

На правах рукописи

Нуждов Андрей Анатольевич

**РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ СПЛАВОВ
ЦИРКОНИЯ Э110 И Э635 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 50–450 °С
И ОБЛУЧЕНИИ ДО ПОВРЕЖДАЮЩИХ ДОЗ 60 СНА**

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ульяновск – 2017

Работа выполнена на кафедре радиационных технологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный университет» и в лаборатории внутриреакторных испытаний отделения «Реакторный исследовательский комплекс» Акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов»

Научный руководитель: **Рисованый Владимир Дмитриевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лиханский Владимир Валентинович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»),
директор отделения безопасности объектов атомной энергетики

Синельников Леонид Прокопьевич,
кандидат технических наук, Акционерное общество «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ»), советник дирекции

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ),

Защита диссертации состоится «16» февраля 2018 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.278.01 при ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» по адресу: г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, д. 106, корп. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте вуза – <http://www.ulsu.ru>, также с авторефератом можно ознакомиться на сайте ВАК при Министерстве образования и науки РФ – <http://vak.ed.gov.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, Ульяновский государственный университет, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета, к. ф.-м. н.

Л.Н. Вострецова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В водо-водяных энергетических ядерных реакторах на тепловых нейтронах типа ВВЭР основным конструкционным материалом для тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) и тепловыделяющих сборок (ТВС) являются сплавы циркония. К циркониевым сплавам, как и к другим конструкционным материалам, предъявляются высокие требования по механическим свойствам и деформационным характеристикам в условиях облучения. Изделия из циркониевых материалов должны иметь достаточную механическую прочность и обеспечивать конструктивную компоновку основных узлов реактора, поэтому вопросам радиационной стойкости этих материалов уделяется большое внимание.

При работе реакторных установок наряду с характерными материаловедческими проблемами, связанными с высокой коррозионной активностью теплоносителя, температурой и механическими нагрузками, имеют место специфические изменения физико-механических свойств конструкционных материалов в результате интенсивного облучения нейтронами. Основные эффекты радиационного воздействия на сплавы циркония проявляются в виде радиационного роста, радиационной ползучести и упрочнения, что влияет на размерные изменения изделий [1]. Деформация изделий из циркониевых сплавов при эксплуатации является важным фактором, определяющим работоспособность активной зоны в целом [2]. Поэтому для увеличения ресурса работы активных зон, повышения надёжности и безопасности эксплуатации ТВС необходимо проведение всестороннего исследования циркониевых сплавов.

Особое место в таких исследованиях занимают вопросы радиационно-термической ползучести оболочечных труб тепловыделяющих элементов. В условиях эксплуатации в оболочках ТВЭлов ВВЭР реализуется как радиационная, так и термическая ползучесть. Совместное влияние этих процессов приводит к накоплению деформации, уровень которой зависит от флюенса нейтронов, механических напряжений, температуры и других факторов [3]. Поэтому выявление особенностей длительных деформационных процессов в оболочках ТВЭлов в зависимости от различных факторов воздействия при высокодозном реакторном облучении является актуальной задачей.

В настоящее время указанная задача приобрела ещё бóльшую значимость. Это связано с работами по увеличению выгорания топлива до 60–70 МВт·сут / кг U и усложнению режимов эксплуатации реакторов типа ВВЭР, а также с разработкой и реализацией инновационных проектов нового поколения ядерных энергетических установок (ЯЭУ) повышенной безопасности и проектов по повышению надёжности и улучшению топливоиспользования. В связи с увеличением выгорания топлива и расширением эксплуатационного ресурса ЯЭУ элементы конструкции могут подвергаться влиянию высоких доз радиационного повреждения (до 60 сна), поэтому требуется оценка их деформационной стойкости. Кроме того, актуальной является задача, связанная с необходимостью обоснования новых эффективных технологий безопасного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Рассматриваемая при этом технология "сухого" хранения предполагает изменение температуры оболочек ТВЭлов в диапазоне от 50 до 450 °С в переходных и аварийных случаях [4], что требует изучения деформационного поведения

циркониевых оболочек при высоких температурах в нестационарных и переходных режимах и при низких температурах в условиях длительного хранения ОЯТ.

Также предъявляются высокие требования к итоговым результатам исследований. Эти требования предусматривают разработку обобщённой многофакторной расчётной модели [5], описывающей основные аспекты влияния облучения на ползучесть циркониевых сплавов (установившуюся и неустановившуюся ползучесть, анизотропию) в различных ситуациях, включая как стационарные, так и маневренные энергетические режимы эксплуатации с перепадами температуры, в том числе и работу при пониженных температурах в условиях высокопоточного облучения.

Поэтому разработка расчётной модели, позволяющей оценивать и прогнозировать деформационные изменения оболочечных труб из сплавов циркония в широком диапазоне температурно-силовых условий, в том числе в условиях длительного "сухого" хранения ОЯТ, является актуальной задачей. Это отражено в ряде федеральных и отраслевых целевых программ, таких как ФЦП «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007–2010 годы и на перспективу до 2015 года»; ФЦП «Национальная технологическая база», раздел «Технологии ядерной энергетики нового поколения»; ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года»; «Программа НИОКР в обоснование повышения технико-экономических характеристик ядерного топлива для действующих, строящихся и перспективных атомных электростанций «Ядерное топливо и эффективные топливные циклы АЭС в период 2011–2015 годы и на перспективу до 2020 года»» и Программа АО «ТВЭЛ» «Обеспечение атомной энергетики и промышленности циркониевыми материалами и изделиями, конкурентоспособными на мировом рынке» на 2016–2020 годы.

Целью диссертационной работы является экспериментально-расчётное определение характеристик установившейся ползучести и усовершенствование модели размерных изменений оболочечных труб из сплавов циркония Э110 и Э635 при облучении до доз радиационного повреждения 60 сна в температурном диапазоне 50–450 °С с учётом условий "сухого" хранения облучённых циркониевых оболочек.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Разработка технологии проведения исследований и создание комплекса технических средств и методик для изучения ползучести в процессе и после реакторного облучения:

- усовершенствование облучательных устройств (ОУ) и создание новых ОУ с целью расширения диапазонов температур, параметров нейтронного потока, деформаций;
- разработка методики исследования ползучести труб, нагруженных внутренним давлением газа, применительно к активной зоне и петлевым каналам реактора СМ в диапазоне температур 50–320 °С;
- разработка эффективных средств измерения размеров облучённых образцов в радиационно-защитной камере.

2. Внутрореакторные исследования линейной (пропорционально зависящей от напряжения) радиационной ползучести и её анизотропии для оболочек из сплавов циркония в диапазоне температур 50–340 °С при скоростях радиационного повреждения от 10^{-4} сна/ч до $5 \cdot 10^{-3}$ сна/ч с использованием установок для испытания трубчатых образцов (УИТО):

- исследование ползучести при нагружении образцов внутренним давлением газа в реакторах БОР-60, СМ и РБТ-6;
- уточнение вклада радиационного роста в деформацию в указанных условиях и изучение его корреляции с ползучестью.

3. Вне реакторные исследования ползучести облучённых оболочечных труб при ступенчатом снижении и увеличении температуры испытаний в диапазоне 380–450 °С при нагружении внутренним давлением газа.

