

П.А. Зайцев, П.П. Олейников, М.Л. Таубин

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ТУГОПЛАВКИХ МАТЕРИАЛОВ
ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК
РЕАКТОРА ЯРД**

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2017



УДК 621.039.54

ББК 31.4

3-17

3-17 Зайцев П.А., Олейников П.П., Таубин М.Л.

**Теплофизические характеристики тугоплавких материалов
тепловыделяющих сборок реактора ЯРД**

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2017. – 188 с. ISBN 978-5-94836-473-5

В книге приведены результаты разработки методов и средств исследования теплофизических характеристик и испытаний материалов, элементов конструкции и узлов активной зоны реакторов ЯРД. Описана методика многофакторных воздействий, позволяющая оптимизировать процессы исследований и испытаний. Представлены экспериментальные данные по теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости, термическому расширению, модулю упругости, прочности, параметру решетки материалов твэлов, теплоизоляционных пакетов и опорных решеток (карбиды, нитриды, карбонитриды урана, теплоизоляционные углеродосодержащие материалы, высокотемпературные соединения карбидов и нитридов переходных металлов и их сплавов, а также гидридов циркония и иттрия). Особенностью описанных экспериментальных данных является то, что они представляют результаты комплексного высокоинтенсивного воздействия радиационных потоков, высоких температур, механических нагрузок и агрессивных по отношению к конструкционным материалам газов на свойства исследованных материалов.

Книга предназначена для научных работников и технических специалистов, работающих в области создания материалов для ядерных реакторов различного назначения.

УДК 621.039.54

ББК 31.4

© 2017, Зайцев П.А., Олейников П.П., Таубин М.Л.

© 2017, АО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА», оригинал-макет, оформление

ISBN 978-5-94836-473-5

Содержание

Определения, обозначения и сокращения	4
Введение	5
Глава 1. Проблемы исследования теплофизических характеристик материалов, элементов и узлов ЯЭУ	9
Методика исследования влияния многофакторных воздействий на работоспособность элементов конструкций.....	9
О едином подходе к исследованию материалов и элементов конструкций.....	12
Обоснование выбора методов теплофизических исследований до, в процессе и после реакторных воздействий.....	14
Глава 2. Термоэлектрические преобразователи для исследования теплофизических характеристик элементов конструкции ЯРД	23
Глава 3. Предреакторные исследования	39
Методы исследования теплофизических свойств.....	39
Глава 4. Внутриреакторные исследования	96
Особенности измерения температур при внутриреакторных исследованиях свойств материалов.....	96
Внутриреакторные исследования теплофизических свойств материалов.....	99
Глава 5. Анализ влияния нестационарных реакторных воздействий	131
Глава 6. Послереакторные исследования тепловых характеристик деталей и узлов ЯРД	153
Глава 7. Обобщение и анализ многофакторных воздействий	175
Сопоставительный анализ влияния отдельных факторов и их комплекса.....	175
Заключение	186

Определения, обозначения и сокращения

В настоящей книге применяются следующие сокращения и обозначения:

АЗ — активная зона

ИВГ — исследовательский газовый реактор

ИГР — импульсный графитовый реактор

КЭТ — канал экспериментальный технологический

КЯЭУ — космическая ядерная энергетическая установка

ОП — опорная решетка

РУ — реакторная установка

ТВР — термопреобразователь вольфрам-ренийевый

ТВС — тепловыделяющая сборка

ТВЭЛ — тепловыделяющий элемент

ТИП — теплоизоляционный пакет

ТК — технологический канал

ТХА — термопреобразователь хромель-алюмелевый

ТХК — термопреобразователь хромель-копелевый

ЯРД — ядерный ракетный двигатель

ЯЭУ — ядерная энергетическая установка

Введение

Разработка ядерных ракетных двигателей (ЯРД) несомненно актуальный вопрос современной науки и техники, направленный на развитие космической ядерной энергетики.

Создание ядерного ракетного двигателя началось в России в шестидесятых годах прошлого столетия [1, 2, 3]. Для выполнения этой важной государственной задачи были созданы уникальные стенды для предреакторных исследований и, что особенно важно, исследовательские реакторы на Семипалатинском полигоне для отработки элементов конструкции в реакторных условиях и испытания двигателя ЯРД.

В процессе разработки таких двигателей был решен комплекс расчетных и конструкторских работ, а с использованием созданных стендов проведены технологические и материаловедческие исследования [4, 5].

