

M-613

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13-95-291

На правах рукописи
УДК 536.24.08

МИНАШКИН
Владимир Фёдорович

СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСА
АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ
И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ
ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ С НОРМАЛЬНЫМ
И СВЕРХТЕКУЧИМ ГЕЛИЕМ

Специальности: 01.04.01 — техника физического эксперимента,
физика приборов, автоматизация физических исследований,
01.04.09 — физика низких температур

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1995

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий
Объединённого института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор технических наук,

старший научный сотрудник

Филиппов Юрий Петрович

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник

Инкин Виктор Дмитриевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор

Писарев А.Ф.

кандидат технических наук,

доцент МИФИ

Харитонов В.С.

Ведущее предприятие – Институт физики высоких энергий, г.Протвино.

Защита состоится " " 1995г. на заседании диссертационного
совета Д-047.01.02 в Лаборатории высоких энергий Объединённого
института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " " 1995г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

Лихачёв М.Ф.

Актуальность работы. Последние годы отмечены активным изучением проблемы нестационарной теплопередачи в системе "твёрдое тело – криогенная жидкость". Это вызвано не только дальнейшим развитием теории переноса тепла, но и потребностями передовых технологий: энергетики, космической и ускорительной техники. Например, при эксплуатации современных ускорителей возможна спонтанная генерация нормальной зоны в сверхпроводящих обмотках магнитов и их разрушение, в связи с чем количественная информация о нестационарной теплопередаче к жидкому гелию становится весьма важной. Кроме того, довольно высокая стоимость сверхпроводящих магнитов и систем криогенного обеспечения побуждает разработчиков к предварительной оптимизации этих устройств, проводимой на моделях. Что касается имеющихся экспериментальных данных по нестационарной теплопередаче к жидкому гелию, то приходится признать их недостаточность, неполноту, зачастую и невысокую точность. Особо следует отметить, что влияние формы теплового импульса и геометрии эксперимента* на динамику тепловых процессов в нормальном и сверхтекучем гелии практически не изучено, что связано с отсутствием соответствующего экспериментального оборудования и методик организации экспериментов. Таким образом, работа по созданию экспериментального оборудования и получению на нём экспериментальных данных будет актуальна.

Цель работы состояла в разработке, создании и практическом применении комплекса аппаратно – программных средств (КАПС) для получения экспериментальных данных по динамике тепловых процессов в нормальном и сверхтекучем гелии с учётом следующей особенности: в качестве экспериментальных образцов должны использоваться тепловыделяющие элементы (ТВЭ), поверхности которых служат одновременно и малоинерционными датчиками температуры. Для нормального и сверхтекучего гелия КАПС должен обеспечивать проведение исследований по влиянию формы теплового импульса и геометрии эксперимента на характеристики нестационарной теплопередачи как в режимах нагрева, так и охлаждения.

* Здесь и далее по тексту под геометрией эксперимента понимается: именно геометрия твёрдого тела (плоская, цилиндрическая, сферическая); конфигурация теплопередачи (жидкость в большом объёме – нагреватель, жидкость в стеснённых условиях – нагреватель); распределение энерговыделения по объёму/поверхности нагревателя.

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
БИБЛИОТЕКА

Научная новизна работы

– Впервые в исследованиях характеристик нестационарной теплопередачи в системах с нормальным и сверхтекучим гелием при применении экспериментальных образцов на основе ТВЭ в виде малоинерционных нагревателей – термометров с помощью входящего в состав КАПС специально созданного усилителя мощности обеспечено постоянство во времени мощности джоулевого тепловыделения в ТВЭ. Для этих условий решена задача измерения температуры тепловыделяющей поверхности как во время нагрева, так и в процессе охлаждения с контролем подводимой мощности. Предложена и создана многоканальная электронная система и пакет программных средств, которые позволяют исследовать пространственные характеристики нестационарной теплопередачи. Внедрены оригинальные методики с соответствующей аппаратурой и программным обеспечением для подготовки системы к экспериментам и проведения исследований.

– Для организации связи аппаратуры криогенного стенда с удалённой (до 500 метров) ЭВМ в условиях сильных электромагнитных помех разработаны и созданы структура информационных сообщений и комплект аппаратуры, обеспечивающий обмен информацией последовательным кодом по одному коаксиальному кабелю с использованием широтно – импульсной модуляции с производительностью линии связи до 10 Кбайт/с. Высокая помехозащищённость при передаче информации достигается модуляцией сигналов, их синхронизацией, структурой информационного сообщения, аппаратно – программным контролем проверки правильности передаваемого сообщения (контроль по чётности и по количеству импульсов). Число крейтов КАМАК, подключаемых этой аппаратурой, составляет от одного до четырёх.

– В исследованиях нестационарной теплопередачи в системе "твёрдое тело – нормальный гелий" при нагрузках, близких к стационарной величине кризиса кипения, обнаружена область тепловой неустойчивости, в пределах которой наблюдается ряд нелинейных эффектов.

Практическая ценность работы

Экспериментальные данные о нестационарных тепловых процессах под воздействием теплового импульса трапецеидальной формы при регулируемой длительности переднего фронта послужили основой для построения карты режимов нестационарной теплопередачи в нормальном гелии.

На основе экспериментальных данных по исследованию нестационарной теплопередачи к вынужденным потокам двухфазного гелия от шестиканального образца количественно оценено различие в

интенсивности процесса теплоотдачи для разных характерных зон, что позволяет получать информацию о пространственных характеристиках нестационарной теплопередачи, например, при расслоённом режиме течения.

Экспериментальные данные по динамике тепловых процессов в нормальном и сверхтекучем гелии в режимах нагрева и охлаждения могут быть полезны при анализе условий генерации, эволюции и коллапса нормальной зоны в сверхпроводниках.

На основе полученных данных установлен линейный характер зависимости критической энергии образования квантовых вихрей от размера канала^{8/} со сверхтекучим гелием.

В настоящее время разработанная электронная аппаратура и пакет программных средств продолжают использоваться для дальнейшего углубления и расширения исследований по нестационарной теплопередаче к нормальному и сверхтекучему гелию. Кроме того, аппаратура связи с удалённой ЭВМ также использовалась и в системе управления ускорителя КУТИ^{10/}.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на научно-методических семинарах ЛСВЭ ОИЯИ, на 6-й Всесоюзной конференции "Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ" (Новосибирск, 1981 г.), на Международном симпозиуме "Теплообмен в криогенных системах" (Харьков, 1985 г.), на 13 Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий (Новосибирск, 1987 г.), на конференции по криогенной технике (США, 1990 г.). По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она содержит 84 страницы текста, 38 рисунков и список литературы из 38 наименований.