4. Усовершенствование обобщённой модели многокомпонентной радиационно-термической ползучести циркониевых сплавов, разработанной проф. Рогозяновым А.Я. при участии диссертанта, с учётом вновь полученных экспериментальных данных в рамках установившейся ползучести оболочечных труб из сплавов Э110 и Э635, а также её экспериментальная проверка и определение параметров расчётных зависимостей, входящих в структуру модели. Дополнение модели новыми дозовыми и температурными диапазонами её использования:

- применительно к условиям эксплуатации твэлов ВВЭР до больших выгораний;
- применительно к условиям длительного "сухого" хранения облучённых твэлов ВВЭР.

Научная новизна

1. Получены аналитические выражения, описывающие изменения эквивалентной скорости установившейся радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплавов циркония в зависимости от факторов радиационного воздействия в температурном диапазоне 310–340 °С для повреждающих доз до 60 сна, имеющие анизотропный характер и применимые для расчёта ползучести при любых видах нагружения без облучения, в процессе и после реакторного облучения.

2. Впервые установлено, что при высокодозном (плотность потока быстрых нейтронов около $2 \cdot 10^{15}$ см⁻²с⁻¹) облучении циркониевых сплавов в области низких температур 50–60 °С при сохранении линейной зависимости деформации ползучести от напряжения и дозы повреждения изменяются характеристики ползучести. Об этом свидетельствует уменьшение модуля радиационной ползучести и изменение коэффициентов анизотропии оболочечных труб из сплавов Э110 и Э635.

3. Определено, что в условиях низкотемпературного (при 50–60 °С) высокодозного облучения претерпевает изменение процесс радиационного роста, и происходит снижение скорости деформирования оболочечных труб из сплавов Э110 и Э635. Дозовая зависимость деформаций радиационного роста при низких температурах не имеет перегиба и существенного увеличения скорости процесса до дозы 25–30 сна.

4. Выявлена зависимость остаточного радиационного упрочнения циркониевых сплавов от условий облучения в диапазоне 50–350 °С. Остаточное

радиационное упрочнение имеет минимальное значение при облучении в температурной области 340–350 °С и увеличивается с ростом дозы радиационного повреждения и снижением температуры облучения.

5. Определены новые параметры модели деформационных изменений и получены расчётные дозовые зависимости осевых деформаций оболочечных труб из сплавов циркония Э110 и Э635 применительно к условиям низкотемпературного высокодозного облучения и послереакторных испытаний при температурах до 450 °С.

Практическая значимость работы

1. В ходе выполненной работы создан комплекс методик и испытательных средств с высокими техническими характеристиками, позволяющий проводить дореакторные, реакторные и послереакторные исследования ползучести оболочечных труб из сплавов Э110 и Э635 на установившейся стадии при постоянных и переменных факторах воздействия. Результаты работы внедрены в практику деятельности АО «ГНЦ НИИАР» при отработке методики исследования размерных изменений и длительной прочности трубчатых образцов в реакторных и стендовых условиях.

2. На основе вновь полученных экспериментальных результатов определены значения коэффициентов в уравнениях, входящих в структуру расчётной модели. Получены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать деформацию оболочечных труб при заданных значениях напряжения и температуры, что даёт возможность, изменяя значения параметров эксплуатации оболочечных труб, определить характеристики их деформационного поведения.

3. В результате проведённых исследований усовершенствована и дополнена обобщённая модель многокомпонентной радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплавов циркония Э110 и Э635 применительно к реальным режимам эксплуатации оболочек твэлов реакторов ВВЭР и условиям "сухого" хранения облучённых твэлов.

4. Полученные экспериментальные данные и выявленные зависимости изменения свойств циркониевых сплавов от условий радиационного воздействия при высокодозном нейтронном облучении включены в отраслевую базу данных по реакторным материалам «Каталог методов реакторных испытаний материалов и изделий ядерной техники» (№ 0229804912 в Государственном регистре баз данных).

5. Полученные данные имеют важное прикладное значение при проектировании изделий активных зон ЯЭУ различного назначения и обосновании их работоспособности, для описания и прогнозирования процесса деформирования оболочек твэлов, эксплуатирующихся до больших выгораний топлива, а также необходимы при разработке технологии обращения изделий из сплавов циркония и для решения задач, связанных с хранением отработавших твэлов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный комплекс методик позволяет проводить испытания на ползучесть труб из сплавов циркония непосредственно в активных зонах исследовательских реакторов БОР-60, СМ и РБТ-6 при напряжениях до 230 МПа и температурах 50–450 °С в среде жидкого натрия, воды и гелия, а также после предварительного облучения вне реактора в среде гелия при аналогичных

напряжениях и температурах 380–450 °С с погрешностью определения продольной и тангенциальной деформации 0,01 и 0,1 % соответственно.

2. Снижение температуры облучения оболочечных труб из сплава Э110 с 310–340 °С до 50 °С приводит к существенному уменьшению модуля радиационной ползучести, к изменению коэффициентов анизотропии ползучести и дозовых зависимостей деформации радиационного роста. Аналогичное влияние снижения температуры получено для труб из сплава Э635. При этом проявляется эффект сближения деформаций разных по составу и структуре сплавов циркония в условиях низкотемпературного облучения.

3. Снижение температуры облучения и увеличение дозы радиационного повреждения приводит к увеличению остаточного радиационного упрочнения сплавов циркония Э110 и Э635. Во время послерадиационного отжига при температуре 450 °С остаточное радиационное упрочнение достигает минимального значения и в дальнейшем при более низких температурах испытания не меняется, что свидетельствует о возврате прочностных характеристик.

4. Установленные расчётные зависимости осевых деформаций и полученные для них значения коэффициентов позволяют описывать деформационные процессы, происходящие в оболочечных трубах из сплавов циркония Э110 и Э635 в условиях температурно-силового воздействия в диапазоне температур 50–450 °С при облучении и вне реактора после предварительного облучения.

Достоверность результатов

Результаты диссертационного исследования базируются на достаточно большом объёме экспериментальных данных, полученных с использованием стандартных методов и метрологически аттестованных испытательных установок.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается:

- воспроизводимостью полученных экспериментальных данных на большом количестве исследованных образцов;
- согласованностью результатов исследования с опубликованными экспериментальными и расчётными результатами других российских и зарубежных авторов;
- публикациями основных результатов работы в рецензируемых научных изданиях;
- обсуждением результатов диссертации на конференциях и симпозиумах, положительными отзывами и рецензиями ведущих специалистов.

Личный вклад автора

В диссертационной работе представлены результаты, которые были получены автором самостоятельно или в соавторстве с научным руководителем на всех этапах исследовательского процесса: изготовление экспериментальных образцов, разработка и создание средств испытания, разработка алгоритмов и программ обработки данных, полученных при испытаниях, проведение экспериментов и измерений, обработка экспериментальных данных, анализ и обобщение полученных результатов.

Автор непосредственно участвовал в постановке задач, получении и анализе всех результатов под общим руководством д.т.н. А.Я. Рогозянова и д.т.н. В.Д. Рисованого.

Автор принимал непосредственное участие в разработке методик, планировании, подготовке и организации механических испытаний и экспериментов в реакторных установках БОР-60, СМ и РБТ-6, в проведении послереакторных исследований образцов.

