

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д-215

УДК 536.483/621.384.6

8-85-337

ДАЦКОВ
Владимир Иванович

**КРИОГЕННАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ
И ИССЛЕДОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В СВЕРХПРОВОДЯЩИХ УСКОРИТЕЛЯХ**

Специальность: 01.04.13 - электрофизика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат технических наук Юрий Александрович
старший научный сотрудник ШИШОВ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук Маргарита Петровна
ОРЛОВА

кандидат технических наук Александр Иванович
старший научный сотрудник ПИКИН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт атомной энергии им. И.В.Курчатова (Москва)

Защита диссертации состоится "___" _____ 1985 г.
в "___" часов на заседании Специализированного совета
Д.047-О1-02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области,
ЛВЭ ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1985 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета *М.Ф. Лихачев* М.Ф. ЛИХАЧЕВ

Актуальность темы. Создание сверхпроводящих магнитных систем (СМС)* для ускорителей, каналов и детекторов заряженных частиц является в настоящее время одним из главных направлений развития экспериментальной базы физики высоких энергий.

Важнейшими факторами, стимулирующими широкое применение сверхпроводимости в магнитных системах физических установок, являются значительное сокращение размеров, веса и стоимости сооружения установок. Кроме того, значительно сокращаются затраты электроэнергии при эксплуатации установок. В СССР осуществляется программа строительства ускорительно-накопительного комплекса (ИЖВЭ, Протвино) на энергию 3 ТэВ со сверхпроводящей магнитной дорожкой длиной 20 км, сверхпроводящего ускорителя "Нуклотрон" (ОИЯИ, Дубна), заканчивается сооружение сверхпроводящего модельного синхротрона СПИМ (ОИЯИ, Дубна). В США завершено строительство сверхпроводящего ускорителя Doubler (Батавия), рассчитанного на энергию 1 ТэВ.

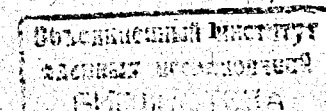
Опыт создания и длительной эксплуатации СМС пока еще недостаточен. Особенно серьезны проблемы, связанные с обеспечением безопасности в аварийных ситуациях, в частности, при переходе СМ в нормальное состояние, вскипании гелия при порче изоляционного вакуума в криостате СМС, а также воздействия на СМС радиационных тепловыделений.

В диссертации эти процессы исследуются с помощью криогенной термометрии, которая в настоящее время играет возрастающую роль в диагностике существующих установок. Значительное количество термометров, связанных с ЭВМ, позволяет оперативно исследовать работу различных узлов и, в конечном итоге, значительно сокращать время ввода установок в рабочий режим.

Для проведения исследований разработан специальный термометрический комплекс, состоящий из термометров и термопреобразователей, градуировочной установки и аппаратуры для регистрации быстрых процессов. Существующие криогенные термометры обладают многими недостатками. Поэтому исследован и предложен термометр на базе отечественного композиционного резистора типа ТВО^{1/1}, не уступающий зарубежным термометрам и принятый промышленностью для серийного изготовления.

Таким образом, актуальность диссертации обусловлена разработкой термометрического комплекса, исследованием нового криогенного термометра, получившего широкое применение в сверхпроводящих и криогенных устройствах, и получением новых экспериментальных данных о процессах, происходящих при аварийных ситуациях в магнитах и криостате ускорителя.

* - Сверхпроводящая магнитная система (СМС) включает в себя сверхпроводящий магнит (СМ), криостат, криогенное обеспечение, электропитание и аварийную защиту, устройства управления и контроля.



Цель работы. Настоящая диссертационная работа посвящена решению ряда физико-технических задач, связанных с созданием ускорителя с СМ погружного типа. Конкретно работа направлена на: 1) исследование метрологических и теплофизических характеристик криогенных термометров на базе резистора ТВО и создание термометрического комплекса; 2) исследование процессов нагрева обмотки дипольного СМ при эвакуации энергии из магнита без перехода и с переходом обмотки в нормальное состояние; 3) исследование процессов кипения гелия при аварийной порче изоляционного вакуума в криостате; 4) исследование влияния радиационных полей на погрешность температурных измерений в СМС ускорителей.

