

A-91

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

13 - 10673

АСТАХОВ

Анатолий Вениаминович

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ  
БОЛЬШИХ ПУЗЫРЬКОВЫХ КАМЕР  
НА ТЯЖЕЛЫХ ЖИДКОСТЯХ

Специальность 05.14.11 - электрофизические установки  
и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 1977

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В.Фурьева

Научный руководитель  
доктор технических наук  
профессор

Иван Федорович  
Малышев

Официальные оппоненты:

доктор технических наук  
профессор

Анатолий Андреевич  
Поротников

кандидат технических наук  
старший научный сотрудник

Игорь Феоктистович  
Михайлов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Ленинградский институт ядерной физики им. Б.П.Константинова.

Автореферат разослан " " \_\_\_\_\_ 1977 г.

Защита диссертации состоится " " \_\_\_\_\_ 1977г.

в " " час на заседании специализированного совета Д-047. О1.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна, Московской области, Лаборатория высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета *М.Ф.Лихачев* М.Ф.Лихачев

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ. В течение двух последних десятилетий пузырьковые камеры являются одним из основных приборов, используемых для исследований в физике элементарных частиц. Современные большие пузырьковые камеры, рабочие объемы которых достигают десятков кубометров, - сложные и дорогостоящие инженерные сооружения, созданные на базе новейших научно-технических достижений. При проектировании таких камер важное значение приобретают вопросы расчета оптимальных параметров их основных систем, к которым относится система термостатирования, обеспечивающая заданные температурные режимы в рабочем объеме камеры. В связи с этим целесообразным является проведение исследований тепловых режимов камеры с целью определения необратимых потерь тепла в рабочей жидкости и создания равномерного поля температуры в ней. Необходимость проведения данной работы связана с созданием камеры СКАТ для Института физики высоких энергий, основные проектные работы по которой были выполнены в НИИЭФА.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. В опубликованных до настоящего времени работах, посвященных исследованию тепловых режимов камер, отсутствовала методика расчета количества необратимых потерь тепла в рабочей жидкости. Метод экстраполяции удельных тепловыделений на величины объемов, применяемый при создании малых камер, не может быть использован при проектировании систем термостатирования больших камер, потери тепла в которых составляют десятки киловатт, так как возможные ошибки данного метода могут привести к значительным экономическим затратам. Не существовало также в литературе методики расчета градиентов температуры, возникающих в рабочей жидкости камеры в процессе ее работы. Необходимость определения

Объединенный институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

градиентов температуры вызвана тем, что условия проведения качественных физических экспериментов ограничивают их величину.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Целью настоящей работы является разработка на основе проведенных исследований методики расчета количества тепла, снимаемого системой термостатирования, для определения ее оптимальных параметров, а также разработка методики расчета максимальных градиентов температуры в рабочем объеме камеры.

**НАУЧНАЯ НОВИЗНА.** Впервые разработана методика расчета необратимых потерь тепла в тяжеложидкостных пузырьковых камерах путем интегрирования  $PV$ -диаграммы. Эмпирические зависимости, найденные в результате обобщения проведенных экспериментов, дают возможность проинтегрировать диаграмму и проанализировать режим работы камеры. Разработана методика оценки максимальных градиентов температуры в рабочей жидкости, позволяющая на стадии проектирования камеры решить вопрос о необходимости применения специальных мер, уменьшающих неоднородность температуры по объему.

**ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ.** Результаты проведенных исследований позволяют определить оптимальные параметры систем термостатирования вновь проектируемых пузырьковых камер на тяжелых жидкостях. Разработанная методика расчета необратимых потерь тепла может быть использована при создании систем охлаждения узлов электрофизических установок с большими удельными тепловыми нагрузками в случае использования в качестве хладагента перегретой жидкости. К таким узлам могут быть отнесены, например, токоприемные устройства ускорителей и резонаторные блоки газоразрядных лазеров.

**АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ.** По материалам работы сделано и обсуждено два доклада на двух научно-технических конференциях. Разработанные методики расчета использованы при создании действующей камеры СКАТ, установленной на нейтринном канале серпуховского ускорителя.