Содержание диссертации

В первой главе кратко рассматривается организация экспериментальных исследований нестационарной теплопередачи в нормальном (HeI) и сверхтекучем гелии (HeII). Исследование нестационарных тепловых процессов большей частью сводится к получению при разных условиях экспериментов (ориентации образца, его геометрии, материалов, давления в He и т.д.) зависимостей вида $\Delta T(t, Q) = T_{\text{пов}}(t, Q) - T_{\text{ж}}$, где t – время, Q – плотность теплового потока на единицу тепловыделяющей поверхности (в свою очередь $Q = Q(t)$), $T_{\text{пов}}$ – температура тепловыделяющей поверхности, $T_{\text{ж}}$ – средняя температура жидкости в рассматриваемом объёме (рис.1). Особо следует отметить,

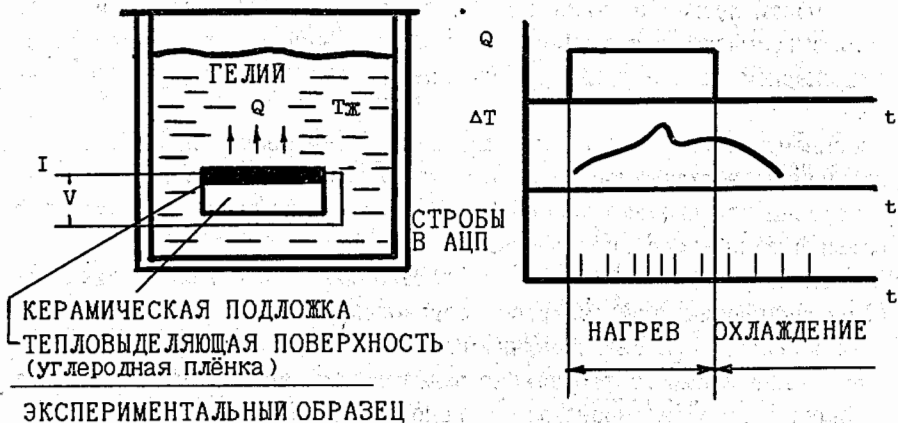


Рис.1. Пример организации исследований нестационарной теплопередачи.

что для корректного определения причины изменения температуры поверхности ТВЭ в ряде экспериментов требуется обеспечить стабилизацию мощности тепловыделения ТВЭ, т.е. использовать мощность тепловыделения в качестве параметра.

Построение аппаратуры и разработка соответствующего программного обеспечения в значительной мере определяется типом и характеристиками используемых экспериментальных образцов. В исследованиях, проводимых на криогенном стенде ЛСВЭ ОИЯИ, предпочтение отдано экспериментальному образцу, построенному на основе ТВЭ, у которых тепловыделяющая поверхность выполнена из тонкой углеродной плёнки, которая служит одновременно малоинерционным нагревателем и высокочувствительным термопреобразователем. Конструктивно образец представляет собой вакуумированную керамическую трубку с напылённой на её поверхность плёнкой. Сопротивление плёнки в рабочем диапазоне температур (1.5÷5.5 К) составляет от 6 кОм до 1 кОм и обладает отрицательным температурным коэффициентом, время тепловой реакции менее 100 нс. В зависимости от решаемой задачи экспериментальный образец может иметь от одного до шести тепловыделяющих элементов, что даёт возможность исследовать пространственные характеристики теплопередачи (например по длине и углу ТВЭ).

В заключительной части первой главы поставлены задачи для отдельных частей КАПС для исследования нестационарной теплопередачи с учётом характеристик ТВЭ и планируемых экспериментов. При решении

этих задач учитывалась необходимость максимального использования уже разработанной аппаратуры и поэтапный ввод системы в эксплуатацию с целью скорейшего получения экспериментальных данных. Кроме того, для выбора оптимальных режимов работы и контроля в системе предусматривалась возможность вывода предварительных результатов исследования в удобном виде и записи данных на долговременное устройство хранения для последующей обработки.

В планируемых экспериментах предполагалось получать в ТВЭ тепловые потоки с удельной мощностью в диапазоне $Q=600+60000 \text{ Вт/м}^2$. При этом необходимо производить измерение температуры тепловыделяющей поверхности ТВЭ как в режиме нагрева, когда выделяется значительная мощность, так и в режиме охлаждения, начиная через несколько микросекунд после снятия мощности. Исходя из размеров теплоотдающей поверхности применяемых экспериментальных образцов и их сопротивления электрическому току, это требование приводит к необходимости использования устройства питания ТВЭ с выходной мощностью до 40 Вт. В большинстве случаев стандартная управляющая аппаратура имеет маломощные выходные сигналы и поэтому в качестве устройства питания должен использоваться усилитель мощности, обеспечивающий усиление управляющего сигнала до необходимого уровня. Для выполнения основного требования к аппаратуре – обеспечения постоянства рассеиваемой в ТВЭ джоулевой мощности – усилитель мощности (УМ) должен снабжаться режимом стабилизации мощности с точностью не хуже 4%. При этом минимально допустимый фронт импульсов мощности на нагрузке не должен превышать 20 мкс с длительностью самих импульсов мощности в пределах от 100 микросекунд до десятков минут. Кроме этого, в УМ необходимо иметь выходные нормированные сигналы, амплитуда которых несёт информацию о величине нагрузки и уровне мощности в ней. Эти величины должны измеряться с погрешностью не более 4%. Для повышения надёжности работы системы в целом УМ должен обладать эффективной защитой от перегрузок.

Аппаратура управления должна, в основном, выполнять две функции: задание параметров импульсов мощности, и организация измерения сигналов, несущих информацию о величине сопротивления ТВЭ (т.е. температуры теплоотдающей поверхности) и уровне мощности в ней в определённые моменты времени. При этом требуется интервал между измерениями от 30 мкс и более; число экспериментальных точек за один цикл "нагрев-охлаждение" может достигать 8×10^3 .

В системе требуется предусмотреть также устройства, обеспечивающие необходимые точности задания уровня мощности и определения величины сопротивления ТВЭ в условиях эксплуатации

многоканальной системы. Таким образом, в составе электронной системы должны также находиться высокоточное сопротивление, имитирующее сопротивление ТВЭ, эталонные приборы для калибровки и устройство, обеспечивающее согласование этих вспомогательных элементов с другими частями электронной системы.