Научная новизна основных результатов диссертации заключается в следующем:

1. Исследован и предложен новый технический криогенный термометр на основе серийного композиционного резистора типа ТВО.
2. Предложена интерполяционная формула и усовершенствована методика градуировки термометров в диапазоне температур 4–300 К.
3. Разработана методика измерения температуры в нестационарных тепловых процессах СМС.
4. Получены экспериментальные результаты измерения максимальной температуры нагрева обмотки дипольного СМ при эвакуации энергии из магнита без перехода и с переходом обмотки в нормальное состояние.
5. Получены экспериментальные данные по удельному теплопритоку в жидкий гелий при аварийной порче изоляционного вакуума модельного криостата гелием при различных видах изоляции гелиевого сосуда.
6. Получены экспериментальные данные по влиянию радиационных полей на термометрическую характеристику криогенного термометра.

Практическая ценность и значимость работы:

I Предложен и использован в качестве технического криогенного термометра отечественный композиционный резистор типа ТВО, превосходящий по ряду параметров аналогичные термометры зарубежного производства, например, фирмы Аллен-Бредли. Оптимальной термометрической характеристикой обладает резистор ТВО-0,125 с номиналом $1 \text{ кОм} / 1^\circ$. Исследованы его метрологические и теплофизические характеристики. В результате совместных работ с ЛНПО "Термоприбор" /3/ термометры на основе резисторов ТВО признаны пригодными для промышленного применения.

2. Найдена интерполяционная градуировочная формула зависимости сопротивления датчика от температуры. Разработана программа расчета на ЭВМ СДС-6500 градуировочных таблиц. Интерполяционная формула и

коэффициенты градуировки использованы в микропроцессорной системе автоматизированного измерения температуры при исследованиях трех прототипных периодов установки СПИН и могут быть применены на других установках.

3. Создана и аттестована государственной комиссией установка для массовой градуировки термометров в интервале температур 4–78 К. На установке отградуировано и передано потребителям свыше 500 криогенных термометров с градуировочными таблицами. Второй экземпляр градуировочной установки поставлен в ЛНПО "Термоприбор" /3/.

4. Создано несколько модификаций термопреобразователей, которые применены на многих криогенных установках ОИЯИ и других научно-исследовательских организаций.

5. Измерена максимальная температура обмотки погружного дипольного магнита модельного синхротрона СПИН при эвакуации энергии из магнита без перехода и с переходом обмотки в нормальное состояние. Результаты измерений содействовали выбору оптимальных режимов эвакуации энергии из магнитов установки СПИН и подтвердили правильность разработанной в ЛВЭ ОИЯИ программы расчета на ЭВМ максимальной температуры обмотки СМ при переходе СМ в нормальное состояние.

6. Измерены удельные теплопритоки в жидкий гелий при аварийной порче изоляционного вакуума криостата гелием и получены данные, необходимые для расчета проходных сечений в криостате, трубопроводах и предохранительных клапанах установки СПИН.

7. Результаты исследований влияния флюенса ускоренных частиц на термометрическую характеристику криогенного термометра могут быть применены при диагностике СМ ускорителей и использованы в совместной ОИЯИ-МИФИ разработке термодатчиков-дозиметров для сверхпроводящих ускорителей.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах научно-исследовательского криогенного отдела ЛВЭ (1978–1985 гг.), на II-м симпозиуме по применению микро-ЭВМ и микропроцессоров (Будапешт, октябрь 1981 г.), на III-й Всесоюзной конференции "Криогенная техника-82" (Балашиха, 1982), на II-й Всесоюзной конференции по техническому использованию сверхпроводимости (Ленинград, 1983 г.), на I3-м Симпозиуме по физике и технике низких температур (ГДР, Гауссиг, 1984 г.). По материалам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ, приведенных в списке литературы.

Структура и объем диссертации определяются избранной темой. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения, содержит

148 страниц машинописного текста, в том числе 46 рисунков, 18 таблиц, библиографию из 82 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность исследования и контроля тепловых процессов в ускорительных СМС методами термометрии. Сформулированы цели работы, отмечена ее новизна и практическая ценность, кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе приведен обзор работ, связанных с использованием методов криогенной термометрии для исследования и контроля работы СМС. Сформулированы основные требования к криогенным термометрам, применяемым в СМС физики высоких энергий. Проведен сравнительный анализ существующих электрических методов измерения криогенных температур.

