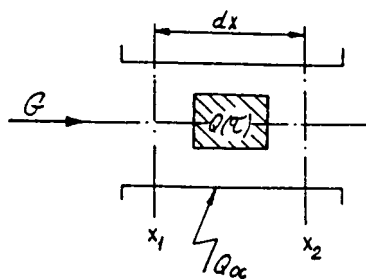
Таким образом, для того чтобы определить тепловыделения, приходящиеся на криогенные потоки в одном магните или цепочке из 4 магнитов (стенды ИФВЭ), требуется достаточно точно измерять как расходы гелиевых потоков, так и температуры потоков на входе и выходе из магнита. Известные на момент исследований СП-магнитов методики измерения температур и расходов давали при определении тепловыделений в СП-магните погрешность 100% и более. Поэтому в ИФВЭ был разработан и внедрен калориметрический метод определения тепловыделений в жидкий гелий и расходов гелия в СП-магните.

Для примера рассмотрим подобный метод измерения тепловыделений в жидкий гелий в сверхпроводящих магнитах. Потеря давления по длине одиночного 6-метрового СП-магнита длиной 6 м составляет  $\Delta p = p_2 - p_1 = 0,05 \cdot 10^5 \text{ Па}$  при абсолютном значении давления потока  $p_1 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Такое небольшое  $\Delta p$  приводит к очень незначительному изменению термодинамических свойств гелия. Поэтому в дальнейшем считаем  $p_2 = p_1$ .

Для вывода расчетных соотношений выделим в канале однофазного гелия СП-магнита участок длиной  $d_x$  с тепловыделяющим элементом мощностью  $Q(\tau)$  (рис.4-8). При постоянном расходе однофазного потока уравнение (4-12) энергии для тепловыделяющего элемента и уравнение (4-13) энергии для потока хладагента будут иметь вид

$$MC(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = Q(r) - Q_{He}(\tau) ; \quad (4-12)$$

$$m \frac{\partial H}{\partial \tau} + mw \frac{\partial H}{\partial x} = Q_{He}(\tau) + Q_{oc}(\tau) . \quad (4-13)$$



Р и с .4-8. Элементарный участок с тепловыделяющим элементом  $Q(\tau)$ .

Здесь и далее:  $M$  и  $C(T)$  — масса и теплоёмкость тепловыделяющего элемента;  $Q_{He}(\tau)$  — тепловой поток, снимаемый с поверхности элемента хладагента;  $m$  — масса хладагента в участке  $dx$ ;  $p, w, H$  — соответственно плотность,

скорость и энтальпия хладагента. Из уравнений (4-12) и (4-13) получаем выражение, описывающее процесс криостатирования тепловыделяющего элемента:

$$m \frac{\partial H}{\partial \tau} + mw \frac{\partial H}{\partial x} + MC(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = Q(\tau) + Q_{oc} \quad (4-14)$$

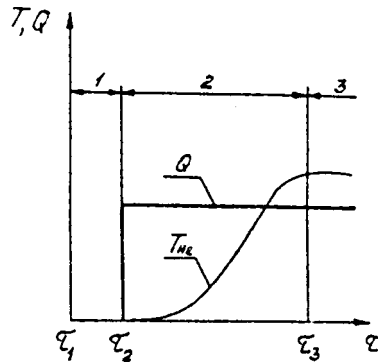
В стационарном режиме на участках 1 и 3 (рис. 4-9) все переходные процессы закончены, и система пришла к установившемуся состоянию. Тогда уравнение (4-14) будет иметь вид

$$mw \frac{dH}{dx} = Q + Q_{oc} \quad (4-15)$$

Из уравнения (4-15) получаем выражение для определения стационарной тепловой нагрузки  $Q$ :

$$Q = G \left\{ [H(x_2, \tau_3) - H(x_2, \tau_1)] - [H(x_1, \tau_3) - H(x_1, \tau_1)] \right\} - [Q_{oc}(\tau_3) - Q_{oc}(\tau_1)], \quad (4-16)$$

где  $G = mw / dx$  — массовый расход хладагента.



Р и с. 4-9. Измерение стационарных тепловыделений.

В уравнении (4-16) величина  $Q_{oc}(\tau_3) - Q_{oc}(\tau_1)$  характеризует изменение теплопритоков из окружающей среды к СП-магниту при его нагреве. В процессе измерения тепловыделений нагрев магнита не должен превышать критической температуры сверхпроводящей обмотки, т.е. по отношению к температуре окружающей среды и к температуре азотных экранов разогрев магнита относительно невелик, а следовательно, невелико и изменение теплопритоков из окружающей среды. Анализ показывает, что разность  $Q_{oc}(\tau_3) - Q_{oc}(\tau_1)$  в сотни раз меньше величины  $Q$ , поэтому в дальнейшем этой разностью можно пренебречь. Тогда уравнение (4-16) упростится:

$$Q = G \left\{ [H(x_2, \tau_3) - H(x_2, \tau_1)] - [H(x_1, \tau_3) - H(x_1, \tau_1)] \right\} \quad (4-17)$$

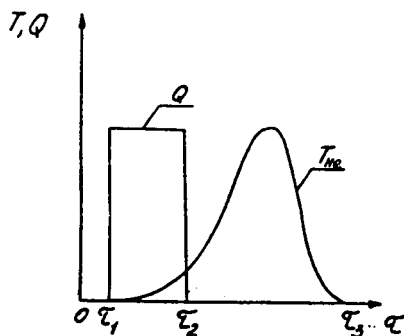
При нестационарном режиме охлаждения примем за  $\tau_3$  (рис.4-10) время возвращения системы к первоначальному состоянию, имевшему место до подачи нагрузки  $Q$ . Проинтегрируем уравнение (4-14) для этого случая:

$$\int_{\tau_1}^{\tau_3} m \frac{\partial H}{\partial \tau} d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_3} mw \frac{\partial H}{\partial x} d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_3} MC(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q(\tau) d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_3} Q_{oc}(\tau) d\tau. \quad (4-18)$$

Как и в случае стационарной нагрузки, принимаем  $\int_{\tau_1}^{\tau_3} Q_{oc}(\tau) d\tau = 0$ . Для нестационарного режима  $\int_{\tau_1}^{\tau_3} m \frac{\partial H}{\partial \tau} d\tau = 0$  и  $\int_{\tau_1}^{\tau_3} MC(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} d\tau = 0$ .

Выражение  $\int_{\tau_1}^{\tau_3} Q(\tau) d\tau$  представляет собой количество тепла  $W$ , выделенного тепловыделяющим элементом за время действия нагрузки  $Q$ . С учетом этих соотношений уравнение (4-18) примет вид

$$W = G \int_{\tau_1}^{\tau_3} [H(x_2, \tau) - H(x_2, \tau_1)] d\tau - G \int_{\tau_1}^{\tau_3} [H(x_1, \tau) - H(x_1, \tau_1)] d\tau. \quad (4-19)$$



Р и с. 4-10. Измерение нестационарных тепловыделений.

Если в сечении  $x_1$  (рис. 4-8) значение энтальпии  $H_1$  не изменяется за период времени от  $\tau_1$  до  $\tau_3$  (рис. 4-9, 4-10), то уравнения (4-17) и (4-19) примут следующий вид:

$$Q = G [H(x_2, \tau_3) - H(x_2, \tau_1)] , \quad (4-20)$$



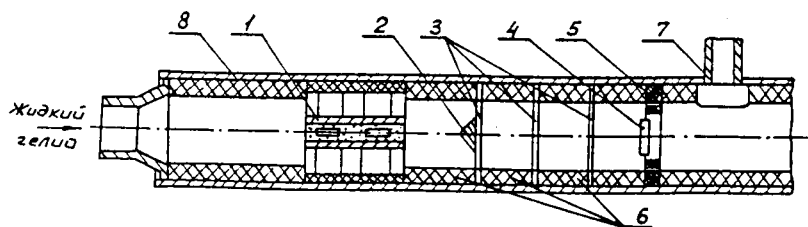
$$W = G \int_{\tau_1}^{\tau_3} [H(x_2, \tau) - H(x_2, \tau_1)] d\tau. \quad (4-21)$$

В этом случае для определения тепловыделений можно использовать значения энтальпии только в точке 2 (рис. 4-8), т.е. при измерении регистрируется изменение температуры потока только по термодатчику  $T_2$ , что существенно повышает точность измерений.