Оптимальное использование аппаратуры системы при выполнении поставленных задач может быть достигнуто только в результате применения специально разработанных методик и программного обеспечения экспериментов. С этой целью необходимо произвести анализ режимов питания ТВЭ, разработать методики калибровки управляющих и измерительных каналов, а также методику подготовки системы в целом и программного обеспечения для исследования влияния параметров импульса мощности на характеристики нестационарной теплопередачи.

В связи с тем, что на первом этапе создания на криогенном стенде ЛСВЭ ОИЯИ системы для исследований из-за специфики этого стенда аппаратура системы и ЭВМ, управляющая этой системой, с периферийным оборудованием находились в разных помещениях с расстоянием между ними до 100 метров, требовалось обеспечить надёжную связь между ними в условиях значительных электромагнитных помех.

Во второй главе приведена информация о структуре и составных частях разработанной и созданной системы (рис.2) на криогенном стенде ЛСВЭ ОИЯИ для исследований динамики тепловых процессов.

В системе условно можно выделить несколько частей:

- усилители мощности (УМ1+УМ6), которые усиливают по мощности управляющие сигналы и формируют нормированные сигналы, несущие информацию о величине нагрузки ($R_{ТВЭ}$) и выделяющейся в ней мощности;
- подсистема управления (ГУИ, ГАС, АЦП), которая согласно разработанным алгоритмам задаёт мощность в ТВЭ с различными законами изменения во времени, а также организует в определённые моменты времени измерение сопротивления этих ТВЭ;
- аппаратура калибровки (БА, ЦВ, $R_{ЭКВ}$), которая обеспечивает необходимые параметры системы периодической калибровкой управляющих и измерительных каналов по разработанным методикам;
- ЭВМ с периферийным оборудованием и аппаратурой связи, которая управляет элементами системы.

Одним из основных элементов системы является усилитель мощности (рис.3). В зависимости от решаемой задачи их число может быть от одного до шести. Конструктивно УМ выполнен в механике стандарта КАМАК, что облегчает изготовление и совместимость УМ с применяемой на криогенном стенде аппаратурой в стандарте КАМАК.

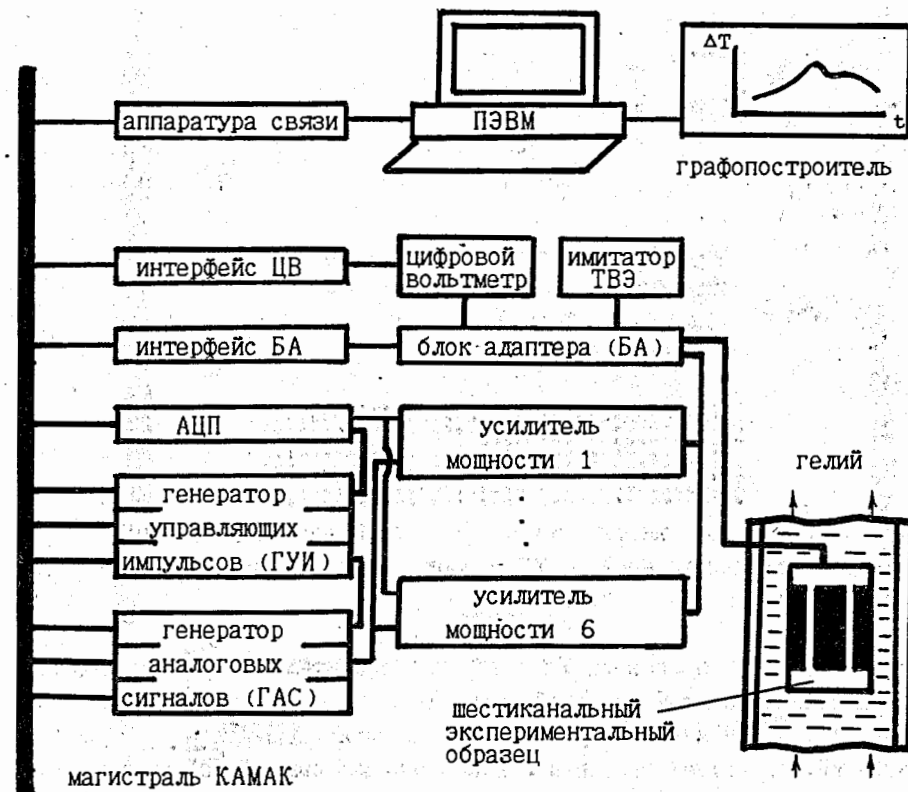


Рис. 2. Структурная схема системы.

УМ состоит из пяти блоков, соединённых шиной, которая расположена на задних панелях блоков. Управление работой УМ, связь с нагрузкой и съём сигналов, пропорциональных току и напряжению в нагрузке, осуществляется с передних панелей блоков. Особенность УМ состоит в том, что он имеет два режима стабилизации - мощности и напряжения. На нагрузке 1+6 кОм диапазон выходных напряжений УМ составляет от 0+100 В и 0+200 В с рабочими областями 20+100 В и 100+200 В соответственно. Максимальная выходная мощность УМ - 40 Вт, нестабильность мощности $\leq 4\%$. Минимальная длительность фронтов импульсов мощности в режиме стабилизации мощности не превышает 20 мкс, а в режиме стабилизации напряжения ≤ 10 мкс. Максимальная длительность импульсов не ограничена (определяется только условиями

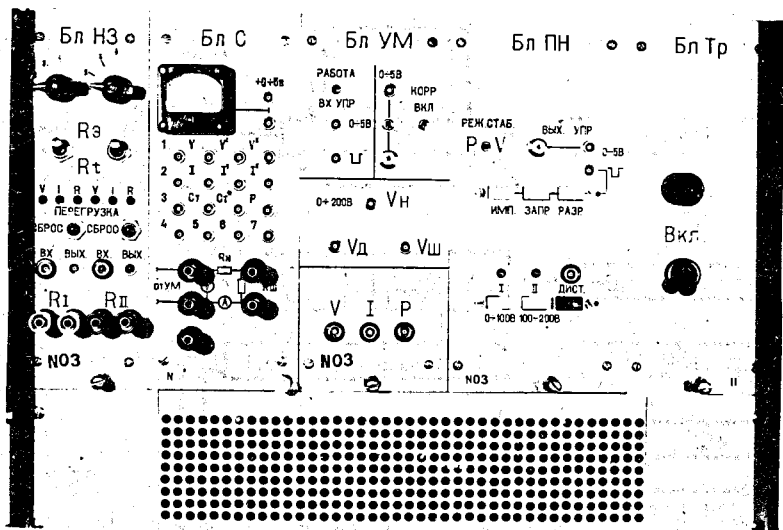


Рис.3. Усилитель мощности. БлТр – блок трансформаторов, БлПН – блок питающих напряжений, БлУМ – блок усилителя мощности, БлС – блок согласования, БлНЗ – блок нагрузок и защиты.

