



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9-89-526

ВАДАЧКОРИЯ

Леван Александрович

УДК 620.17;536.483;
536.3; 621.039.5/6

**КОМПЛЕКС УСТАНОВОК
ДЛЯ ВНУТРИРЕАКТОРНЫХ
И ПОСТРАДАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ
В УСЛОВИЯХ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР**

**Специальность 01.04.01 - экспериментальная
физика**

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

Работа выполнена в Ордена Трудового Красного Знамени
Институте физики Академии наук Грузинской ССР.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор

Г.Б.Федоров

доктор технических наук

И.А.Шолаев

доктор физико-математических
наук, старший научный
сотрудник

Ю.Г.Мамаладзе

Ведущая организация:

Институт физики металлов Уральского отделения АН СССР,
Свердловск.

Защита диссертации состоится _____ 1989 года
в _____ часов на заседании Специализированного совета
при Лаборатории высоких энергий Объединенного института
ядерных исследований, г.Дубна, Московской области.

Автореферат разослан _____ 1989 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

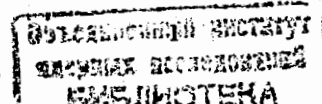
М.Ф.Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы. Физико-механические свойства твердых тел определяются их реальной внутренней структурой с разнообразными дефектами. Облучение тела частицами высокой энергии вызывает изменение этой структуры и предоставляет возможность ее изучения и изучения зависимости макроскопических свойств твердых тел от параметров их реальной внутренней структуры.

Кроме чисто научной ценности, подобные исследования имеют также большое прикладное значение, поскольку все более широкое использование излучений в различных областях науки и техники требует знания влияния облучения на свойства материалов. Поведение конструкционных материалов под воздействием радиации часто оказывается фактором, который определяет и ограничивает возможности тех или иных инженерных решений.

Исследования радиационных эффектов в твердых телах особенно ценны в диапазоне криогенных температур. Это объясняется тем, что часть дефектов структуры, возникших в результате облучения, при нормальных и высоких температурах быстро исчезает путем рекомбинации или выхода дефектов из кристалла ввиду их высокой термической активности, а при криогенных температурах, наоборот, большинство дефектов сохраняется. Поэтому существенно наличие экспериментальных установок, которые предоставляют возможность проследить за изменением различных свойств материалов, определяемых дефектами структуры, в изотермическом режиме или в процессе медленного управляемого нагрева в диапазоне криогенных температур и всесторонне изучить природу радиационных эффектов.



Целью диссертации является разработка и создание комплекса установок для многосторонних исследований радиационных эффектов в твердых телах при криогенных температурах, в основном на базе ядерного реактора.

Научная новизна. Изучены узловые проблемы технического оснащения экспериментов по исследованию радиационных эффектов в твердых телах при криогенных температурах и пути их решения. Многие из поднятых вопросов впервые исследованы теоретически. Разработаны, построены и внедрены оригинальные установки и устройства для криостатирования образцов и экспериментальных установок с образцами в поле реакторного излучения, а также для различных испытаний и исследований образцов, как во время облучения в реакторе, так и вне реактора после облучения, в широком управляемом диапазоне температур. Проведен анализ результатов расчета, испытания и эксплуатации этих установок и устройств, рассмотрены возможности и перспективы их усовершенствования и развития.

Изучено влияние различных экранов ("плавающих", охлаждаемых жидким криоагентом, газообразным теплоносителем или парами криоагента, выходящими из экранируемого сосуда, и т. д.) на эффективность высоковакуумной изоляции в обычных условиях и в зоне ядерного излучения. Разработаны методики расчета систем с такими экранами.

Разработаны, построены и внедрены оригинальные установки для криостатирования облучаемого в ядерном реакторе объекта посредством газообразного теплоносителя (гелия), в температурных диапазонах 80 - 300 К и 10 - 300 К, а также установки, в которых облучаемые объекты охлаждаются жидким азотом или жидким гелием. Разработаны методики их расчета.

Разработаны, построены и внедрены оригинальные установки для испытаний образцов на растяжение и на малоцикловую усталость, как в реакторе, так и вне реактора после облучения, а также установки и устройства для исследования радиационных эффектов в механически напряженных материалах, для рентгеноструктурных исследований облученных и механически напряженных материалов и т. д., в диапазоне криогенных температур.

Практическая ценность. Полученные в диссертации результаты, как теоретических исследований, так и опытно-конструкторских разработок, в основном использованы и используются для экспериментальных исследований в области низкотемпературной радиационной физики твердого тела и радиационного материаловедения на реакторе ИРТ Института физики АН ГССР.

Разработанные в диссертации методики общего анализа и расчета влияния различных экранов на лучистую теплопередачу через высоковакуумную среду в обычных условиях и в поле ядерного излучения можно использовать при самых разнообразных случаях экранирования теплового излучения. Эти методики дают возможность определения рационального способа экранирования и оптимальных параметров экранной системы для данных частных условий защиты изолируемого тела от теплового излучения.

Разработанные в диссертации принципиальные решения систем для криостатирования облучаемого объекта и для различных испытаний и исследований материалов, как во время их облучения, так и после облучения, а также методики их анализа и расчета можно использовать при решении аналогичных задач на пучках ускорителей частиц высоких энергий.

К защите представляются следующие основные результаты:

1. Общий анализ лучистого теплообмена через теплоэкраны и методики расчета влияния различных экранов на эффективность высоковакуумной теплоизоляции в обычных условиях и в поле ядерного излучения.

2. Исследование возможностей защиты жидкого криоагента в зоне ядерного излучения от теплопритока извне посредством экрана, охлаждаемого его парами.

3. Исследование возможностей криостатирования облучаемого объекта посредством принудительно циркулирующего газообразного теплоносителя, принципиальные схемы и конструкции реакторных криогенных петель с гелием в качестве теплоносителя и с управляемым бесступенчатым изменением температуры облучаемого объекта в диапазонах 80 - 300 К и 10 - 300 К.

