

На правах рукописи

**Соколов Андрей Николаевич**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И РАСЧЕТНОЕ  
ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОКСИДНОГО ТОПЛИВА  
С НИЗКИМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ДЕФОРМИРОВАНИЮ В  
ТВЭЛАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ**

Специальность 05.14.03 - Ядерные энергетические установки, включая проектирование эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Автор: 

Москва-2005

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Малыгин Василий Борисович

Официальные оппоненты:  
Годин Юлий Григорьевич доктор технических наук, профессор  
МИФИ (ГУ)

Красносёлов Василий Аркадьевич  
доктор технических наук,  
ФГУП «Государственный научный  
центр Российской Федерации – НИИАР»

Ведущая организация: ФГУП ОКБ «Гидропресс»

Защита диссертации состоится 28 декабря 2005 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.130.04 в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2005 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу МИФИ.

Учёный секретарь диссертационного совета МИФИ,  
д.ф.-м н., профессор

 Е.М. Кудрявцев

2007-4  
2743

2360398

3

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность проблемы.

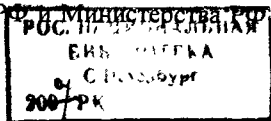
Конкурентоспособность и эффективность использования топлива в энергетических реакторах определяется уровнем достигнутых выгораний. Современные конструкции твэлов должны обеспечить выгорание до 70 ГВтсут./т. Увеличение длительности кампании требует разработки и лицензирования тепловыделяющих элементов с повышенным эксплуатационным ресурсом.

Среди множества факторов, определяющих работоспособность твэлов при высоких выгораниях, важное место занимает проблема силового взаимодействия топлива и оболочки (ВТО). Снижение напряжений при ВТО приведет к уменьшению повреждений оболочки и, соответственно, увеличению ресурса твэла. Нагрузки на оболочке могут быть снижены путем использования топлива с низким сопротивлением деформированию. В связи с этим, главным направлением решения задачи обеспечения надежности твэлов при высоких выгораниях, специалисты большинства стран производителей топлива считают использование в твэлах энергетических реакторов диоксида урана с добавками легирующих элементов. Легирование направлено на снижение сопротивления деформированию топлива для уменьшения механического взаимодействия топлива с оболочкой в стационарных и переходных режимах, а также на увеличение размера зерна для ограничения выхода продуктов деления.

При облучении экспериментальных твэлов с диоксидом урана, легированным оксидами ниобия, титана, хрома, алюминия и кремния, иностранными исследователями подтверждено повышение их эксплуатационных характеристик. Получены результаты по выходу продуктов деления, изменению размеров оболочки и топливного столба, изменению структуры краевой зоны таблеток. Однако данные по закономерностям накопления пластических деформаций легированного диоксида урана, необходимые для расчёта напряжённо-деформированного состояния оболочки, обоснования работоспособности, безопасности и ресурса твэлов, в настоящее время отсутствуют.

Обоснование использования легированного диоксида урана в качестве топлива энергетических реакторов предполагает, прежде всего, изучение размерной стабильности таблеток в процессе облучения и закономерностей накопления пластических деформаций в условиях ползучести.

Работа выполнена в рамках межотраслевой программы сотрудничества Министерства образования РФ и Министерства РФ по



атомной энергии по направлению «Научно - инновационное сотрудничество» (Приказ Министерства образования РФ № 4659 от 27.12.2002) и в рамках программы «АЭС и ЯЭУ нового поколения с повышенной безопасностью» (постановление правительства РФ №263 от 06.04.1996).

#### **Цель работы.**

Разработка и усовершенствование экспериментальных средств для исследования процессов деформирования ядерного топлива. Получение, анализ и обобщение данных по ползучести, радиационному уплотнению и распуханию легированного диоксида урана для обоснования его использования в твэлах энергетических реакторов с повышенным эксплуатационным ресурсом.

#### **Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Разработаны экспериментальные средства для исследования радиационной ползучести, уплотнения и распухания оксидного ядерного топлива при проектных параметрах облучения в широком интервале температур.
2. Впервые проведены исследования и найдены закономерности изменения характеристик ползучести легированного диоксида урана с низким сопротивлением деформированию от напряжения, температуры, плотности деления.
3. Впервые получены экспериментальные данные по радиационному уплотнению и распуханию легированного диоксида урана с низким сопротивлением деформированию.
4. Разработаны модели и рекомендации для учёта ползучести сердечников из легированного диоксида урана с низким сопротивлением деформированию в программах анализа работоспособности и лицензирования твэлов.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Методики и экспериментальные средства исследования радиационной ползучести, радиационного уплотнения и распухания топлива внедрены на реакторе ИВВ-2М ФГУП «Институт реакторных материалов».
2. Результаты и расчётные рекомендации внедрены и используются в ФГУП ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара для анализа напряжённо-деформированного состояния, оценки ресурса и лицензирования твэлов.

#### **Основные положения выносимые на защиту:**

1. Разработанные и усовершенствованные экспериментальные средства исследования радиационной ползучести, радиационного уплотнения и распухания оксидного ядерного топлива.
2. Автоматизированные системы обеспечения испытаний.

3. Экспериментальные результаты исследования ползучести легированного диоксида урана с низким сопротивлением деформированию и закономерности изменения характеристик ползучести от температуры, напряжения и плотности деления.
4. Экспериментальные результаты исследования радиационного уплотнения и распухания легированного диоксида урана с низким сопротивлением деформированию.
5. Модели деформирования диоксида урана, учитывающие влияние температуры, напряжения, плотности деления, структуры и состава на характеристики ползучести.
6. Расчётные рекомендации для учёта ползучести в программах анализа работоспособности и лицензирования твэлов.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на: научных сессиях МИФИ-99 (Москва, 1999 г.), МИФИ-2000 (Москва, 2000 г.), МИФИ-2002 (Москва, 2002 г.), МИФИ-2003 (Москва, 2003 г.), МИФИ-2004 (Москва, 2004 г.), конференции МАГАТЭ «Characterization and Quality control of nuclear fuels – CQCNF – 2000» (Hyderabad, 2002), конференции МАГАТЭ «Technical Committee Meeting on Improved Fuel Pellet Material and Designs» (Brussels, 2003), четвёртой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH. (Москва, 2004. г.)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 3 статьи в научных журналах, 13 тезисов докладов.

**Состав работы.** Диссертация состоит из введения, шести разделов общим объёмом 137 стр., включая 75 рисунков, 15 таблиц и список использованных источников из 121 позиций.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проведённый в первой главе анализ литературы показал, что улучшение эксплуатационных характеристик топлива из диоксида урана возможно путем модификации его состава и структуры, направленной на снижение сопротивления деформированию с обеспечением размерной стабильности топлива и допустимого выхода продуктов деления под оболочку твэла. Рассмотрены экспериментальные результаты по влиянию условий испытаний состава, структуры на скорость ползучести диоксида урана. Рассмотрены механизмы деформирования твёрдых тел.

Повышение скорости ползучести, а значит и снижение сопротивления деформированию диоксида урана возможно путем введения легирующих элементов, образующих твердый раствор. Малые концентрации (десятые доли мас. %)  $TiO_2$ ,  $Nb_2O_5$ ,  $Cr_2O_3$  увеличивают концентрацию подвижных точечных дефектов в диоксиде

урана и тем самым, увеличивают диффузионную составляющую скорости ползучести. Такие добавки приводят к увеличению размера зерна. Добавки на основе алюмосиликатов, оксидов железа в концентрации менее 1% мас. приводят к образованию структурных выделений на границе зерен. Сопротивление деформированию в этом случае снижается за счет уменьшения вязкости границы и интенсификации процессов зернограницной диффузии.

Для дальнейших исследований перспективным представляется комплексное легирование диоксида урана смесью стеклообразующих оксидов, включающих оксиды кремния, алюминия, железа в концентрации до 0,25 % мас. и добавками на основе ниобия.