Результаты этих исследований и испытаний до недавнего времени были закрыты, и только после совместных российско-американских научных конференций эта информация стала общедоступной.

Учитывая то обстоятельство, что в процессе комплексных исследований и испытаний в обеспечение разработки ЯРД накоплен колоссальный опыт и получена исключительно уникальная информация о влиянии высокоинтенсивных механических, температурных, радиационных и химических воздействий на тугоплавкие материалы при сверхвысоких (свыше 3000 °С) температурах, актуальность анализа и обобщения этой информации является очевидной. Кроме того, в настоящее время это важно и для сохранения знаний, полученных в процессе указанных исследований.

Данная работа и посвящена обобщению результатов предреакторных и внутриреакторных исследований теплофизических свойств материалов, из которых изготавливались элементы конструкции технологического канала ЯРД (рис. 1), а также послереакторных исследований состояния элементов и узлов тепловыделяющих сборок, испытанных в реакторе ИВГ-1 в условиях, моделирующих натурные.

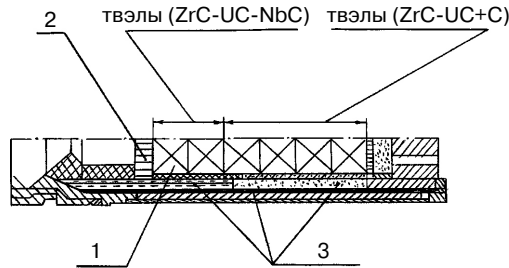


Рис. 1. Схема технологического канала: 1 — нагревные секции (твэлы); 2 — опорная решетка; 3 — теплоизоляционный пакет

Для обоснования целостности указанных обобщений авторами предложена модель многофакторных воздействий, дающая возможность оптимизировать исследования, учитывая сложность и дороговизну реакторных испытаний, а также унифицировать методики и аппаратуру.

В качестве основного вывода этой модели формулируется заключение о том, что основным фактором, определяющим работоспособность изделий как индивидуально, так и в сочетании с другими факторами, является фактор «температура».

Кроме того, температура, — это один из важнейших технологических параметров, определяющих эффективность и безопасность эксплуатации ЯЭУ. И если при реализации большинства технологических приемов возможно обойтись измерительными средствами общетехнического назначения, то в реакторных установках из-за конструктивных особенностей и радиационных воздействий необходимы специальные средства измерения температуры. Известно, что режимы технологических процессов производства многих конструктивных компонентов, например тепловыделяющих элементов ТВС ЯЭУ, отличаются более чем на 1000°C . Еще более высокий уровень температуры — в разработках ядерных энергетических установок космического назначения, включая их стендовые и реакторные испытания. Так, рабочая температура испытанного прототипа ядерно-ракетного двигателя, например, даже превысила температурный предел —



2500 °С, установленный для контактных термометрических средств в государственной поверочной схеме вида измерения.

Именно поэтому в данной работе кратко описаны особенности термометрии применительно к ЯРД.

Указанные работы в области высокотемпературной реакторной термометрии применительно к созданию ЯРД проводились сотрудниками ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» на протяжении ряда лет на всех стадиях, от разработки технологии изготовления элементов и узлов конструкций, стендовых испытаний, внутриреакторных исследований материалов и послереакторных исследований состояния деталей и узлов. Эта комплексная информация обобщена в отдельной монографии, которая готовится к печати.

Прежде всего необходимо отметить вклад в разработку и многолетний опыт работ Федика И. И., Подладчикова Ю. Н., Дьякова Е. К., Денискина В. П., Наливаева В. И. и сотрудников объединенной экспедиции Могильного И. А., Ивлева А. П., Грозного В. И., Тухватулина Ш. Т., Черепнина Ю. С. и др.

В данной работе представлена модель многофакторных воздействий (глава 1), краткого анализа технологических, метрологических и конструкторских решений при создании высокотемпературных средств измерений, в том числе с учетом реакторных воздействий (глава 2), методы и результаты предреакторных (глава 3) и внутриреакторных исследований теплофизических свойств материалов (глава 4), а также послереакторных исследований состояния элементов и узлов ЯРД (глава 5). Особенно важно отметить экспериментальное подтверждение предпосылки того, что из всего комплекса факторов, воздействующих на материалы элементов и узлов конструкции ЯРД («температура», «среда», «радиация», «напряжения») основное воздействие оказывает фактор «температура», который присутствует во всех комбинациях факторах, определяющих работоспособность конструкций ЯРД (глава 6).