Основной объём представленных в работе экспериментальных данных получен лично автором. Им проведены работы по обработке, анализу и обобщению собственных результатов с привлечением литературных данных. В соавторстве выполнена разработка расчётной модели и проведено сопоставление результатов с экспериментальными данными.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и семинарах: XIV Международной конференции по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению (Алушта, 12–17 июня 2000 г.); Шестой Российской конференции по реакторному материаловедению (Дмитровград, 11–15 сентября 2000 г.); Международном конгрессе «Энергетика-3000» (Обнинск, 21–23 октября 2002 г.); семинаре КНТС РМ «Вопросы создания новых методик, исследований и испытаний, сличительных экспериментов, аттестации и аккредитации» (Дмитровград, 12–13 ноября 2001 г.); Седьмой Российской конференции по реакторному материаловедению (Дмитровград, 8–12 сентября 2003 г.); 6-th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support (19–23 September 2005, Albena, Bulgaria); научно-технической конференции «Экспериментальное обоснование проектных, конструкторских и технологических решений в инновационных разработках ядерной энергетики» (Дмитровград, 4–8 декабря 2006 г.); VIII Российской конференции по реакторному материаловедению (Дмитровград, 21–25 мая 2007 г.); IX Российской конференции по реакторному материаловедению (Дмитровград, 14–18 сентября 2009 г.); Международной научной конференции «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях» (Дмитровград, 5–9 декабря 2011 г.); Двенадцатой Международной конференции «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС» (Санкт-Петербург, 5–8 июня 2012 г.); X Российской конференции по реакторному материаловедению (Дмитровград, 27–31 мая 2013 г.).

Публикации

По материалам диссертации в различных российских и зарубежных специализированных изданиях опубликовано 27 печатных работ, в том числе 3 – в журналах из списка ВАК, 3 – в сборниках трудов международных конференций, 6 – в сборниках трудов всероссийских конференций, 15 – в специализированных журналах научных организаций.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и списка используемой литературы.

Диссертация изложена на 123 страницах, содержит 31 рисунок, 35 таблиц и список литературы из 61 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы. Определена цель и основные задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней представлен краткий аналитический обзор ранее опубликованных работ в области изучения деформационных процессов в циркониевых сплавах при облучении, механизмов радиационной ползучести и радиационного роста этих материалов. Проведён анализ работ по исследованию влияния условий испытаний на такие параметры, как текстура и коэффициенты анизотропии.

Сделан обзор ранее проведённых исследований поведения деформации ползучести и радиационного роста циркониевых сплавов при облучении нейтронами в широком интервале температур [6–8]. По результатам обзора сделан вывод о необходимости уточнения вклада радиационного роста в деформацию при разных условиях. Кроме этого, большой интерес представляют данные об изменении деформации радиационного роста и ползучести при больших дозах, превышающих 10–15 сна.

Изменения размеров твэлов обусловлены в основном линейной радиационной ползучестью, скорость которой пропорциональна напряжению, и радиационным ростом оболочечных труб из сплавов циркония [5]. Влияние этих процессов на скорость радиационного формоизменения и абсолютную деформацию циркониевых оболочек существенно, особенно при высоких флюенсах нейтронов. При обосновании работоспособности твэлов в расчётных кодах оба процесса считают независимыми от температуры. Такое допущение теоретически не обосновано и нуждается в проверке при описании и прогнозировании деформации. Кроме того, инновационные проекты предполагают эксплуатацию каналов из сплавов циркония при низких температурах (около 100 °С), для которых отсутствуют экспериментальные данные. Эта информация представляется особенно важной, поскольку в этих условиях линейная радиационная составляющая является единственной компонентой ползучести.

Также отмечена необходимость послереакторных исследований деформационных процессов в облучённых материалах при термическом воздействии. Такие исследования связаны с изучением размерных изменений отработавших твэлов при длительном "сухом" хранении. Важной задачей при этом является разработка модели деформирования облучённых оболочек из сплавов циркония в зависимости от условий эксплуатации.

На основе выполненного в данной главе анализа литературы определена цель работы и сформулированы задачи исследований.

Во второй главе рассмотрены методические вопросы проведения экспериментов по исследованию радиационной ползучести анизотропных материалов. В этой главе обсуждаются особенности технических средств и методик исследования ползучести в процессе и после реакторного облучения.

В работе использовали образцы для испытания при нагружении внутренним давлением гелия, изготовленные из отрезков штатных оболочечных труб из

циркониевых сплавов Э110 и Э635. Химический состав исследуемых сплавов представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав сплавов циркония

Сплав	Массовое содержание легирующих элементов и примесей (не более), %					
	Zr	Nb	Sn	Fe	O	Примеси
Э110	Основное	0,9–1,1	–	0,05	0,1	0,18
Э635		0,9–1,1	1,0–1,5	0,3–0,5	0,1	0,15

Испытания образцов проводили в исходном состоянии без облучения, при облучении в реакторах БОР-60, СМ, РБТ-6 в диапазоне флюенса быстрых ($E > 0,1$ МэВ) нейтронов $(0,2–20)10^{22}$ см⁻² при температурах 50–340 °С и после облучения при 380–450 °С.

Высокотемпературные высокодозные испытания образцов проводили в материаловедческих пакетах, размещаемых в активной зоне реактора БОР-60. Условия испытаний: температура 310–340 °С, тангенциальное напряжение σ_{θ} от 73 МПа до 230 МПа, скорость радиационного повреждения K от $5 \cdot 10^{-4}$ сна/ч до $2,2 \cdot 10^{-3}$ сна/ч, доза радиационного повреждения Kt до 58 сна. Среда испытаний – проточный натрий. На рисунке 1 представлена конструкция разборного облучательного устройства для испытаний образцов в реакторе БОР-60 в среде жидкого натрия.

В промежутках между кампаниями реактора в радиационно-защитной камере проводили измерения наружного диаметра и длины образцов с помощью высокоточных микрометров со специальной оснасткой, которая позволила максимально снизить разброс результатов многократных измерений.

Погрешности определения параметров испытаний: K и Kt – 10 %, σ_{θ} – до 7 %, абсолютная погрешность измерения диаметра и длины – 3...5 мкм.

По результатам измерений определяли изменение размеров образца и рассчитывали его продольную ϵ_z и тангенциальную ϵ_{θ} деформации с относительной погрешностью 0,01 и 0,1 % соответственно.

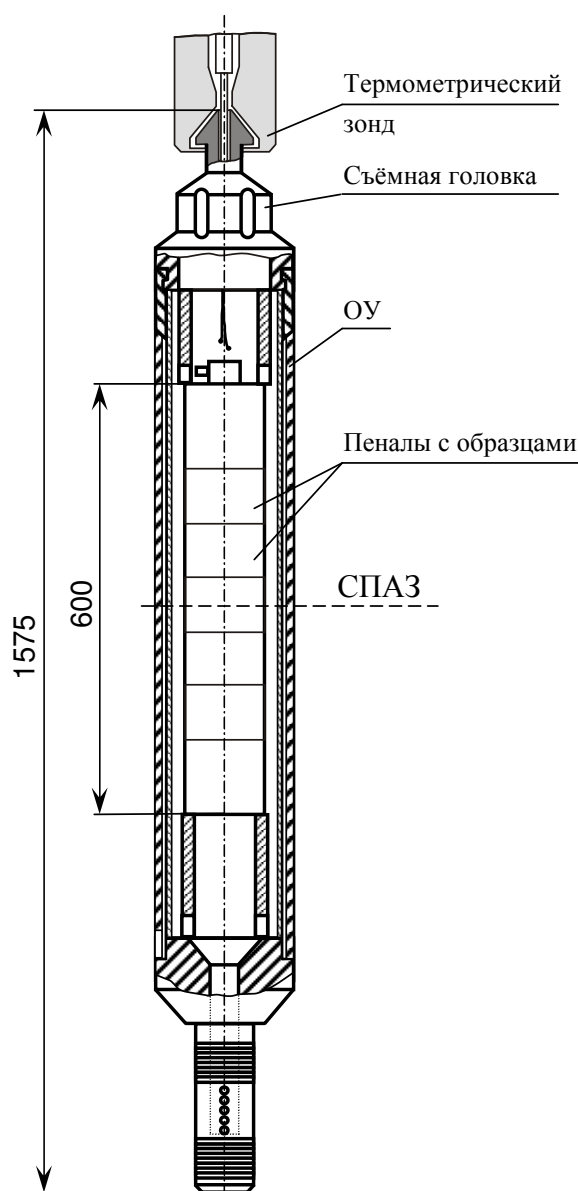


Рисунок 1 – Схема ОУ для испытаний конструкционных материалов в активной зоне реактора БОР-60