Для обоснования использования оксидного топлива с низким сопротивлением деформированию в твэлах энергетических реакторов необходимы данные по радиационной ползучести, распуханию и радиационному уплотнению легированного топлива.

Во второй главе рассмотрены условия эксплуатации сердечников твэлов, определены технические требования, предъявляемые к экспериментальным средствам исследований. Экспериментальные средства должны обеспечить испытания ядерного топлива при нагружении в режимах ползучести и деформирования с постоянной скоростью, исследования распухания в интервале температур 380-1500 °С при объемном энерговыделении в образцах 380 - 500 Вт/см<sup>3</sup>. Такое энерговыделение соответствует плотности деления в образце в интервале (1,1-1,5) 10<sup>13</sup> дел/см<sup>3</sup>с.

Для исследования радиационной ползучести, а также радиационного уплотнения и распухания оксидного топлива разработаны внутриканальные установки «ПОСТ-УРАЛ-М» и «РАСТ-УРАЛ», представленные на рис. 1 и 2.

Установка «ПОСТ-УРАЛ-М» состоит из навески, включающей рабочую полость с испытуемым топливом, системы нагружения, системы измерения деформации, электромеханического привода, измерительных и газо-вакуумных коммуникаций. Внутри герметичной рабочей полости расположены образцы топлива. Образцы нагружаются сжимающим усилием с помощью пневматической системы нагружения, исполнительным элементом в которой является сильфон. Подача давления в узел нагружения, а также заполнение рабочей полости гелием или неоном осуществляется с использованием газо-вакуумных коммуникаций. Индуктивный преобразователь перемещения установлен в держателе и вынесен за пределы активной зоны реактора. Деформация от образца передается преобразователю удлинительным штоком. На нижнем конце удлинительный шток представляет собой молибденовую трубку, проходящую через

центральное отверстие в образце к торцу нагружающего пуансона. Термопара для измерения температуры проходит внутри этой трубки. Её горячий спай устанавливается на уровне середины образца. По торцам образца установлены полированные диски из молибдена. Для перемещения навески по высоте активной зоны и, тем самым, изменения величины потока нейтронов, используется электромеханический привод, состоящий из двигателя постоянного тока, редуктора и винтовой пары. Пределы перемещения задаются позиционированием конечных выключателей.

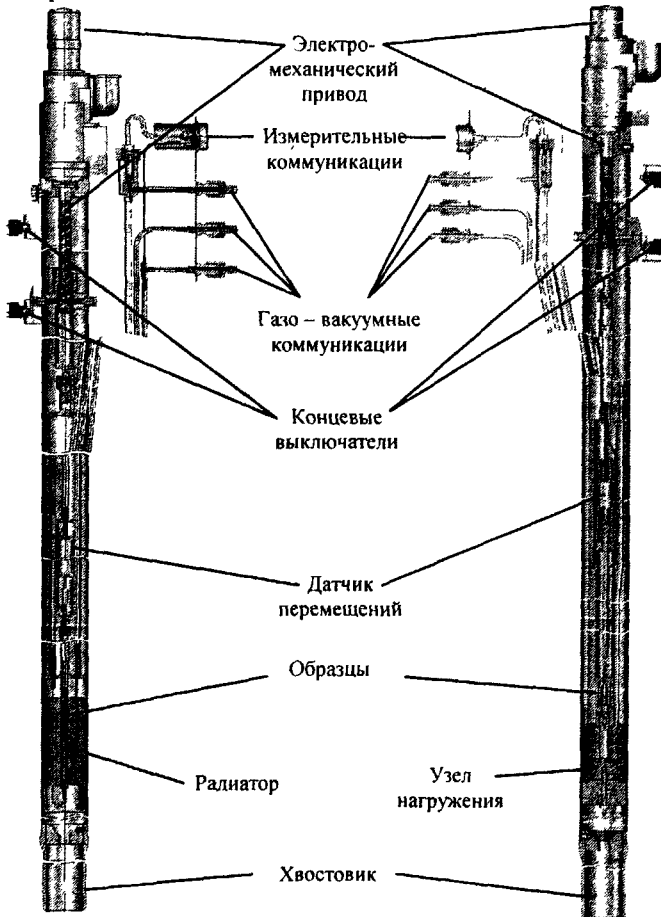


Рис 1 Установка для исследования радиационного уплотнения и распухания «РАСТ-УРАЛ»

Рис 2 Установка для исследования радиационной ползучести «ПОСТ-УРАЛ-М»

Установка «РАСТ-УРАЛ» состоит из навески, включающей рабочую камеру с образцами, системы измерения деформации, электромеханического привода, измерительных и газо-вакуумных коммуникаций. Рабочая камера представляет собой макет тепловыделяющего элемента с оболочкой из нержавеющей стали внешним диаметром 10 мм. В оболочке находятся образцы таблеток из исследуемой топливной композиции. В нижней части, к оболочке приварена трубка для прокачки инертного газа. Зазор между топливным сердечником и оболочкой заполнен инертным газом. На верхнем торце топливного сердечника установлен удлинительный шток преобразователя перемещений. Преобразователь перемещений вынесен за пределы активной зоны. Для обеспечения теплоотвода от твэла на рабочем участке установлен алюминиевый радиатор. Полость рабочего участка заполняется гелием, зазор между радиатором и корпусом капсулы – гелием или неоном, в зависимости от задаваемого уровня температур на топливных образцах. Температура измеряется термопарой, в центральной отверстии образцов, в середине сборки по высоте. Вторая термопара предназначена для контроля температуры радиатора и установлена на расстоянии 15 мм от оси установки, внутри радиатора. Навеска заключена в страховочный корпус, который заканчивается захватом для соединения с электромеханическим приводом. Страховочный корпус исключает попадание продуктов деления в теплоноситель в случае разгерметизации рабочей полости. Технологические коммуникации, представляющие собой газовые трубки, предназначены для обеспечения и смены газовой атмосферы в рабочей камере.

Проведённые проектировочные теплофизические расчёты, с использованием метода конечных элементов, позволили определить зависимость температуры топлива от зазоров между элементами установок, величины энерговыделения и состава используемого газа в полости капсулы. Для установки «ПОСТ-УРАЛ-М» варьировались радиальные зазоры между образцами, корпусом и молибденовой обоймой, а для установки «РАСТ-УРАЛ» - радиальные зазоры между образцами, оболочкой твэла и алюминиевым радиатором. Расчёты показали, что для установки «ПОСТ-УРАЛ-М» при радиальном зазоре 0,42 мм между топливом и молибденовой обоймой в интервале энерговыделений 350 до 550 Вт/см<sup>3</sup> максимальная температура образцов изменяется от 550 до 1000 °С при заполнении рабочей камеры гелием. Для установки «РАСТ-УРАЛ», при нулевом радиальном зазоре между оболочкой радиатора и оболочкой твэла максимальная температура топлива меняется от 550 до 650 °С при энерговыделении от 400 до 550 Вт/см<sup>3</sup>.



Толщина стенок образцов определялась из условия прочности по термическим напряжениям. Расчеты показали, что для обеспечения механической целостности топлива при объемном энерговыделении в образцах до  $600 \text{ Вт/см}^3$  необходимо использовать образцы в виде полых цилиндров с толщиной стенки не более 1,65 мм.

Управление внутриреакторными установками, а также регистрация данных осуществляется при помощи системы измерения деформации, системы автоматизированного контроля и регулирования температуры, газо-вакуумного стенда.

Для контроля и регулирования температуры разработана автоматизированная система, схема которой показана на рис. 3.

Система обеспечивает непрерывное измерение и регистрацию температуры образцов, а также ее регулирование посредством перемещения навески по высоте активной зоны. Относительная приведенная погрешность измерения температуры не превышает 3%.