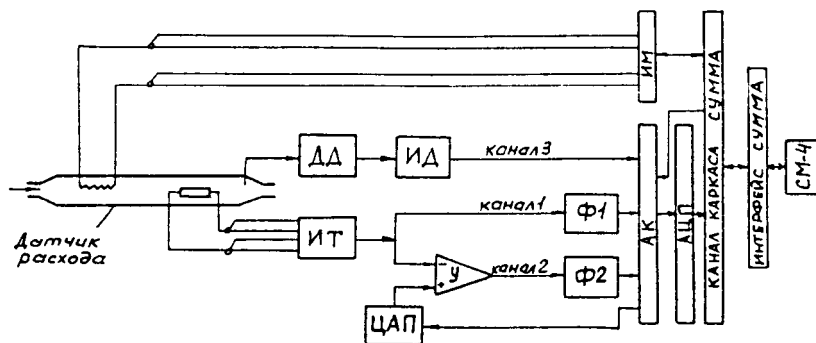
Итак, при измерении стационарных тепловыделений регистрируются параметры в точках 1 и 2 (рис. 4-8) до подачи нагрузки и после, по прошествии некоторого промежутка времени, необходимого для установления в системе состояния равновесия. Если температура в точке 1 не изменялась, то используется уравнение (4-20), при изменении  $T_1$  используется уравнение (4-17). В случае нестационарных тепловыделений температура  $T_2$  регистрируется непрерывно в течение времени от  $\tau_1$  до  $\tau_3$ . Полученная температурная кривая переводится в энтальпийную, и в зависимости от состояния  $T_1$  по уравнению (4-19) или (4-21) вычисляется количество тепла  $W$ , отводимого от СП-магнита в гелий. Величина  $W$ , деленная на временной интервал  $(\tau_2 - \tau_1)$ , дает среднеинтегральную мощность тепловыделений.

Проведенный анализ оценки погрешностей тепловыделений в поток однофазного гелия СП-магнита показал, что ее значение не превышает 11%. Для экспериментальной оценки погрешностей между точками 1 и 2 (рис. 4-8) был установлен электронагреватель. Расхождение между введенной и измеренной мощностями тепловыделений не превышало 5%.

По этому же принципу был разработан и внедрен калориметрический расходомер жидкого гелия (рис. 4-11, 4-12). Для этого прибора оценочная погрешность измерения массового расхода составляет 6,5%.



Р и с.4-11. Конструктивная схема датчика расхода: 1 — нагреватель;  
2 — корпус; 3 — сетка; 4 — температурный датчик;  
5 — фторопластовое кольцо; 6 — текстолитовое кольцо;  
7 — штуцер под разъем; 8 — труба.



Р и с.4-12. Принципиальная схема системы измерений: ДД — датчик давления; ИД — преобразователь “ток-напряжение”; ИТ — блок измерения температуры; У — усилитель; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь; ИМ — источник мощности; Ф1 и Ф2 — фильтры; АК — аналоговый коммутатор; АЦП — аналого-цифровой преобразователь.

## 5. Криогенные стенды УНК ИФВЭ, проект системы криогенного обеспечения

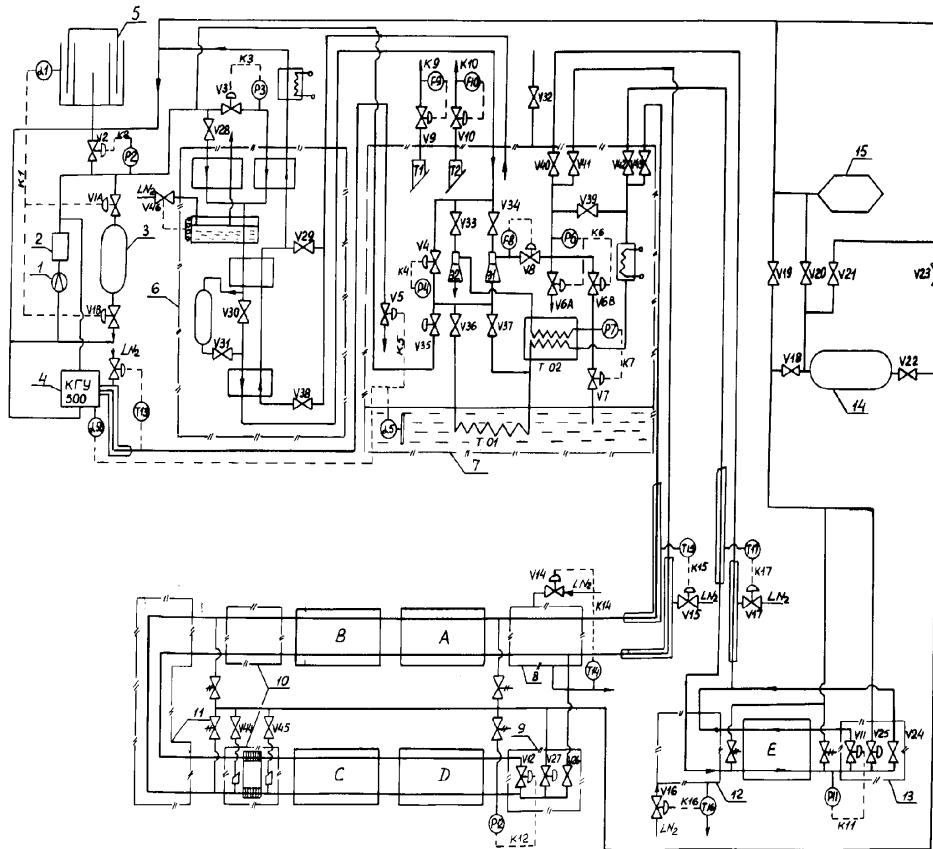
Когда были разработаны концептуальные основы системы криогенного обеспечения УНК и её структурная схема, то было принято решение все новые стенды создавать в криогенной части как модель системы криогенного обеспечения УНК. В дальнейшем это дало возможность исследовать как сверхпроводящие магниты и цепочку СП-магнитов, так и систему криогенного обеспечения УНК и её основные элементы: компрессоры, очистители, рефрижераторы, криогенные трубопроводы, схемные решения и т.д.

Основные результаты, изложенные в данной главе, опубликованы в работах [10, 11, 16, 17, 18, 19, 39]

### 5.1. Стенд испытания СП-магнитов УНК и цепочки СП-магнитов УНК

Система криогенного обеспечения (СКО) стенда (рис. 5-1) включает в себя: рефрижератор с избыточным обратным потоком (сателлит 6) производительностью 400 Вт; цепочку магнитов А, В, С, D; прокачной криостат Е со сверхпроводящим магнитом; ожигитель 4, в качестве которого используется криогенная гелиевая установка КГУ-500/4,5-140 производительностью 140 л/час. Как по составу оборудования, так и по схемному решению СКО стенда аналогична криогенному модулю СКО УНК, который состоит из ожигителя производительностью 2400 л/час, сателлита холодопроизводительностью 2100 Вт при  $T=4,1$  К, цепочки из 110 магнитов. Так как сателлит СКО стенда имеет меньшую холодопроизводительность, чем сателлит криогенного модуля СКО УНК, в СКО стенда включен циркуляционный блок 7, предназначенный для создания на стенде условий кри-

остативания магнита, тождественных условиям криостатирования цепочки магнитов УНК, а именно — расход потока однофазного гелия до 120 г/с при  $T=4,1$  К. Это достигается применением в блоке двух эжекторов: эжектора Э1 для повышения расхода однофазного потока и эжектора Э2 для снижения температуры однофазного потока. Эксперименты показали, что блок обеспечивает расход 100 г/с при температуре входа в магнит 4,0 К.