СМС кольцевых ускорителей погружного типа могут перейти в аварийное состояние по следующим основным причинам: выделение тепла в обмотке СМ при переходе ее в нормальное состояние, радиационные тепловыделения в элементах СМ, теплопритоки в жидкий гелий при порче изоляционного вакуума криостата. Тепловые процессы в СМС в аварийных ситуациях протекают с большими скоростями. Аварийные процессы в СМС изучены пока недостаточно.

Одним из критериев безопасности работы СМ является допустимая температура проводника в самой нагретой точке обмотки, перешедшей в нормальное состояние. В ЛВЭ ОИЯИ разработана программа расчета на ЭВМ максимальной температуры обмотки СМ при переходе в нормальное состояние. Возникла необходимость экспериментальной проверки программы, т.к. в расчетах учитывались не все факторы: теплоемкость изоляции проводника, реальный теплоотвод в жидкий гелий и др.

Процессы, происходящие в гелиевых криостатах при порче изоляционного вакуума, недостаточно изучены. Это вызывает трудности при расчете предохранительных устройств криостатов, т.к. в частности, нет экспериментальных данных по аварийному теплопритоку к жидкому гелию. Некоторые авторы считают, что наиболее серьезные аварии возникают при порче вакуума воздухом, а натекание гелия представляет несравненно меньшую опасность. Однако такая точка зрения справедлива только в том случае, если считать, что вероятно появление больших течей (несколько десятков мм²). Наиболее вероятные небольшие воздушные течи не представляют опасности, напротив, такие же гелиевые течи в конечном счете приводят к потере вакуума, т.к. гелий не конденсируется на криогенных поверхностях.

СМ ускорителей работают в радиационных полях. Можно предположить,

что значительная доза облучения будет при: настройке ускорителя, потере управления пучком, размещении СМ вблизи мишени или поглотителя пучка. Пучок ускоренных частиц может вызвать радиационный нагрев в обмотке СМ и создать аварийную ситуацию. Комплектующие СМ криогенные термометры диагностики также подвержены радиационному нагреву, что может привести к значительной погрешности измерения температуры СМ. Недостаточно исследованы вопросы радиационной стойкости криогенных термометров и влияния радиационных полей на погрешность измерения температуры в СМ ускорителей.

Вторая глава посвящена созданию термометрического комплекса, рассмотрены его состав и решаемые с его помощью задачи, изложены результаты исследования характеристик криогенного термометра на основе резистора ТВО.

Автором в качестве криогенных термометров впервые использованы отечественные композиционные резисторы типа ТВО-0,125, имеющие параметры не хуже, чем у резисторов фирмы Аллен-Бредли, а в отношении диапазона рабочих температур и длительной стабильности сопротивления даже лучше /1/.

При исследовании зависимости температурного коэффициента сопротивления резисторов от номинала (рис.1) обнаружено, что температурный коэффициент резко увеличивается, начиная с 70 Ом. В качестве тер-

мометра сопротивления композиционного (ТСК) используется резистор с оптимальным номиналом 1000 Ом, выбранный из-за приемлемой величины температурного коэффициента сопротивления и удобства стыковки с измерительными системами.

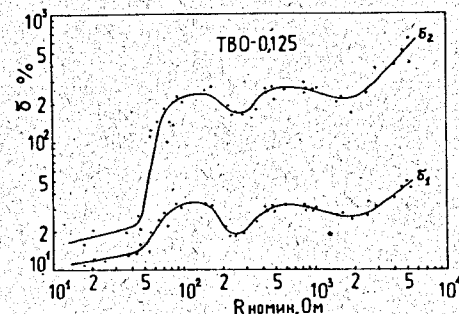


Рис. 1. Зависимость температурных коэффициентов сопротивления β_1 и β_2 резисторов ТВО от номинала R_n .

$$\beta_1 = \frac{R_{78K} - R_{300K}}{R_{300K}} \cdot 100\% ; \quad \beta_2 = \frac{R_{4,2K} - R_{300K}}{R_{300K}} \cdot 100\% ;$$

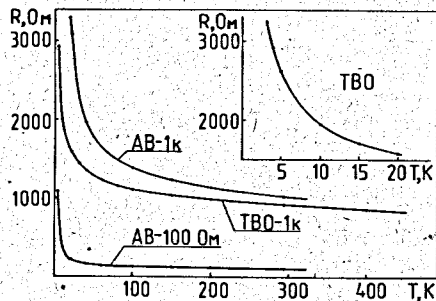


Рис. 2. Зависимость сопротивления R резисторов ТСО и Аллен-Бредли (АВ) от температуры T .