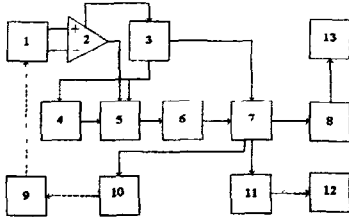


Рис 3 Схема системы автоматизированного контроля и регулирования температуры

1 – датчик температуры; 2 – усилитель, 3 – источник питания; 4 – источник опорного напряжения; 5 – АЦП; 6 – SPI интерфейс; 7 – управляющий микроконтроллер, 8 – преобразователь интерфейса; 9 – объект исследований; 10 – блок пуска управления двигателем, 11 – дисплей; 12 – внешний источник питания, 13 – компьютер.

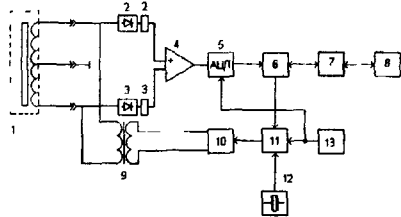


Рис 4 Схема системы измерения перемещений

1-преобразователь перемещений; 2,3-амплитудные детекторы; 2,3'-фильтры низких частот; 4-дифференциальный усилитель; 5-АЦП, 6-управляющий микроконтроллер, 7-устройство оптической развязки; 8-компьютер, 9-«развязывающий» трансформатор, 10-буферный усилитель, 11-синтезатор частот синусоидального сигнала, 12-кварцевый генератор; 13-источник опорного напряжения.

Для измерения деформации используется индуктивный дифференциальный преобразователь линейных перемещений «ПИРТ», разработанный в МИФИ для высокотемпературных и внутриканальных исследований. На рис. 4 представлена схема микропроцессорной системы измерения перемещений. Основной особенностью системы является применение цифрового синтезатора частот синусоидального сигнала, усилителей с низким температурным дрейфом и 16 битного АЦП. Отклонение от линейности в диапазоне измерений  $\pm 2500 \text{ мкм}$  не превышает 0,5 %.

Проведена модернизация установки «КРИП-М» для исследования ползучести сердечников в лабораторных условиях. Переконфигурация системы измерения деформации и введение компенсации температурных расширений удлинительных штоков привели к существенному повышению точности измерения деформации образца. Испытания показали, что средняя погрешность, связанная с изменением температуры образца в интервале 20 – 1100 °С составляет около 0,02 мкм/град.

Технические характеристики внутриреакторных и лабораторной установок указаны в табл. 1.

Таблица 1.

Основные технические характеристики экспериментальных устройств.

Характеристика \ Назначение	Экспериментальное устройство		
	ПОСТ-УРАЛ-М	РАСТ-УРАЛ	КРИП-М
	Исследование радиационной ползучести	Исследование распухания и радиационного уплотнения	Исследование ползучести в лабораторных условиях
Температура испытаний, °С	200 – 1100	200 – 700	1600±1
Погрешность измерения температуры *, %	3	3	2
Максимальное сжимающее усилие на образце, Н	1200	3-5	4000
Погрешность определения усилий *, %	1,5	не измеряется	1,5
Диапазоны измеряемых перемещений, мкм	± 2500	± 2500	0 – 5000
Погрешность измерения перемещений *, %	0,5	0,5	0,1
Размеры образцов, мм			
длина	10 - 11	10 - 11	9-11
внешний диаметр	7,2	7,2	6-8
внутренний диаметр	4,0	4,0	1,2 - 1,4
Максимальное энерговыделение в образце, Вт/см <sup>3</sup>	600	600	отсутствует
Количество образцов	2	8 - 10	1
Габариты установки, мм			
диаметр	58	58	
Длина	1500	1500	

\*-Указаны относительные приведенные погрешности

В третьей главе представлены характеристики образцов, условия проведения испытаний и экспериментальные результаты. Для испытаний изготовлены четыре партии образцов, характеристики и состав которых представлены в табл. 2. Исключая введение добавок и

температуру спекания таблетки, получены по штатной технологии производства таблеток твэлов энергетических реакторов.

Таблица 2

## Характеристики образцов

Индекс партии	P1	P2	C1H2	M2H1
Состав	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub>	UO <sub>2</sub> + 0 1мас % A**+0 2мас % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	UO <sub>2</sub> +0 25мас % B**+0 1мас % Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> **
Температура спекания, °С	1650	1750	1650	1750
Плотность, г/см <sup>3</sup>	10 62 ± 0 02	10 77 ± 0 01	10 75 ± 0.02	10 40 ± 0.04
Размер зерна, мкм	10-12	10-12	15-16	15-16
Кислородный коэффициент	2,001	2,001	2,0042	2,0035

\*-А – сурик - смесь оксидов-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

\*\*-В – муллит - 2SiO<sub>2</sub> 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Исследование механических свойств без облучения проводилось в режиме деформирования с постоянной скоростью и при нагружении в режиме ползучести при сжимающих напряжениях в интервале 10-40 МПа и температурах 1200-1500 °С. Экспериментальная установка заполнялась смесью аргона и водорода, при содержании водорода 7 %. Результаты испытаний легированного и штатного топлива представлены на рис. 5-6.

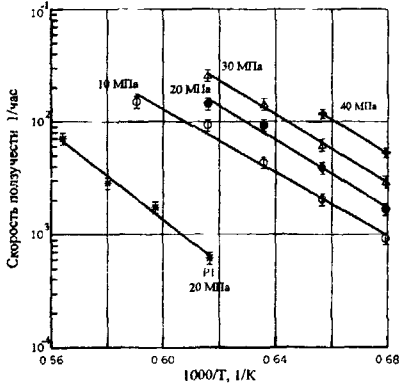


Рис 5 Зависимость скорости ползучести диоксида урана, легированного суриком и оксидом ниобия (партия C1H2, ○, ●, △, ◆, - 10,20,30,40 МПа) от обратной температуры Диоксид урана -\* (партия P1) Цифрами указаны напряжения

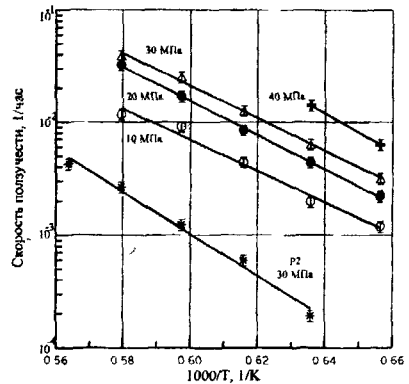


Рис 6 Зависимость скорости ползучести диоксида урана (партия M2H1, ○, ●, △, ◆, - 10,20,30,40 МПа), легированного муллитом и оксидом ниобия от обратной температуры Диоксид урана -\* (партия P2)

До напряжений 30 МПа наблюдается линейная зависимость между скоростью ползучести и напряжением. Такая зависимость

характерна для диффузионного механизма ползучести. Энергии активации ползучести, представленные в табл 3, близки к известным литературным данным по энергиям активации диффузии катионов по вакансионному механизму в диоксиде урана.

Таблица 3

Индекс партии	Значение кажущейся энергии активации Q, кДж/моль при напряжении МПа			
	10	20	30	40
P1	-	375	376	-
P2	-	357	358	-
C1H2	291	293	290	390-400
M2H1	274	290	281	330-334

При напряжениях выше 30 МПа наблюдается более сильная зависимость скорости ползучести от напряжения. Это связано со сменой диффузионного механизма ползучести, доминирующего при низких напряжениях, на механизм переползания дислокаций. Увеличение энергии активации связано с дополнительной энергией, необходимой для взаимодействия дислокаций с точечными дефектами. По разным оценкам эта энергия лежит в пределах (0,6-1,0) эВ или (58-96) кДж/моль.

Скорость ползучести легированных образцов в 15 -- 30 раз выше, чем образцов диоксида урана без добавок.