Р и с .5-1. Принципиальная схема стенда испытаний СП-магнитов и цепочки СП-магнитов УНК.

На данном стенде были испытаны все полномасштабные СП-магниты как с теплым, так и с холодным железным ярмом, цепочки из 4 СП-магнитов с теплым и холодным экраном. На том же стенде проводились все испытания, описанные в главе 4.

Работу по автоматизации вели сотрудники ОЭА с участием специалистов из САКЛЕ КАЭ (Франция). Приобретенный опыт работы по автоматической системе управления был использован при создании стенда калибровки серийных СП-магнитов и системы криогенного обеспечения УНК.

В результате в ИФВЭ создан стенд, позволяющий испытывать СП-магниты в диапазоне температур от 3,9 до 5 К как в режиме криостатирования УНК, так и в режимах двухфазного и однофазного гелия. В период с 1983 по 1990 гг. стенд ежегодно работал до 5000 часов. Работоспособность стенда сохранена до настоящего времени.

## 5.2. Стенд калибровки серийных СП-магнитов

Указанный стенд создавался для проведения вакуумных, криогенных и электротехнических испытаний серийно изготавливаемых СП-диполей и квадрупольных УНК.

Стенд оснащен системой криогенного обеспечения для охлаждения, криостатирования и отогрева СП-магнитов в процессе их изготовления с производительностью три магнита в сутки. На восьми стапелях испытываются дипольные магниты, на двух стапелях — квадрупольные (рис. 5-2).

Общая продолжительность испытаний каждого магнита 48 часов. Первый этап испытаний — монтаж, вакуумные испытания, охлаждение магнита до гелиевых температур. Второй этап испытаний — криостатирование магнита и измерение необходимых параметров в процессе проведения электрических и магнитных испытаний. Третий этап — отогрев и демонтаж магнита.

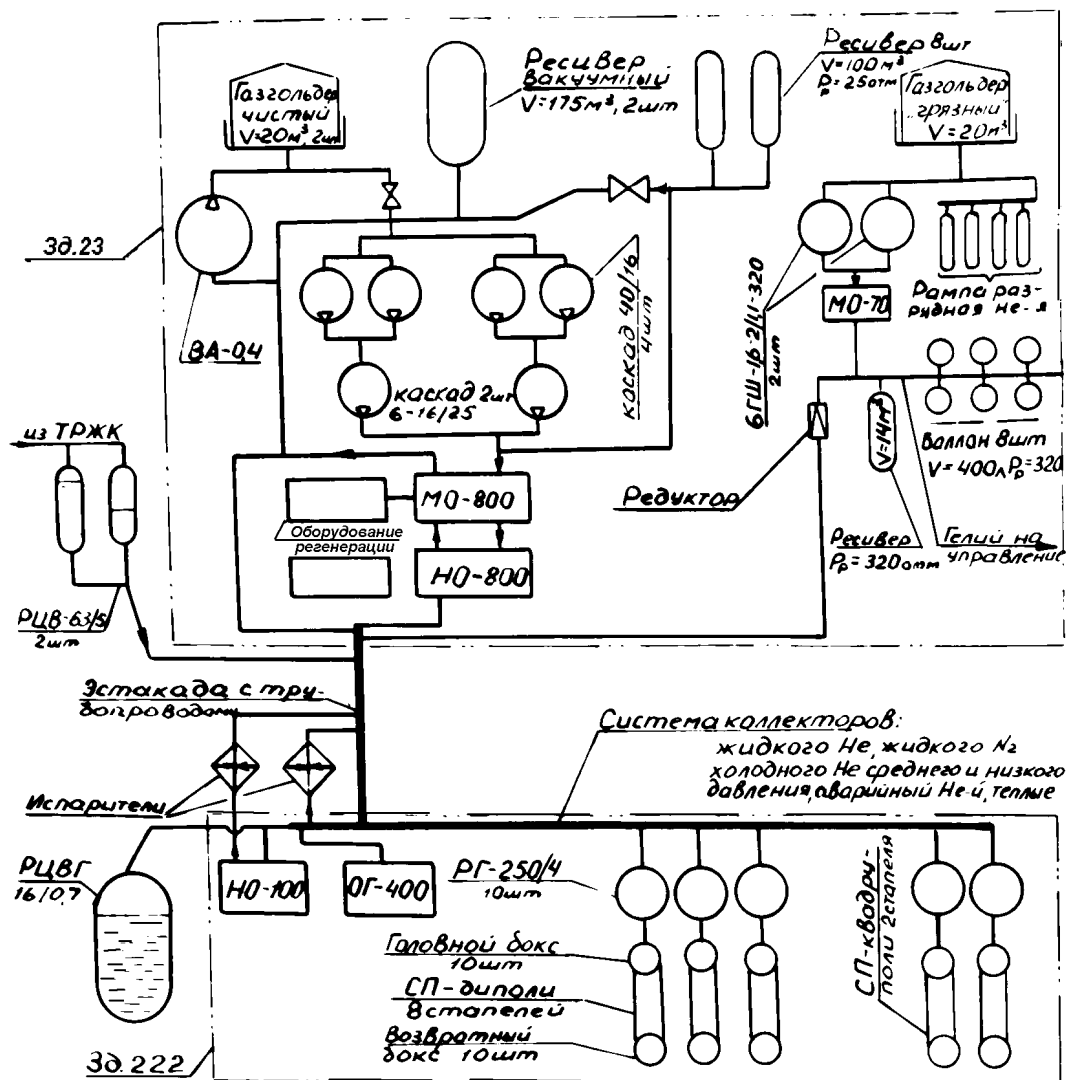
Схема криостатирования СП-магнита выполнена согласно рис. 3-3 и соответствует условиям работы СП-магнитов в УНК. Это достигается теми же средствами, что и в стенде испытаний СП-магнитов (рис. 5-1).

Основные параметры системы криогенного обеспечения следующие: охлаждение тоководов рассчитано на ток 7 кА, суммарная тепловая нагрузка на гелиевую систему одного стапеля равна 150 Вт, расход жидкого гелия через один магнит до 120 г/с, время непрерывной работы системы криогенного обеспечения не менее 2000 ч, общее время работы системы в год 7000 ч.

Анализ техусловий показал, что криогенную систему стенда калибровки (КС СК) целесообразно создавать как модель системы криогенного обеспечения УНК как по общим схемным решениям, так и по схемным решениям криогенных аппаратов. Именно с учетом этих условий криогенное оборудование КС СК было разработано и создано в НПО Криогенмаш и смонтировано в ИФВЭ. Также была поставлена цель сделать стенд полностью автоматизированным, что и было выполнено усилиями ИФВЭ и НПО Криогенмаш.

Блочная схема КС СК практически полностью повторяет блочную схему системы криогенного обеспечения УНК (раздел 5-3). Также аналогичны схемные решения систем компримирования и очистки, предварительного охлаждения, ожижителей гелия ОГ-400 и ОГ-200 и сателлитных рефрижераторов (рис. 5-3). Подобные решения позволили обеспечить не только надежную работу стенда калибровки магнитов, но и достаточно полно моделировать систему криогенного обеспечения УНК.