4. Исследование возможностей криостатирования облучаемого объекта посредством жидкого криоагента, принципиальные схемы и конструкции реакторных криоканалов с жидким гелием.

5. Принципиальные схемы и конструкции установок для внутриреакторных и послереакторных механических испытаний материалов в условиях криогенных температур.

6. Принципиальные схемы и конструкции установок для внутриреакторных и послереакторных исследований радиационных эффектов в механически напряженных материалах.

Таким образом, совокупность выполненных в диссертации работ является новым перспективным направлением в радиационной физике конденсированных сред, а именно: криостатирование твердых тел в поле ядерного излучения и криогенная техника для их реакторного исследования в диапазоне криогенных температур.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на IV (Ташкент, 1963), V (Тбилиси, 1965), VIII (Алма-Ата, 1974), IX (Обнинск, 1976), X (Свердловск, 1978) Всесоюзных совещаниях по координации научно-исследовательских работ с использованием исследовательских ядерных реакторов; на IV рабочем совещании по физике и технике исследовательских реакторов (Будапешт, 1965); на X совещании по применению рентгеновских лучей к исследованию материалов (Москва, 1971); на II Всесоюзном совещании "Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования" (Киев, 1976); на Всесоюзном семинаре "Методика и техника реакторных и послереакторных экспериментов в радиационном материаловедении" (Дмитровград, НИИАР, 1981); на Всесоюзной школе по физике и технике реакторов (Ленинград, ЛИЯЭ, 1982); на Всесоюзном семинаре "Послереакторные методы исследования свойств в радиационном материаловедении" (Дмитровград, НИИАР, 1982).

Публикация. Содержание диссертации отражено в 14 статьях и в 4 авторских свидетельствах на изобретение. Список основных публикаций прилагается.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, разбитых на 32 параграфа, заключения и списка литературы. Она изложена на 292 страницах, включая 72 рисунка и список литературы, содержащий 254 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении сформулированы тема и цель диссертации, указаны новизна и ценность результатов, полученных в диссертации, изложена структура диссертации.

Первая глава посвящена исследованию влияния различных экранов на эффективность высоковакуумной изоляции в обычных условиях и в поле ядерного излучения и разработке методик расчета разнообразных экранных систем. По сравнению с другими видами теплоизоляции, высоковакуумная изоляция имеет наибольшую эффективность при наименьшем содержании материалов, что особенно важно в зоне ядерного излучения. В литературе имеются лишь методики расчета частных случаев экранирования теплового излучения вне зоны ядерного излучения.

Оптические свойства поверхности как цельного объекта могут отличаться от свойств ее элементарного участка. Это объясняется тем, что вогнутые участки поверхности частично облучают себя и отражают на себя. В § I.1 выведена формула

$$\varepsilon_{\text{эф}} = A_{\text{эф}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \cdot \varphi} = 1 - R_{\text{эф}} \quad (\text{I.1})$$

для расчета эффективных степени черноты ($\varepsilon_{\text{эф}}$), поглощательной ($A_{\text{эф}}$) и отражательной ($R_{\text{эф}}$) способностей диффузной поверхности, характеризующих ее в целом. Здесь ε - степень черноты тела, а φ - средний угловой коэффициент излучения поверхности на окружающее пространство. Очевидно, что формула (I.1) удобна для решения задач с лучистым теплообменом между телами.

В § I.2 введено понятие и выведена формула для расчета эквивалентных излучательной ($\varepsilon_{\text{эк}}$) и поглощательной ($A_{\text{эк}}$) способностей поверхности тела, окруженного "плавающими" экранами, характеризующих тело с экранами в целом и упрощающих анализ возможностей "плавающих" экранов:

$$\varepsilon_{\text{эк}} = A_{\text{эк}} = \frac{1}{\frac{1 - \varphi^n}{(1 - \varphi) \cdot \varepsilon_{\text{пр}}} + \frac{\varphi^n}{\varepsilon}} \quad (\text{I.2})$$

Здесь ε - степень черноты тела и экранов, а $\varepsilon_{\text{пр}}$ - приведенная степень черноты замкнутых систем лучистого теплообмена между телом и I-м экраном, между I-м и 2-м экранами и т. д.; φ - средний угловой коэффициент излучения I-го экрана на тело, 2-го экрана на I-й экран и т. д., а n - число экранов.

В § I.3 исследованы возможности защиты тела от направленного теплового излучения при помощи теневого экранов вне и в поле ядерного излучения. Выведены формулы для расчета мощности теплопритока к телу и температур экранов, показывающие неограниченность возможностей теневого экранирования.

Большое практическое значение имеет изучение влияния экранов на лучистый теплообмен между двумя телами, составляющими замкнутую систему. В § I.4 рассмотрена общая ситуация, когда экраны могут подвергаться постороннему тепловому воздействию (нагреву от ядерного излучения, электрического тока и т. д., или охлаждению посредством жидкого криоагента, газообразного теплоносителя и т. д.). Допускаем, что n экранов, последовательно размещенных между телами A и B, образуют $n+1$ замкнутых систем и противоположные поверхности каждого экрана имеют одинаковые температуры. Для стационарного процесса теплообмена выведены уравнения мощности результирующего теплового излучения в произвольной из $n+1$ замкнутых систем:

$$E_m = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{AB}} \cdot H_{\text{AB}} \cdot (T_A^4 - T_B^4) + \sum_{k=1}^{m-1} Q_k \cdot \frac{\varepsilon_{\text{AB}} \cdot H_{\text{AB}}}{\varepsilon_{\text{AK}} \cdot H_{\text{AK}}} - \sum_{k=m}^n Q_k \cdot \frac{\varepsilon_{\text{AB}} \cdot H_{\text{AB}}}{\varepsilon_{\text{KB}} \cdot H_{\text{KB}}} \quad (\text{I.3})$$