Исследован на ЭВМ вид зависимости сопротивления термометра от температуры (рис. 2) и на основе анализа градуировочных характеристик ~ 100 термометров найдена универсальная интерполяционная формула [2]:

$$T = \sum_{n=0}^m C_n \cdot (R_0/R)^n, \quad (1)$$

где R - измеряемое сопротивление термометра (на измерительном постоянном токе 10 мкА стабильном 10^{-5}); $R_0 = 1000$ Ом - номинальное сопротивление при комнатной температуре;

C_n - коэффициенты, определяемые по точкам градуировки методом наименьших квадратов, их число $n = 7$. Для интерполяции по формуле (1) в интервале температур 4-300К с погрешностью $\leq 0,5\%$ необходимо использовать не менее 8 температурных точек градуировки сопротивления термометра, равномерно распределенных в интервале сопротивлений от R 300К до R 4К [3].

Изучена длительная стабильность сопротивления 10 термометров ТСК, проверяемых ежемесячно в течение 5 лет - в пределах температурной погрешности 1% изменения показаний при 4,2К не обнаружено.

Для измерения чувствительности к магнитному полю термометры помещались в апертуру сверхпроводящего соленоида с индукцией B до 8Тл [3]. Изменение сопротивления термометров ТСК не зависит от ориентации относительно оси магнитного поля, а соответствующее значение температурной погрешности ΔT_B (при $T = 4,2$ К и B до 8Тл) может быть выражено формулой:

$$\Delta T_B = \alpha \cdot S_T \cdot B^2, \quad (2)$$

где $\alpha = 2,04 \cdot 10^{-6}$ - коэффициент пропорциональности, полученный экспериментально, S_T - температурная чувствительность термометра (Ом/К), B - индукция магнитного поля (Тл).

Измерены некоторые теплофизические параметры термометров ТСК в интервале температур 4-10К. Зависимость теплоемкости C термометра, определяемой методом термической релаксации, от температуры в интер-

вале 4-10К с погрешностью 10% описывается выражением [4]:

$$C_T = A \cdot T^3, \quad (3)$$

где $A = 2,06 \cdot 10^{-7}$; T - температура.

Собственная тепловая инерция термометра ТСК в жидком гелии (4,2К), измеренная методом импульсного нагрева измерительным током, составляет величину ~ 1 мс, при температуре 10К равна ~ 8 мс.

Создана установка для градуировки низкотемпературных термометров сопротивления, позволяющая градуировать за 1 смену партию из 20 термометров в диапазоне 4-78К с точностью 0,5%. Установка прошла государственную метрологическую аттестацию и введена в эксплуатацию в ЛВЭ ОИЯИ.

Создана многоканальная регистрирующая аппаратура для исследования быстропротекающих ($dT/dt \leq 100$ К/с) тепловых процессов, состоящая из: 10-канального аналогового мультиплексора, блока реального времени, блоков сопряжения, быстрой цифрпечати, многоканального перьевого самописца, прецизионных цифровых вольтметров класса 0,05%.

Третья глава посвящена исследованию некоторых аварийных тепловых процессов в погружных СМС. В ней решаются следующие две задачи: изучение процессов нагрева обмотки дипольного магнита модельного синхротрона при эвакуации энергии без перехода и с переходом обмотки в нормальное состояние, исследование процессов теплообмена при аварийной порче изоляционного вакуума гелиевых криостатов.

Разработаны термопреобразователи, состоящие из термометров ТСК и арматуры крепления и предназначенные для измерения температуры поверхности объектов, соприкасающихся с жидким гелием.

Измерена динамическая температурная погрешность δT_d термопреобразователя I (см. рис. 3) при предельной скорости теплового процесса модельного эксперимента.