Обобщение и анализ результатов отработки элементов конструкции активных зон ЯРД, приведенные в данной монографии, особенно актуальны и в настоящее время, если учесть, что элементы

и узлы реакторных установок как промышленного (реакторы АЭС), так и специального назначения работают в условиях одновременного воздействия температуры, теплоносителя, механических нагрузок и радиационных потоков.

В связи с изложенным можно заключить, что представленная информация по методологии, методикам и аппаратуре для исследования и испытаний реакторных материалов может быть использована и при разработке реакторов различных применений.

Литература

1. Понамарев-Степной Н. Н. Космические энергетические установки // В мире науки. Спецвыпуск, 2015. — С. 94—97.
2. Драгунов Ю. Г. Воплощая мечту // В мире науки. Спецвыпуск, 2015. — С. 98—103.
3. Ядерные ракетные двигатели / Темянко Ю. Г., Конюхов Г. В., Коротеев А. С., Кузьмин Е. П., Павельев А. А. — ООО «Норминформ», 2001. — 416 с.
4. Дзюбенко Б. В., Федик И. И., Аштмантас Л. В. Проблемы создания ядерного ракетного двигателя. Становление и развитие. — Вильнюс, 2008. — 174 с.
5. Власов Н. М., Федик И. И. Тепловыделяющие элементы ядерных ракетных двигателей. — М.: ЦНИИАтоминформ, 2001. — 208 с.

ГЛАВА I

ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ, ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ ЯЭУ

Методика исследования влияния многофакторных воздействий на работоспособность элементов конструкций

Как известно, для условий эксплуатации высокотемпературных реакторов характерно то, что детали и узлы подвержены одновременному высокоинтенсивному многопараметровому внешнему воздействию.

Это обстоятельство затрудняло анализ информации при оценке работоспособности материалов, ответственных за работоспособность деталей и узлов. Изложенное предопределило необходимость создания методологии оптимального планирования исследований влияния различных процессов на изменение свойств материалов активной зоны.

Так, в фактор «температура» включены параметры, характеризующие влияния температурных полей (уровень и перепады температур, тепловые потоки). В фактор «радиация» включены параметры,

характеризующие реакторное воздействие (флюенс, интенсивность и спектр нейтронов).

В фактор «напряжения» включены параметры, характеризующие результат внешнего силового воздействия и внутренних напряжений (вибрационные, бандажные, газодинамические нагрузки, остаточные напряжения).

В фактор «среда» включены параметры, характеризующие химическое и эрозионное воздействия.

Следует заметить, что в некоторых случаях для оптимизации возможно исследование влияния на какое-либо свойство не всех параметров, включенных в фактор, а влияние реакции его от действия данного фактора. Например, при исследовании влияния на термopрочность фактора «напряжения» целесообразно изучить влияние трещин как обобщенный результат действия фактора, а не ставить задачу исследования влияния на термopрочность отдельно, например, вибрации, термических напряжений, учитывая, что даже в одном испытании различные элементы конструкций, а также одни и те же элементы конструкции расположены в различных частях изделия, повреждены различной комбинацией факторов. Последние объединены в парные, тройные и комплексами.

В представленную схему не включены парные комбинации «среда — напряжения» и «радиация — среда», поскольку экспериментальные исследования химического взаимодействия с водородом и азотом, а также эрозионного воздействия указывают на то, что без одновременного влияния температуры влияние этих комбинаций пренебрежимо мало. По этой же причине исключена комбинация «напряжения — среда — радиация». В качестве возможного использования предложенной методики приведем пример. Если перед материаловедами в качестве главной прикладной задачи ставится создание методики прогнозирования работоспособности деталей и узлов, то в соответствии с обсуждаемой схемой на начало данной работы необходимо было бы провести исследование двенадцати параметров на все свойства материалов, работоспособность деталей и узлов (прочность, термopрочность, ползучесть, теплопроводность и т.д.), затем

исследовать варианты парных, тройных и комплексных воздействий, причем для каждой детали или узла, после чего, по-видимому, можно формулировать и принцип прогнозирования.