и средней температуры произвольного из n экранов:

$$T_m^4 = \frac{\varepsilon_{\text{AB}} \cdot H_{\text{AB}}}{\varepsilon_{\text{mB}} \cdot H_{\text{mB}}} \cdot T_A^4 + \frac{\varepsilon_{\text{AB}} \cdot H_{\text{AB}}}{\varepsilon_{\text{Am}} \cdot H_{\text{Am}}} \cdot T_B^4 + \frac{\sum_{k=1}^{m-1} Q_k \cdot \frac{\varepsilon_{\text{AB}} \cdot H_{\text{AB}}}{\varepsilon_{\text{AK}} \cdot H_{\text{AK}}}}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{mB}} \cdot H_{\text{mB}}} + \frac{\sum_{k=m}^n Q_k \cdot \frac{\varepsilon_{\text{AB}} \cdot H_{\text{AB}}}{\varepsilon_{\text{KB}} \cdot H_{\text{KB}}}}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{Am}} \cdot H_{\text{Am}}} \quad (\text{I.4})$$

где $\epsilon_{AB}, \epsilon_{AГГ}$ и т. д. - приведенные степени черноты совокупностей замкнутых систем, образованных экранами между соответствующими индексам телами, а $H_{AB}, H_{AГГ}$ и т. д. - площади взаимно излучающих поверхностей соответствующих индексам тел, когда между ними нет экранов; T_A и T_B - температуры тел А и В ($T_A > T_B$); Q_1, \dots, Q_n - мощности посторонних тепловых воздействий на экраны; σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана. Выведены формулы для определения ϵ_{AB}, \dots и H_{AB}, \dots , а также для расчета частных случаев таких экранных систем.

Оценка эффективности экрана в целом и его отдельных участков в поле ядерного (реакторного) излучения производится посредством сравнения температурного поля экрана с температурами поверхностей соседних тел в стационарном режиме. В § 1.5 выведены уравнение температурного поля "плавающего" экрана, размещенного между телами А и В, и формула его средней температуры. Определены критическая толщина экрана ($\delta_{кр}$) и критическая мощность тепловой нагрузки единицы массы экрана от радиоактивного излучения ($q_{N,кр}$), в произвольной N точке экрана,

$$\delta_{кр} = \frac{\sigma_0 \cdot \epsilon_{пр,2} \cdot \Psi_{ЭВ} (T_A^4 - T_B^4)}{q_{N,max} \cdot \rho} \quad \text{и} \quad q_{N,кр} = \frac{\sigma_0 \cdot \epsilon_{пр,2} \cdot \Psi_{ЭВ} (T_A^4 - T_B^4)}{\rho \cdot \delta} \quad (1.5)$$

где $\epsilon_{пр,2}$ - приведенная степень черноты замкнутой системы экрана с телом В, $\Psi_{ЭВ}$ - угловой коэффициент излучения экрана на поверхность тела В, а ρ - плотность материала экрана. Здесь же выведены уравнения температурных полей цилиндрических экранов, охлаждаемых жидким криоагентом с торца и проточным газом, а также формулы для расчета их средних температур, дающие возможность оценить эффективность экранов и выбрать их оптимальные параметры в поле ядерного излучения.

В § 1.6 проведен анализ возможностей "плавающих" экранов в замкнутой системе лучистого теплообмена двух тел. Показаны диаграммы зависимостей эффективности экранирования от числа экранов и углового коэффициента излучения соседних экранов, а также распределения относительных температур по экранам.

Вторая глава посвящена изучению процесса охлаждения облучаемого в поле ядерного излучения объекта посредством принудительно циркулирующего в замкнутом контуре газообразного теплоносителя, охлаждаемого предварительно вне зоны излучения жидким криоагентом или в криогенераторе, поискам оптимальных принципиальных схем и конструкций установок (реакторных криогенных петель с гелием в качестве теплоносителя) для реализации этого процесса и рациональных режимов их работы.

Процесс работы криогенной петли состоит из двух основных стадий, первая - охлаждение теплоносителя вне зоны излучения, а вторая - охлаждение облучаемого объекта посредством его обдува теплоносителем. В § 2.1 проведен анализ стадии охлаждения принудительно циркулирующего газообразного теплоносителя вне зоны ядерного излучения, состоящего из ступеней предварительного охлаждения обратным потоком теплоносителя и парами криоагента и окончательного охлаждения жидким криоагентом. Разработаны методики расчета петель с компрессором при температуре окружающей среды и с криокомпрессором.

В § 2.2 рассмотрены криогенные петли с вертикальным криоканалом, разработанные, построенные и используемые для внутриреакторных исследований влияния облучения на механические свойства материалов, в которых в качестве криоагента используется жидкий азот. Приведены результаты работы петель.

Для дистанционной подачи образцов или ампул с образцами извне в поле излучения реактора, их облучения при температуре, близкой к температуре жидкого азота, и удаления облученных образцов в криоконтейнер с жидким азотом, с целью исследования этих образцов вне реактора, разработана, построена и внедрена криогенная петля с криопневмопочтой в горизонтальном криоканале. В § 2.3 рассмотрена эта петля и приведены ее эксплуатационные параметры.