эксперимента). Так как от УМ требуется значительное быстродействие при довольно большой выходной мощности с высокими требованиями по точности стабилизации мощности в широком диапазоне изменения нагрузки, то встает проблема обеспечения устойчивой работы УМ, т.е. отсутствие самовозбуждения при максимально достижимом быстродействии и точности стабилизации. Для решения этой задачи составлялась динамическая модель УМ и исследовалась устойчивость этой модели. Результаты исследований реализованы в схемном решении УМ. Усилитель мощности обеспечивает нормированные выходные сигналы, которые несут информацию о уровне мощности в нагрузке и о величине нагрузки как в режиме нагрева, так и в процессе охлаждения. При этом в процессе охлаждения пропускается только измерительный ток, меньший на два порядка по сравнению с током в режиме нагрева. Следует отметить, что измерение в режиме охлаждения может происходить через несколько микросекунд после окончания режима нагрева.

Назначение блоков УМ следующее. Блок трансформаторов и блок питающих напряжений обеспечивают питание элементов схем и управление режимами работы УМ. Главный узел УМ, обеспечивающий выдачу стабилизированной мощности (напряжения) в нагрузку, располагается в блоке усилителя мощности. Блок согласования служит для организации измерения величины сопротивления ТВЭ в режиме охлаждения. Блок нагрузок и защиты содержит набор сопротивлений из

рабочего диапазона для настройки и проверки работы БлУМ и схему, отвечающую за защиту УМ от перегрузок. Кроме того, для проверки динамических свойств УМ используется специально разработанная для этого случая активная нагрузка, создающее ступенчатое (с фронтом ≤ 2 мкс) изменение величины нагрузки.

Управление УМ осуществляется двумя видами сигналов – аналоговым сигналом в диапазоне 0-5 В, задающим уровень мощности в нагрузке (поступает с ГАС), и сигналом ТТЛ уровня, который служит для управления длительностью импульса мощности (поступает с ГУИ).

ГАС состоит из блока памяти, в котором хранятся коды формы и уровня аналогового сигнала на выходе ГАС, устройства сопряжения памяти с блоком шестиканального цифро-аналогового преобразователя (рис.4). Синхронная работа блоков обеспечивается с помощью импульсов, поступающих с ГУИ.

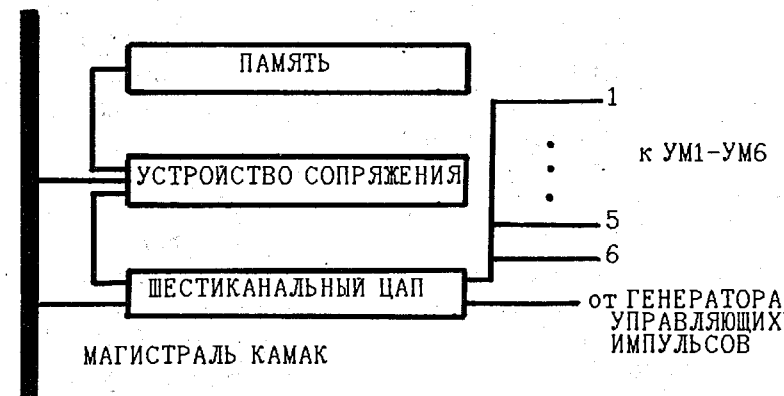


Рис.4. Структурная схема генератора аналоговых сигналов.

Генератор управляющих импульсов (рис.5) задаёт длительность импульса мощности на нагрузке, временное положение и количество импульсов запуска АЦП, а также импульсы для организации в ГАС управляющих аналоговых сигналов для УМ.

Получение требуемых характеристик электронной системы достигается периодической калибровкой управляющих и измерительных каналов. Разработанная для этого аппаратура с соответствующими методиками состоит из переменного высокоточного эквивалентного сопротивления

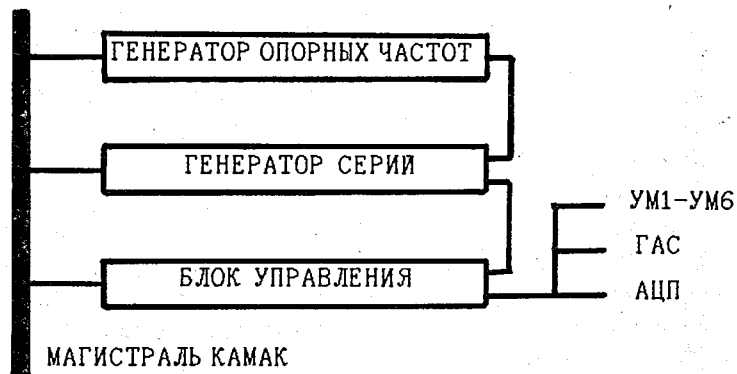


Рис.5. Структурная схема генератора управляющих импульсов.

$R_{\text{экв}}$, с помощью которого имитируется $R_{\text{ТВЭ}}$, цифрового вольтметра (ЦВ) с контроллером связи и блока адаптера (БА), посредством которого производятся необходимые подключения. Отличительная особенность применяемой аппаратуры состоит в том, что переход из режима калибровки в режим работы и обратно осуществляется без дополнительных коммутаций, что значительно упрощает процесс калибровки и сокращает его время. Это особенно важно в случае использования многоканальной системы.

В третьей главе рассматривается организация связи аппаратуры криогенного стенда с ЭВМ. Специфика криогенного стенда состоит в том, что он включает большое количество мощных силовых установок (компрессоры, электромоторы, вакуумные насосы и т.д.), которые создают высокий уровень вибраций и значительные электромагнитные помехи. Поэтому необходимо было предварительно подготовить специальное место, чтобы ослабить эти отрицательные воздействия на аппаратуру со стороны силовых установок. В связи с этим на первом этапе ЭВМ с периферийным оборудованием и аппаратура криогенного стенда располагались в разных помещениях. Расстояние между этими помещениями было около 100 метров. На этом этапе создания системы связь аппаратуры с ЭВМ была организована с помощью специально разработанной для таких случаев аппаратуры расширения ветви КАМАК. В окончательном варианте после двухлетней модернизации криогенного стенда ЭВМ была установлена на криогенном стенде и, соответственно, связь с аппаратурой осуществлялась стандартными для данного типа ЭВМ средствами. При этом сохранена возможность перестройки системы на случай удалённых измерений.