Испытания КС СК подтвердили правильность заложенных решений как в стенд калибровки, так и в систему криогенного обеспечения УНК. Особенно важно отметить, что все испытания были проведены в автоматизированном режиме управления, которая показала высокую надежность. Таким образом, впервые введена в эксплуатацию разветвленная криогенная система без использования элементов ручного управления во всех режимах работы — переходных и стационарных.



Р и с.5-2. Принципиальная схема стенда калибровки серийных СП-магнитов УНК.

### 5.3. Проект системы криогенного обеспечения УНК

Основные параметры СКО УНК приведены в таблице 5-1. Максимальная холодопроизводительность СКО при  $T=4,4\text{ К}$  составляет 50 кВт. Двойной запас холодопроизводительности при  $T=4,4\text{ К}$  по сравнению с данными табл. 2-2 объясняется следующим:

- при серийном производстве магнитов трудно изготовить все магниты с расчетными значениями статических теплопритоков (табл. 2-1);
- запас по холодопроизводительности позволит в достаточно короткие сроки охладить магниты после их перехода в нормальное состояние и в период их замены.

Таблица 5-1.

**Основные параметры СКО УНК.**

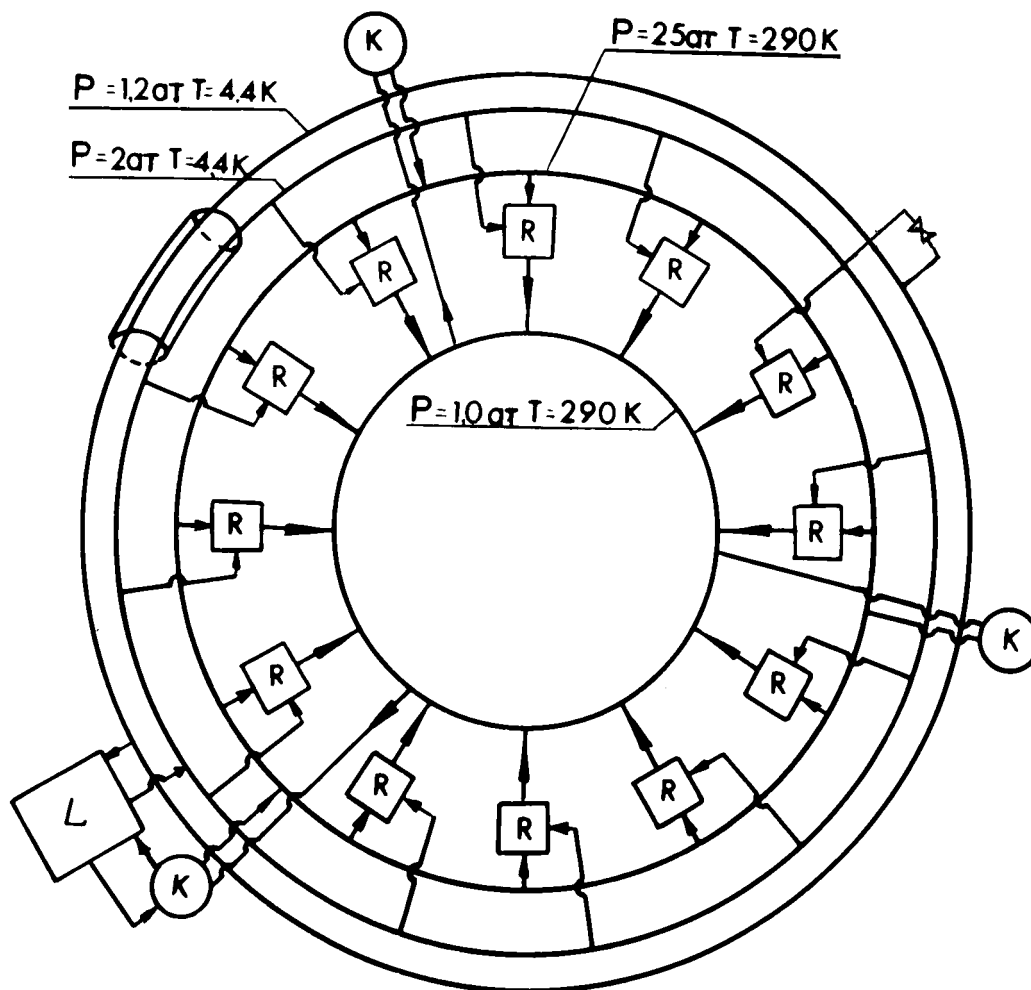
Максимальная холодопроизводительность при $T=4,4$ К	кВт	50
Диапазон экономичного регулирования холодопроизводительности при $T=4,4$ К	кВт	20÷50
Холодопроизводительность при $T=80$ К	кВт	110
Количество цепочек магнитов	шт.	24
Количество жидкого гелия для охлаждения токовводов	г/с	30
Энергозатраты на производство 1Вт холода при $T=4,4$ К	Вт	~400

В СКО УНК предусмотрено экономичное регулирование холодопроизводительности в диапазоне 20÷50 кВт (удельные энергозатраты не увеличиваются при снижении холодопроизводительности). Поэтому создание запаса по холодопроизводительности приводит только к увеличению капитальных затрат, эксплуатационные затраты при этом будут определяться лишь тепловой нагрузкой СП-магнитов.

СКО УНК (рис. 5-3) состоит из центральной ожижительной станции *L*, 12 рефрижераторных станций *R*, трех компрессорных станций *K*, воздухоразделительной станции и системы трубопроводов, связывающих все станции в единую схему.

Центральная ожижительная станция *L* предназначена для снабжения жидким гелием сателлитных рефрижераторов *R*. Она состоит из шести ожижителей производительностью 2400 л/час каждый и хранилища жидкого гелия объемом 240 м<sup>3</sup> (рис. 5-4). В период накопления жидкого гелия и охлаждения СП-магнитов работают все ожижители, в период криостатирования с  $Q=50$  кВт — четыре ожижителя. При снижении нагрузки на СКО УНК соответствующая часть ожижителей отключается.