Расход жидкого криоагента в криогенной петле значительно больше, чем в обычных криостатах, что объясняется тепловой нагрузкой от ядерного излучения. Здесь очень важно обеспечить рациональное использование жидкого криоагента, поиски возможностей которого изложены в § 2.4. На рис. I показана принципиальная схема криогенной петли с рациональным использованием жидкого криоагента при всех режимах ее работы. Включается компрессор 4, посредством вентиля 8 устанавливается расход теплоносителя через петлю, соответствующий тепловой нагрузке и заданной температуре образца. При помощи делителя 9 и сумматора 10 весь расход теплоносителя пропускается через теплообменники II и I7. При пуске петли жидкий криоагент в ванну I5 заливается с такой скоростью, чтобы в теплообменнике II происходил полный теплообмен между теплоносителем и парами криоагента. По мере понижения температуры выходящего из теплообменника I7 теплоносителя делитель 9 перестраивается таким образом, чтобы после достижения стационарного режима работы петли выходящий из теплообменника II теплоноситель имел температуру кипения криоагента, а выходящие из него пары криоагента имели температуру, близкую к температуре окружающей

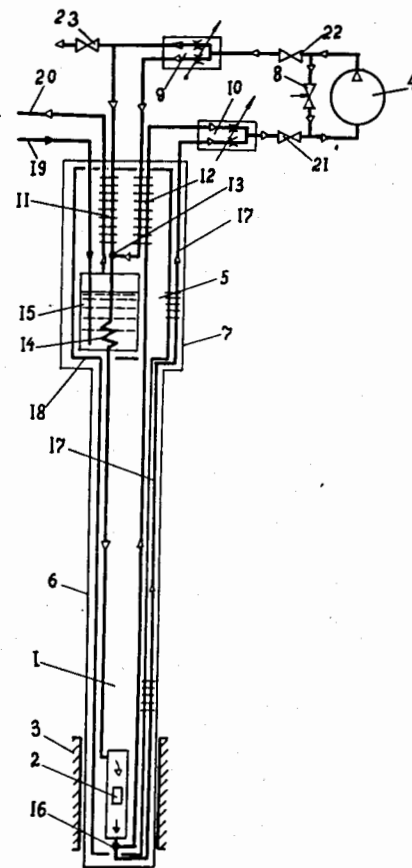


Рис. I. Принципиальная схема криогенной петли: I - криоканал; 2 - образец; 3 - активная зона; 4 - компрессор; 5 - теплообменный аппарат; 6 и 7 - вакуумные рубашки; 8, 21, 22 и 23 - вентили; 9 и 16 - делители; 10 и 13 - сумматоры; 11, 12, 14 и 17 - теплообменники; 15 - ванна; 18 - экран; 19 - переливалка; 20 - труба.

среды. Одновременно сумматор I0 перестраивается таким образом, чтобы в теплообменнике I2 обратный поток теплоносителя имел такой же расход, какой в нем имеет прямой поток. Остальная часть обратного потока теплоносителя проходит через теплообменник I7, охлаждая при этом экран I8. Разработана методика расчета петли с определением расходов теплоносителя и криоагента, а также их температур в узловых точках петли.

С учетом проведенного в § 2.4 анализа разработана, построена и внедрена криогенная петля для облучения биологических объектов в диапазоне температур 80-300 К, которая рассмотрена в § 2.5. Петля имеет вертикальный криоканал, нижний конец которого помещен в гнезде активной зоны реактора ИРТ для ТВС. В ней предусмотрено управляемое бесступенчатое изменение температуры облучаемого объекта в упомянутом диапазоне.

С целью получения возможности исследования облучаемых образцов при более низких температурах разработаны, построены и внедрены криогенные петли с криогенератором (К-2, ХГУ 500/15), в которых образцы в процессе облучения охлаждаются в диапазоне температур 10-80 К. В § 2.6 рассмотрена такая петля с вертикальным криоканалом, в котором, в основном, исследуются механические свойства материалов. Для расширения возможностей этой установки разработан и построен теплообменный аппарат, предназначенный для охлаждения циркулирующего гелия до температуры жидкого азота. Аппарат будет включен в контур петли параллельно с криогенератором, что даст возможность охлаждать облучаемые в криоканале образцы до любой температуры в диапазоне 10-300 К и изменять температуру образцов по заданной программе в этом диапазоне.

Третья глава посвящена изучению процесса охлаждения облучаемого в поле ядерного излучения объекта посредством жидкого криоагента, непосредственно омывающего его или охлаждающего через промежуточную среду, поискам оптимальных решений систем охлаждения и путей рационального использования жидкого криоагента, созданию и исследованию криоканалов с таким охлаждением различных объектов в зоне реакторного излучения.

В § 3.1 изучены возможности различных способов подачи жидкого криоагента в зону ядерного излучения. Проведен анализ процесса охлаждения облучаемого объекта посредством жидкого криоагента: когда криоагент омывает объект, когда охлаждает его через газ и когда охлаждает через металлический теплопроводник. Разработаны методики расчета этих систем с определением температурного поля и расхода жидкого криоагента.

Для выделения из спектра излучения реактора нейтронов с длиной волны $\geq 4 \text{ \AA}$ и их подачи на трехкристальный нейтронный спектрометр, предназначенный, со своей стороны, для исследования неупругого рассеяния этих нейтронов на твердых телах и жидкостях, разработан, построен и внедрен криоканал с бериллиевым фильтром, охлаждаемым жидким азотом через медный теплопроводник, который рассмотрен в § 3.2. Криоканал размещен в корпусе шибера горизонтального канала реактора, причем ванна с жидким азотом размещена в защищенной от облучения части канала. Приведены расчетные параметры и результаты испытания криоканала. Например, при мощности реактора 1 МВт бериллиевый фильтр охлаждается до 96,5 К, а интенсивность выходящих из криоканала холодных нейтронов с охлаждением бериллия возрастает и достигает приблизительно четырехкратного увеличения

при температуре 120 К. Дальнейшее охлаждение фильтра практически не меняет интенсивность выходящих из него нейтронов.