Комплект аппаратуры расширения ветви КАМАК состоит из основных (M1, M2) и сервисных блоков, облегчающих настройку и эксплуатацию аппаратуры (имитатор команд блока M1, блок индикации содержимого линии связи блоков M1 и M2, блок десятичной индикации шин R, W магистрали КАМАК). Модуль M1 включается в крейт ветви КАМАК и обслуживает от одного до четырёх крейтов с контроллерами M2. Обмен информацией происходит последовательным кодом по одному коаксиальному кабелю с использованием широтно - импульсной модуляции (рис.6).

Диалог между M1 и M2 построен по принципу "Команда - Ответ" независимо от вида выполняемой в крейте команды и один цикл занимает 0.5 мс. Сообщение типа "Команда" содержит информацию вида (С; N; A; F; DATA), а сообщение типа "Ответ" - (X; Q; L; DATA). Знак "" указывает, что символы относятся к крейтам расширения ветви КАМАК. Под данные DATA отведено 16 разрядов. Обмен информацией сопровождается контролем по чётности и количеству импульсов. В блоке M1 реализован режим "Поиск L". Блоки M1 и M2 при имеющихся в них схемах ввода/вывода могут работать при расстоянии между ними до 500 метров. К числу достоинств применения созданного комплекта аппаратуры для организации связи следует отнести высокую помехоустойчивость, лёгкость организации связи и наличие сервисных блоков, повышающих эффективность эксплуатации этой аппаратуры. При

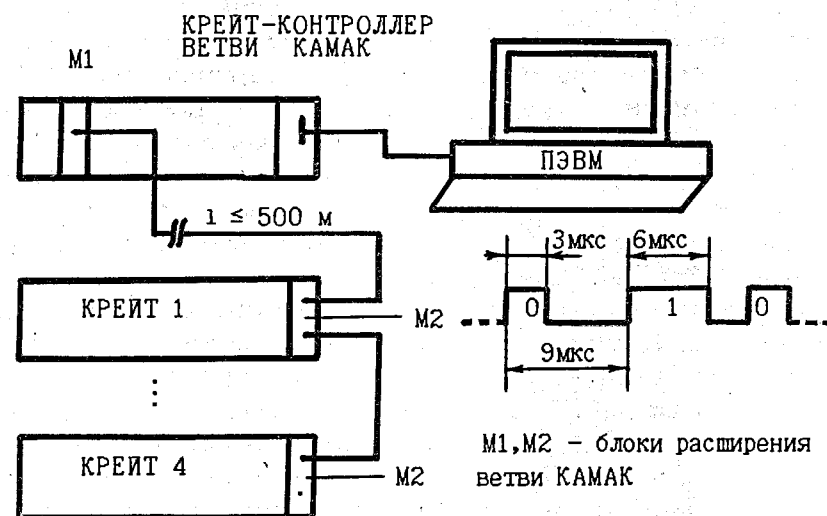


Рис.6. Организация связи и временные соотношения информационных импульсов.

этом высокая надёжность безошибочной передачи в этой системе достигается комплексно: высокий уровень сигнала при широтно-импульсной модуляции, выполнение команды в управляемом кreyте только в случае правильности приёма информации, контроль по чётности информационного сообщения и по количеству импульсов в нём, предварительная начальная установка в блоке М2 перед приёмом каждого информационного сообщения, синхронизация.

Четвёртая глава посвящена методикам организации экспериментов. В начале главы проводится оценка режимов питания экспериментального образца, имеющего в зависимости от решаемой задачи от одного до шести ТВЭ, с целью определения оптимального режима работы УМ. Показано, что в случае использования мощности тепловыделения в качестве параметра при исследованиях с применением ТВЭ с совмещённым нагревателем – термодатчиком (сопротивление нагрузки УМ в этом случае находится в диапазоне 1+6 кОм) наиболее оптимальным является работа УМ в режиме стабилизации мощности (погрешность менее 4%, которая определяется характеристиками УМ). При использовании режимов стабилизации напряжения или тока относительное изменение мощности тепловыделения будет соответственно около 500% и свыше 80%.

В следующей части этой главы приведена методика калибровки управляющего канала, цель которой состоит в определении зависимости $R_{\text{вых}} = f(N)$, где N – код соответствующего управляющего канала ЦАПа. Отличительная особенность калибровки заключается в том, что эквивалентное сопротивление выберётся максимальным из рабочего диапазона. Связано это со свойствами ТВЭ и характеристиками УМ.

Следует отметить, что измерение сопротивления ТВЭ в режиме нагрева и охлаждения осуществляется разными способами, поэтому и методики калибровки измерительных каналов различны для каждого режима.

Измерение сопротивления ТВЭ и уровня мощности в ней в режиме нагрева производится путём одновременного определения мгновенных значений сигналов, пропорциональных току и напряжению в ТВЭ. Применение такой организации измерений дополнительно повышает достоверность результатов. В задачу калибровки входит определение зависимостей вида $N_I = f(I_H)$ и $N_U = f(U_H)$, где N_I и N_U – коды соответствующих АЦП, I_H и U_H – ток и напряжение на сопротивлении ТВЭ. Отличительная особенность применяемой методики состоит в том, что зависимости по току и напряжению снимаются одновременно за один цикл по всему диапазону, что существенно сокращает время калибровки. Достигается это выбором определённого значения $R_{\text{экв}}$ и использованием режима стабилизации напряжения УМ.

Цель калибровки измерительного канала в режиме охлаждения

заключается в получении зависимости $N = f(R_{\text{экв}})$, где N – код АЦП, измеряющего ток в ТВЭ, $R_{\text{экв}}$ – сопротивление имитирующее ТВЭ. В этом случае особенность состоит в том, что на ТВЭ подаются измерительные импульсы напряжения (амплитудой 6 В и длительностью 10+20 мкс) и определяется величина тока в ТВЭ.

Следует отметить, что полученные в результате калибровок измерительных каналов зависимости $N_I = f(I_H)$, $N_U = f(U_H)$ и $N = f(R_{\text{экв}})$ были нелинейны. Поэтому при измерениях применялась кусочно-линейная аппроксимация этих зависимостей. Число узловых точек в каждом конкретном случае выбиралось исходя из требуемой точности измерения.