Для проведения низкотемпературных высокодозных исследований разработана методика испытаний при облучении в активной зоне реактора СМ в составе новой тепловыделяющей сборки (ТВС), конструкция которой позволяет проводить такие работы. Активная зона реактора СМ обеспечивает уникальную возможность исследования линейной компоненты радиационной ползучести практически без влияния на деформацию других компонент ползучести. Такая возможность создаётся благодаря высокой плотности потока быстрых нейтронов (около $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$) и низкой температуре облучения (не более $60 \text{ }^\circ\text{C}$), определяемой температурой теплоносителя первого контура. Указанному значению плотности потока соответствует скорость радиационного повреждения циркония около $4 \cdot 10^{-3} \text{ сна/ч}$.

Подготовленные партии образцов испытывали в специально разработанном облучательном устройстве (ОУ), представляющем собой тонкостенный перфорированный пенал для размещения образцов (рисунок 2). В пенале и в его концевых деталях имеются отверстия для обеспечения циркуляции теплоносителя, охлаждающего образцы. Устройство имеет штатную головку для загрузки и выгрузки его из реактора. ОУ является разборным, что обеспечивает многократность его использования и позволяет периодически исследовать образцы в радиационно-защитной камере.

Послереакторные испытания образцов проводили путём сопоставления поведения необлучённых и облучённых образцов. Напряжения рассчитывали с учётом температуры испытания с погрешностью $\pm(3-4) \%$. Максимальное тангенциальное напряжение σ_θ в образцах из сплавов Э110 и Э635 не превышало 200 МПа. Испытания проводили в специально разработанном устройстве в среде гелия при температуре $380-450 \text{ }^\circ\text{C}$. Точность поддержания температуры составляла $\pm 7 \text{ }^\circ\text{C}$.

Периодически образцы извлекали и дистанционно измеряли их длину и диаметр в средней части. Продольную ϵ_z и тангенциальную ϵ_θ деформацию рассчитывали по изменению длины и диаметра с погрешностью $\pm 0,01 \%$ и $\pm 0,1 \%$.

Третья глава посвящена изучению линейной (скорость ползучести пропорциональна напряжению) радиационной ползучести и её анизотропии при испытаниях оболочек из сплавов циркония в реакторах БОР-60 и РБТ-6 с использованием установок УИТО. Для каждого реактора используются различные модификации установок. Испытываемые образцы, нагружаемые

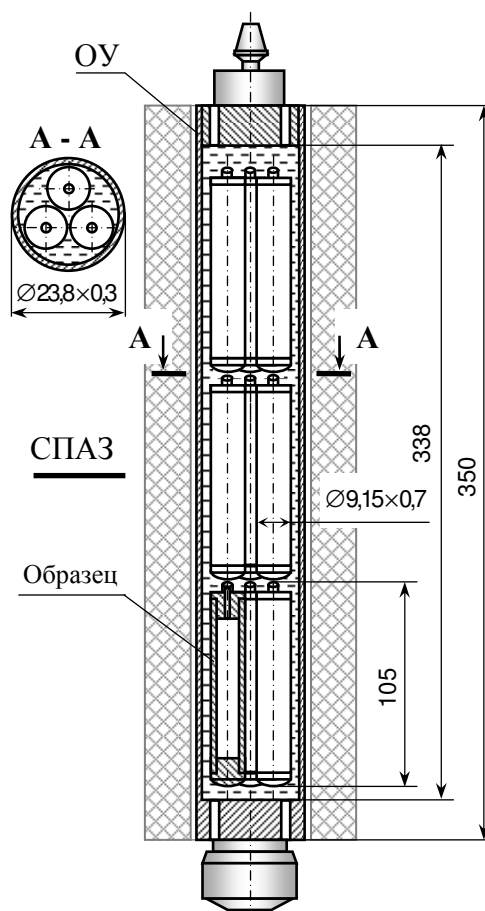


Рисунок 2 – Схема ОУ для исследований ползучести в активной зоне реактора СМ

внутренним давлением газа, размещаются на нескольких этажах в разборном облучательном устройстве многократного использования. Диаметр и длину образцов периодически измеряют в радиационно-защитных камерах, что позволяет изучить кинетику деформирования по двум главным осям.

В главе изложены результаты исследования совместного влияния радиационного роста и ползучести на деформацию оболочечных труб в различных температурно-силовых условиях. Приводятся экспериментальные данные по исследованию ползучести оболочечных труб из сплавов циркония в условиях активной зоны реактора БОР-60 в температурном диапазоне 310–340 °С, облучённых до доз радиационного повреждения 58 сна.

Анализ полученных результатов проводили в рамках общей концепции многокомпонентной анизотропной ползучести [9], допускающей возможность проявления трёх линейных и трёх степенных компонент со своими коэффициентами анизотропии G, H, F и использующей уравнения механики для описания напряжённо-деформированного состояния при любом виде нагружения.

Результаты исследований анизотропии ползучести и особенностей поведения компонент ползучести в совокупности с ранее полученными результатами исследований ползучести предварительно облучённых образцов в условиях растяжения в реакторе РБТ-6 [10] позволили получить зависимость эквивалентной скорости установившейся ползучести от значимых факторов воздействия для труб из сплава Э110.

Полученные выражения совместно с уравнениями механики [9] и упомянутыми выше коэффициентами анизотропии применимы для описания установившейся ползучести оболочечных труб из сплава Э110 при разных видах нагружения, вне реакторных ($K = 0$, $K_t = 0$) и реакторных (K и K_t не равны нулю) условиях испытания в диапазоне 250–450 °С, а также при стендовых ($K = 0$, $K_t \geq 1$ сна, $T = 250 \dots 450$ °С) условиях испытания после предварительного облучения.

Подобные выражения получены для эквивалентной скорости установившейся реакторной ползучести оболочечных труб из сплава Э635 с учётом особенностей эволюции радиационных упрочняющих дефектов.

В четвёртой главе описывается исследование деформационных изменений оболочечных труб из сплавов циркония при низкотемпературном высокопоточном облучении в активной зоне реактора СМ.

Анализ результатов показывает, что при отсутствии температурной составляющей заметный вклад в размерные изменения, наряду с деформацией ползучести, вносит радиационный рост. Проанализировано влияние радиационного роста при различных значениях дозы радиационного повреждения в оболочках и изучена его корреляция с ползучестью.

Проведённые расчётно-экспериментальные исследования показали уменьшение модуля "В" радиационной ползучести и изменение коэффициентов анизотропии оболочечных труб из сплава Э110 при снижении температуры облучения $T_{обл}$. Установлено, что при уменьшении $T_{обл}$ с 310–340 °С до 53–56 °С модуль "В" снижается с $(1,1 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$ до $(1,3 \pm 1,5) \cdot 10^{-5}$ (МПа·сна)⁻¹. При этом коэффициенты анизотропии G, H и F также изменяются от $0,57 \pm 0,02$, $0,43 \pm 0,02$ и $-0,19 \pm 0,02$ до $0,63 \pm 0,02$, $0,37 \pm 0,02$ и $-0,17 \pm 0,04$ соответственно. Подтверждено, что дозовая зависимость деформаций радиационного роста при низких температурах не имеет перегиба и существенного увеличения скорости процесса до дозы 25–30 сна.