Для исследования влияния реакторного излучения на критические параметры сверхпроводников на реакторе ИРТ Института физики АН ГССР используется криоканал, в котором предусмотрено облучение образца при температурах 15 К и выше, вывод образца из зоны облучения и ввод в поле сверхпроводящего соленоида (в верхней части криоканала) без повышения его температуры и исследование образца в магнитном поле при температурах жидкого гелия и выше. С целью расширения возможностей исследования радиационных эффектов в сверхпроводниках разработан и строится криоканал, в котором, кроме вышеизложенного, предусмотрено облучение образца, начиная с температур жидкого гелия. Принципиальная схема и конструкция усовершенствованного криоканала рассмотрены в § 3.3.

Особого внимания требует проблема охлаждения облучаемых в ядерном реакторе образцов жидким гелием. Этой проблеме и поискам возможностей использования паров гелия для успешного ее решения посвящены последующие параграфы главы. В § 3.4 изучен нестационарный процесс заливки жидкого криоагента в зону ядерного излучения. Проведен анализ возможностей уменьшения испаряемости жидкого криоагента посредством его паров, определен оптимальный режим процесса заливки и разработана методика расчета основных ее параметров.

Наличие дополнительных паров криоагента, расход которых не зависит от теплопритока извне, а определяется тепловой нагрузкой от ядерного излучения, дает возможность доведения теплопритока к жидкому криоагенту из окружающей среды до

практического нуля. В § 3.5 подробно исследованы возможности экранирования жидкого криоагента в зоне ядерного излучения посредством своих паров, а в § 3.6 рассмотрены принципиальная схема и конструкция гелиевого криоканала с экраном, охлаждаемым парами гелия. Выходящие из рабочей камеры криостата пары гелия используются для охлаждения ее экрана, который одновременно выполняет роли горловины, паропровода и подвески криостата. Криостат изготовлен из тонкостенных труб нержавеющей стали, размещенных коаксиально. Их размеры в мм: рабочей камеры - $\Phi 20 \times 0,2$; экрана - $\Phi 32 \times 0,3$; $\Phi 36 \times 0,4$ и $\Phi 40 \times 0,4$; вакуумного кожуха - $\Phi 60 \times 0,6$. На рис. 2 приведены диаграммы характерных зависимостей в криоканале, вычисленные по разработанной в § 3.5 методике. Диаграмма реальных температур экрана будет проходить между диаграммами $T_{э \min}$ и $T_{э \max}$.

Четвертая глава посвящена комплексу установок для механических испытаний облученных материалов, как в процессе их облучения в криоканале реактора ИРТ, так и вне реактора, после выгрузки образцов из криоканала без повышения температуры.

Для испытания металлических микрообразцов на растяжение в поле реакторного излучения при криогенных температурах разработана, построена и внедрена микромашина, в которой используется пневматический способ нагружения образца, с гелием в качестве рабочего газа и металлическим сильфоном в качестве силового элемента. Принципиальная схема, конструкция и результаты эксплуатации машины рассмотрены в § 4.1. Основным преимуществом этой машины является неограниченность количества образцов, пропускаемых через нее. Внутриканальное устройство машины дает возможность загрузить извне, облучить и

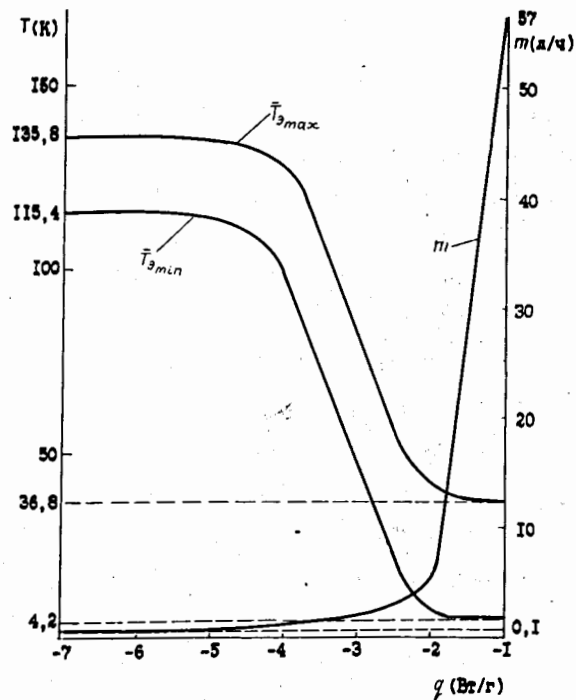


Рис.2: Диаграммы зависимостей возможных максимальной ($T_{\text{Э max}}$) и минимальной ($T_{\text{Э min}}$) средних температур экрана и испаряемости жидкого гелия (m) от средней по высоте рабочей камеры мощности выделяемого в единице массы тепла (q).

испытать партию образцов (25 штук). По мере испытания облученных образцов новые образцы догружаются без нарушения режимов работы реактора и криоканала. Части разорванных образцов собираются в бункере устройства, в котором помещаются до 300 образцов и который разгружается дистанционно. На рис.3 показана схема растяжного устройства машины, размещенного в криоканале. Во время испытания образца производится автоматическая запись диаграммы растяжения. Разработана методика обработки результатов испытания образца.

Для испытания на растяжение облученных при криогенных температурах образцов вне реактора при температурах 78-300 К разработана, построена и внедрена микромашина, которая рассмотрена в § 4.2. Здесь используется комбинированный пневмогидравлический способ нагружения образца с воздухом и маслом в качестве рабочих тел. Предусмотрена возможность транспортировки облученных образцов без повышения их температуры. Образцы дистанционно загружаются в криоканал реактора и облучаются. Облученные образцы при помощи криопневмопочты перегружаются в криоконтейнер, посредством которого доставляются в "горячую" лабораторию. Из криоконтейнера образцы перегружаются в магазин машины, размещенной в криостате. В этом же параграфе проведен анализ динамики движения образцов во время их перегрузки, а также возможных изменений температуры образца при его перемещении потоком газа.