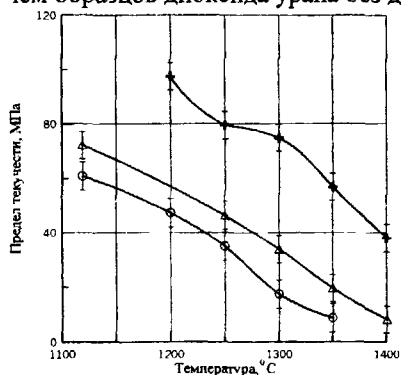


Рис 7 Зависимость предела текучести от температуры + - исходный диоксид урана технологии ВВЭР - 1000,  $\Delta$  - легирование муллитом и ниобием,  $\square$  - легирование суриком и ниобием

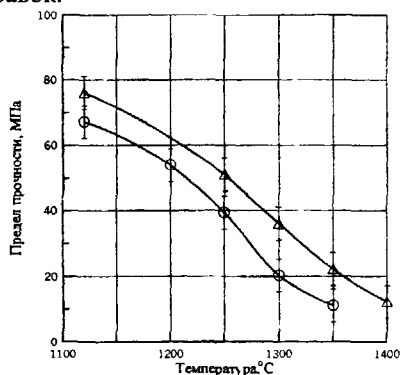


Рис 8 Зависимость предела прочности легированного диоксида урана от температуры  $\Delta$  - легирование муллитом и ниобием,  $\square$  - легирование суриком и ниобием

Для определения предела текучести и предела прочности образцы нагружались в режиме деформирования с постоянной скоростью  $(8-9) \cdot 10^{-3}$  1/час в интервале температур 1100-1400 °C.

Зависимость предела текучести и предела прочности легированного диоксида урана от температуры показаны на рис. 7 и 8. Низкое значение предела текучести вместе с высокой скоростью ползучести приведёт к значительному снижению силового взаимодействия между сердечником и оболочкой на переходных режимах.

Для исследования радиационной ползучести, как более приемлемые по ядерно-физическим свойствам, были выбраны образцы, легированные оксидом ниобия и алюмосиликатами. Структурный анализ, проведённый в ГНЦ РФ ВНИИНМ им. академика А.А. Бочвара, показал, что алюмосиликаты находятся в диоксиде урана в виде межзеренной фазы. Оксид ниобия образует твердый раствор замещения в решетке диоксида урана. Образцы исследуемого топлива облучались в диапазоне энерговыделений  $270\text{--}465 \text{ Вт/см}^3$ . Температура в центре образцов менялась от  $320$  до  $1175 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотность деления – от  $9 \cdot 10^{12}$  до  $1,5 \cdot 10^{13} \text{ 1/см}^3\text{с}$ . Напряжения сжатия менялись в диапазоне  $10\text{--}32 \text{ МПа}$ .

Вследствие значительных температурных градиентов в образце, рассматривалась эффективная температура (постоянная по всему объему образца) равная температуре, при которой скорость ползучести равна экспериментальному значению скорости, полученному при реальном (неравномерном) распределении температур.

На рис. 9 и 10 представлены зависимости радиационной скорости ползучести легированного топлива от плотности деления и напряжения. В области низких температур до  $660 \text{ }^\circ\text{C}$  скорость радиационной ползучести топлива с низким сопротивлением деформированию линейно зависит от плотности деления и от приложенных напряжений.

В интервале  $320\text{--}660 \text{ }^\circ\text{C}$  скорость радиационной ползучести не зависит от температуры. В области температур  $660\text{--}945 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается переходной участок, на котором скорость ползучести постепенно увеличивается. При температурах выше  $945 \text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается термоактивированная ползучесть с энергией активации  $246 \text{ кДж/моль}$ , которая контролируется термическими эффектами, усиленными действием облучения.

Как видно из рис. 11, в атермической области скорость радиационной ползучести легированного топлива за счёт релаксации напряжений на границе зёрен в  $2,5\text{--}3,8$  раза выше скорости ползучести топлива штатной технологии. В области термически активируемой ползучести увеличение скорости более существенно: в  $4,5$  раза при  $945 \text{ }^\circ\text{C}$  и в  $10\text{--}12$  раз при больших температурах.

Исследование радиационного уплотнения и распухания легированного топлива проводилось при энерговыделении в образцах  $509 \text{ Вт/см}^3$ . Температура в центре образца, находящегося в середине

топливного столба, составляла  $660 \pm 15$  °С, плотность деления –  $1,7 \cdot 10^{13}$   $1/\text{см}^3\text{с}$ . Общее время облучения составило 3860 часов. Достигнуто выгорание  $2,41 \cdot 10^{20}$  дел/ $\text{см}^3$ , что равно примерно 1 % от числа тяжелых атомов. Максимальное уменьшение высоты топливного столба наблюдалось при выгораниях  $(7 - 8) \cdot 10^{19}$  дел/ $\text{см}^3$ .

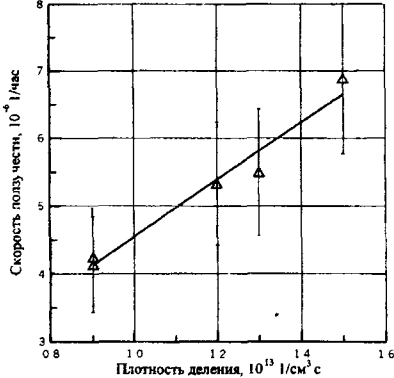


Рис 9 Зависимость скорости радиационной ползучести топлива с низким сопротивлением деформированию от плотности деления. Напряжения 28-32 МПа

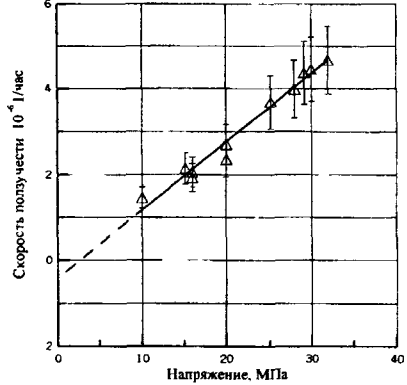


Рис 10 Зависимость скорости радиационной ползучести для топлива с низким сопротивлением деформирования от напряжения в области температур 280 – 660 °С. Плотность деления  $10^{13}$   $1/\text{см}^3\text{с}$

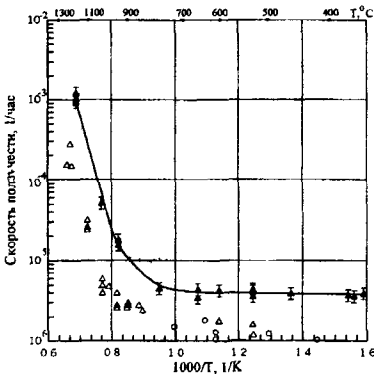


Рис 11 Зависимость скорости радиационной ползучести от обратной температуры. Темные точки – легированный диоксид урана. Светлые точки – диоксид урана штатной технологии без добавок. Приведено к напряжению 30 МПа и плотности деления  $10^{13}$   $1/\text{см}^3\text{с}$

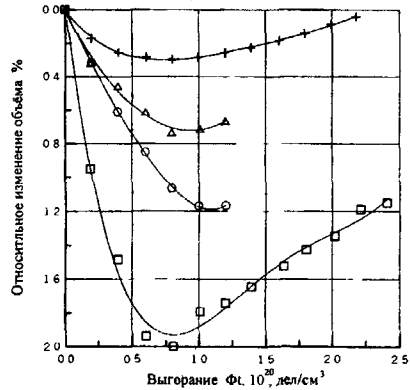


Рис 12 Кинетические кривые изменения объема диоксида урана в процессе облучения. + - данные настоящей работы,  $\Phi = 1,7 \cdot 10^{13}$  дел/ $\text{см}^3\text{с}$ ,  $T = 590$  °С, исходная плотность 95 %. Диоксид урана технологии ВВЭР – 1000.  $\Delta$  -  $\Phi = 4,5 \cdot 10^{13}$  дел/ $\text{см}^3\text{с}$ ,  $T = 790$  °С, исходная плотность 95,8 %, O -  $\Phi = 6,6 \cdot 10^{13}$  дел/ $\text{см}^3\text{с}$ ,  $T = 540$  °С, исходная плотность 94,1 %,  $\square$  -  $\Phi = 8,2 \cdot 10^{13}$  дел/ $\text{см}^3\text{с}$ ,  $T = 790$  °С, исходная плотность 93,2 %

Относительное значение уменьшения высоты, вызванное уплотнением топлива, равно 0,11 % от первоначального значения. Учитывая, что размерные изменения топлива на основе диоксида урана при температуре ниже 600 °С, вызванные облучением, изотропны, изменение объема образцов за счет радиационного уплотнения составило 0,33 %. Это значение существенно ниже принятых в техническом проекте твэла ВВЭР – 1000 допустимых изменений объема сердечника вследствие уплотнения - 1,2 %.