**ПУБЛИКАЦИЯ.** По результатам проведенных исследований опубликовано 8 работ.

**ОБЪЕМ РАБОТЫ.** Диссертация, содержащая 131 стр. машинописного текста, 27 стр. рисунков, библиографический список из 71 наименования, состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения.

В главе I приведен краткий обзор литературных данных по теме диссертации и сформулированы основные задачи исследований. На примере циклограммы изменения давления обосновывается выбор первоначальных параметров рабочей жидкости и характер их изменения. Для создания стабильных условий фотографирования треков заряженных частиц необходимо, чтобы температура рабочей жидкости перед каждым циклом изменения давления сохраняла свое значение. С этой целью тепло, выделившееся в процессе работы камеры, должно быть удалено из нее при условии обеспечения наибольшей равномерности температуры жидкости по объему. Необратимые потери тепла возникают в основном из-за "паразитного" кипения жидкости при переводе ее в перегретую область и возвращении в первоначальное состояние. Вопросы расчета тепловых потерь в камерах рассматривались в известных работах Д.Ф.Шоу, Г.Харигела, Г.Хорлитца, А.И.Филиппова, Е.И.Дьячкова и др. Однако в этих работах не учитывались режимы изменения давления, что не дает возможности определить оптимальные параметры системы термостатирования.

При выделении тепла в рабочей жидкости возникают градиенты температуры, искажающие треки частиц при фотографировании. Результаты измерения поля температуры в рабочем объеме действующей камеры, опубликованные в работе К.Х.Эрбеле, позволяют сделать вывод о том, что на стадии проектирования камеры нужно знать максимальные градиенты температуры, возникающие в рабочей жидкости при периодическом выделении в ней тепла.

Определение поля температуры в рабочем объеме камеры сводится к численному исследованию нестационарной свободной конвекции в замкнутой полости. Вопросам теплоотдачи при свободной конвекции посвящены работы Е.Л.Тарунина, Г.З.Гершуни, А.Г.Зарубина, А.В.Лыкова и др. Из анализа этих работ следует, что до настоящего времени нет разработанной методики, которую можно было бы применить для расчета поля температуры в рабочем объеме пузырьковой камеры. Разработка такой методики является самостоятельной задачей.

В настоящей диссертации на основе результатов экспериментальных данных, приведенных в работе К.Х.Эрбеле, и результатов расчета, полученных Е.Л.Таруниным, обосновывается правомерность определения максимальных градиентов температуры в рабочем объеме камеры путем решения задачи стационарной теплопроводности многослойной пластины с внутренними источниками тепла различной интенсивности по вертикальной координате камеры.

Для практических расчетов тепловых режимов камер, заполненных фреоном IЗVI, в частности, для обработки экспериментов, проведенных в данной работе, необходимо знать аналитические зависимости, с помощью которых можно определить

теплофизические свойства этого фреона. Такие зависимости в области рабочих температур камеры ( $25+35$ )<sup>0</sup>С были получены путем обобщения табличных и справочных данных, приведенных в литературе.

На основе анализа опубликованных работ по изучению тепловых режимов пузырьковых камер сформулированы основные задачи исследований. Количество тепла, выделившееся в рабочей жидкости, может быть определено путем интегрирования PV -диаграммы, для чего необходимо иметь ее аналитическое описание. До начала "паразитного" кипения в жидкости функция P(V) описывается с помощью известных термодинамических соотношений. Дальнейшее поведение функции при увеличении объема жидкости зависит от количества образовавшегося пара. С целью определения теплового потока, идущего на образование паровой фазы, должна быть решена задача нестационарной теплопроводности от стенок рабочего объема к жидкости при изменении в ней давления, а следовательно, и температуры насыщения.

Применение теории термодинамики парожидкостной смеси для аналитического описания PV -диаграммы на линии сжатия сильно бы осложнило общую задачу. М.Д.Вайсман, например, предлагает при расчете реальных процессов, происходящих в парожидкостной смеси, дополнить термодинамические соотношения экспериментально устанавливаемыми поправочными величинами. В данной работе при определении координат характерных точек диаграммы также используются эмпирические зависимости, полученные в результате обобщения экспериментов.