В § 4.3 рассмотрена установка, разработанная, построенная и внедренная для испытания материалов на усталость в малоцикловой упруго-пластической области в условиях криогенных температур. Она предназначена как для внутриреакторных, так и

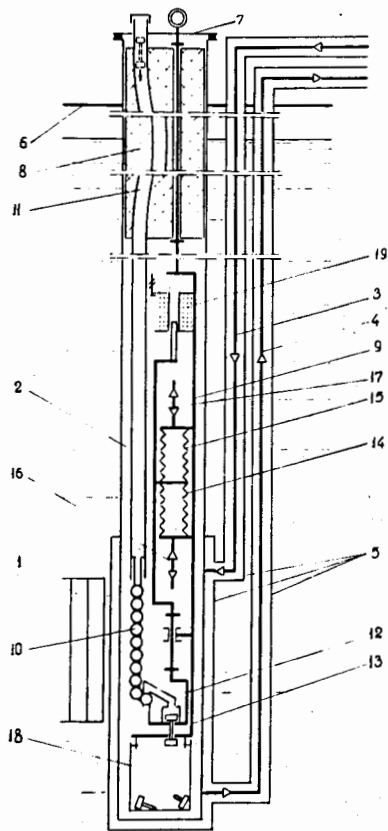


Рис.3. Криоканал с растяжным устройством: 1 - активная зона; 2 - криоканал; 3 и 4 - криотрубопроводы; 5 - вакуумные кожухи; 6 - площадка; 7 - крышка; 8 - пробка; 9 - растяжное устройство; 10 - магазин; 11, 16 и 17 - трубы; 12 и 13 - захваты; 14 и 15 - сильфоны; 18 - бункер; 19 - датчик.

послереакторных испытаний образцов. В первом случае установка комплектуется внутриканальным устройством, а во втором случае - послереакторным устройством для испытания образцов на растяжение. В установке предусмотрена возможность изменения продолжительности цикла, временного расклада в цикле и скоростей нагрузки и разгрузки образца в широком диапазоне. Уровень нагрузки образца в циклах поддерживается автоматически. Во время испытания образца на усталость записываются диаграммы "деформация-время" и "нагрузка-время", а во время его испытания на разрыв - диаграмма "нагрузка-деформация". При разрыве образца в процессе его испытания на усталость автоматически фиксируются параметры момента разрушения образца.

В § 4.4 рассмотрена установка для облучения механически напряженных материалов и их испытания на растяжение, разработанная и построенная для определения роли облучения в напряженном состоянии в изменении механических свойств материалов. Установка дает возможность одновременного облучения шести микрообразцов в криоканале реактора, из которых три образца могут быть нагружены одинаковыми растягивающими усилиями до желаемого уровня, а остальные три - свободными от механической нагрузки. Установка дает возможность испытания этих образцов на растяжение с записью диаграммы "нагрузка-деформация".

Пятая глава посвящена установкам для физико-механических исследований радиационных эффектов в твердых телах при криогенных температурах, как во время облучения в реакторе, так и после облучения вне реактора. В последнем случае предусмотрена возможность транспортировки образцов без подогрева.

Для рентгеноструктурных исследований облученных образцов

как в свободном, так и в механически напряженном состоянии при температурах 80-300 К разработаны, построены и внедрены криогенные камеры, устанавливаемые на столик гониометра дифрактометра типа УРС-50, ДРОН-1 и т.п. В § 5.1 рассмотрена криогенная камера, предназначенная для рентгеноструктурных исследований облученных в криоканале реактора образцов, которые из криоканала в криоконтейнер и из криоконтейнера в криогенную камеру перегружаются без подогрева. Для охлаждения криоконтейнера и криогенной камеры используется жидкий азот. Изменение температуры образца в камере производится при помощи теплопроводника, соединяющего образец с жидким азотом, и электронагревателя, размещенного за образцом. Предусмотрена удобная юстировка образца относительно оси вращения гониометра. Для подвода к образцу рентгеновских лучей и для вывода из камеры отраженных от образца лучей в ее стенках имеются окна, дающие возможность проводить исследования в угловом диапазоне

$$0 < 2 \cdot \theta < 180^\circ$$

В § 5.2 рассмотрена криогенная камера, предназначенная для рентгеноструктурных исследований материалов (в том числе и облученных) в процессе их одноосного растяжения. Здесь используется пневматический способ нагружения образца с металлическим сильфоном и воздухом в качестве рабочего газа. С целью разгрузки столика гониометра камера подвешена на кронштейн с независимой от дифрактометра стойкой - пространственное расположение и вращение камеры определяются расположением и вращением базовой поверхности столика гониометра, а вот механическую нагрузку от камеры несет кронштейн. В камере предусмотрены возможности бесступенчатых изменений в обе стороны как температуры образца, так и уровня его нагрузки.

В § 5.3 рассмотрена установка, разработанная, построенная и внедренная для внутриреакторных исследований влияния облучения на эффект Баушингера в условиях криогенных температур. Знакопеременные механические напряжения, необходимые для определения эффекта Баушингера в образце, здесь возбуждаются посредством его поочередного растяжения и сжатия. И в этой установке применяется пневматический способ нагружения образца. Установка дает возможность проводить исследование или по схеме сжатие-растяжение, или по схеме растяжение-сжатие. Нагружение образца плавное и регулируемое; можно остановить процессы нагружения или разгрузки образца, а потом возобновить их. Приведены и обсуждаются результаты экспериментов.