На рис. 12 представлены зависимости изменения объема диоксида урана в процессе облучения. Исследованное топливо имеет лучшую размерную стабильность по сравнению со штатным топливом ВВЭР – 1000. Скорость набухания составила 0,59 % на один процент выгорания, что соответствует общепринятой величине скорости набухания за счет накопления твердых продуктов деления для диоксида урана штатной технологии.

В четвертой главе приводятся модели и расчетные соотношения для описания ползучести штатного и легированного топлива без облучения и под облучением.

Анализ экспериментальных данных и моделей по термической ползучести диоксида урана показал, что скорость ползучести может быть представлена в виде:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\alpha \Omega \sigma D_{\text{эфф}}}{k T d^2} + \frac{\beta \sigma^{4.5} D_{\text{эфф}}}{k T \sqrt{b N} \mu^{3.5}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  - постоянные, зависящие от степени релаксации касательных напряжений на границе зерна,  $\sigma$  - напряжение,  $\Omega$  - атомный объем, равный  $4 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ ;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ ;  $d$  - размер зерна;  $D_{\text{эфф}}$  - эффективный коэффициент диффузии точечных дефектов;  $T$  - абсолютная температура;  $b$  - вектор Бюргерса;  $N$  - плотность дислокаций;  $\mu$  - модуль сдвига.

Учитывая, что диоксид урана является ионным соединением, в котором диффузия происходит по вакансионному механизму, эффективный коэффициент диффузии определяется выражением:

$$D_{\text{эфф}} = \frac{3}{2} D_{VU} C_{VU}. \quad (2)$$

Коэффициентов диффузии вакансий урана равен:

$$D_{VU} = \frac{1}{12} a^2 j_0 f_{VU} \exp\left(-\frac{\Delta H_{VU}}{kT}\right) \exp\left(\frac{\Delta S_{VU}}{k}\right), \quad (3)$$

где  $a$  - параметр решетки,  $j_0$  - собственная частота колебаний;  $f_{VU}$  - корреляционный геометрический фактор для вакансий урана;  $\Delta H_{VU}$  - энтальпия активации миграции вакансий урана,  $C_{VU}$  - концентрация вакансий урана.

Концентрация дефектов (Френкеля и Шоттки) в диоксиде урана определяется законом действующих масс:

$$C_{VU}C_{iU} = \exp[(\Delta S_{fU}T - \Delta H_{fU})/kT] \quad (4)$$

$$C_{VO}C_{iO} = \exp[(\Delta S_{fO}T - \Delta H_{fO})/kT] \quad (5)$$

$$C_{VU}C_{VO}^2 = \exp[(\Delta S_S T - \Delta H_S)/kT] \quad (6)$$

где  $\Delta H_S$  и  $\Delta S_S$  - энтальпия и энтропия образования дефекта Шоттки;  $\Delta H_{fO}$  и  $\Delta S_{fO}$  - энтальпия и энтропия образования пары Френкеля кислорода;  $\Delta H_{fU}$  и  $\Delta S_{fU}$  - энтальпия и энтропия образования пары Френкеля урана;  $C_{iU}$  и  $C_{iO}$  - концентрации интерстиций урана и кислорода;  $C_{VO}$  концентрация вакансий кислорода. Систему уравнений (4-6) необходимо дополнить условием электронейтральности:

$$x = 2(C_{iO} - C_{VO}), \quad (7)$$

где  $x$  - отклонение от стехиометрии.

В случае легированного топлива, необходимо рассмотреть влияние добавок ниобия на диффузионные процессы и учесть модификацию границы зерна за счёт межзёрненной фазы на основе алюмосиликатов. Условие электронейтральности в этом случае будет иметь вид:

$$2(C_{iO} - C_{VO}) = \left(x + \frac{C_{Nb}}{2}\right), \quad (8)$$

где  $C_{Nb}$  - атомная концентрация ниобия в твердом растворе. Решая систему уравнений (4-6) относительно  $C_{VU}$  с учётом условия электронейтральности (8) для концентрации вакансий урана  $C_{VU}$ , можно получить выражение:

$$C_{VU} = \frac{16 \exp\left(-\frac{\Delta H_S - \Delta S_S T}{kT}\right)}{\left(\sqrt{(2x + C_{Nb})^2 + 16 \exp\left(-\frac{\Delta H_{fO} - \Delta S_{fO} T}{kT}\right)} - (2x + C_{Nb})\right)^2}. \quad (9)$$

Из последнего выражения следует, что при больших отклонениях от стехиометрии концентрация вакансий урана пропорциональна  $x^2$  и намного превышает равновесные термодинамические значения. Экспериментальные данные показывают уменьшение роста скорости ползучести с увеличением кислородного коэффициента. Можно сделать предположение, что в этих условиях вакансии урана могут объединяться в комплексы и их концентрация падает пропорционально  $1/(1+Rx^2)$ , где  $R$  - параметр, определяемый из вероятности столкновения вакансий и времени жизни вакансионного комплекса.

Образование межзёрненной фазы приводит к увеличению ширины границы и уменьшению сопротивления скольжению по границе зерна. Рассмотрим зерно в форме октаэдра. Будем считать, что межзёрненная фаза равномерно распределена по границе зерна. Наличие фазы даст увеличение скорости ползучести в  $\delta_2/\delta_1$  раз, где  $\delta_2$  толщина



межзеренной прослойки,  $\delta_1$  - ширина границы в диоксиде урана без добавок, равная 1-3 межатомным расстояниям. Это приведёт к увеличению первого слагаемого в выражении (1) для скорости ползучести на величину  $6,5 \cdot 10^8 d C_\Phi$ , где  $C_\Phi$  - объёмная концентрация межзеренной фазы.

Таким образом, подставив в (1) значение эффективного коэффициента диффузии, для расчета скорости ползучести диоксида урана с добавкой 0,25 мас. % ( $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и 0,1 мас. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  с учётом зависимости от пористости следует рекомендовать выражение:

$$\dot{\epsilon}_M = A(1+0,31P^{1,8})f_1(X,T)\frac{\sigma}{d^2} + B(1+0,31P^{1,8})f_1(X,T)\sigma^{4,5}\exp\left(-\frac{4500}{T}\right) \quad (10)$$

$$f_1(x,T) = \frac{\exp\left(-\frac{24600}{T}\right) \left[ \sqrt{(2x+C_{Nb})^2 + 176 \exp\left(-\frac{26000}{T}\right)} + (2x+C_{Nb}) \right]^2}{1+1,5 \cdot 10^4 (2x+C_{Nb})^2} \quad (11)$$

где  $A=7,34 \cdot 10^8$ ;  $B=76,7$ .

Полученное значение скорости ползучести будут иметь размерность 1/час. Подобранные значения энтальпий образования равны 2,24 эВ для пары Френкеля кислорода и 5,7 эВ для дефекта Шоттки, что весьма близко к литературным данным. В представленном соотношении  $\sigma$  - напряжение, МПа,  $d$  - размер зерна, мкм;  $P$  - пористость, %,  $\dot{\epsilon}_M$  - стационарная скорость термической ползучести легированного топлива, 1/час. Соотношение верифицировано для диоксида урана с добавкой 0,25 мас. % муллита ( $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и 0,1 мас. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  в интервале температур 1200 - 1450 °С, напряжений - (10 - 40) МПа. Полученное соотношение описывает экспериментальные результаты с погрешностью 14%.