Найденное количество необратимых потерь тепла в жидкости дает возможность определить параметры системы термостати-

рования камеры и выбирать оптимальные режимы работы системы изменения давления с целью получения минимальных потерь тепла.

В качестве удельных тепловых нагрузок в жидкости при решении задачи определения максимальных градиентов температуры в рабочем объеме используется результат интегрирования  $PV$ -диаграммы.

Экспериментальные исследования проводились с целью нахождения обобщенных зависимостей для определения координат характерных точек диаграммы на линии сжатия, а также для подтверждения правильности разработанных методик расчета.

Глава 2 посвящена вопросам теоретического исследования тепловых режимов пузырьковых камер. Процесс расширения рабочей жидкости рассматривается на примере типичной  $PV$ -диаграммы, в которой в качестве одной из координат используется относительное изменение объема  $\epsilon$  (в дальнейшем  $PE$ -диаграмма). На основе известных термодинамических соотношений с использованием определений изотермического и адиабатического коэффициентов сжимаемости жидкости получены зависимости, позволяющие найти функцию  $P(\epsilon)$  от точки диаграммы, соответствующей первоначальному состоянию жидкости перед расширением, до точки, характеризующей начало "паразитного" кипения.

В уравнении, описывающем диаграмму в области перегрева жидкости до момента достижения нижнего давления, неизвестной является относительная величина образовавшейся паровой фазы  $\zeta$ . Зависимость  $\zeta$  от времени может быть найдена из количества тепла, переданного от стенок рабочего объема к жидкости в течение пребывания ее в перегретом состоянии. Получены

зависимости, позволяющие составить систему уравнений с целью нахождения  $\zeta(\tau)$ . Для определения изменения температуры стенок во времени использовано решение задачи нестационарной теплопроводности, приведенное в работе А.И.Пеховича и В.М.Жидких. Теплоотдача в жидкость на начальном участке диаграммы описана уравнениями, характеризующими процесс конвекции, а в области перегрева жидкости - зависимостями, используемыми для процесса кипения. В качестве температуры вскипания перегретой жидкости принята температура насыщения, соответствующая текущему значению давления. По данным работы В.Ф.Приснякова такое допущение дает погрешность, удовлетворяющую требованиям инженерных расчетов. Полученная система уравнений для определения  $\zeta(\tau)$  может быть решена только численными методами с применением ЭВМ. Интегрирование диаграммы на участке кипения жидкости до достижения нижнего давления также должно быть произведено численным методом.

Для известного количества необратимых потерь тепла в камере приведены уравнения, позволяющие определить параметры теплоносителя в секциях теплообмена системы термостатирования, установленных в рабочем объеме.

Задача определения максимальных градиентов температуры, возникающих в жидкости при периодическом выделении в ней тепла, решалась в предположении, что тепловыделение происходит в результате конденсации паровой фазы в слое жидкости, прилегающем к стенкам рабочего объема. Рассматривалось вертикальное сечение камеры вдоль пучка частиц в виде плоской неограниченной пластины, что позволило определить градиенты температуры только в вертикальной плоскости камеры. Тем не менее, это удовлетворяет условию поставленной задачи, так



как из данных работы К.Х.Эрбеле по замеру поля температуры в действующей камере следует, что такие градиенты являются максимальными. Известные зависимости от времени величины отрывного диаметра парового пузыря, его радиуса и высоты всплытия совместно с результатами решения задачи определения  $\zeta(\tau)$  позволили составить систему уравнений, решение которой дает возможность определить толщины тепловыделяющих слоев на нижней и верхней стенках рабочего объема. Для найденных объемных тепловыделений с использованием закона Фурье получена система уравнений, позволяющая определить температуру рабочей жидкости в зависимости от вертикальной координаты камеры. Использование в разработанной методике расчета эквивалентного коэффициента теплопроводности жидкости, учитывающего естественную конвекцию, уменьшает ошибку, возникающую при рассмотрении объема рабочей жидкости в виде твердого тела.