В последующих параграфах главы рассматриваются установки, разработанные, построенные и внедренные для внутриреакторных исследований влияния сопряженного воздействия реакторного излучения и механического напряжения на электропроводность твердых тел в условиях криогенных температур. В рассматриваемой в § 5.4 установке предусмотрена возможность нагружения проволочного образца одноосным растягивающим усилием, а в рассматриваемой в § 5.5 установке - нагружения ленточного образца одноосным поперечным сжатием, до соответствующих величин напряжения. В обеих установках одновременно с нагруженным образцом в идентичных с ним условиях облучается и свободный от механического нагружения контрольный образец, причем в процессе эксперимента с этих образцов снимаются зависимости их электросопротивления от дозы облучения. Приводятся и обсуждаются результаты исследования алюминиевых образцов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

I. Разработана методика расчета эффективных излучательной, поглотительной и отражательной способностей диффузной поверхности, характеризующих ее как цельный объект, упрощающая анализ лучистого теплообмена этой поверхности с другими поверхностями.

2. Введено понятие эквивалентных оптических свойств поверхности тела, окруженного системой "плавающих" экранов, и разработана методика расчета эквивалентных излучательной и поглотительной способностей этой поверхности, характеризующих тело с экранами в целом. Они упрощают анализ влияния "плавающих" экранов на эффективность теплоизоляции тела.

3. Исследован процесс экранирования лучистого теплообмена в замкнутой системе двух тел, в условиях тепловых воздействий (нагревание, охлаждение) на экраны извне. Выведены уравнения теплообмена между телами и температур экранов.

4. Исследованы возможности "плавающих" экранов в замкнутой системе лучистого теплообмена двух тел вне зоны ядерного излучения. Показано, что когда одно из тел заключено в другое, тогда с увеличением числа экранов мощность теплообмена между ними стремится к пределу, отличному от нуля, вопреки распространенному ошибочному мнению.

5. Исследованы возможности "плавающих" экранов в зоне ядерного излучения. Установлено, что существуют критические толщина экрана и число экранов для данных условий облучения, выше которых экраны дают отрицательный эффект.

6. Исследованы возможности теневых экранов при защите тела от направленного теплового излучения. Установлено, что

при наличии только направленного теплового излучения (например, в космосе) возможности теневых экранов неограниченны.

7. Разработаны методики расчета теплопритока к криосистеме от ее вакуумного кожуха в зоне ядерного излучения через экран, охлаждаемый или жидким криоагентом с торца, или циркулирующим газообразным теплоносителем, или парами криоагента, а также температурных полей и средних по тепловому излучению температур этих экранов.

8. Проведен анализ процесса криостатирования облучаемого объекта посредством его обдува циркулирующим газообразным теплоносителем, охлаждаемым предварительно жидким криоагентом или в криогенераторе. Определены возможности усовершенствования криогенных петель с принудительно циркулирующим теплоносителем, а также расширения диапазона их возможностей.

9. Исследован процесс криостатирования теплоносителя жидким криоагентом в криогенной петле при разных режимах ее работы. Разработана принципиальная схема криогенной петли с рациональным использованием возможностей жидкого криоагента.

10. Разработана, построена и внедрена криогенная петля с криопневмопочтой, дающая возможность облучения в реакторе образцов и их выгрузки при температуре жидкого азота, с целью испытания или исследования этих образцов вне реактора. Здесь циркулирующий гелий выполняет как роль теплоносителя, так и роль рабочего газа пневмопочты, а жидкий азот - криоагента.

II. Разработаны, построены и внедрены криогенные петли для внутриреакторных испытаний и исследований материалов в диапазоне температур 80-300 K, с управляемым бесступенчатым изменением температуры в этом диапазоне. Эти петли имеют вер-

тикальный криоканал, в них также используются гелий и азот.

12. Разработана, построена и внедрена криогенная петля с криогенератором (К-2, ХГУ 500/15), охлаждающим циркулирующий гелий, предназначенная для внутриреакторных испытаний и исследований материалов в диапазоне температур 10-80 К. Разработан и построен теплообменный аппарат на жидком азоте, включение которого в контур этой петли параллельно с криогенератором даст возможность охлаждения облучаемого объекта в диапазоне 10-300 К, с плавным управляемым изменением температуры.

13. Проведен анализ процесса охлаждения облучаемого объекта жидким криоагентом, как омывающим его непосредственно, так и охлаждающим через газовую среду или металлический теплопроводник. Разработаны методики расчета этих систем с определением температурного поля и расхода жидкого криоагента. Изучены возможности различных способов подачи жидкого криоагента в зону ядерного излучения.

14. Исследован нестационарный процесс заливки жидкого криоагента в зону ядерного излучения, определен ее оптимальный режим при постоянной тепловой нагрузке от облучения.

15. Показано, что при значительных тепловых нагрузках от ядерного излучения теплоприток к жидкому криоагенту извне практически полностью можно исключить при помощи паров этого криоагента, охлаждая ими экраны, подвески и т. д.

16. Разработан, построен и внедрен реакторный криоканал, в котором облучаемый бериллиевый фильтр нейтронов охлаждается жидким азотом через металлический теплопроводник извне.

17. Разработан и строится криоканал, в котором сверхпроводник будет облучаться при температуре жидкого гелия, а об-

лученный образец будет исследоваться вне реактора в магнитном поле при температурах жидкого гелия и выше.

18. Разработан и строится криоканал с жидким гелием в зоне реакторного излучения. Экран криоканала, охлаждаемый выходящими из него парами гелия, одновременно выполняет роли подвески криоканала и криотрубопроводов для вывода паров гелия из него. Разработана методика теплового расчета системы.

19. Разработана, построена и внедрена микромашина для внутриреакторных испытаний материалов на растяжение при криогенных температурах, которая не имеет принципиального ограничения числа испытанных образцов. Образцы в зону облучения подаются извне, не нарушая режимов работы реактора и криогенной петли. При испытании образца записывается диаграмма "нагрузка-деформация". Испытанные образцы собираются в бункер, который после заполнения разгружается дистанционно.

20. Разработана, построена и внедрена микромашина для испытания облученных образцов на растяжение вне реактора, с системой перегрузки образцов без подогрева из криоканала реактора в криостат с микромашиной.