Вместе с тем, полученные экспериментальные данные указывают на ранее неотмеченную особенность радиационного роста при низких температурах – увеличение интервала доз, в котором проявляется неустановившаяся, затухающая стадия деформирования (примерно с 2 сна до 10–15 сна).

Аналогичное влияние снижения температуры облучения обнаружено на трубах из более прочного сплава Э635. Так, модуль ползучести "В" при снижении температуры облучения уменьшился с $(2,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$ до $(0,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-5}$ (МПа·сна)⁻¹. Однако при $T_{обл} = 53 \dots 56$ °С деформация сплава Э635 значительно меньше отличается от деформации сплава Э110, чем при $T_{обл} = 300 \dots 450$ °С. Таким образом, можно констатировать наличие эффекта сближения деформации разных по составу и структуре сплавов циркония в условиях низкотемпературного облучения.

Обработка экспериментальных результатов с помощью модели ползучести оболочечных труб [5], показала, что при выбранных условиях испытаний вклад в деформацию образцов вносят линейная радиационная компонента ползучести (ϵ_n) и радиационный рост (ϵ_p). Получены выражения для общих осевых деформаций, которые можно записать в виде:

$$\epsilon_z = \epsilon_{z,n} + \epsilon_{z,p} = B [-a^{-1}(1 - e^{-aKt}) + Kt][(G + H)\sigma_z - G\sigma_\theta - H\sigma_r] + A_{z,p1}(1 - e^{-bKt}) + A_{z,p2} Kt^2,$$

$$\epsilon_\theta = \epsilon_{\theta,n} + \epsilon_{\theta,p} = B [-a^{-1}(1 - e^{-aKt}) + Kt][(G + F)\sigma_\theta - G\sigma_z - F\sigma_r] + A_{\theta,p1}(1 - e^{-bKt}) + A_{\theta,p2} Kt^2,$$

где B – модуль радиационной ползучести, (МПа·сна)⁻¹;

$a, b, A_{z,p1}, A_{\theta,p1}, A_{z,p2}, A_{\theta,p2}$ – расчётные коэффициенты;

размерность a и b – сна⁻¹, другие коэффициенты безразмерные.

Экспериментально полученные данные использовали для расчёта неизвестных коэффициентов применительно к сплавам Э110 и Э635. Решая уравнения при разных сочетаниях, получали несколько значений для каждого неизвестного и их усреднённые значения. Результаты расчётов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчётные значения усреднённых коэффициентов

Сплав	$T_{обл},$ °С	$B,$ (МПа·сна) ⁻¹	$A_{\theta,p1},$ $\times 10^{-4}$	$A_{\theta,p2},$ $\times 10^{-6}$	$A_{z,p1},$ $\times 10^{-4}$	$A_{z,p2},$ $\times 10^{-6}$	$a, b,$ сна ⁻¹	G	H	F
Э110	310–450	$1,1 \cdot 10^{-4}$	–	–	–	–	–	0,57	0,43	-0,19
	53–56	$1,3 \cdot 10^{-5}$	-8,70	1,32	5,53	0,16	3,0	0,63	0,37	-0,17
Э635	310–450	$2,6 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	–	–	0,55	0,45	-0,14
	53–56	$0,5 \cdot 10^{-5}$	4,25	-0,67	4,53	0,53	3,0	0,60	0,40	-0,10

В пятой главе приводятся экспериментальные данные по исследованию влияния реакторного облучения на деформационные процессы в оболочечных трубах из сплавов Э110 и Э635, испытанных вне реактора в температурно-силовых условиях, характерных для "сухого" хранения облучённых твэлов ВВЭР.

Проведены вне реакторные исследования при ступенчатом снижении температуры в диапазоне 450–380 °С и при ступенчатом увеличении температуры испытаний от 330 до 415 °С. Для решения поставленных задач испытывались одновременно необлучённые и облучённые в разных условиях образцы, нагруженные давлением гелия.

Результаты обработки данных по облучённым образцам из сплава Э110 показали, что коэффициенты анизотропии у всех образцов при разных температурах испытания практически одинаковы. Однако параметр остаточного радиационного упрочнения "С" меняется от 0,4 до 20 в зависимости от условий облучения. Минимальное значение $C = 0,4$ получено для образца, облучённого при максимальной температуре ($T_{\text{обл}} = 338^\circ\text{C}$) до небольшой дозы повреждения ($Kt = 4,9$ сна). У образца, облучённого при той же температуре до $Kt = 18$ сна, значение "С" увеличилось до 0,6. Снижение температуры $T_{\text{обл}}$ до 322°C приводит к увеличению "С". При этом влияние дозы повреждения на "С" выражено в несколько большей степени: увеличение Kt с 6,2 до 18 сна привело к росту "С" от 1,2 до 2,3. Значительное снижение $T_{\text{обл}}$ до $53\text{--}56^\circ\text{C}$ и увеличение Kt до 31 и 39,3 сна резко увеличило остаточное радиационное упрочнение до 18–20.

На основании полученных результатов сделаны выводы о том, что после выдержки облучённых образцов при температуре 450°C остаточное радиационное упрочнение остается практически постоянным и не меняется при более низких температурах испытания. С учётом этого можно представить описанные результаты в виде зависимости "С" от температуры облучения $T_{\text{обл}}$ (рисунок 3).

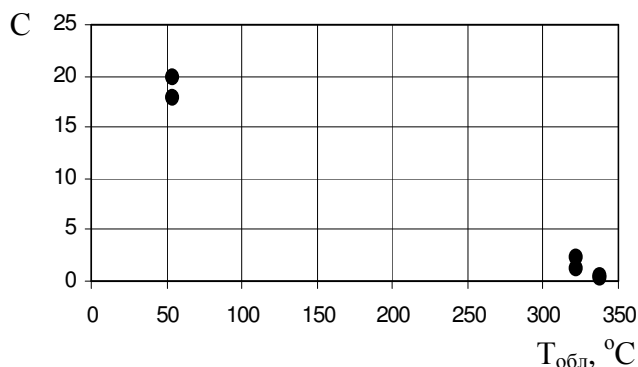


Рисунок 3 – Зависимость остаточного радиационного упрочнения "С" от $T_{\text{обл}}$ образцов из сплава Э110

Анализ результатов испытаний образцов из сплава Э635 показал, что их поведение без облучения и после облучения качественно такое же, как и образцов из сплава Э110.

С учётом новых данных, полученных в ходе выполнения работы, были сделаны уточнения оригинальной гипотезы деформационных процессов в облучённых анизотропных материалах, которую использовали для обработки результатов испытаний. Обработка экспериментальных данных состояла в определении неизвестных параметров с учётом того, что часть из них была установлена ранее при исследовании термической и радиационно-термической ползучести.