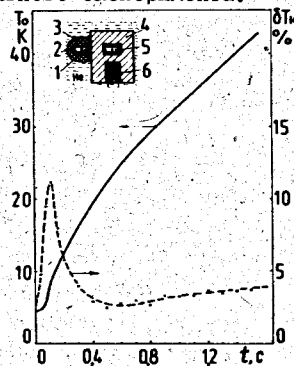


Рис. 3. Конструкция и динамическая температурная погрешность термопреобразователя I. 1 - термометр термопреобразователя, 2 - медный проволочный чехол, 3 - теплоизоляция, 4 - медный блок, 5 - реперный термометр (T_0), 6 - нагреватель.

Для характерных времен эвакуации энергии из дипольного СМ $\sim 0,2-0,6$ с динамическая температурная погрешность измерения термопреобразователем I равна 4-5%.

В связи с трудностью экспериментальной проверки динамической температурной погрешности $\delta T_{\text{и}}$ термопреобразователя II (см. рис. 4), расположенного на стенке гелиевого сосуда со стороны жидкого гелия, проведен термометрический анализ $\delta T_{\text{и}}$ такой конструкции.

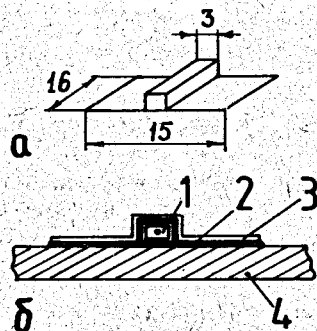


Рис. 4 Конструкция термопреобразователя II, а - размеры, б - сечение.

- 1 - термометр,
- 2 - медный теплопровод,
- 3 - покрытие из стали Х18Н9Т,
- 4 - стенка гелиевого сосуда из стали Х18Н9Т (толщиной 2 мм).

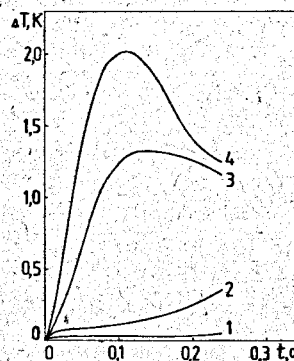
Задача установления соотношения между измеренной в термопреобразователе T изм. и истинной на поверхности стенки T температурами для нестационарного теплового процесса в общем виде не решается, но ее решение возможно при выполнении следующих условий: а) температура среды, омывающей стенку, в процессе измерения постоянна; б) закрепление термопреобразователя на стенке не изменяет плотность теплового потока; в) распределение температуры по толщине стенки линейное. Решение уравнения нестационарного теплообмена стенки с закрепленным на ней термопреобразователем приводит к формуле /8/:

$$\frac{T_{\text{изм.}}(S)}{T(S)} = \gamma_{\alpha} \cdot \frac{1 + \epsilon_{\alpha} \cdot S}{1 + \epsilon \cdot S} \quad (4)$$

где S - параметр преобразования Лапласа; $\gamma_{\alpha}, \epsilon_{\alpha}, \epsilon$ - безразмерные коэффициенты теплообмена и тепловой инерции элементов термопреобразователя. Расчетная тепловая инерция термопреобразователя II при $T=4,2$ К равна ~ 9 мс, а его динамическая температурная погрешность при характерных временах аварийного кипения гелия в криостате $\sim 10-20$ с дает величину $\sim 2,5$ %.

Измерение температуры обмотки дипольного СМ осуществлялось с помощью термопреобразователя I (см. рис. 3), расположенного на медианном

витке обмотки. Перевод участка проводника в нормальное состояние производился нагревателем. Эвакуация энергии из СМ происходила автоматически на внешнее омическое сопротивление по сигналу детектора нормальной зоны. Эксперименты проводились на специальном стенде /5/ при номинальном токе 2000 А (критический ток магнита ≈ 2200 А).



Измерены температуры обмотки СМ (см. рис. 5) при выводе энергии с различными скоростями спада тока. Например, при скорости спада тока $\dot{I} = 2,6 \cdot 10^5$ А/с температура обмотки достигает $T_{\text{макс.}} = 6,3$ К.