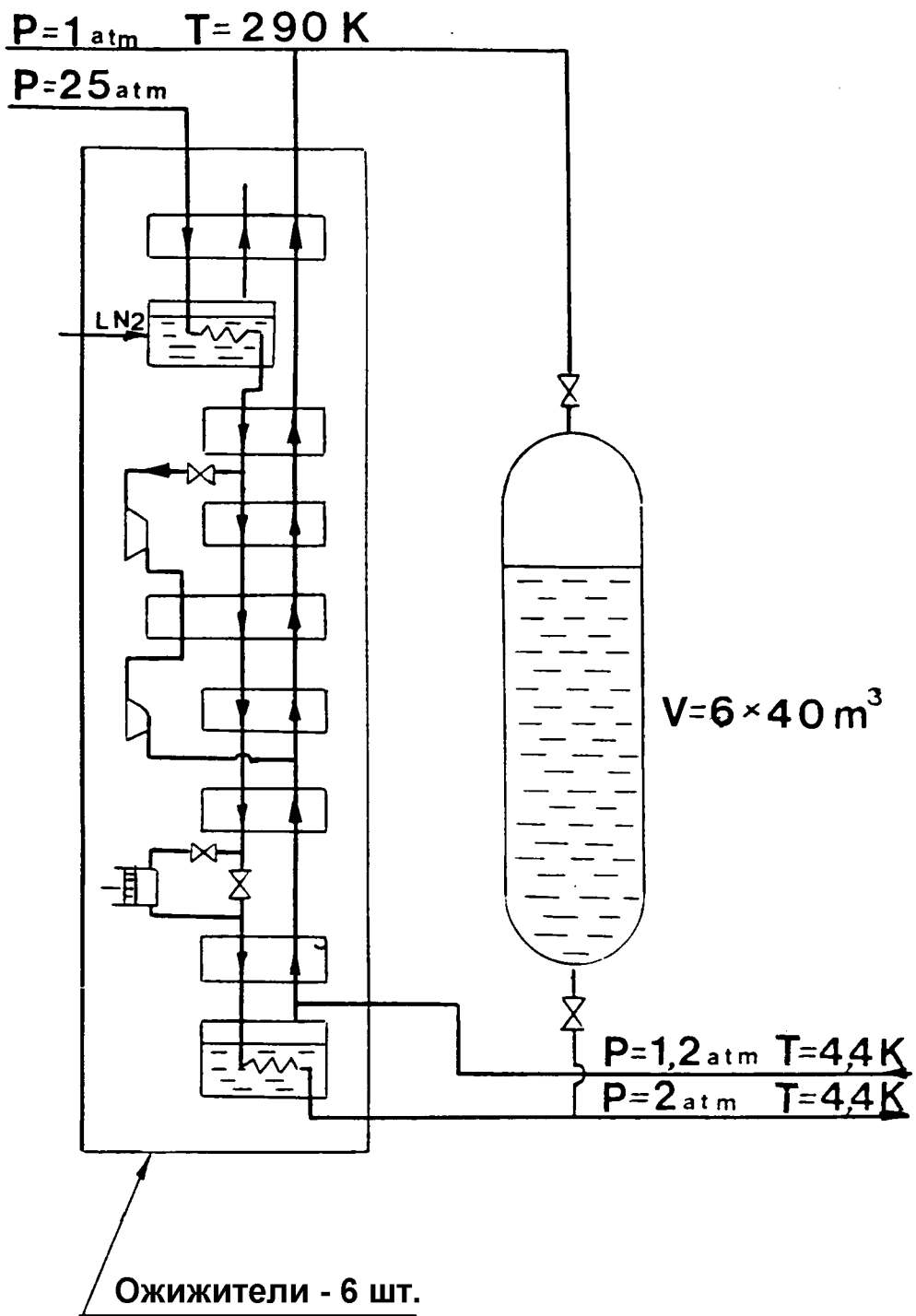
Хранилище жидкого гелия используется для быстрого захолаживания цепочек магнитов после проведения ремонтных работ, а также для экономичного регулирования холодопроизводительности СКО УНК и для обеспечения требуемого уровня надежности при минимальных капитальных затратах на резервное оборудование.



Р и с.5-3. Схема гелиевой части системы криогенного обеспечения УНК.

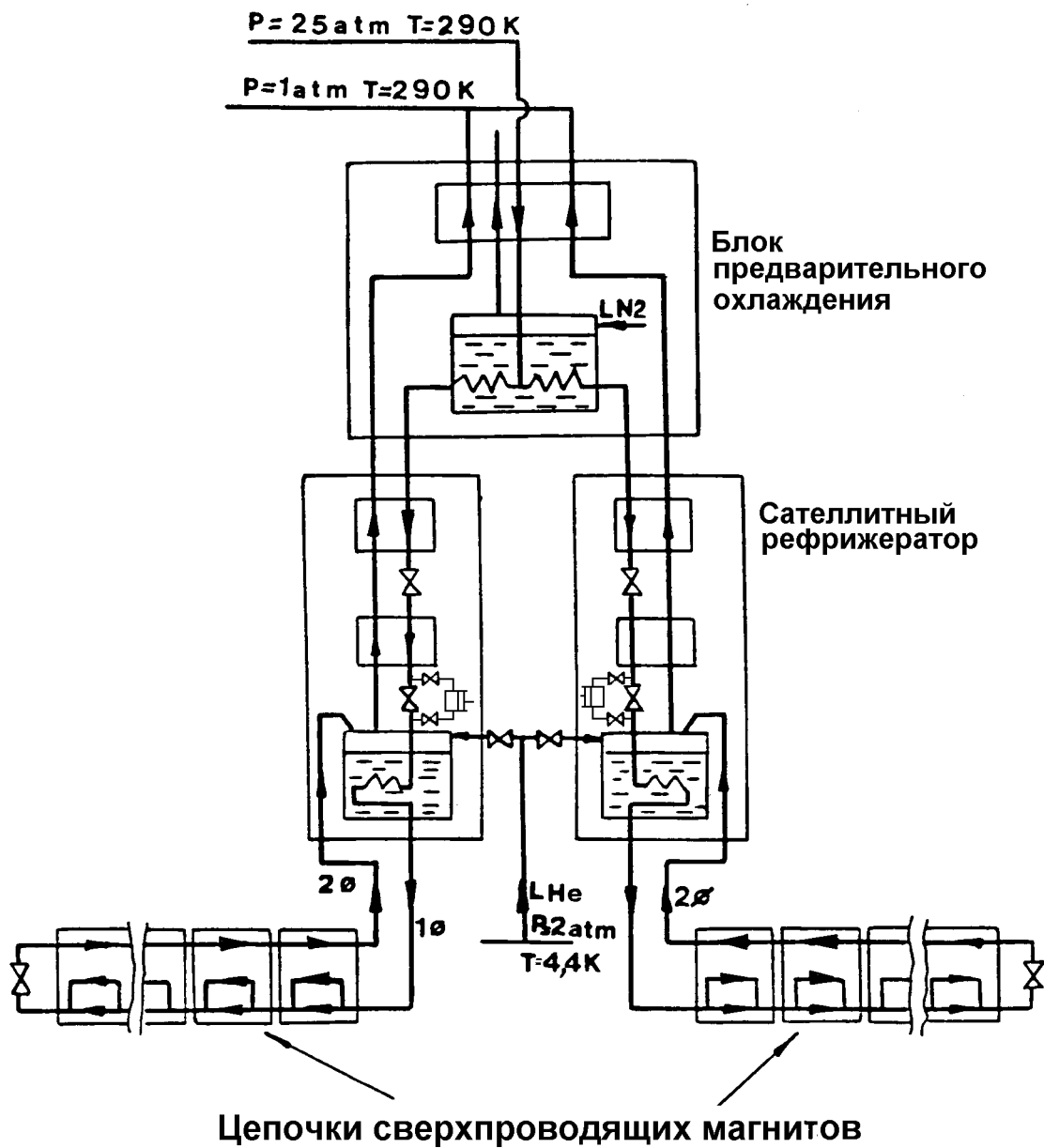
Каждый ожижитель выполнен по эффективной схеме с использованием предварительного охлаждения жидким азотом, двух турбодетандеров и поршневого детандера в ступени окончательного охлаждения.

Сателлитная рефрижераторная станция R предназначена для криостатирования двух цепочек СП-магнитов. Станция (рис.5-5) состоит из одного блока предварительного охлаждения и двух сателлитных рефрижераторов. Каждый рефрижератор связан с одной цепочкой магнитов. Такая схема рефрижераторной станции выбрана, исходя из условий транспортировки, компоновки в подземном зале и возможности отогрева и захолаживания одной цепочки при криостатировании других (ремонтный период отогрева и захолаживания).



Р и с.5-4. Центральная гелиевая ожижительная станция.