Основываясь на выражениях, входящих в состав расчётной модели, и учитывая изотропный характер диффузионных компонент ползучести ($G = H = F = 0,5$ и нет вклада в продольную деформацию), для осевых деформаций тонкостенных труб ($\sigma_\theta = 2\sigma_z$, $\sigma_r = -p/2$, где σ_r – радиальное напряжение, p – давление газа в образцах при испытании) можно записать:

$$\varepsilon_\theta = 0,862(\varepsilon_{H-X} + \varepsilon_{K_0}) + (\varepsilon_{C1} / \sigma_{\text{экв},C1} + \varepsilon_{C2} / \sigma_{\text{экв},C2}) [(F + 0,5G)\sigma_\theta - F\sigma_r] + a_{H1,\theta}(1 - e^{-t/\tau}) + a_{H2,\theta}t,$$

$$\varepsilon_z = (\varepsilon_{C1} / \sigma_{\text{экв},C1} + \varepsilon_{C2} / \sigma_{\text{экв},C2}) \cdot [(1 - G)\sigma_\theta - H\sigma_r] + a_{H1,z}(1 - e^{-t/\tau}) + a_{H2,z}t,$$

где G, H, F – коэффициенты анизотропии компонент C1 и C2;
 τ – коэффициент, ч; t – время испытания, ч.

Данные выражения использовали для описания результатов испытаний. Учитывая результаты, приведенные в работе [11], для сплава Э110 принимали следующие значения коэффициентов: $G = 1 - H = 0,57$; $F = 0,28$; для сплава Э635: $G = 1 - H = 0,59$; $F = 0,52$. Неизвестные коэффициенты в выражениях определяли по расчётной программе. Таким образом, получены выражения, описывающие результаты испытаний, и определены расчётные коэффициенты для всех компонент ползучести сплавов Э110 и Э635.

Характеристики радиационного упрочнения определяли расчётным путём, прежде всего обрабатывая полученный при двух значениях температуры испытания $T_{исп}$ (380 и 415 °С) большой массив экспериментальных данных по газонаполненным образцам, облучённым в реакторе СМ в широком диапазоне Kt (от 4,5 до 61 сна). Зависимость "C" от Kt и $T_{исп}$ для образцов из сплава Э110, облучённых при 53–56 °С имеет вид:

$$C = 2,59 \cdot 10^{-8} e^{13500/T_{исп}} Kt^{0,6},$$

для образцов, облучённых при 310–340 °С:

$$C = 2,57 \cdot 10^{-9} e^{13500/T_{исп}} Kt^{0,6}.$$

Для сплава Э635 зависимости радиационного упрочнения выглядят следующим образом:

при 53–56 °С: $C = 2,70 \cdot 10^{-8} e^{13500/T_{исп}} Kt^{0,6},$

при 310–340 °С: $C = 2,87 \cdot 10^{-9} e^{13500/T_{исп}} Kt^{0,6}.$

Показано удовлетворительное соответствие между экспериментальными результатами и дозовыми зависимостями, полученными по представленным выражениям.

В шестой главе проводится анализ полученных экспериментальных данных и обобщение результатов исследования с целью формирования расчётной модели многокомпонентной радиационно-термической ползучести оболочечных труб из циркониевых сплавов Э110 и Э635, а также её экспериментальная проверка и определение параметров расчётных зависимостей.

С учётом новых данных, полученных при обработке результатов испытаний, определены выражения для описания суммарной эквивалентной скорости установившейся ползучести сплавов Э110 и Э635. Для каждой компоненты ползучести рассчитаны коэффициенты анизотропии и параметры, входящие в эти выражения. Коэффициенты анизотропии для различных компонент ползучести – по Набарро-Херрину (Н-Х), по Кобле (Ко), радиационной (Р) и трёх степенных (C1, C2, C3) [5] – при облучении в температурном диапазоне 250–450 °С представлены в таблице 3.

Сформированная модель ползучести циркониевых сплавов Э110 и Э635 адекватно описывает деформационные процессы в условиях облучения при температурах 250–450 °С, учитывает особенности термической и радиационно-термической ползучести оболочечных труб и позволяет прогнозировать размерные изменения твэлов ВВЭР.

Таблица 3 – Коэффициенты анизотропии для компонент ползучести при облучении в температурном диапазоне 250–450 °С

Компоненты ползучести	Сплав Э110			Сплав Э635		
	G	H	F	G	H	F
H-X, K ₀	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
P	0,57±0,02	0,43±0,02	-0,19±0,02	0,55±0,02	0,45±0,02	-0,14±0,02
C1, C2	0,61	0,39	0,28	0,59	0,41	0,52
C3	0,67	0,33	0,81	–	–	–

Облучение в условиях низких температур позволяет исключить влияние температурных составляющих на ползучесть циркониевых сплавов. Для условий облучения в температурном диапазоне 50–60 °С получены выражения, описывающие осевые деформации сплавов Э110 и Э635, когда учитывается влияние только радиационной компоненты ползучести и радиационного роста.

Полученные выражения дополняют модель ползучести циркониевых сплавов Э110 и Э635 и могут быть использованы для прогнозирования размерных изменений оболочек твэлов в специфических режимах эксплуатации.

Вычисленные значения коэффициентов анизотропии для расчёта осевых деформаций при низкотемпературном облучении представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения коэффициентов анизотропии радиационной компоненты ползучести при 50–60 °С

Сплав	G	H	F
Э110	0,63 ± 0,02	0,37 ± 0,02	-0,17 ± 0,04
Э635	0,60 ± 0,02	0,40 ± 0,02	-0,10 ± 0,02

Послереакторные испытания образцов при термическом воздействии позволили расширить возможности модели, дополнив её новой областью применения. Результатом проведённой работы стало определение зависимости для суммарной эквивалентной деформации ползучести облучённых циркониевых сплавов в условиях длительного воздействия нагрузки и температуры в диапазоне 330–450 °С. Для данных условий испытания также получены значения коэффициентов анизотропии, которые представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Коэффициенты анизотропии компонент ползучести при испытаниях вне реактора

Компоненты ползучести	Э110			Э635		
	G	H	F	G	H	F
H-X, K ₀	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
C1, C2	0,57	0,43	0,28	0,59	0,41	0,52

С помощью усовершенствованной и дополненной модели ползучести можно прогнозировать вероятность полного исчерпания деформационной способности оболочек, что актуально для обоснования безопасности длительного "сухого" хранения отработавших твэлов ВВЭР.

Проведена верификация расчётной модели с целью сопоставления фактических деформаций оболочек отработавших полномасштабных и рефабрикованных твэлов реакторов ВВЭР с прогнозируемыми моделью значениями деформациями. Итоги сравнительного анализа показали, что модель ползучести позволяет адекватно описать результаты испытаний твэлов [12], а полученные значения коэффициентов не противоречат разработанной концепции деформационных процессов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На основании результатов, представленных в диссертационной работе по исследованию влияния облучения на установившуюся ползучесть сплавов циркония Э110 и Э635 при температурах 50–450 °С и дозах радиационного повреждения до 60 сна, сделаны следующие выводы:

1. В рамках единого методологического подхода к исследованию оболочечных труб разработан комплекс методик и оборудования, который позволяет проводить испытания на ползучесть труб из сплавов циркония непосредственно в активных зонах исследовательских реакторов БОР-60, СМ и РБТ-6 при напряжениях до 230 МПа и температурах 50–450 °С в среде жидкого натрия, воды и гелия, а также после предварительного облучения вне реактора в среде гелия при аналогичных напряжениях и температурах 380–450 °С с погрешностью определения продольной и тангенциальной деформации 0,01 и 0,1 % соответственно.

2. Проведённые в реакторах БОР-60 и СМ исследования показали, что для оболочечных труб из сплава Э110 снижение температуры облучения с 310–340 °С до 50 °С приводит к существенному уменьшению модуля радиационной ползучести и изменению коэффициентов анизотропии ползучести. Также меняются значения коэффициентов в выражениях, описывающих дозовые зависимости осевых деформаций радиационного роста. Аналогичное влияние снижения температуры получено для труб из сплава Э635. При этом деформация более прочного сплава Э635 мало отличается от деформации сплава Э110, то есть проявляется эффект сближения деформаций разных по составу и структуре сплавов циркония в условиях низкотемпературного облучения.