Неоптимальность такого подхода очевидна, поскольку поиск необходимо вести по всему возможному объему информации без учета степени всех компонент для прогнозирования. Представляется более оптимальным подход с учетом принятой методики конструирования и создания изделий, суть которой состоит в отказе на первом этапе от поиска идеальных решений, допускающем частичное повреждение отдельных деталей и узлов при сохранении изделием функционального назначения, тем более что этот подход оправдал себя, дав дополнительную информацию о состоянии деталей и узлов после успешных испытаний изделий в серии пусков реактора ИВГ-1. Принципиальное отличие предлагаемого подхода от общепринятого состоит в планировании прикладных (но не фундаментальных) исследований исходя из анализа состояния деталей и узлов первых опытных изделий, прошедших полномасштабные реакторные испытания.

Такой подход исключает исследование несущественных комбинаций факторов и, как следствие, сокращает объем исследований. В этом случае для той или иной детали после выявления определяющей комбинации факторов (например «температура — напряжения — среда») из исследования исключается несущественный фактор и его комбинации (в нашем примере все варианты с фактором «радиация»).

В итоге выявляется основной фактор, влияние которого целесообразно исследовать всесторонне для выбранной детали, исходя из чего планируются материаловедческие исследования свойств материала, из которого состоит данная деталь, в зависимости от параметров, составляющих определенный как основной фактор. К примеру, если для обойм ТИП определяющим выявленным фактором является фактор «среда», то следует исследовать изменение теплопроводности, термopрочности в зависимости от степени химико-эрозионного взаимодействия. При этом исследование прочности

вряд ли оправданно, если при анализе состояния элемента конструкции механических повреждений не обнаружено.

Экспериментальная информация, полученная по предложенной методике, дает возможность составить полную картину физических явлений, протекающих при эксплуатации ЯЭУ, что, в свою очередь, позволяет оценить работоспособность изделия, его предельные возможности, выработать основные направления оптимизации конструкций, их материального состава и режимов испытаний.

Оптимизация предложенной методики требует наличия экспериментальной базы, включающей лабораторные предреакторные, а также внутрореакторные методы и экспериментальные устройства, стенды для исследования всех комбинаций факторов (исключая «радиацию») и, наконец, реакторы для штатных испытаний (комплекс факторов) и исследовательские реакторы для исследования двойных и тройных комбинаций с фактором «радиация».

Результаты данной работы показывают, что такая база была создана во ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» и включает в себя реакторы ИГР, ИВГ-1, электродуговые стенды, электротермическую установку и горячие прессы, а также методы и экспериментальные устройства для до-, внутри- и послереакторных исследований.

О едином подходе к исследованию материалов и элементов конструкций

При анализе и прогнозировании работоспособности деталей и узлов ТК основная трудность возникает при сопоставлении условий материаловедческих исследований с условиями эксплуатации изделий. Так, например, вызывало затруднение использование данных по теплопроводности (это же относится и к любому свойству) материалов, полученных на специально приготовленных образцах (цилиндры $\varnothing = 30$ мм, $h = 25-50$ мм) в лабораторных условиях при расчете температурных полей в узлах конструкций, подверженных одновременному воздействию группы факторов, при натурных испытаниях.

В связи с этим одной из задач данной работы была разработка такого подхода к исследованию свойств материалов и характеристик изделий, основной принцип которого состоит в материаловедческих исследованиях на образцах, в качестве которых выступают реальные объекты (твэлы, опорные решетки, обоймы ТИП).

Второй принцип состоит в применении для оценки работоспособности элементов конструкций информации, полученной при определении физических свойств на объектах, в качестве которых брались элементы конструкций. Для пояснения следует отметить, что в данной работе исследовалась, например, теплопроводность именно твэлов, хотя теплопроводность является фундаментальным свойством материала (в данном случае сплава UC, ZrC-UC-C и др.), причем твэла с присущими ему микро- и макродефектами, как технологическими, так и возникшими в процессе испытаний.

В этом случае теплопроводность выступает не как свойство материала, а как характеристика теплопереноса элемента конструкции. Для реализации описанного подхода были сформулированы следующие требования.

Идентичность. Это требование заключается в необходимости разработки методов, применимых как для исследования материалов, так и деталей и узлов изделий. В соответствии с этим требованием были разработаны методы определения теплофизических характеристик на образцах в виде витых стержней (применительно к твэлам), тонкостенных полых цилиндров (применительно к обоймам ТИП), цилиндров, перфорированных винтообразными каналами (применительно к опорным решеткам).