В главе 3 приведены результаты экспериментального исследования РЭ -диаграмм работы пузырьковой камеры, заполненной тяжелой жидкостью. Эксперименты проводились на макете камеры с рабочим объемом, равным  $0,2 \text{ м}^3$  и представляющим собой горизонтальный цилиндр с внутренним диаметром  $0,7 \text{ м}$  и длиной  $0,6 \text{ м}$ . Материал его корпуса - сталь Х18Н10Т, толщина стенок -  $0,016 \text{ м}$ . В качестве рабочей жидкости использовался фреон 13В1. Необходимая температура в камере устанавливалась с помощью секций теплообмена, состоящих из двух медных змеевиков внутренним диаметром  $0,011 \text{ м}$ , прикрепленных к верхней и нижней части внутренней поверхности цилиндра. По трубкам пропусклась вода заданной температуры. Изменение давления в газовой системе расширения передавалось на рабо-

чую жидкость через эластичную мембрану диаметром  $0,4 \text{ м}$ . В качестве датчиков давления использовались индуктивные датчики типа ДИ. Изменение объема жидкости определялось по величине перемещения мембраны, которая измерялась с помощью специально разработанных индуктивных датчиков. Сигналы от датчиков через преобразователи типа УГ-1 поступали для записи на шлейфовый осциллограф К-105. Для измерения температуры рабочей жидкости служили платиновые термометры сопротивления ТСП-195. Запись температуры производилась на многоточечном потенциометре ЭПП-09.

Полученные в результате проведения экспериментов зависимости давления в рабочей жидкости и положения мембраны от времени позволили построить РЭ -диаграммы работы камеры. Анализ результатов многочисленных опытов с различными начальными условиями и режимами изменения давления показал, что в самом общем случае РЭ -диаграмма может быть разбита на семь характерных участков, каждый из которых за исключением участка от начала "паразитного" кипения в жидкости до достижения в ней нижнего давления, выражается с достаточной степенью точности линейной зависимостью. Следовательно, для аналитического описания диаграммы достаточно знать координаты границ этих участков.

Обобщение опытных данных позволило получить эмпирические зависимости, с помощью которых можно определить значения давлений и величин относительного изменения объема на границах характерных участков диаграммы. Обработка результатов экспериментов производилась с учетом параметров, влияющих на процесс сжатия парожидкостной смеси, а также на процесс конденсации паровой фазы. Введение в эмпирические зависи-

мости коэффициентов, учитывающих величину объема камеры и теплофизические свойства рабочих жидкостей, позволяет использовать эти зависимости для описания РЭ - диаграммы практически при всех случаях расчета тепловых режимов тяжеложидкостных пузырьковых камер.

Результат обработки экспериментов позволил получить эмпирическую зависимость коэффициента адиабатической сжимаемости фреона I3VI от рабочей температуры и скорости изменения объема жидкости, необходимую для аналитического описания диаграммы на линии расширения.

На макете камеры были измерены коэффициенты изотермической сжимаемости и объемного расширения фреона I3VI. Удовлетворительное совпадение результатов замера со значениями коэффициентов, полученных путем расчета на основе соотношений, предложенных в работах В.И.Астафьева и Н.Ф.Отпущенкова, подтверждает возможность использования этих соотношений в диссертации.

В главе 4 изложена методика расчета количества необратимых потерь тепла в пузырьковых камерах на тяжелых жидкостях. В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований были получены зависимости, позволяющие описать аналитически РЭ - диаграмму на всех участках, за исключением участка от начала "паразитного" кипения до достижения в жидкости нижнего давления. Интеграл по контуру РЭ - диаграммы, характеризующий количество выделившегося в жидкости тепла, может быть вычислен с учетом полученных аналитических зависимостей для линейных участков диаграммы и с использованием решения задачи определения относительной величины образовавшейся паровой фазы  $\xi$ .