3. Получены экспериментальные данные по исследованию вне реактора предварительно облучённых образцов оболочечных труб из сплавов Э110 и Э635 в температурно-силовых условиях характерных для "сухого" хранения облучённых твэлов ВВЭР. Показано, что параметр остаточного радиационного упрочнения, используемый в модели для расчёта эквивалентных скоростей установившейся ползучести степенных компонент, определяется температурой облучения, дозой радиационного повреждения и меняется в зависимости от параметров облучения. Снижение температуры облучения и увеличение дозы радиационного повреждения приводит к увеличению остаточного радиационного упрочнения сплавов циркония Э110 и Э635.

4. Расширена база экспериментальных данных и установлены аналитические зависимости, описывающие деформацию оболочечных труб из сплавов циркония Э110 и Э635 в диапазоне температур 50–450 °С при облучении. Определены математические выражения для суммарной эквивалентной скорости и деформации

ползучести, которые являются основой модели радиационно-термической ползучести оболочек твэлов.

Получены выражения для расчёта осевых деформаций в тангенциальном и продольном направлениях применительно к описанию деформационных процессов, происходящих в оболочечных трубах в условиях температурно-силового воздействия после реакторного облучения. На основе экспериментальных результатов определены значения коэффициентов, входящих в полученные расчётные зависимости.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК:

1. Рогозянов, А. Я. Закономерности и механизмы радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплавов циркония [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П. Кобылянский, А. А. Нуждов // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 2. – С. 19–27.
2. Нуждов, А. А. Влияние предварительного облучения на деформацию испытываемых вне реактора образцов оболочечных труб из сплавов циркония [Текст] / А. А. Нуждов, А. Я. Рогозянов // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 4. – С. 12–19.
3. Нуждов, А. А. Влияние радиационного упрочнения на деформационные процессы в оболочечных трубах из сплавов циркония [Текст] / А. А. Нуждов, А. Я. Рогозянов // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 1. – С. 5–13.

В изданиях, входящих в международные базы цитирования:

1. Use of the Irradiation-Thermal Creep Model of Zr-1% Nb Alloy Cladding Tubes to Describe Dimensional Changes of VVER Fuel Rods [Electronic resource] / AY Rogozyanov, AV Smirnov, BA Kanashov, VS Polenok, AA Nuzhdov // Journal of ASTM International (JAI). – March 2005. – Vol. 2. – Iss. 3. – P. 225–238. – Paper ID JAI12426. – ISSN 1546-962X. – Режим доступа : http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/JAI/PAGES/JAI12426.htm. Дата обращения : 05.11.2017. – Яз. англ.
2. Rogozyanov, A. Ya. Behavior and Mechanisms of Irradiation-Thermal Creep of Cladding Tubes Made of Zirconium Alloy [Electronic resource] / A. Ya. Rogozyanov, G. P. Kobilyansky, A. A. Nuzhdov // Journal of ASTM International (JAI). – February 2008. – Vol. 5. – Iss. 2. – Paper ID JAI101105. – ISSN 1546-962X. – Режим доступа : http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/JOURNALS/JAI/PAGES/JAI101105.htm. Дата обращения : 05.11.2017. – Яз. англ.
3. Current Status and Development of Mechanical Test Techniques in the Course of Irradiation in MIR, SM and RBT-6 Reactors [Electronic resource] / A. V. Burukin, A. L. Izhutov, A. A. Nuzhdov, P. S. Palachev // Proceedings of the 11-th International Conference on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support (26 September – 03 October 2015, Golden Sands Resort, Bulgaria). – ISSN 1313-4531. – Vol. 1. – P. 286–299. – Яз. англ.

В других научных изданиях:

1. Взаимосвязь и особенности установившейся ползучести сплава Zr-1%Nb до, в процессе и после реакторного облучения [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П.

- Кобылянский, А. Е. Новосёлов, А. А. Нуждов [и др.] // Сборник трудов. – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 2000. – Вып. 4. – С. 17–23.
2. Исследования анизотропной термической и радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплава Zr-1%Nb [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П. Кобылянский, А. Е. Новосёлов, А. А. Нуждов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (79). – 2001. – № 2. – С. 96–103.
 3. Радиационно-термическая ползучесть оболочечных труб из сплавов циркония [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П. Кобылянский, А. Е. Новосёлов, А. А. Нуждов [и др.] // Сб. докл. Шестой Российской конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 2001. – Т. 2. – Ч. 2. – С. 111–127.
 4. Ползучесть оболочечных труб из сплавов циркония под давлением при испытаниях в петлевом канале реактора СМ [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П. Кобылянский, А. А. Нуждов [и др.] // Сборник трудов. – Димитровград : ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, 2002. – Вып. 1. – С. 3–11.
 5. Нуждов, А. А. Разработка модели радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплавов циркония на основе реакторных испытаний [Текст] / А. А. Нуждов // Сб. реф. и статей «Новые технологии для энергетики, промышленности и строительства». – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 2002. – Вып. 5. – С. 166–175.
 6. Рогозянов, А. Я. Тенденции в развитии методик реакторных испытаний на ползучесть оболочечных материалов ядерных реакторов [Текст] / А. Я. Рогозянов, А. А. Нуждов // Сб. реф. семинара «Вопросы создания новых методик, исследований и испытаний, сличительных экспериментов, аттестации и аккредитации». – Димитровград : ФГУП ГНЦ РФ НИИАР, 2002. – С. 23–27.
 7. Рогозянов, А. Я. Влияние эволюции деформационного и радиационного упрочнения на ползучесть оболочечных труб из сплавов циркония [Текст] / А. Я. Рогозянов, А. А. Нуждов // Седьмая Российская конференция по реакторному материаловедению : тез. докл. – Димитровград : ФГУП «ГНЦ НИИАР», 2003. – С. 150–151.
 8. Рогозянов, А. Я. Исследования деформационной способности и ползучести оболочечных труб из сплава Э110 под давлением в условиях облучения в реакторе БОР-60 до доз 1,5–39 сна [Текст] / А. Я. Рогозянов, А. А. Нуждов, Г. П. Кобылянский // Сборник трудов. – Димитровград : ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2003. – Вып. 3. – С. 12–22.
 9. Рогозянов, А. Я. Закономерности и механизмы радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплавов циркония [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П. Кобылянский, А. А. Нуждов // Сборник трудов. – Димитровград : ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2004. – Вып. 3. – С. 3–12.
 10. Описание размерных изменений твэлов ВВЭР на основе использования модели радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплава Zr-1%Nb [Текст] / А. Я. Рогозянов, А. В. Смирнов, Б. А. Канашов, В. С. Поленок, А. А. Нуждов // Сборник трудов. – Димитровград : ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2006. – Вып. 1. – С. 45–57.
 11. Развитие методик высокодозовых испытаний материалов в реакторе СМ для обоснования увеличения выгорания топлива ВВЭР и проекта ВВЭР-1500 [Текст] / Р. Р. Мельдер, А. А. Нуждов, А. Л. Петелин [и др.] // Вопросы