На основе измеренных значений температуры рассчитана степень подкритичности тока магнита в период эвакуации энергии. Для вычисления критических токов $I_c(t)$ магнита используется следующая эмпирическая формула:

Рис. 5. Температуры нагрева обмотки дипольного СМ без перевода в нормальное состояние при выводе энергии с разными напряжениями: 1 - 20В, 2 - 50В, 3 - 200В, 4 - 400В.

$$I_c(t) = S \cdot \frac{2j_{c10} \cdot H_{10}}{H(t) + H_{10}} \cdot \left(1 - \frac{T_{\alpha} - T_{\beta}}{T_c - T_{\beta}} \cdot \frac{H_c}{H_c - H(t)} \right) \quad (5)$$

где $H_{10}, H_c, H(t)$ - напряженности магнитного поля, соответственно, 10к Э, критическое (для НТ-50 ~ 100 кЭ), текущее; $T_{\alpha}, T_c, T(t)$ - температуры, соответственно, ванны гелия - 4,2К, критическая (для НТ-50 $\sim 9,2$ К), текущая в самой нагретой точке обмотки; j_{c10} - критическая плотность тока сверхпроводника при $H = 10$ кЭ; S - сечение сверхпроводника в шинке обмотки.

Расчеты показали, что данные магнита обладают достаточным запасом по критическому току ($\min \Delta I_c(t) = I_c(t) - I_c(t) = 500$ А) вплоть до скоростей изменения тока магнита $\dot{I} \leq 2,6 \cdot 10^5$ А/с.

Измерены температуры обмотки дипольного СМ при переходе обмотки в нормальное состояние и эвакуации энергии с различными скоростями на омическое сопротивление.

С помощью разработанной в ЛВЭ ОИЯИ программы на ЭВМ рассчитана максимальная температура обмотки, находящейся в адиабатических условиях.

Для расчетов использована формула:

$$\int_0^t I_{(t)}^2 \cdot dt = \gamma \cdot S^2 \cdot \int_{4,2}^{\theta} \frac{\bar{c}_p(\tau)}{\rho(\tau)} \cdot d\tau \quad (6)$$

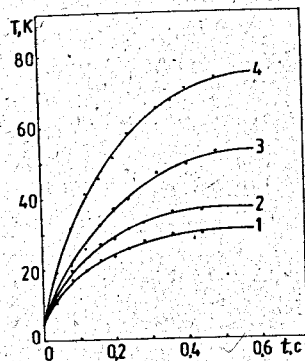


Рис. 6. Температура обмотки дипольного СМ с переходом в нормальное состояние при выводе энергии с разными напряжениями: 1 - 100В, 2 - 50В, 3 - 20В, 4 - 6В.

ется допустимым для безопасной работы обмотки дипольного магнита.

Исследования нагрева обмотки дипольного СМ содействовали выбору оптимального режима эвакуации энергии из магнитов модельного синхротрона.

Для решения задачи измерения удельного теплопритока к жидкому гелию при аварийной порче изоляционного вакуума криостата использовано уравнение теплопроводности стенки гелиевого сосуда:

$$q(t) = \frac{\lambda(\tau) \cdot \Delta T(t)}{\delta}, \quad (7)$$

где $\lambda(\tau)$ - интегральная теплопроводность материала стенки, δ - толщина стенки, $\Delta T(t)$ - разность показаний термометров, расположенных на наружной и внутренней поверхностях стенки гелиевого сосуда. Ход температур и полученная величина q в одном из характерных случаев показаны на рис. 7.

Определены максимальные удельные теплопритоки $q_{\text{макс}}$ к жидкому гелию при различных видах изоляции гелиевого сосуда и разных давлениях в сосуде. При использовании лавсановой пленки и давлениях в гелиевом сосуде 140-180 кПа получены величины $q_{\text{макс}} = 0,95-1,93 \text{ Вт/см}^2$. Выявлена неравномерность теплопритока в различных местах

где $I(t)$ - текущее значение тока магнита, $\bar{\rho}$ - средняя плотность проводника в обмотке, $C_p(\tau)$ - средняя удельная теплоемкость проводника, $\bar{R}(\tau)$ - среднее удельное сопротивление проводника, T - температура проводника, S - площадь поперечного сечения проводника, θ - максимальная температура, t - время.