Для расчёта термической скорости ползучести диоксида урана без добавок  $\dot{\epsilon}$  необходимо в (11) приравнять  $C_{Nb}=0$ , а коэффициенты в уравнении (10) положить равными  $A=5,2 \cdot 10^7$ ,  $B=59$ . Соотношение верифицировано для диоксида урана штатной технологии ВВЭР-1000 в интервале температур 1200 - 1700 °С, напряжений - (10 - 60) МПа.

Для диоксида урана при температуре ниже 500 °С скорость радиационной ползучести практически постоянна, при более высокой температуре - увеличивается с повышением температуры. Это дает основание полагать, что существуют два независимых механизма, вклад которых в общую деформацию зависит от уровня температур.

Оценка атермической составляющей скорости ползучести диоксида урана произведена на основе механизма анизотропии модульного взаимодействия:

$$\dot{\epsilon}_{PI} = B\sigma K, \quad (12)$$

где  $B$  - модуль ползучести,  $K$  - скорость образования точечных дефектов (скорость смещений).

$$B = \frac{15(1-\mu)(Z_{i0})^2 V_i}{3\pi\Delta V_i E [15(1-\mu) + 2(4-5\mu)]}, \quad (13)$$

где  $\mu=0,3$  – коэффициент Пуассона,  $V_i$  – объем промежуточного атома, равный атомному объему  $\Omega$ ,  $\Delta V_i = 0.8\Omega$  – корреляционный фактор для промежуточного атома (дилатация),  $Z_{i0}$  – параметр предпочтения (близок к единице).  $E=2 \cdot 10^5 \cdot 31,2T$  – модуль упругости диоксида урана, МПа. Здесь  $T$  – абсолютная температура.

Термическая составляющая радиационной ползучести в диоксиде урана связана с разделением потоков точечных дефектов под действием приложенных напряжений. Тогда, для оценки скорости ползучести можно использовать модель аналогичную модели Наббаро – Херринга:

$$\dot{\epsilon}_{p2} = \frac{\alpha\Omega D_p}{\chi^2 kT} \sigma, \quad (14)$$

где  $D_p$  – коэффициент радиационной диффузии,  $\chi^2$  – среднее квадратичное расстояние до стока точечных дефектов,  $\alpha$  – постоянная.

Будем считать, что основным стоком точечных дефектов в облучаемом диоксиде урана является сеть треков, образующихся при торможении осколков деления. Расчет параметров трека, выполненный на основе модели ионного взрыва, для  $\chi^2$  дает значение  $10^{10} \text{ см}^2$ .

Коэффициент радиационной диффузии  $D_p$ , как и термической, пропорционален концентрации точечных дефектов  $C_v$ . Так как вакансии и промежуточные атомы образуются при облучении в равных количествах, то концентрации вакансий  $C_v$  и промежуточных атомов  $C_i$  равны между собой:

$$C_v = C_i = \sqrt{\frac{K}{4\pi r_v j_i}}, \quad (15)$$

где  $r_v$  – безразмерный параметр – радиус рекомбинации, принимается равным 4,  $j_i$  – частота перескока точечных дефектов. Коэффициент диффузии дефектов  $D_{v0}$  определяется выражением (3). Коэффициент радиационной диффузии равен коэффициенту диффузии вакансий  $D_{v0}$ , умноженному на долю времени  $\tau_T$ , которую выбитый атом проводит в треке осколка деления между двумя перерастворениями:

$$D_p = \tau_T C_v D_{v0} \quad (16)$$

Величина  $\tau_T = a^2 \rho_T = 1,33 \cdot 10^{-5}$ . Плотность сети трековых линий принята равной  $10^{10} \text{ 1/см}^2$ . Учитывая сказанное выше, термическая компонента скорости радиационной ползучести в соответствии с выражением (15) равна:

$$\dot{\epsilon}_{p2} = A_2 \sigma \sqrt{K} \exp\left(-\frac{0,45}{kT}\right), \text{ 1/с.} \quad (17)$$

Определение эффективной концентрации точечных дефектов и скорости их производства –  $K$  можно сделать исходя из следующих предположений. В присутствии примесей происходит интенсивный захват точечных дефектов примесными атомами. Захваченные точечные дефекты теряют подвижность и не влияют на процессы деформирования. В делящихся материалах наличие и изменение концентрации атомов примесей связано с накоплением продуктов деления.

Будем считать, что вокруг атома примеси существует область объемом  $V_3$ , попадая в которую точечный дефект поглощается. Время удержания дефекта атомом примеси обозначим через  $\tau$ . Для описания динамики накопления центров захвата  $N$  можно записать дифференциальное уравнение:

$$dN = \Phi dt - V_3 N \Phi dt - \lambda N dt, \quad (18)$$

где  $\Phi$  – плотность деления,  $\lambda = 1/\tau$  – частота освобождения атомов из центра захвата. Первый член уравнения описывает производство центров захвата, второй – их перекрытие, третий – насыщение центров захвата. Решение уравнения (18) имеет вид:

$$N = \frac{\Phi}{V_3 \Phi + \lambda} [1 - \exp(-(V_3 \Phi + \lambda)t)]. \quad (19)$$

Точечные дефекты радиационного происхождения в рассматриваемой области температур малоподвижны и могут быть захвачены только в области действия осколка деления (в треке осколка, в термическом пике, пике смещения т.д.). Относительная концентрация центров захвата в этой области может быть представлена как  $C = NV_{тр}$ , где  $V_{тр}$  – объем области действия осколка деления. Для расчёта стационарного значения радиационной скорости ползучести необходимо в выражении (19) положить  $t \rightarrow \infty$ . Если общую скорость производства дефектов представить в виде суммы свободных и захваченных,  $K_0 = K + KC$ , для скорости производства подвижных дефектов получим, с учётом что  $K_0 = v\Phi\Omega$ :

$$K(\Phi) = \frac{v\Phi\Omega}{1 + \frac{\Phi V_{тр}}{V_3 \Phi + \lambda}} \quad (20)$$

где  $v$  – число атомов, выбиваемых осколком деления.

В теории радиационных повреждений число смещений на осколок в диоксиде урана обычно принимают равным  $2 \cdot 10^5$  1/дел. Таким образом, для начальной скорости производства дефектов в диоксиде урана можно получить:  $K_0 = 8,2 \cdot 10^{-18} \Phi$ .

Объем зоны захвата принимают обычно равной (100 – 1000)  $\Omega$ . Будем считать, что  $V_3 = 10^{-20} \text{ см}^3$ . Объем трека осколка деления –  $V_{тр} = 10^{-18} \text{ см}^3$ . Время удержания дефекта ловушками представляется в виде:

$$\tau = l/\lambda = \frac{l^2}{D_{v0}} \exp\left(\frac{E_{cb}}{kT}\right), \quad (21)$$

где  $l$  - расстояние, на которое должен уйти дефект, что бы покинуть сток,  $E_{cb}=3,6$  эВ – энергия связи дефекта с ловушкой. За величину  $l$  примем радиус трека осколка, равный  $(V_{тр})^{1/3}$ , т.е.  $10^{-6}$  см.

С учетом сказанного выше, для скорости образования подвижных радиационных дефектов получим соотношение:

$$K(\Phi) = \frac{8,2 \cdot 10^{-18} \Phi}{1 + \frac{10^{-18} \Phi}{10^{-20} \Phi + \lambda}}. \quad (22)$$

Суммируя выражения (12) и (17), с учётом (22) можно рекомендовать следующее соотношение для расчета стационарной радиационной скорости ползучести диоксида урана с учетом зависимости от плотности:

$$\dot{\epsilon}_p = \left[ \frac{A_1}{E} \sigma R_c + A_2 \sigma \sqrt{R_c} \exp\left(-\frac{5200}{T}\right) \right] (1 + 0,31 P^{1,8}) + \dot{\epsilon}, \quad (23)$$

где  $A_1=2,7 \cdot 10^{-14}$ ,  $A_2 = 7,3 \cdot 10^{-12}$ ,  $\dot{\epsilon}$  - скорость термической ползучести диоксида урана без добавок,  $R_c$  - стационарное значение эффективной плотности деления, равное:

$$R_c = \frac{\Phi}{1 + \frac{10^{-18} \Phi}{10^{-20} \Phi + \lambda}}. \quad (24)$$

При температурах меньше  $900^\circ\text{C}$   $R_c = \Phi/101$ .