По разработанному во 2 главе способу расчета  $\xi(\tau)$  составлена система уравнений в случае использования в качестве рабочей жидкости фреона I3VI. Аналитическое решение приведенной системы уравнений не представляется возможным. Приведен пример расчета  $\xi(\tau)$ . Вычисления производились на ЭВМ "БЭСМ-4". Результаты расчета зависимости относительной величины образовавшейся паровой фазы от времени удовлетворительно согласуются с опытными данными, полученными путем обработки РЭ - диаграммы, снятой на макете пузырьковой камеры. Это подтверждает возможность применения предложенного способа расчета для определения количества паровой фазы, образовавшейся при переводе жидкости в перегретое состояние.

Полученные значения  $\xi$  были использованы для численного интегрирования функции Р(ε) на участке кипения жидкости, что дало возможность полностью проинтегрировать РЭ - диаграмму и тем самым определить количество необратимых потерь тепла за один цикл изменения давления в камере.

Разработанная методика расчета необратимых потерь тепла в рабочей жидкости была проверена на макете пузырьковой камеры в НИИЭФА, а также на действующей камере СКАТ. Необратимые потери тепла на макете камеры находились из площади РЭ - диаграммы, записанной в процессе проведения экспериментов, а на камере СКАТ - путем замера количества тепла, уносимого теплоносителем системы термостатирования. При расчете потерь тепла учитывалась энергия импульсных ламп-вспышек. Максимальное расхождение результатов численного расчета и данных измерений не превысило 20%. Такое согласование результатов позволяет рекомендовать в комплексе разработанную методику определения необратимых потерь тепла для определе-

ния параметров систем термостатирования вновь проектируемых пузырьковых камер, работающих на тяжелых жидкостях.

В качестве примера приведено в виде графика распределение температуры в вертикальной плоскости камеры СКАТ, полученное по предложенному во второй главе способу оценки максимального градиента температуры в рабочей жидкости. Качественная картина распределения температуры совпадает с графиками, приведенными в работах М.Деррика и К.Х.Эрбеле. Расчетные данные удовлетворительно согласуются также и с результатами замера поля температуры в камере СКАТ. Это позволяет использовать предложенный способ расчета для оценки максимального градиента температуры в рабочем объеме тяжелой жидкостной пузырьковой камеры. Результат расчета дает возможность на стадии проектирования камеры решить вопрос о необходимости применения специальных мер, уменьшающих разность температуры в рабочем объеме. В качестве таких мер могут быть применены, например, перемешивающие устройства, либо использованы искусственно создаваемые градиенты температуры в секциях теплообмена системы термостатирования.

Глава 5 посвящена вопросам проектирования камеры СКАТ, в создании которой автор принимал непосредственное участие. Приведена техническая характеристика камеры, кратко описаны ее основные узлы, более подробно рассматривается разработка системы термостатирования, которая явилась реализацией проведенных в данной работе исследований.

В настоящее время камера введена в действие на нейтринном канале серпуховского ускорителя. Достигнуты расчетные параметры основных систем камеры. Получены снимки, на которых запечатлены взаимодействия нейтрино с ядрами мишени (фреон IЗVI).

Размеры фотографируемой области камеры были выбраны из условия обеспечения эффективного проведения нейтринных экспериментов на серпуховском синхрофазотроне: вдоль пучка - 4,5 метра, в плоскости, параллельной фотопленке, - 1,6 метра и по глубине фотографирования - 1,1 метра. Общая конструкция камеры существенным образом зависит от схемы фотографирования. Для камеры СКАТ была выбрана компоновка, при которой весь рабочий объем просматривается двумя фотокамерами. Такая схема наиболее полно удовлетворяет требованию эффективного использования рабочего объема и максимально упрощает обработку фотоснимков.

Корпус камеры состоит из рабочего и охранного объемов, разделенных "плавающим" стеклом толщиной 140 мм и размерами 1300 x 4200 мм<sup>2</sup>. Корпус рабочего объема представляет собой толстостенную оболочку с толщиной стенок ~ 200 мм, сваренную из поковок немагнитной стали X18H10T. Значительный объем камеры и большая величина требуемого магнитного поля, которая в центре камеры должна составлять 25± 27 кВ, выдвинули задачу тщательного согласования конструкции электромагнита и корпуса камеры. Блок клапанов и охранный объем выполнены из магнитного материала и после установки корпуса в полости электромагнита являются составной частью магнитопровода.