Измеренные максимальные температуры обмотки удовлетворительно ($\sim 5-7\%$) согласуются с расчетными. Это показывает, что в расчетах можно не учитывать теплообмен нагретого проводника с соседними участками обмотки с жидким гелием. При эвакуации с напряжением 6В и медленном спаде тока $I \approx 6 \cdot 10^3 \text{ А/с}$ зарегистрирована величина $T_{\text{макс}} \approx 80\text{К}$, что является

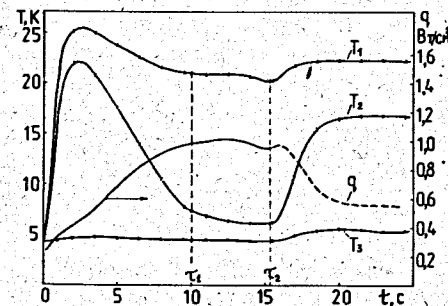


Рис. 7. Температуры, измеренные термометрами T_1, T_2, T_3 , которые расположены соответственно, на внешней и внутренней стенках гелиевого сосуда и в жидкости на высоте 80 мм от дна, и расчетный удельный теплоприток через стенку гелиевого сосуда после напуска гелия в изоляционное пространство криостата.

сосуда, например, в одном из экспериментов $q_{\text{макс}} = 0,76-1,72 \text{ Вт/см}^2$. При наличии азотного экрана и давлениях в сосуде 120-175 кПа получены $q_{\text{макс}} = 0,30-0,63 \text{ Вт/см}^2$. Измерения расхода гелия с помощью диафрагмы в линии обратного потока гелия подтвердили правильность результатов измерения удельного теплопритока с помощью температурных датчиков.

Для дополнительной проверки результаты измерений представлены в виде зависимости:

$$q = f(T_{\text{ст.}} - T_{\text{в}}), \quad (8)$$

где q - удельный тепловой поток от стенки сосуда в жидкий гелий; $T_{\text{в}}, T_{\text{ст.}}$ - температуры, соответственно, ванны жидкого гелия и стенки сосуда.

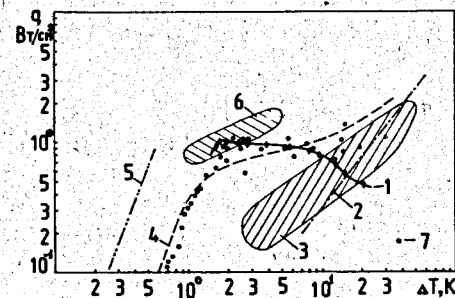


Рис. 8. Сравнение экспериментальных данных по зависимости плотности теплового потока от температурного градиента ΔT стенки - жидкость для различных режимов кипения жидкого гелия: 1 - экспериментальные данные для характерного случая, приведенного на рис. 7; 2 - расчет по уравнению Брина и Вествотера^{9/}; 3 - пленочное кипение гелия по работе^{10/}; 4 - кривая кипения гелия по работе^{11/}; 5 - расчет по уравнению Кутателадзе^{12/}; 6 - кризис кипения гелия по работе^{10/}; 7 - экспериментальные данные настоящей работы для отверстий напуска гелия в вакуум с диаметрами от 0,5 до 15 мм.

Проведено сравнение этой функции с литературными данными (рис.8). Экспериментальная зависимость (8) удовлетворительно согласуется с кривой кипения по работе [11].

На основе измерений рассчитаны предохранительные устройства СМС модельного синхротрона [7].

Четвертая глава посвящена исследованию влияния радиационных полей на погрешность температурных измерений в СМС ускорителей.

Частицы, теряемые ускоренным пучком, могут создавать существенные радиационные тепловыделения в обмотках СМ ускорителя и в элементах диагностики СМС ускорителя - криогенных термометрах. Исследования имели двоякую цель: во-первых, - определить погрешность измерения температуры в радиационных условиях, во-вторых - измерить радиационные характеристики термометра ТСК для разработки на его основе модели измерителя радиационных тепловыделений в СМ ускорителя.

Радиационная стойкость термометров ТСК проверена при облучении потоком быстрых нейтронов интенсивностью $\sim 3 \cdot 10^{12} \text{ н/см}^2 \text{ с}$. Уход термометрической характеристики ТСК ($T=4,2\text{К}$) за пределы погрешности 1% наступает при флюенсе $F > 10^{17} \text{ н/см}^2$, что доказывает возможность работы таких термометров в СМС ускорителей, где радиационные поля имеют значительно меньшую интенсивность.