Сопоставимость. Это требование заключается в необходимости при исследовании реализовывать процессы, аналогичные процессам, действующим при испытаниях. Так, учитывая, что в процессе испытаний в твэлах и ТИП реализуется в основном радиальный тепловой поток, при разработке методов и анализе результатов преимущество отдавалось методам радиального теплового потока.

Преимственность. Это требование заключается в возможности, используя одну и ту же методику, провести исследования до, внутри, и после реакторных воздействий.

Этому требованию полностью отвечают разработанные в рамках данной работы различные модификации дифференциального импульсного метода.

Информативность. Это требование заключается в необходимости получения информации о влиянии всех действующих факторов на элементы и узлы конструкций в процессе натуральных испытаний при исследовании свойств материалов. В соответствии с этим требованием в рамках данной работы создана методика исследований многофакторных воздействий, в соответствии с которой и проведены исследования влияния как отдельных факторов, так и их комбинаций, вплоть до полного набора факторов, реализуемых при ресурсных, натуральных испытаниях.

Обоснование выбора методов теплофизических исследований до, в процессе и после реакторных воздействий

Необходимость анализа состояния деталей и узлов, исследования свойств, определяющих работоспособность их в составе изделия как в процессе реакторного воздействия, так и после испытаний, потребовала, как отмечалось, создания комплекса методов и аппаратуры, которые позволили бы, во-первых, проводить экспресс-оценку эксплуатационных характеристик твэлов, обойм ТИП, опорных решеток, корпуса между пусками аппаратов в целях прогнозирования развития дефектности и, во-вторых, исследовать непосредственное воздействие для направленного регулирования свойств материалов и режимов испытаний.

Таким образом, задача сводилась к созданию следующих методов и аппаратуры: вне реакторных (лабораторных) и внутри реакторных.

За основу при выборе исследуемых характеристик было взято, во-первых, то обстоятельство, что одной из основных эксплуатационных характеристик твэла высокотемпературных реакторов является

термопрочность, определяемая критериями, в которые входят такие свойства материалов, как теплопроводность, термическое расширение, модуль упругости, прочность, во-вторых, необходимость для тепловых расчетов теплоемкости и температуропроводности, в-третьих, то, что для понимания природы влияния радиационных воздействий на термопрочность и теплопроводность необходимо знание величин микронапряжений, действующих на материалы, величины формоизменения, микротвердости и электросопротивления как основного критерия плотности радиационных дефектов, а методы металлографии и химического анализа в качестве вспомогательных могут быть использованы для понимания изменения структуры и состава материалов и узлов.

Предреакторная стадия

На этой стадии создания деталей и узлов ТВС с требуемыми характеристиками стоят обычно три основные задачи: выбор материала, выбор химического состава этого материала и выбор технологии изготовления образца или изделия из этого материала. Большой набор вариантов в каждой из этих задач в совокупности с широким спектром определяемых свойств и режимов обуславливает большой объем исследований. Поэтому основными критериями выбора методов взяты следующие:

- возможность имитации натуральных условий;
- аналогия физических процессов при измерениях и в процессе эксплуатации;
- комплексность (одновременное измерение нескольких параметров);
- экспрессность.

В связи с изложенным и с учетом хорошо развитой теории теплофизических измерений представлялось наиболее целесообразным на стадии предреакторных исследований использовать методы, позволяющие одновременно измерять комплекс параметров (теплоемкость, температуропроводность, теплопроводность), при этом методы и приборы и, что очень важно, средства измерения температур хорошо аттестованные.

Кроме того, отсутствие фазовых превращений, линейность свойств тугоплавких материалов в интервале температур 1000—3000 К обуславливают то, что в этом интервале температур технически сложные измерения теплоемкости и температуропроводности в нестационарном режиме при массовых измерениях вряд ли целесообразны.

По-видимому, целесообразно при высоких температурах ($T \geq 1500$ К) использовать, хотя и сложные в технической реализации, комплексные методы, когда необходимы или фундаментальные исследования теплопереноса, или исследования уникальных материалов, например пиролитических карбидов [1.1] или редкоземельных металлов [1.2]. В этих случаях принципиальным является то, что комплекс свойств может быть получен в идентичных условиях, что позволяет формировать физические модели, а объем измерений при этом сравнительно небольшой. В случаях же прикладных исследований более принципиальной является имитация условий эксплуатации по ряду параметров, таких как уровень температур, термоциклирование, рабочая среда и т. д.