Фотографирование рабочего объема камеры производится четырьмя фотокамерами через окна, расположенные в передней стенке охранного объема. Используется темнопольная система фотографирования с освещением "под 90°", которое осуществляется 27 импульсными источниками света, расположенными по



периметру рабочего объема. Максимальная энергия вспышки осветителя составляет 2000 Дж.

Изменение давления в рабочей жидкости камеры осуществляется через эластичную мембрану сжатым газом, который сбрасывается и подается в предметбранный объем с помощью 25 быстродействующих пневматических клапанов, условный проход которых составляет 120 мм. 12 клапанов предназначены для повышения давления, 13 — для его понижения. Для изменения давления в предметбранном объеме используется газ, находящийся в ресиверах. С целью поддержания в ресиверах опорных давлений с заданной точностью применялась специально разработанная система автоматического регулирования. Система изменения давления камеры может обеспечить понижение давления в ее рабочем объеме с 30 до 8 ати за 50 мс, повышение давления — с 8 до 30 ати за 40 мс.

Прогрев и термостатирование камеры осуществляются циркуляцией воды необходимой температуры в секциях теплообмена, выполненных из трубок внутренним диаметром 0,02 м. В рабочем объеме имеется четыре секции теплообмена, в охранном объеме — две секции. Циркуляция воды в каждой из них происходит по схеме "противоток", что повышает равномерность температуры по длине камеры. Температура воды в каждой секции регулируется независимо. Такая система дает возможность изменять горизонтальный и вертикальный градиенты температуры в рабочей среде. Система прогрева и термостатирования рабочего объема выполнены с отдельными гидравлическими контурами, что облегчает переход с режима на режим и обеспечивает устойчивую работу системы автоматического регулирования температуры. В охранном объеме при работе камеры не происходит

выделения тепла и поэтому гидравлические контуры прогрева и термостатирования в нем совмещены.

Система термостатирования работает при неизменном расходе дистиллированной воды в замкнутых контурах. Стабилизация температуры рабочей жидкости осуществляется с помощью датчиков температуры, установленных непосредственно в рабочую жидкость в каждой секции теплообмена. Измерительные приборы снабжены реостатными задающими датчиками, с помощью которых они воздействуют на электрические регулирующие устройства. Регулирующие устройства, в свою очередь, воздействуют на те или иные исполнительные механизмы в зависимости от режима работы камеры. Параметры настройки регуляторов были найдены после экспериментального определения динамических характеристик регулируемого объекта, проведенного на макете системы термостатирования.

При проектировании системы термостатирования параметры ее определялись по приведенной в диссертации методике. Разработанная система дает возможность снять суммарное количество тепла, выделившегося в рабочем объеме камеры, около 65000 ккал/ч, обеспечивая при этом поддержание температуры на требуемом уровне  $(25 \pm 35)^{\circ}\text{C}$  в местах установки датчиков с точностью  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Для уменьшения неоднородности температуры рабочей жидкости по всему объему необходимо в секциях теплообмена системы термостатирования создать искусственный вертикальный градиент температуры.

В приложении приведена система уравнений, позволяющая определить зависимость величины объема рабочей жидкости от времени, которая в разработанных в диссертации методиках расчета была принята известной.

Основные результаты проведенной работы можно кратко сформулировать следующим образом:

1. Проведены теоретические исследования термодинамических процессов, происходящих при адиабатическом изменении давления в рабочей жидкости пузырьковых камер. Получены аналитические зависимости для решения задачи нестационарной теплопроводности от стенки камеры к рабочей жидкости. В результате решения этой задачи определена относительная величина паровой фазы  $\zeta$ , образовавшейся в жидкости при переводе ее в перегретое состояние. С помощью известных термодинамических соотношений и вычисленной функции  $\zeta(\tau)$  описана  $P\tau$ -диаграмма на линии расширения.