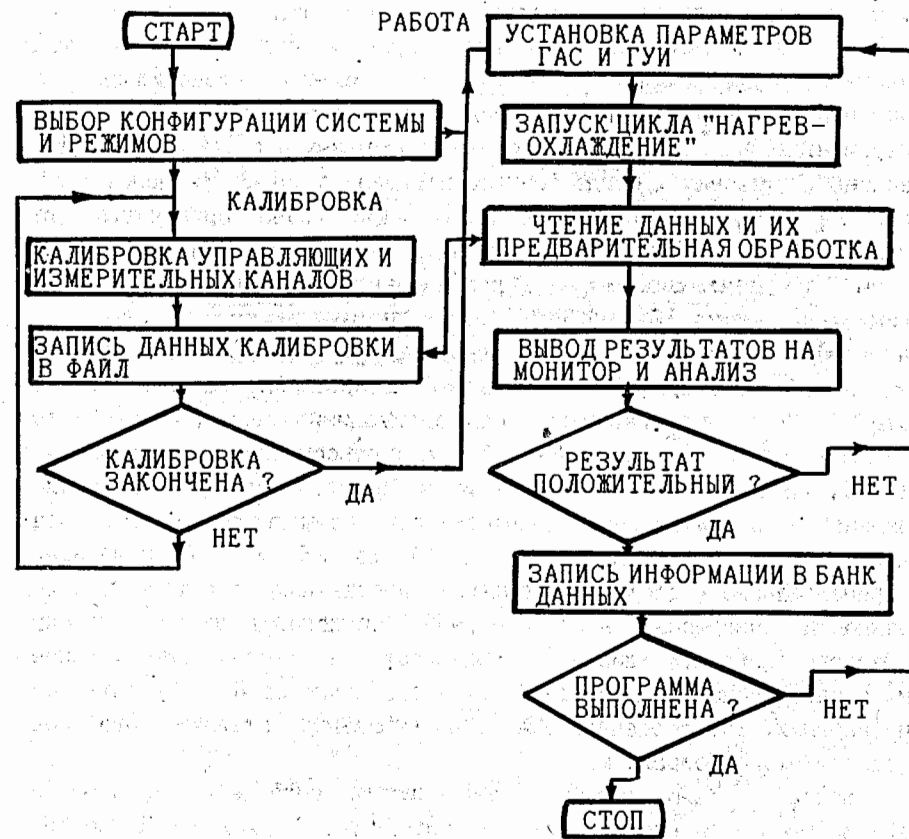


Рис. 7. Блок-схема алгоритма проведения исследований.

Далее в этой главе рассмотрена методика подготовки электронной аппаратуры для проведения экспериментов по исследованию влияния параметров импульсов мощности на характеристики нестационарной теплопередачи. Применяемая методика позволяет провести тестирование отдельных частей системы и предварительную отработку параметров управляющих сигналов на $R_{ЭКВ}$ с последующим переключением на ТВЭ. Такая методика даёт возможность существенно сократить затраты и время на получение экспериментальных данных.

В конце главы приводится программное обеспечение, которое управляет работой системы в режимах калибровки, сбора данных и предварительного отбора данных с использованием графического представления результатов.

В пятой главе представлены некоторые результаты, полученные на криогенном стенде ЛСВЭ ОИЯИ при использовании созданного комплекса аппаратно - программных средств. Эксперименты проводились с нормальным и сверхтекучим гелием при различных ориентациях экспериментальных образцов, в свободных условиях и в так называемых "стеснённых" условиях, когда образец помещали в канал, расположенный вокруг теплоотдающей поверхности. В этой главе приводятся те результаты, которые отражают основные характеристики созданной системы. Эти результаты получены как в соавторстве, так и отдельно другими сотрудниками ЛСВЭ ОИЯИ.

Закономерности теплопередачи к вынужденным потокам двухфазного гелия при стационарном и импульсном нагреве исследовались в работе ^{3/}. Условия эксперимента были следующими: массовая скорость $w=25 \pm 110 \text{ кг/м}^2\text{с}$, давление $P=1.25 \text{ Па}$, относительная энтальпия $x=-0.1 \pm 1$, удельные тепловые потоки $q=75 \pm 5000 \text{ Вт/м}^2$, нагрузки стационарные и импульсные, длительность прямоугольного импульса мощности находилась в пределах от 10 до 25 мс. Проведённые экспериментальные исследования выявили качественные и количественные особенности процесса нестационарной теплопередачи к потоку двухфазного гелия при одиночных импульсах, а также существенное отличие нестационарных характеристик этого процесса по сравнению со стационарными. Это особенно заметно на начальных стадиях процесса для относительно больших величин Q и x .

В работе ^{6/} были получены зависимости перегрева $\Delta T(t, q)$ в интервале времён 10 мкс - 1 мин при задании в ТВЭ удельной мощности прямоугольной формы в диапазоне от 0.17 до 10 кВт/м². Эксперименты проводились в объёме насыщенного гелия при давлениях 0.06-0.18 МПа при горизонтальной и вертикальной ориентациях образца в свободных и стеснённых условиях.

В результате анализа полученных зависимостей $\Delta T(t, q)$ были обнаружены следующие эффекты:

- возникновение ярко выраженных пиков перегрева;
- развитие незатухающих колебаний температуры;
- возможность хода процесса по нескольким путям при неизменной предыстории - ветвление кривых.

Например, на рис.8 область с этими эффектами находится в интервалах перегревов от 1 до 40 К и времён от 100 мс до 64 с.

Следует особо подчеркнуть, что обнаружение этой области стало возможно только при использовании мощности тепловыделения в качестве параметра, т.е. благодаря работе созданного УМ в режиме стабилизации мощности.

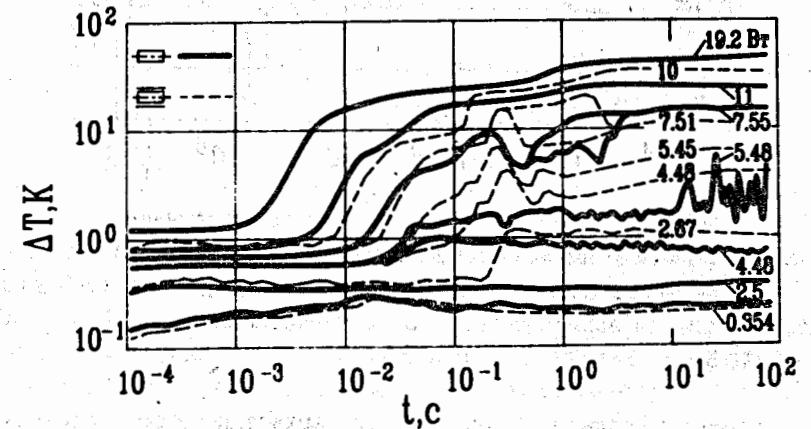


Рис.8. Зависимости перегрева $\Delta T(t, q)$, $P=0.1 \text{ МПа}$.