Учитывая изложенное, а также наиболее отработанные, по мнению авторов, теории и приборы методов регулярного режима, разработанные профессором Платуновым Е. С. с сотрудниками [1.3], в данной работе для интервала температур 300—1200 К были использованы динамические калориметры, основанные на монотонном разогреве цилиндрических образцов.

Эти методы реализовали либо осевой, либо радиальный тепловой поток, однако в более высокотемпературном калориметре ДК-АС-900 использован метод радиального теплового потока. В связи с этим для измерений при температурах 1200—2300 К выбран сравнительно простой в технической реализации и обработке экспериментальных данных метод, также реализующий радиальный тепловой поток и позволяющий определять одновременно тепло- и электропроводность. При более высоких температурах (до 3000 К), когда техническая подготовка и проведение эксперимента существенно усложняется, возникают дополнительные трудности в метрологическом обеспечении

измерений. Эта задача в рамках данной работы решена с учетом необходимости стыковки данных с использованием метода «пластины» и метода радиального теплового потока, также позволяющего одновременно определять тепло- и электропроводность и обладающего возможностью измерений температур различными способами.

Таким образом, методом радиального теплового потока (различными модификациями) был перекрыт температурный интервал от 370 до 3000 К. Причем при температурах предположительной эксплуатации материалов выбранные методы позволяют проводить эксперимент по термоциклированию (фактор «температура»), выдержке при высокой температуре, отжигах в различных средах (фактор «среда») и одновременно исследовать влияние этих факторов на свойства материалов. Описанное относится к материаловедческим исследованиям, т. е. исследованиям свойств на специально приготовленных образцах.

Но предреакторные исследования предусматривают не только материаловедческие исследования, но и контрольные измерения на фрагментах изделий. В частности, для контроля теплоизоляции, для которой теплопроводность является эксплуатационным параметром, разработан метод и экспериментальная установка, на которой проведен цикл исследований теплоизоляционных материалов и пакетов в различных условиях, моделирующих натурные [1.4]. Этот метод позволяет проводить изменения термического сопротивления всего теплоизоляционного пакета отдельных тонкостенных теплоизоляционных обоем при температуре от 1500 до 2800 К в радиальном направлении и в различных средах.

Таким образом, алгоритм предреакторных исследований теплофизических свойств реакторных материалов строился на необходимости выбора материала, выбора химического состава этого материала, выбора технологии изготовления с последующей рекомендацией для изготовления изделий. То есть главная задача — статистический набор данных для большого количества образцов.

Выбранные на основе предреакторных исследований теплофизических, прочностных, термодинамических и химико-физических

параметров (включая радиационно-материаловедческие исследования) материалы закладывались в детали и узлы и после стендовых испытаний поступали на реакторные испытания в составе технологических каналов.

Послереакторная стадия

После проведения реакторных испытаний технологические каналы (ТК) препарировали для осмотра и анализа их состояния. Однако такой информации явно не хватало, поэтому возникла необходимость проведения исследований свойств материалов твэлов, теплоизоляции, опорной решетки после натурных испытаний. Учитывая, что на начало данной работы систематически подобные исследования не проводились (были известны отдельные исследования прочности, модуля упругости, электросопротивления и параметра решетки трех ТК после испытаний в составе 1-й зоны установки 300 [1.5]), возникла необходимость создания группы методов и экспериментальных устройств для определения теплофизических и структурно-физических свойств облученных объектов.

Исходя из необходимости сопоставления предреакторных и послереакторных исследований первым критерием выбора предложена идентичность послереакторных и предреакторных методов. Исходя из этого критерия были освоены методики определения термочности, термического расширения, модуля упругости, формоизменений, электросопротивления, параметра решетки, остаточных напряжений (рентгеновские методы) твэлов. В связи с отсутствием известных методов определения теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности твэлов они были разработаны и внедрены.

Аналогично были разработаны методы и экспериментальное устройство для определения теплопроводности обойм ТИП.

При освоении всех перечисленных методов и устройств, известных и разработанных, выдвигались требования, вытекающие из второго критерия, — безопасность персонала при работе с высоко-радиоактивными материалами. Эти требования включали дистанционность измерений (защита персонала расстоянием) и экспрессность (защита персонала временем). Третьим критерием является объем