2. Проведены экспериментальные исследования по изучению  $P\tau$ -диаграмм работы камеры. В результате обобщения опытов, проведенных при различных параметрах, влияющих на процесс сжатия парожидкостной смеси, а также на процесс конденсации пара, получены эмпирические зависимости, позволяющие определить координаты характерных точек  $P\tau$ -диаграммы на линии сжатия.

3. На основе теоретических и экспериментальных исследований разработана методика расчета количества тепла, выделившегося в рабочей жидкости пузырьковой камеры, путем интегрирования  $P\tau$ -диаграммы. Результат расчета дает возможность определить параметры системы термостатирования камеры, а также выбирать оптимальные режимы работы системы изменения давления с целью получения минимальных потерь тепла. Применение в эмпирических зависимостях безразмерных величин и введение в эти зависимости поправочных коэффици-

ентов, учитывающих теплофизические свойства рабочих жидкостей и размеры рабочих объемов, позволяет использовать разработанную методику для определения параметров систем термостатирования тяжеложидкостных пузырьковых камер, отличных от исследуемого макета.

4. Для найденного количества тепла, выделившегося в рабочей жидкости, разработана методика оценки максимального градиента температуры, возникающего в рабочем объеме камеры. Результат расчета позволяет на стадии проектирования камеры решить вопрос о необходимости применения специальных мер, уменьшающих неоднородность температуры рабочей жидкости.

5. Определены экспериментально коэффициенты объемного расширения и изотермической сжимаемости фреона I3B1. Согласование результатов экспериментальных данных с расчетными, полученными по предложенным в литературе зависимостям, позволили использовать эти зависимости для исследований, проведенных в данной работе.

6. Проведена экспериментальная проверка разработанной методики определения необратимых потерь тепла в тяжеложидкостных пузырьковых камерах на макете камеры в НИИЭФА, а также на действующей камере СКАТ в ИФВЭ. Удовлетворительное согласование результатов расчета и опытных данных свидетельствует в пользу предложенной методики и позволяет рекомендовать ее для определения параметров систем термостатирования вновь проектируемых камер.

Вышеизложенные результаты работы использованы при создании систем прогрева и термостатирования пузырьковой камеры СКАТ с рабочим объемом  $\sim 7,5 \text{ м}^3$ .

Материалы диссертации докладывались на совещании по технике пузырьковых камер в ОИЯИ, Дубна (1969 г.), на Международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий в Дубне (1970 г.) и опубликованы в работах:

1. А.В.Астахов, В.А.Большаков, Г.А.Град, И.Ф.Малышев  
Препринт НИИЭФА, А-0214, Л., 1974.
2. А.В.Астахов, В.А.Большаков, Г.А.Град, А.В.Попкович  
Электрофизическая аппаратура, выпуск 10,3, Атомиздат, М., 1973.
3. А.В.Астахов, В.А.Большаков, Г.А.Град и др. Материалы рабочего совещания по технике пузырьковых камер.  
Препринт ОИЯИ, 13-4466, 51, Дубна, 1969.
4. А.В.Астахов, В.А.Большаков, Г.А.Град и др. Труды международной конференции по аппаратуре в физике высоких энергий, ОИЯИ, Д-5805, 674, Дубна, 1970.
5. А.В.Астахов, В.А.Большаков, Г.А.Град и др. Препринт ИФВЭ, СМК 71-75, Серпухов, 1971.
6. А.В.Астахов, В.А.Большаков, Г.А.Град и др. Электрофизическая аппаратура, выпуск 9, 114, Атомиздат, М., 1971.
7. А.В.Астахов, Г.А.Град, И.Ф.Малышев. Препринт НИИЭФА, А-0253, Л., 1975.
8. А.В.Астахов, В.А.Большаков, Г.А.Град, А.В.Попкович.  
Авторское свидетельство № 474795, Бюллетень изобретений, № 23, стр.109, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел  
20 мая 1977 года.