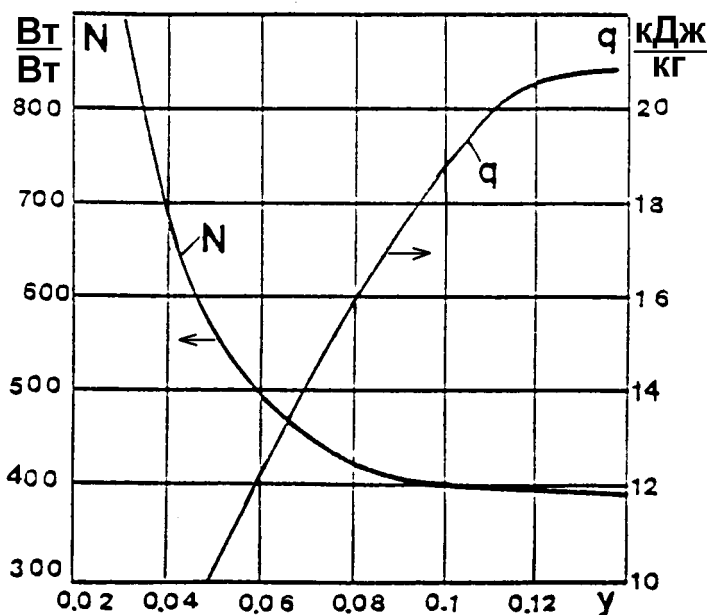




Р и с.5-5. Сателлитная станция.

На рис. 5-6 приведены значения удельных энергозатрат  $N$  и удельной холодопроизводительности  $q$  в зависимости от относительной добавки  $y = \frac{G_{He}}{G_p}$ , где  $G_{He}$  — расход жидкого гелия, добавляемого в ванну рефрижератора,  $G_p$  — расход сжатого гелия. Из рис. 5-6 следует, что минимальные затраты энергии на произ-

водство холода соответствуют величине  $y=0,12\pm 0,14$  и составляют менее 400 Вт/Вт.



Р и с.5-6. Удельная холодопроизводительность  $q$  и удельные энергозатраты  $N$  в сателлитном рефрижераторе.

Для сжатия гелия используются маслозаполненные винтовые компрессорные агрегаты. Производительность одного агрегата 240 г/с. Агрегаты в количестве 36 штук сосредоточены в трех компрессорных станциях К (рис. 5-3).

Элементы криогенной гелиевой системы связаны в единую схему с помощью коллекторов. Все коллекторы расположены в тоннеле УНК. Расход жидкого гелия в коллекторе (рис. 5-3  $p=2$  ат,  $T=4,4$  К) выбран несколько больше, чем это требуется для рефрижераторных установок. Это излишнее количество дросселируется в экран гелиевого коллектора (рис. 5-3  $p=1,2$  ат,  $T=4,4$  К) и в виде двухфазного гелия возвращается в центральную ожижительную станцию, снимая теплоприток к коллектору.

Криостатирование экранов СП–магнитов осуществляется жидким азотом. Коллектор жидкого азота (на рис. 5-3 не показан) является экраном для коллектора жидкого гелия. Для производства жидкого азота применены воздухоразделительные установки общей производительностью 12 тонн жидкого азота в час.

Магниты с “холодным” ярмом имеют существенные массы материалов, охлаждаемые до температуры 4,5 К (табл. 5-2).

Таблица 5-2.

**Масса материалов СП–диполя, цепочки и СП–кольца при  $T=4,5$  К.**

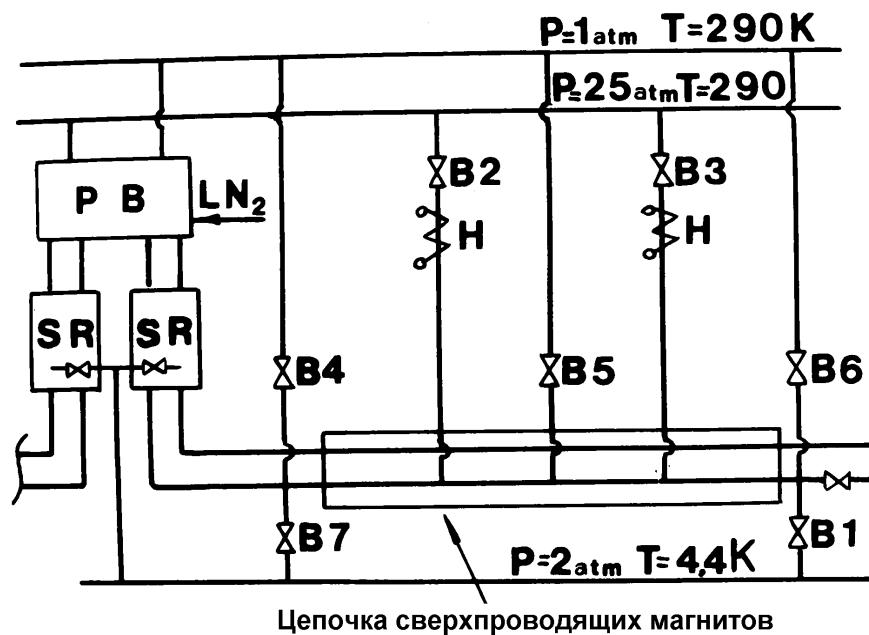
Диполь	кг
Нержавеющая сталь	920
Железное ярмо	4010
Сверхпроводящий кабель	100
Всего по диполю	5030
По цепочке	$554 \cdot 10^3$
По СП–кольцу УНК	$13,3 \cdot 10^6$

В СКО УНК предусмотрены два периода захолаживания и отогрева: плановый период для захолаживания (отогрева) всех магнитов УНК и ремонтный период, когда для замены какого-либо магнита отогревается, а затем захолаживается только та цепочка, в которой находится некачественный магнит.

На рис. 5-7 приведена схема цепочки, позволяющая реализовать плановый и ремонтный периоды захолаживания и отогрева. В плановом периоде захолаживаются (отогреваются) одновременно все 24 цепочки СП–магнитов. Процесс захолаживания осуществляется в два этапа: от 300 до 80 К и от 80 до 4,5 К. На первом этапе в теплую цепочку СП–магнитов подается гелий из рефрижератора (SR), охлажденный до 80 К в блоке предварительного охлаждения. Из цепочки нагретый гелий через предохранительные клапаны, установленные на квадруполях (на схеме не показаны), сбрасывается в коллектор ( $p=1$  ат,  $T=290$  К). По мере охлаждения цепочки соответствующие клапаны квадрупольей будут закрываться. На втором этапе в цепочку через вентиль В1 подается жидкий гелий из коллектора ( $p=2$  ат,  $T=4,4$  К). Гелий проходит через всю цепочку и выводится через рефрижератор (SR). После того, как в ванне рефрижератора появится жидкий гелий, цепочка переводится в режим криостатирования; расчетное время планового периода захолаживания составляет ~ 8 суток.

Плановый период отогрева будет также проводиться в два этапа: нагрев до 80 К и нагрев до 300 К. Расчетное время отогрева сравнимо с временем планового захолаживания. В ремонтный период отогревается (захолаживается) лишь та цепочка, в которой находится некачественный магнит. В остальных цепочках поддерживается режим криостатирования, при котором от СКО УНК потребляется холод только для компенсации теплопритоков из окружающей среды. Избыток производительности СКО УНК по сжатому и жидкому гелию используется для отогрева (захолаживания) цепочки с некачественным магнитом.

В ремонтный период отогрева в холодные магниты через вентили В2 и В3 подается гелий из коллектора (рис. 5-7  $p=25$  ат,  $T=290$  К). В нагревателях Н гелий подогревается до  $T=310$  К, что повышает эффективность отогрева при температуре магнитов, близкой к  $T=273$  К. Из цепочки магнитов гелий сбрасывается в коллектор ( $p=1$  ат,  $T=293$  К) через вентили В4, В5, В6. При расходе сжатого гелия 440 г/с на цепочку процесс нагрева цепочки составит ~ 40 часов.



Р и с.5-7. Схема цепочки магнитов с режимами захлаживания и отогрева.

После выполнения ремонтных работ цепочка переводится в режим захлаживания. Жидкий гелий в магниты подается из коллектора жидкого гелия ( $p=2$  ат,  $T=4,4$  К) через вентили В1 и В7 и выводится из цепочки через клапаны квадруполей и вентиль В5. Расход жидкого гелия для захлаживания составляет 280 г/с, время захлаживания — 40 часов.