Влияние попадания прямого пучка ускоренных частиц на показания термометров ТСК изучалось на синхрофазотроне ОИЯИ [4]. Датчики облучались пучками дейтонов и протонов с энергиями 7,31 ГэВ и 2,55 ГэВ соответственно. Термометры размещены в капсуле из эпоксидного компаунда и криостатировались при температурах $T_0 = 4,3-4,6\text{К}$. Абсолютное число частиц в импульсе определялось плоскопараллельной ионизационной камерой с погрешностью $\sim 7\%$. Характерный сигнал с термометра ТСК при попадании пучка протонов показан на рис.9. Максимум сигнала соответствует радиационному нагреву термометра до температуры $\sim 4,5\text{К}$ ($T_0 = 4,2\text{К}$). Радиационный нагрев термометра до максимума происходит с временем, характерным для собственной тепловой инерции $\sim 1 \text{ мс}$ (при $T = 4,2\text{К}$), которое существенно меньше длительности пучка. Поэтому основная погрешность измерения температуры обмотки СМ в момент прямого попадания пучка определяется интенсивностью пучка. Абсолютная калибровка радиационного нагрева ΔT термометра ТСК в зависимости от флюенса F дейтонов показана на рис.10. Эта калибровка используется при обработке результатов измерений температуры элементов СМ в момент прохода пучка.

Определена аналитическая зависимость между температурой термометра T_i и флюенсом F_i частиц (протонов, $E_p = 2,55 \text{ ГэВ}$):

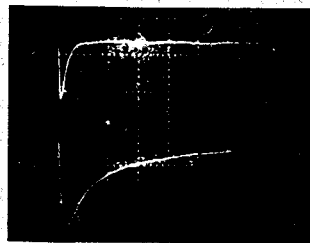


Рис.9. Оциллограмма импульсов от пучка протонов ($E_p = 2,55 \text{ ГэВ}$, интенсивность $2 \cdot 10^{10}$) длительностью 6 мс: сверху - импульс с синтиллятора; внизу - импульс с термометра ТСК.

Масштаб: по вертикали - 0,2 В/дел; по горизонтали - 10 мс/дел.

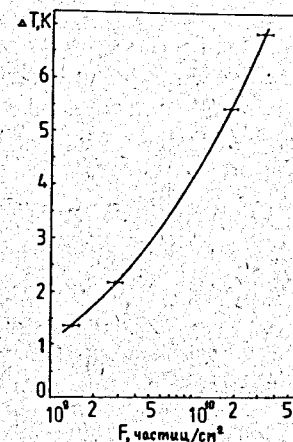


Рис.10. Зависимость максимального перегрева ΔT термометра ТСК от флюенса F дейтонов.

$$F_{pi} = 2,34 \cdot 10^6 (T_i^4 - T_0^4), \quad (9)$$

где T_0 - начальная температура термометра до облучения. Погрешность измерения температуры $< 1\%$ в момент прохождения пучка достигается при флюенсах $F \leq 3 \cdot 10^8 \text{ частиц/см}^2$.

Результаты исследований перегрева термометров при облучении пучками частиц показали возможность определения с удовлетворительной погрешностью как флюенса падающих на них частиц, так и энерговыделения. Это обстоятельство позволяет рекомендовать термометры ТСК в автоматизированных системах контроля потерь частиц, что имеет важное значение для оптимальной настройки и безаварийной эксплуатации сверхпроводящих ускорителей высоких энергий.

Пятая глава посвящена разработке и применению различных термопреобразователей в криогенных стендах и установках ЛВЭ ОИЯИ. Обсуждаются особенности измерения температуры в циркуляционных и погружных системах, и криогенных объектов в вакууме. Рассмотрены вопросы автоматизации измерений на крупных установках с большим количеством термометров на примере микропроцессорной системы измерения температуры на 3-х прототипных периодах установки СПИН. Описаны совместные исследования ОИЯИ-ЛНПО "Термоприбор" по применению резисторов ТВО в моделях промышленных термопреобразователей для измерения температуры элементов СМ в вакууме.