21. Разработана, построена и внедрена установка для внутриреакторных или послереакторных испытаний образцов на малоцикловую усталость при криогенных температурах, с возможностями изменения как временного расклада цикла, так и уровня нагружения образца в широком диапазоне, а также последующего испытания образца на растяжение. При испытании образца на усталость записываются диаграммы "нагрузка-время" и "деформация-время", а при испытании на растяжение - "нагрузка-деформация".

22. Разработана, построена и испытана установка для об-

лучения в криоканале реактора механически напряженных образцов и для их последующего испытания на растяжение. Одновременно облучаются шесть образцов, три из которых нагружены.

23. Разработана, построена и внедрена криогенная камера для рентгеноструктурных исследований облученных образцов в диапазоне температур 80-300 К, которые из криоканала реактора в камеру перегружаются при помощи криоконтейнера без подогрева. В криоконтейнере и камере используется жидкий азот.

24. Разработана, построена и внедрена криогенная камера для рентгеноструктурных исследований механически напряженных материалов в диапазоне температур 80-300 К. В камере образец нагружается растягивающим усилием, уровень которого можно изменять в широком диапазоне.

25. Разработана, построена и внедрена установка для исследования эффекта Баушингера в криоканале реактора. Четыре образца исследуются или по схеме сжатие-растяжение, или по схеме растяжение-сжатие.

26. Разработаны, построены и внедрены установки для резистивных исследований механически напряженных материалов в криоканале реактора. В одной установке образец растягивается, а во второй - сжимается. С нагруженного и свободного образцов снимаются зависимости электросопротивления от дозы облучения, дающие ценные сведения о радиационных эффектах в материале.

С П И С О К

основных публикаций, отражающих содержание диссертации

1. Андроникашвили Э.Л., Вадачкория Л.А., Замтарадзе Л.А. Реакторный внутриканальный криостат с дистанционным охлаждением // Физика низких температур, вып. 2. - Тбилиси: Мецниереба, 1966. - С.52-60.

2. Андроникашвили Э.Л., Вадачкория Л.А., Замтарадзе Л.А. Реакторный внутриканальный криостат с дистанционным охлаждением // ПТЭ. - 1967. - № 3. - С.211-212.
3. Низкотемпературная петля с пневмопочтой на ядерном реакторе ИРТ-2000 / Л.А. Вадачкория, Дж.Г. Кацитадзе, И.А. Наскидашвили, А.А. Чипашвили // Атомная энергия. - 1969. - Т.26, вып. 3. - С.288-290.
4. Вадачкория Л.А. Некоторые вопросы экранирования теплового излучения // ИФЖ. - 1970. - Т.18, № 1. - С.21-30.
5. А.с. 326906 (СССР). Низкотемпературная петля для ядерных исследований / Л.А. Вадачкория, Ш.А. Мумладзе, И.А. Наскидашвили, Г.П. Тавхелидзе, А.А. Чипашвили. - 1971 / Б.И. - 1973. - № 3, с.143.
6. Вадачкория Л.А. Влияние экранов на лучистый теплообмен в зоне проникающего излучения // ИФЖ. - 1972. - Т.23, № 4 - С.627-634.
7. А.с. 375535 (СССР). Низкотемпературная приставка к рентгеновскому дифрактометру для рентгеноструктурных исследований материалов / Л.А. Вадачкория, Р.Э. Майле, Ш.А. Мумладзе, И.А. Наскидашвили. - 1973 / Б.И. - 1973. - № 16, с.98.
8. Низкотемпературные вертикальные каналы реактора ИРТ-2000 / Л.А. Вадачкория, Дж.Г. Кацитадзе, Ш.А. Мумладзе, И.А. Наскидашвили, Г.П. Тавхелидзе, Л.С. Топчян, А.А. Чипашвили // ИФЖ. - 1973. - Т.25, № 3. - С.430-435.
9. Вадачкория Л.А. Теплофизический анализ систем глубокого охлаждения объекта исследования в зоне реакторного излучения // Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение / Под ред. И.А. Наскидашвили. - Тбилиси: Мецниереба, 1974. - С.98-122.

10. Низкотемпературные испытания материалов на усталость в зоне реакторного облучения / Л.А. Вадачкория, Д.Г. Демуров, Дж.Г. Кацитадзе, Ш.А. Мумладзе, И.А. Наскидашвили, Г.П. Тавхелидзе, Р.В. Чачанидзе // Радиационные эффекты изменения механических свойств конструкционных материалов и методы их исследования. - Киев: Наукова думка, 1977. - С.126-135.
11. Вадачкория Л.А., Тавхелидзе Г.П. Установка для испытаний материалов на растяжение в криоканале ядерного реактора // Проблемы прочности. - 1981. - № 6. - С.117-118.
12. Установка для внутриреакторного исследования эффекта Баушингера / Э.С. Лапишвили, Дж.Г. Кацитадзе, И.А. Наскидашвили, Л.А. Вадачкория // Проблемы прочности. - 1983. - № 4. - С.114-116.
13. Вадачкория Л.А. Криогенные петли ядерного реактора // Физика и техника реакторов (Материалы школы ЛЯИФ) / Под ред. А.Н. Ерикалова. - Л.: 1984. - С.115-156.
14. Вадачкория Л.А. Эффективные оптические свойства диффузной поверхности // ИФЖ. - 1986. - Т.51, № 1. - С.164-165. (Деп. в ВИНТИ 14 мая 1986 г., № 3502-В86).
15. А.с. 1241956 (СССР). Криогенная петля / Л.А. Вадачкория. - 1986 / Б.И. - 1989. - № 40.
16. А.с. 1387734 (СССР). Установка для криостатирования облучаемых образцов в ядерном реакторе / Л.А. Вадачкория. - 1987 / Б.И. - 1989. - № 40.

Рукопись поступила в издательский отдел
10 июля 1989 года.