Расчеты показали, что в период захлаживания и отогрева целесообразно использовать только каналы однофазного гелия, использование каналов обратного потока приводит к снижению эффективности процесса и к увеличению времени захлаживания и отогрева.

Таким образом, при использовании магнитов с “холодным” ярмом выбранная схема СКО УНК обеспечивает все режимы (захлаживание, отогрев, криостатирование).

Учитывая, что все схемные и конструктивные решения СКО УНК и основных установок СКО УНК были либо промоделированы, либо непосредственно испытаны на стенде СП–магнитов (рис. 5-1) и на стенде калибровки СП–магнитов (рис. 5-2), было принято решение о выпуске оборудования СКО УНК. В настоящее время головные образцы СКО УНК смонтированы в ИФВЭ.

## Заклучение

1. В ИФВЭ совместно с НПО “Криогенмаш” и НИИЭФА им. Д.В. Ефремова создан проект системы криогенного обеспечения УНК, которая позволяет с высокой степенью надежности обеспечивать все режимы работы сверхпроводящего кольцевого магнита. При этом достигнуты высокие экономические показатели в широком диапазоне регулирования. Головные образцы оборудования системы криогенного обеспечения смонтированы в ИФВЭ.

2. Разработаны, созданы и введены в эксплуатацию уникальные стенды исследования СП–магнитов и цепочек магнитов, а также стенд калибровки серийных магнитов. В то же время каждый из этих стендов создавался и как модель системы криогенного обеспечения УНК. Имеются новые решения, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения.

3. Проведены комплексные криогенные исследования сверхпроводящего магнита УНК. В результате внедрения изменений в конструкцию и усовершенствования элементов магнита реальные теплопритоки и тепловыделения доведены до расчетных и создана конструкция магнита, магнита сделана практически неразрушаемого при работе в переходных процессах. Имеются новые решения, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения.

4. Определены и исследованы режимы холодопроизводящих криогенных установок, позволяющие существенно повысить надежность систем криообеспечения сверхпроводящих ускорителей за счет схемных решений без большой степени резервирования оборудования.

5. Доказано, что на эффективность сателлитных рефрижераторов влияет осевая теплопроводность в теплообменных аппаратах. Это явилось стимулом для создания нового типа теплообменников.

6. Разработаны и внедрены новые методики измерения параметров криогенных каналов СП–магнитов ускорителей.

7. Разработаны и внедрены новые криогенные узлы и схемные решения, обеспечивающие надежную работу СП–магнитов в переходных процессах (захолаживание, отогрев, переход магнита в нормальное состояние). Имеются новые решения, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения.

Результаты, изложенные в данной диссертации, были использованы в проектах других ускорителей с применением сверхпроводящих устройств.

#### **Основные результаты опубликованы в работах:**

1. Агеев А.И., Белушкин В.А., Зельдович А.Г., Крылов В.В. Анализ процессов охлаждения и криостатирования крупных сверхпроводящих устройств: Препринт ОИЯИ Р8-10039, Дубна, 1976, 16 стр.
2. Агеев А.И., Пряничников В.И., Рубин Н.Б. Охлаждение и криостатирование крупных объектов серийной криогенной гелиевой установки КГУ-250/4,5. — В сб.: “Совершенствование процессов, машин и аппаратов холодильной и криогенной техники и кондиционеров воздуха”. — Всесоюзная конференция по холоду, Ташкент, с.8, 1977.
3. Агеев А.И., Буринов В.Ф., Пряничников В.И., Муратов Ю.В. Криогенная установка для ожижения газов. Авторское свидетельство на изобретение №682739. Опубликовано в БИ, №32, 1979.
4. Агеев А.И., Архаров А.М., Пряничников В.И., Рубин Н.Б. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи в He-I и He-II при импульсной тепловой нагрузке. // ИФЖ, т.ХХХХ, №3, с. 389-393, 1981.
5. Агеев А.И., Винокур Я.Г., Вишнев И.П., Дмитриевский Ю.П., Лебедева И.Б., Мигалинская Л.Н., Седов О.А., Филатов И.А., Москвитин В.И., Мызни-

- ков К.П., Сытник В.В., Шамичев А.Н.. Проблемы охлаждения сверхпроводящих магнитов УНК в условиях радиационного разогрева. — Труды 7-го Всесоюзного Совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, с.109-114, 1980.
6. Агеев А.И., Буринов В.Ф., Дерендяев Ю.С., Кузнецов А.В., Пряничников В.И., Рубин Н.В. Исследование гидродинамики двухфазных потоков гелия при стационарных докритических тепловых нагрузках. — Сообщение ОИЯИ 8-80-586, 6 стр., Дубна, 1980.
  7. Агеев А.И., Буринов В.Ф., Зинченко С.И., Филиппов Ю.П. О неоднородности гидродинамических характеристик (ГДХ) парогенерирующих каналов криогенных объектов. // ИФЖ, т.43, №2, с.190-195, 1982.
  8. Агеев А.И., Андреев Н.И., Булатов Э.А., Васильев Л.М., Гридасов В.И., Москвитин В.И., Мызников К.П., Орлов А.П., Сытник В.В. Исследование сверхпроводящего диполя в условиях больших тепловыделений: Препринт ИФВЭ 81-153, 11 стр., Серпухов, 1981.
  9. Агеев А.И., Муравьев М.В., Шамичев А.Н. Comparative Analysis of Cryogenic System for Superhigh Energy Superconducting Accelerator. ICFA Workshop, 3-th, Protvino, 1981, Possibilities and Limitations for Superconducting Accelerator Magnets, p.160-171, Protvino, 1982.
  10. Агеев А.И., Зинченко С.И., Муравьев М.В., Сердюк, Шамичев А.Н. Эжекторная ступень криогенной установки. Авторское свидетельство на изобретение №840616, опубликованное в БИ, №23, 1981.
  11. Агеев А.И., Зинченко С.И., Логачев С.Н., Муравьев М.В., Шамичев А.Н. Исследование установки КГУ-400/4,5 в нештатных режимах: Препринт ИФВЭ 82-158, Протвино, 1982, 7 стр.
  12. Агеев А.И., Шамичев В.Н. Термодинамический анализ рефрижераторного цикла с избыточным обратным потоком: Препринт ИФВЭ 82-159, 12 стр.
  13. Агеев А.И., Каштанов Е.М., Москвитин В.И., Шамичев А.Н. Криостат. Авторское свидетельство на изобретение, БИ, №1058389, 1983.
  14. Агеев А.И., Архаров А.М., Пряничников В.И., Рубин Н.Б. Экспериментальное исследование теплоотдачи в He-I и He-II при стационарной нагрузке. // Журнал "Химическое и нефтяное машиностроение", №7, с.20-21, 1983.
  15. Агеев А.И., Зинченко С.И., Муравьев М.В., Сердюк В.С., Шамичев А.Н. Эжекторная ступень криогенной установки. Авторское свидетельство на изобретение №1087752, опубл. в БИ, №15, 1984.
  16. Агеев А.И., Каштанов Е.М., Москвитин В.И., Сытник В.В., Шамичев А.Н. Криостат для прецизионного крепления сверхпроводящего магнита. Авторское свидетельство на изобретение №1090196.
  17. Агеев А.И., Зинченко С.И., Левин М.В., Шамичев А.Н. Исследование модели криогенного модуля. — Девятое Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, с.380-383, Дубна, 1984.
  18. Агеев А.И., Алферов В.Н., Голобородько С.Г., Дунайцев А.Ф., Золотов А.А., Каштанов Е.М., Кренделев В.А., Куянов Ю.В., Леонов А.П., Логачев С.Н., Муравьев М.В., Романов В.П., Трофимов Н.Н., Усинов Е.А., Шамичев А.Н. Система автоматического управления криогенной гелиевой установки: Препринт ИФВЭ 84-207, 16 стр., Протвино, 1984.