- атомной науки и техники. Серия «Материаловедение и новые материалы». – М. : ФГУП ВНИИНМ. – 2006. – Вып. 2(67). – С. 432–440.
12. Влияние условий эксплуатации и текстуры оболочек на различия в удлинении твэлов ВВЭР-1000 [Электронный ресурс] / В. М. Косенков, Д. В. Марков, А. А. Нуждов [и др.] // VIII Российская конференция по реакторному материаловедению : сб. докл. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2008. – С. 305–317.
 13. Рогозянов, А. Я. Исследования влияния облучения на деформационные процессы в образцах оболочечных труб из сплавов циркония применительно к проблеме "сухого" хранения твэлов ВВЭР [Электронный ресурс] / А. Я. Рогозянов, А. А. Нуждов, К. А. Изосимова // VIII Российская конференция по реакторному материаловедению : сб. докл. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2008. – С. 479–492.
 14. Нуждов, А. А. Радиационная ползучесть оболочечных труб из сплавов циркония при низкотемпературном высокодозовом облучении [Текст] / А. А. Нуждов, А. Я. Рогозянов // Сборник трудов: ежеквартальный сб. науч. статей. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2009. – Вып. 3. – С. 44–51.
 15. Нуждов, А. А. Влияние радиационного упрочнения на деформационные процессы в оболочечных трубах из сплавов циркония [Текст] / А. А. Нуждов, А. Я. Рогозянов // Сборник трудов: ежеквартальный сб. науч. статей. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2009. – Вып. 4. – С. 3–14.
 16. Нуждов, А. А. Влияние радиационного упрочнения на вне реакторную ползучесть оболочечных труб из сплавов Э110 и Э635 применительно к условиям сухого хранения ОЯТ ВВЭР [Электронный ресурс] / А. А. Нуждов, А. Я. Рогозянов // Международная научная конференция «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях» : сб. докл. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2012. – С. 592–605.
 17. Нуждов, А. А. Внутриреакторная ползучесть оболочечных труб из сплавов Э110 и Э635 в широком диапазоне температур и доз облучения [Электронный ресурс] / А. А. Нуждов, А. Я. Рогозянов // Международная научная конференция «Исследовательские реакторы в разработке ядерных технологий нового поколения и фундаментальных исследованиях» : сб. докл. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2012. – С. 631–639.
 18. Состояние и развитие методик механических испытаний материалов в процессе облучения в реакторах СМ и РБТ-6 [Электронный ресурс] / В. А. Кисляков, А. Я. Рогозянов, С. В. Серёдкин, А. А. Нуждов, П. С. Палачёв // X Российская конференция по реакторному материаловедению : сб. докл. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2013. – 857 с. – С. 786–802.
 19. Кисляков, В. А. Модернизация системы управления экспериментальным устройством «Нейтрон-8» [Текст] / В. А. Кисляков, А. А. Нуждов, П. С. Палачёв // Сборник трудов АО «ГНЦ НИИАР». – Димитровград : АО «ГНЦ НИИАР». – 2015. – Вып. 1. – С. 71–77.

Патенты на изобретения:

1. Пат. 2485475 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/20. Способ испытаний на релаксацию напряжения при изгибе / А. Я. Рогозянов, А. А. Нуждов, П. С. Палачёв ; заявитель и патентообладатель ОАО «ГНЦ НИИАР». – № 2011151038/28 ; заявл. 14.12.2011 ; опубл. 20.06.2013, Бюл. № 17.

2. Пат. м. 152090 Российская Федерация, МПК G 01 N 3/20. Устройство для испытания плоских облученных образцов на релаксацию напряжения при изгибе / А. Я. Рогозянов, А. А. Нуждов, П. С. Палачев, А. В. Белов ; заявитель и патентообладатель ОАО «ГНЦ НИИАР». – № 2014137358/28 ; заявл. 15.09.2014 ; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изменение геометрических параметров твэлов водо-водяных энергетических реакторов при эксплуатации до выгорания 50 МВт·сут/кг урана : Препринт. НИИАР–4(859) [Текст] / В. А. Жителев [и др.]. – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 1997. – 20 с.
2. Экспериментальное обоснование надёжности штатного топлива ВВЭР в базовых режимах эксплуатации [Текст] / А. В. Смирнов [и др.] // Сб. докл. Пятой межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 8–12 сентября 1997 г. – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 1998. – Т. 1. – Ч. 1. – С. 33–46.
3. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. В 2 кн. Кн. 1 [Текст] / Ф. Г. Решетников [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.
4. Материаловедческие проблемы длительного мокрого и сухого хранения ОЯТ ВВЭР и РБМК [Электронный ресурс] / С. В. Павлов [и др.] // Сб. докл. IX Российской конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 14–18 сентября 2009 г. – Димитровград : ОАО «ГНЦ НИИАР», 2009. – С. 455–477.
5. Рогозянов, А. Я. Закономерности и механизмы радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплавов циркония [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П. Кобылянский, А. А. Нуждов // Физика и химия обработки материалов. – 2008. – № 2. – С. 19–27.
6. Кобылянский, Г. П. Радиационный рост и радиационная ползучесть циркониевых сплавов : обзорная информация [Текст] / Г. П. Кобылянский, В. К. Шамардин, В. М. Косенков. – Димитровград : НИИАР, 1982. – 34 с.
7. Кобылянский, Г. П. Обзор исследований влияния облучения на циркониевые сплавы [Текст] / Г. П. Кобылянский, В. К. Шамардин, А. Е. Новосёлов // Сб. докл. Четвёртой межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 15–19 мая 1995 г. – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 1996. – Т. 2. – С. 3–27.
8. Кобылянский, Г. П. Радиационная стойкость циркония и сплавов на его основе : справочные материалы по реакторному материаловедению [Текст] / Г. П. Кобылянский, А. Е. Новосёлов; под ред. В. А. Цыканова. – Димитровград : ГНЦ РФ НИИАР, 1996. – 176 с.
9. Рогозянов, А. Я. Закономерности и модели многокомпонентной термической и радиационно-термической ползучести оболочечных труб из циркониевых сплавов [Текст] / А. Я. Рогозянов. – Димитровград : ДИТУД УлГТУ, 2009. – 345 с.
10. Исследования анизотропной термической и радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплава Zr–1%Nb [Текст] / А. Я. Рогозянов, Г. П. Кобылянский, А. Е. Новосёлов, А. А. Нуждов [и др.] // Вопросы атомной

науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» (79). – 2001. – № 2. – С. 96–103.

11. Нуждов, А. А. Влияние предварительного облучения на деформацию испытываемых вне реактора образцов оболочечных труб из сплавов циркония [Текст] / А. А. Нуждов, А. Я. Рогозянов // Физика и химия обработки материалов. – 2009. – № 4. – С. 12–19.
12. Описание размерных изменений твэлов ВВЭР на основе использования модели радиационно-термической ползучести оболочечных труб из сплава Zr-1%Nb [Текст] / А. Я. Рогозянов, А. В. Смирнов, Б. А. Канашов [и др.] // Сборник трудов. – Димитровград : ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», 2006. – Вып. 1. – С. 45–57.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

АЭС – атомная электрическая станция

БОР-60 – быстрый опытный реактор, тепловая мощность – 60 МВт

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор

ОУ – облучательное устройство

РБТ-6 – реактор бассейнового типа, тепловая мощность – 6 МВт

СМ – высокопоточный исследовательский реактор

сна – смещение на атом

СПАЗ – средняя плоскость активной зоны

ТВС – тепловыделяющая сборка

твэл – тепловыделяющий элемент

УИТО – установка для испытания трубчатых образцов

ФЦП – федеральная целевая программа

ЯЭУ – ядерная энергетическая установка