Далее в этой главе представлены результаты ^{7/} экспериментального исследования нестационарных тепловых процессов, протекающих на границе раздела "твёрдое тело - жидкий гелий" под воздействием теплового возмущения трапецеидальной формы. Данные получены при следующих условиях: ориентация образца - вертикальная, гелий насыщенный, температура объёма - 4.23 К, длительность импульса мощности - 6.4 с с мощностью теплового импульса в $0.3 \pm 17 \text{ Вт}$, длительность переднего фронта импульса мощности - 20 мкс, 1 мс, 2 мс, 10 мс, 100 мс, 200 мс, 1 с.

Результаты продемонстрировали существенное влияние длительности переднего фронта теплового возмущения на процесс теплопередачи. На рис.9 приведено сравнение зависимостей перегрева для двух серий экспериментов.

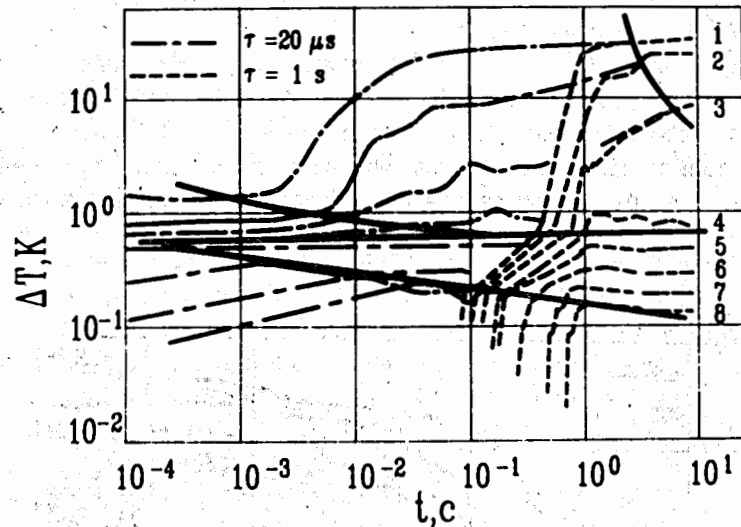


Рис.9. Зависимости $\Delta T(t, Q)$ для двух значений фронтов ($20 \mu\text{с}$ и 1 с). Непрерывные линии – границы режимов, прерывистые – данные. Значения мощности зависимостей 1–8 соответственно – 16.7, 10.9, 8.54, 6.4, 3.48, 1.34, 0.63, 0.33 Вт.

На основе экспериментальных данных авторами этой работы был установлен универсальный характер карты режимов нестационарной теплопередачи и предложен метод точного расчёта границ режимов, а также новая модификация карты режимов.

В работе^{4/} приведены экспериментальные данные по исследованию нестационарной теплопередачи к вынужденным потокам двухфазного гелия от шестиканального образца, т.е. исследовались пространственные характеристики теплопередачи. Результаты были получены в виде зависимостей перегрева ΔT поверхности образца от времени t после подачи прямоугольного импульса мощности. Ориентация образца была горизонтальной, а массовая скорость такова, что реализовывались расслоённые режимы течения двухфазного гелия при давлении $1.3 \times 10^5 \text{ Па}$.

В результате анализа зависимостей $\Delta T(t, Q)$ (рис.10) можно выделить характерные режимы нестационарной теплопередачи и оценить

различие в степени интенсивности процессов для верхней и нижней образующих образца, что связано с расслоением потока гелия в охлаждающем канале.

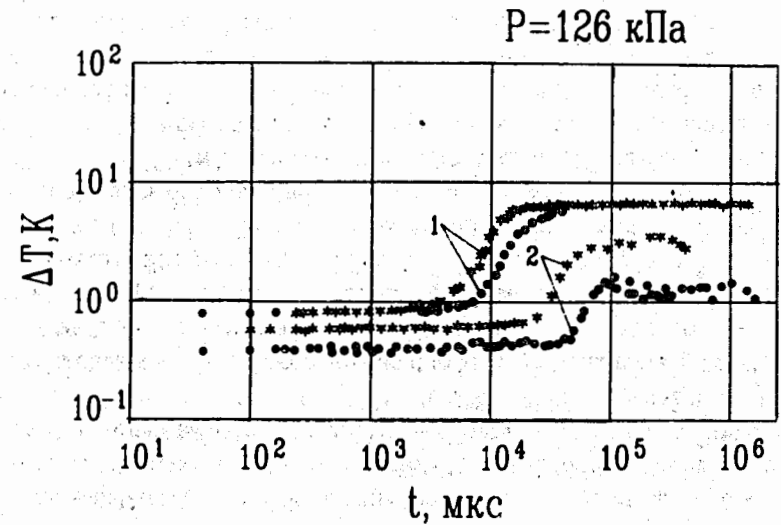


Рис.10. Зависимости перегрева $\Delta T(t, Q)$ поверхности образца: * – для верхней образующей, • – для нижней образующей, 1 – 9100 Вт/м^2 , 2 – 4540 Вт/м^2 ; $m = 48 \text{ кг/м}^2\text{с}$, $x = 0.32$, $P = 126 \text{ кПа}$.

Проводились также эксперименты, в которых в качестве криогента использовался сверхтекучий гелий. Эти эксперименты показали ряд отличий при использовании сверхтекучего гелия по сравнению с нормальным. В частности, авторы этой работы^{8/} на основе полученных экспериментальных данных определили относительно малое время установления стационарных режимов отвода тепла и сравнительно большое время наступления кризиса. Кроме этого, в определённых условиях получены качественно новые данные: обнаружена область переходов, характеризующаяся пиками перегрева теплоотдающей поверхности, и следующее за ней ускоренное наступление кризиса, обусловленное турбулизацией сверхтекучего гелия.