19. Агеев А.И., Мызников К.П., Шамичев А.Н., Тарасов А.В., Жирнов А.Н., Зинченко С.И., Бармин Н.В., Буткевич И.К., Горбачев С.П., Коваленко В.Д., Морковин И.К. Development of Cryogenic System for UNK. — В сборнике “Proceeding of Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics”, ICFA, стр.58-61, Brookhaven, USA, 1986.
20. Агеев А.И., Андреев Н.И., Балбеков В.И., Долженков В.И., Каштанов Е.М., Мызников К.П., Сытник В.В., Тараканов Н.М., Ткаченко Л.М. Superconducting Cold Iron Dipole Magnet for UNK. - В сб.: “Proceeding of Workshop on Superconducting Magnets and Cryogenics”, ICFA, стр.41-43, Brookhaven, USA, 1986.
21. Агеев А.И., Божко Ю.Г., Гусак В.И., Дайковский А.Г., Жирнов А.В., Прощаев Е.Г., Тарасов А.В. Моделирование процессов захлаживания и отогрева СП–дипольных магнитов УНК. — 10-е Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, с.296-299, Дубна, 1986.
22. Агеев А.И., Андреев Н.И., Балбеков В.И., Булатов Э.А., Васильев В.А., Васильев Л.М., Герцев К.Ф., Гридасов В.И., Дмитревский Ю.П., Долженков В.И., Елистратов В.В., Злобин А.В., Козуб С.С., Мызников К.П., Сытник В.В., Тараканов Н.М. Разработка сверхпроводящих диполей УНК. — 13-я Международная конференция по ускорителям заряженных частиц высоких энергий. Т.2, с.38-42, Новосибирск, 1986.
23. Агеев А.И., Зинченко С.И., Смыков Г.Б., Шамичев А.Н. Influence of Longitudinal Heat Conductivity of Heat Exchangers on the Efficiency of Satellite Refrigerator. — В сб. :“Proceeding of the XI-th International Cryogenic Engineering Conference”, стр.203-206, West Berlin, 1986.
24. Агеев А.И., Абрамов А.Г., Балуев А.Б., Божко Ю.Г., Гусак В.И., Дайковский А.Г., Жирнов А.В., Тарасов А.В. Моделирование двумерных нестационарных температурных полей в СП–магнитах УНК: Препринт ИФВЭ 86-201, 7 стр., Протвино, 1986.
25. Агеев А.И., Балбеков В.И., Дмитревский Ю.П., Зинченко С.И., Злобин А.В., Козуб С.С., Маслов М.А., Мохов Н.В., Мызников К.П., Шамичев А.Н., Щербаков П.А. Влияние тепловыделений в цикле УНК на работоспособность сверхпроводящих диполей: Препринт ИФВЭ 86-58 ОУНК, ОРИ, 20 с., библи.15, Протвино, 1986.
26. Агеев А.И., Божко Ю.Г., Жирнов А.В., Кренделев В.А., Прощаев Е.Г., Тарасов А.В., Федорченко В.Н., Фомин В.П. Измерение расхода жидкого гелия калориметрическим методом: Препринт ИФВЭ 86-226 ОУНК, 10 с., библи.10, Протвино, 1986.
27. Агеев А.И., Божко Ю.Г., Жирнов А.В., Кренделев В.А., Левин М.В., Орлов А.П., Прощаев Е.Г., Тарасов А.В., Фомин В.П. Калориметрический метод измерения тепловыделений в сверхпроводящих магнитах УНК: Препринт ИФВЭ 86-161 ОУНК, 8с., библи.7, Протвино, 1986.
28. Агеев А.И., Балуев А.Б., Божко Ю.Г., Дайковский А.Г., Жирнов А.В., Тарасов А.В. Расчетный анализ поперечных тепловых процессов в СП–магнитах УНК в режимах захлаживания и отогрева: Препринт ИФВЭ 87-174 ОУНК, 12 с., библи.2, Протвино, 1987.

29. Агеев А.И., Зинченко С.И., Левин М.В., Логачев С.Н., Салимов С.Е. Cryogenic Test Results for a string of Four Superconducting Dipoles. ICES-XII, 6 стр., Англия, 1988.
30. Агеев А.И., Балуев А.Б., Божко Ю.Г., Дайковский А.Г., Жирнов А.В., Мызников К.П., Сытник В.В., Тарасов А.В. Результаты исследования процессов захлаживания и отогрева полномасштабного СП–диполя УНК. — XI Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц, т.2, с.243-246, Дубна, 1988.
31. Агеев А.И., Божко Ю.Г., Золотов А.А., Каштанов Е.М., Козуб С.С., Мызников К.П., Сытник В.В., Тарасов А.В., Шпакович Н.В. Статический теплоприток в СП–диполе УНК: Препринт ИФВЭ 89-184 ОУНК, 8 с., библиография, Протвино, 1989.
32. Агеев А.И., Левин М.В., Плескач В.В., Шамичев А.Н. Предохранительный клапан. Авторское свидетельство на изобретение №1472735, ОИ.-1989, №14, с.170.
33. Агеев А.И., Левин М.В., Смыков Г.Б., Шамичев А.Н. Вторичные эффекты в витых теплообменных аппаратах: Препринт ИФВЭ 89-113 ОУНК, 16 с., библиография, Протвино, 1989.
34. Агеев А.И., Левин М.В., Смыков Г.Б., Шамичев А.Н. Измерение продольной теплопроводности конструкции витого теплообменного аппарата для гелиевых установок: Препринт ИФВЭ 89-114 ОУНК, 6 с., библиография, Протвино, 1989.
35. Агеев А.И., Балуев А.Б., Божко Ю.Г., Дайковский А.Г., Жирнов А.В., Тарасов А.В. Расчет трехмерных температурных полей и термомеханических напряжений в СП–диполе УНК при его захлаживании: Препринт ИФВЭ 89-213 ОМВТ, 12 с., библиография, Протвино, 1989.
36. Агеев А.И., Божко Ю.Г., Жирнов А.В., Мызников К.П., Сытник В.А., Тарасов А.В., Шамичев А.Н. Экспериментальное исследование захлаживания и отогрева СП–диполей УНК: Препринт ИФВЭ 89-182 ОУНК, 11 с., библиография, Протвино, 1989.
37. Агеев А.И., Зинченко С.И., Левин М.В., Логачев С.Н. Static Heat Leak Measurements for UNK Superconducting Dipoles. — В сб.: “Advances in cryogenic engineering”, v.37, стр.573-576, 1991.
38. Агеев А.И., Васильев Л.В., Андреев Н.И., Балбеков В.И., Герцев К.Ф., Гридасов В.И., Мызников К.П., Дрождин А.И., Смирнов Н.И., Сычев В.Н., Сытник В.В. Тараканов Н.М., Зинченко С.И., Злобин А.В. Разработка и исследование сверхпроводящих магнитов УНК. — 12 Международная конференция по магнитным технологиям (МТ-12). Ленинград, 1991, стр.682-685.
39. Агеев А.И., Александров А.Г., Алферов В.Н., Иванов Ю.Н., Квашин А.Г., Кренделев В.А., Лазин Ю.А., Лукьянцев А.Ф., Прошин В.Ф., Соловьев Л.Л., Сытин А.Н., Федорченко В.Н., Фомин В.П., Хворостьянов А.В. Система управления криогенным комплексом стенда калибровки сверхпроводящих магнитов. — XIV Совещание по ускорителям заряженных частиц. Сборник докладов, т.2, стр.163-165, Протвино, 1994.

*Рукопись поступила 10 февраля 1998 г.*