Кроме экспериментов по изучению нестационарной теплопередачи в режиме нагрева, проводились исследования характеристик теплопередачи в режиме охлаждения. В результате этих исследований было определено поведение зависимостей перегрева $\Delta T(t, Q)$ после отключения мощности в зависимости от уровня мощности в импульсе, ориентации

экспериментального образца и температуры гелия.^{9/}

Основные результаты работы

1. Сформулированы основные требования к комплексу аппаратно - программных средств с целью получения экспериментальных данных по влиянию формы теплового импульса и геометрии эксперимента на динамику тепловых процессов в системах с нормальным и сверхтекучим гелием в цикле "нагрев - охлаждение" с использованием экспериментальных образцов, у которых тепловыделяющие поверхности одновременно служат в качестве датчиков температуры.
2. Проведён анализ режимов питания экспериментального образца. Сделан вывод о том, что при исследованиях с применением экспериментального образца с совмещённым нагревателем - термодатчиком наиболее оптимальной является работа УМ в режиме стабилизации мощности. Разработаны и внедрены методики с соответствующей аппаратурой и программное обеспечение для подготовки электронной системы к экспериментам.
3. Разработан и создан комплекс аппаратно - программных средств, который позволяет в широких пределах проводить исследования по влиянию формы теплового импульса и геометрии эксперимента на характеристики нестационарной теплопередачи к нормальному и сверхтекучему гелию. В частности реализованы следующие возможности:
 - с помощью созданного УМ обеспечивается режим стабилизации мощности тепловыделения в широких пределах изменения сопротивления ТВЭ (1 + 6 кОм) и мощности в нём (0+40 Вт) с точностью стабилизации не хуже 4% и временем реакции при работе на быстроменяющуюся во времени нагрузку не более 20 мкс;
 - задаётся практически любая форма импульса мощности тепловыделения, т.е. такие параметры как амплитуда, фронт, длительность и скважность;
 - многоканальная система питания ТВЭ (шесть каналов) с соответствующими каналами управления позволяет исследовать пространственные (по углу и длине экспериментального образца) характеристики нестационарной теплопередачи;
 - схемное решение УМ с помощью подсистем управления и измерения позволяет определять температуру тепловыделяющей поверхности ТВЭ как в режиме нагрева, так и в режиме охлаждения с контролем подводимой мощности.
4. Разработаны и созданы комплект аппаратуры и структура информационного сообщения, обеспечивающие в условиях сильных электромагнитных помех связь аппаратуры криогенного стенда с удалённой (до 500 метров) ЭВМ. Связь организована последовательным

кодом с использованием широтно - импульсной модуляции и аппаратно - программным контролем правильности передаваемого сообщения с производительностью до 10 Кбайт/с. Число подключаемых крейтов КАМАК - от одного до четырёх.

5. С помощью созданного комплекса аппаратуры, программного обеспечения и методик получен ряд качественно новых экспериментальных данных по нестационарной теплопередаче к нормальному и сверхтекучему гелию. В частности: обнаружена область тепловой неустойчивости в статическом нормальном гелии при нагрузках, близких к стационарной величине кризиса кипения; исследовано влияние длительности переднего фронта импульса мощности на характеристики теплопередачи; получена количественная информация о пространственных характеристиках нестационарной теплопередачи к вынужденному потоку двухфазного гелия.

6. Созданный комплекс аппаратно - программных средств в настоящее время используется в дальнейших исследованиях по нестационарной теплопередаче к нормальному и сверхтекучему гелию, а отдельные части этого комплекса также нашли применение и в других системах.^{10/}

Работы, опубликованные по теме диссертации:

1. А.И.Губанов, В.Д.Инкин, В.Ф.Минашкин. Аппаратура расширения ветви КАМАК. В кн: Всесоюзная конференция "Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ". Тезисы докладов. Изд-во СО АН СССР, Новосибирск, 1981, с.58.
2. В.Д.Инкин, В.Ф.Минашкин, Ю.П.Филиппов. Комплекс электронной аппаратуры для проведения исследований на тепловой модели сверхпроводящего магнита. Сообщение ОИЯИ, 8-85-756, Дубна, 1985, 6 с.
3. В.М.Микляев, В.Ф.Минашкин, А.В.Скрыпник, Ю.П.Филиппов. Теплопередача к вынужденному потоку гелия при стационарном и импульсном нагреве. В кн.: Тезисы докладов Международного симпозиума "Теплообмен в криогенных системах". Изд-во АН УССР, Харьков, 1985, с.37-38.
4. В.Ф.Минашкин, С.В.Романов, С.Ю.Селюнин, Ю.П.Филиппов. Электронная система для исследования нестационарных тепловых процессов. Сообщение ОИЯИ, P10-88-902, Дубна, 1988, 14 с.
5. В.Ф.Минашкин. Усилитель мощности для исследования нестационарных тепловых процессов. Сообщение ОИЯИ, P10-89-547, Дубна, 1989, 13 с.
6. В.М.Микляев, В.Ф.Минашкин, С.Ю.Селюнин, И.А.Сергеев, А.В.Скрыпник, Ю.П.Филиппов. Нелинейные эффекты при моделировании тепловых режимов сверхпроводящих магнитов в условиях импульсного энерговыделения. В кн.: Труды 13 Международной конференции по

ускорителям частиц высоких энергий. Новосибирск: Наука, 1987. т.2, с.53-58.

7. Yu.P.Filippov, V.F.Minashkin and I.A.Sergeyev. Transient Heat Transfer into Liquid Helium under Controlled Heat Generation. In: Advances in Cryogenic Engineering, Plenum Press, New York, 1990, vol.35, p.387-394.

Цитированная литература:

8. В.М.Микляев, И.А.Сергеев, Ю.П.Филиппов. Особенности нестационарной теплопередачи к сверхтекучему гелию. ИФЖ, 1988, т.54, №6, с.950-956.

9. Yu.P.Filippov and I.A.Sergeyev. Transient Thermal Recovery of Preheated Solid in a Liquid Helium Bath -1st Report. In: Proceedings LTES90, Institute of Criogenics, Southampton, 1990, p.113.

10. Л.В.Дубовик, В.Д.Инкин, Л.И. Косухина, В.Н.Лысяков, В.Ф.Минашкин, А.А.Мозелев, В.П.Николаев, Т.П.Саенко, А.В.Смирнов, Г.А.Филина. Автоматизированная система управления коллективным ускорителем тяжёлых ионов ОИЯИ. В кн: Всесоюзная конференция "Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ". Тезисы докладов. Изд-во СО ОН СССР, Новосибирск, 1981, с.94.

Рукопись поступила в издательский отдел

5 июля 1995 года.