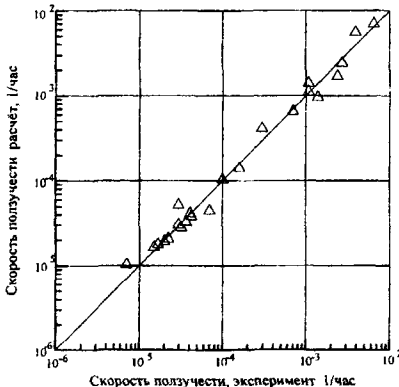


Рис 13 Сравнение экспериментальных и рассчитанных по соотношению (23) значений радиационной скорости ползучести диоксида урана.  $\Delta$  - обобщённые экспериментальные данные,

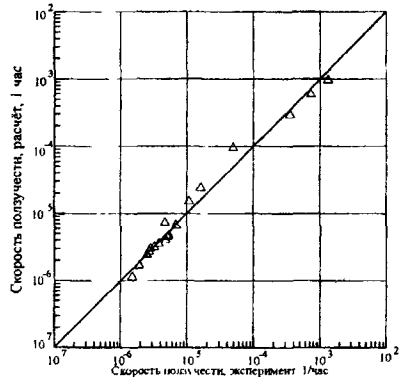


Рис 14 Сравнение экспериментальных и рассчитанных по соотношению (25) значений радиационной скорости ползучести модифицированного диоксида урана  $\Delta$  - данные настоящей работы;

Соотношение (23) верифицировано по зарубежным и отечественным данным для радиационной ползучести диоксида урана полученным в интервале температур 200 - 1550 °С, напряжений (10 - 40) МПа, плотностей деления ( $7 \cdot 10^{12}$  -  $2,5 \cdot 10^{14}$ )  $1/\text{см}^3\text{с}$ . Плотность топлива изменялась от 89 до 97 % от теоретической. На рис. 13 представлены результаты сравнения расчётов с экспериментальными данными. Полученное соотношение описывает экспериментальные результаты с погрешностью 12%.

Результаты, полученные в работе, показали, что в отличие от диоксида урана без добавок для легированного диоксида урана скорость радиационной ползучести при температурах меньше 900 °С практически не зависит от температуры. Формально это означает, что второй член в уравнении (23) мал по сравнению с компонентами термической и радиационной ползучести. Кроме того, вследствие релаксации напряжений на границах зерен, скорость атермической радиационной ползучести легированного топлива выше, чем для топлива без добавок. С учётом выше изложенного, стационарная скорость радиационной ползучести модифицированного топлива может быть найдена как сумма термической и радиационной составляющих скорости ползучести. Тогда, для расчёта стационарной скорости ползучести модифицированного топлива на основе диоксида урана с добавкой 0,25 мас. % ( $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 0,1 мас. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  под облучением в зависимости от плотности деления, температуры, напряжения, пористости, размера зерна и кислородного коэффициента, можно рекомендовать следующее выражение:

$$\dot{\epsilon}_{\Sigma\text{м}} = \dot{\epsilon}_{\text{м}} + \frac{A_1}{E} \sigma \Phi (1 + 0,31P^{1,8}), \quad (25)$$

Соотношение (25) верифицировано по данным настоящей работы для стационарной радиационной ползучести модифицированного топлива на основе диоксида урана, полученным в интервалах температур 350 - 1180 °С, напряжений (10 - 32) МПа, плотностей деления ( $9 \cdot 10^{12}$  -  $1,5 \cdot 10^{13}$ )  $1/\text{см}^3\text{с}$ , при  $\chi=0,001$ , атомной концентрации ниобия  $C_{\text{Nb}}=0,0012$ , размере зерна  $d=18,5$  мкм и пористости  $P=4\%$ .  $A_1=5,2 \cdot 10^{-16}$ ,  $\dot{\epsilon}_{\text{м}}$  - даётся выражением (10). На рис. 14 представлены результаты сравнения расчётов с экспериментальными данными.

Полученное соотношение описывает экспериментальные результаты с погрешностью 17%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Для исследования радиационной ползучести оксидного топлива в условиях облучения применительно к реактору ИВВ-2М разработана внутриканальная установка «ПОСТ-УРАЛ-М». Выбранные конструктивные параметры обеспечивают уровень температур в диапазоне 200 - 1100 °С при энерговыделениях 200-600 Вт/см<sup>3</sup>. Установка внедрена в ФГУП ИРМ.

2. Для исследования радиационного уплотнения и распухания оксидного топлива применительно к реактору ИВВ-2М разработана внутриканальная установка «РАСТ-УРАЛ». Выбранные конструктивные параметры обеспечивают уровень температур в диапазоне 200 – 700 °С при энерговыделениях 200-600 Вт/см<sup>3</sup>. Установка внедрена в ФГУП ИРМ.

3. Разработан и создан комплекс измерительных систем для автоматизированного контроля и регулирования температуры, измерения деформации, сбора и регистрации данных в ходе реакторного эксперимента.

4. Проведена модернизация установки «КРИП-М» для исследования характеристик ползучести оксидного топлива, результатом которой явилось существенное повышение точности измерения деформации образца.

5. Установлено, что комплексное легирование диоксида урана смесью стеклообразующих оксидов, включающих оксиды кремния и железа в концентрации до 0,25 мас. % и оксидом ниобия в концентрации до 0,2 мас. %, приводят к увеличению скорости термической ползучести в 15-30 раз в области температур 1200-1500 °С, при сжимающих напряжениях до 40 МПа.

6. Показано, что топливо, легированное 0,25 мас. % (2SiO<sub>2</sub> 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и 0,1 мас. % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, имеет лучшую размерную стабильность на начальной стадии облучения по сравнению с диоксидом урана без добавок. Максимальное уменьшение высоты топливного столба равно 0,11%, что соответствует изменению объема на 0,33%.

7. Показано, что скорость радиационной ползучести топлива, легированного 0,25 мас. % (2SiO<sub>2</sub> 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и 0,1 мас. % Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, в интервале 320 – 660 °С слабо зависит от температуры. При температурах выше 945 °С наблюдается термоактивированная ползучесть с энергией активации 246 кДж/моль. В атермической области скорость радиационной ползучести топлива с низким сопротивлением деформированию в 2,5 – 3,8 раза выше скорости ползучести топлива штатной технологии. В области термически активируемой ползучести скорость увеличивается в 10 – 12 раз.

8. Показано, что топливо из легированного диоксида урана отвечает критерию по размерной стабильности, принятому для твэлов энергетических реакторов. Его сопротивление деформированию в зависимости от условий эксплуатации в 2,5–30 раз ниже, чем для диоксида урана штатной технологии.

9. Разработаны и верифицированы расчётные рекомендации, описывающие термическую и радиационную ползучесть штатного и легированного топлива. Предложенные соотношения пригодны для расчёта термической и радиационной скорости ползучести, штатного и легированного топлива, в зависимости от плотности деления, температуры, напряжения, пористости, размера зерна и кислородного коэффициента, используются в программах анализа работоспособности и лицензирования твэлов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Малыгин В.Б., Михеев Е.Н., Милованов О.В., Афонсенкова А.И., Соколов А.Н. Влияние легирования на характеристики ползучести диоксида урана. // Научная сессия МИФИ-99. Сборник трудов. М., 1999. Т.5. с.64.

2. Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Прогнозирование эксплуатационных свойств диоксида урана двухфракционного состава. // Научная сессия МИФИ-99. Сборник трудов. М., 1999. Т.5. с.86.

3. Локтев А.М., Милованов О.В., Михеев Е.Н., Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Топливо на основе диоксида урана для высоких выгораний и переходных режимов эксплуатации твэлов ВВЭР // Научная сессия МИФИ-2000. Сборник трудов. М., 2000. Т.9. с.82.

4. Мильдер Л.Ю., Тен А., Токарев В.И., Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Методика и средства исследования ползучести и размерной стабильности диоксида урана в процессе облучения // Научная сессия МИФИ-2002, Научно-инновационное сотрудничество. Сборник трудов. М., 2002. Т.1. с.166.

5. Кузнецов В.И., Медведев А.В., Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Разработка и верификация модели ползучести диоксида урана // Научная сессия МИФИ-2002, Научно-инновационное сотрудничество, сборник трудов. М., 2002. Т.1. с.168.

6. Мильдер Л.Ю., Тен А., Токарев В.И., Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Методики исследования деформаций ползучести, уплотнения и набухания диоксида урана на реакторе ИВВ-2. // Труды НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалы, М.: НИКИЭТ, 2002. с.34.

7. Аблеев А.Н., Токарев В.И., Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Система измерения перемещений для реакторных исследований эксплуатационных свойств ядерного топлива. // Труды НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалы, М.: НИКИЭТ, 2002. с.37.

8. Кудрявцев Е.М., Мильдер Л.Ю., Тен А., Токарев В.И., Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Размерная стабильность легированного диоксида урана в процессе облучения // Научная сессия МИФИ-2003, Научно-инновационное сотрудничество. Сборник научных трудов. М., 2003. Т.1. с.112.

9. Бибилашвили Ю.К., Михеев Е.Н., Локтев А.М., Милованов О.В., Кулешов А.В., Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Механические свойства диоксида урана с низким сопротивлением деформированию. // Научная сессия МИФИ-2003, Научно-инновационное сотрудничество. Сборник научных трудов. М., 2003. Т.1. С.114.

10. Малыгин В.Б., Бибилашвили Ю.К., Тен А., Мильдер Л.Ю., Токарев В.И., Соколов А.Н. Радиационная ползучесть диоксида урана с низким сопротивлением деформированию // Научная сессия МИФИ-2004, Научно-инновационное сотрудничество. Сборник научных трудов. М., 2004. Т.1. с.123.

11. Bibilashvili, Yu.K., Malygin V.B., Medvedev A.V., Sokolov A.N. et al. / Development of low – strain resistant fuel for reactor fuel rods // Proc. Conf. on IAEA: Characterization and Quality control of nuclear fuels – CQCNF – 2000. Hyderabad, India, 10 – 12 December, 2002.

12. Bibilashvili, Yu.K., Malygin V.B., Kuznetsov, V.I., Medvedev, A.V., Pimenov Y.V., Novikov, V.V., Sokolov A.N. et al. / Fuel of low resistance to strain // Proc. Conf. on IAEA: Technical Committee Meeting on Improved Fuel Pellet Material and Designs, Brussels, 20 – 24 October 2003.

13. Малыгин В.Б., Соколов А.Н., Мильдер Л.Ю., Тен А., Токарев В.И. Конструкция и теплофизический расчёт установки «ПОСТ-УРАЛ-М» для исследования ползучести и размерной стабильности диоксида урана в процессе облучения. // Сборник трудов четвертой конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH. М. 2004.

14. Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Радиационная ползучесть диоксида урана с низким сопротивлением деформированию. // Инженерная физика. 2004. №2. с.38-40.

15. Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Изменение размеров таблеток легированного диоксида урана в процессе облучения. // Инженерная физика. 2004. №4. с.27-30.

16. Малыгин В.Б., Соколов А.Н. Комплекс экспериментальных средств для исследования радиационной ползучести и размерной стабильности топлива энергетических реакторов. // Инженерная физика. 2005. №1 с.34-35.



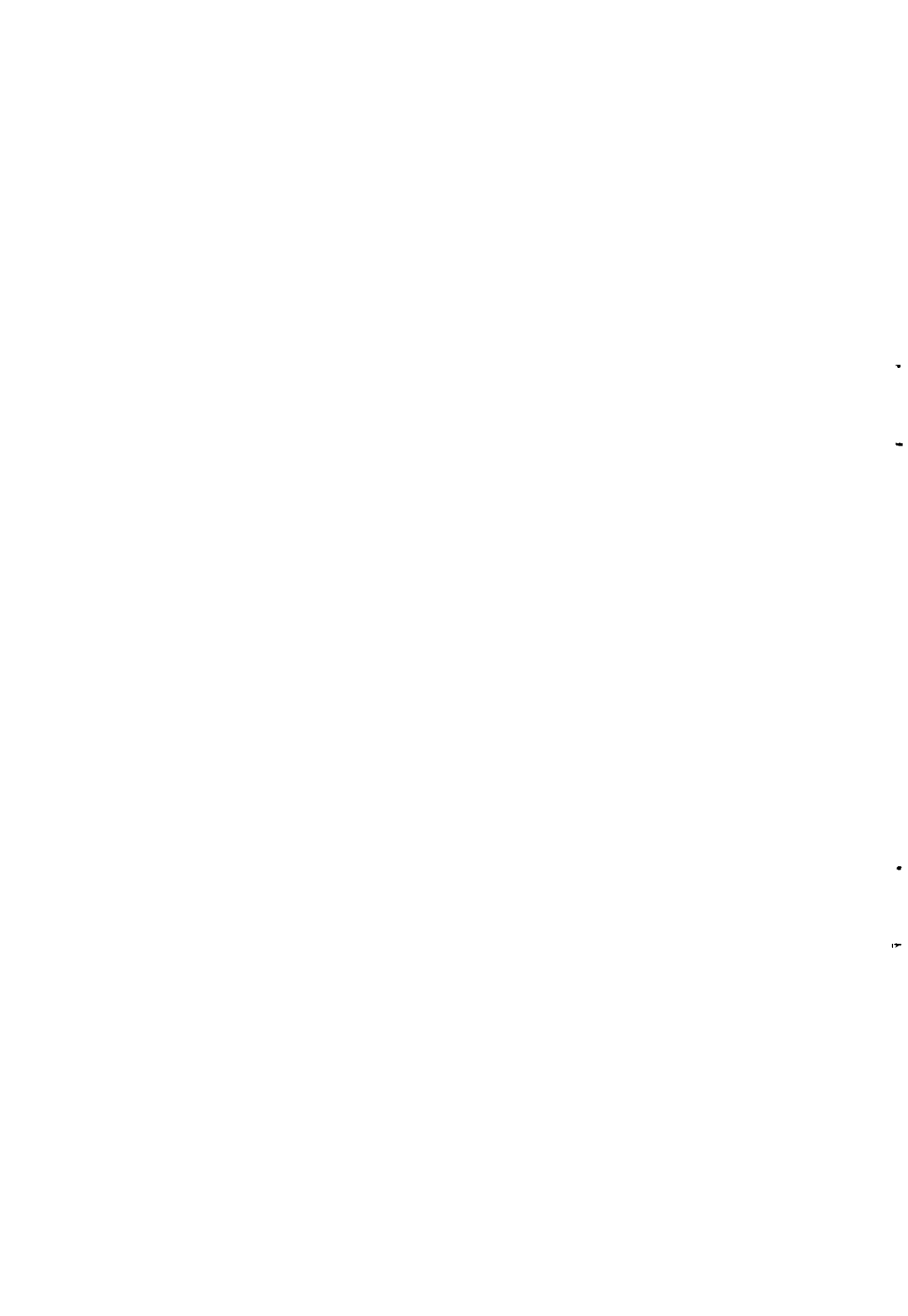
Отпечатано в ООО «Компания Спутник+»

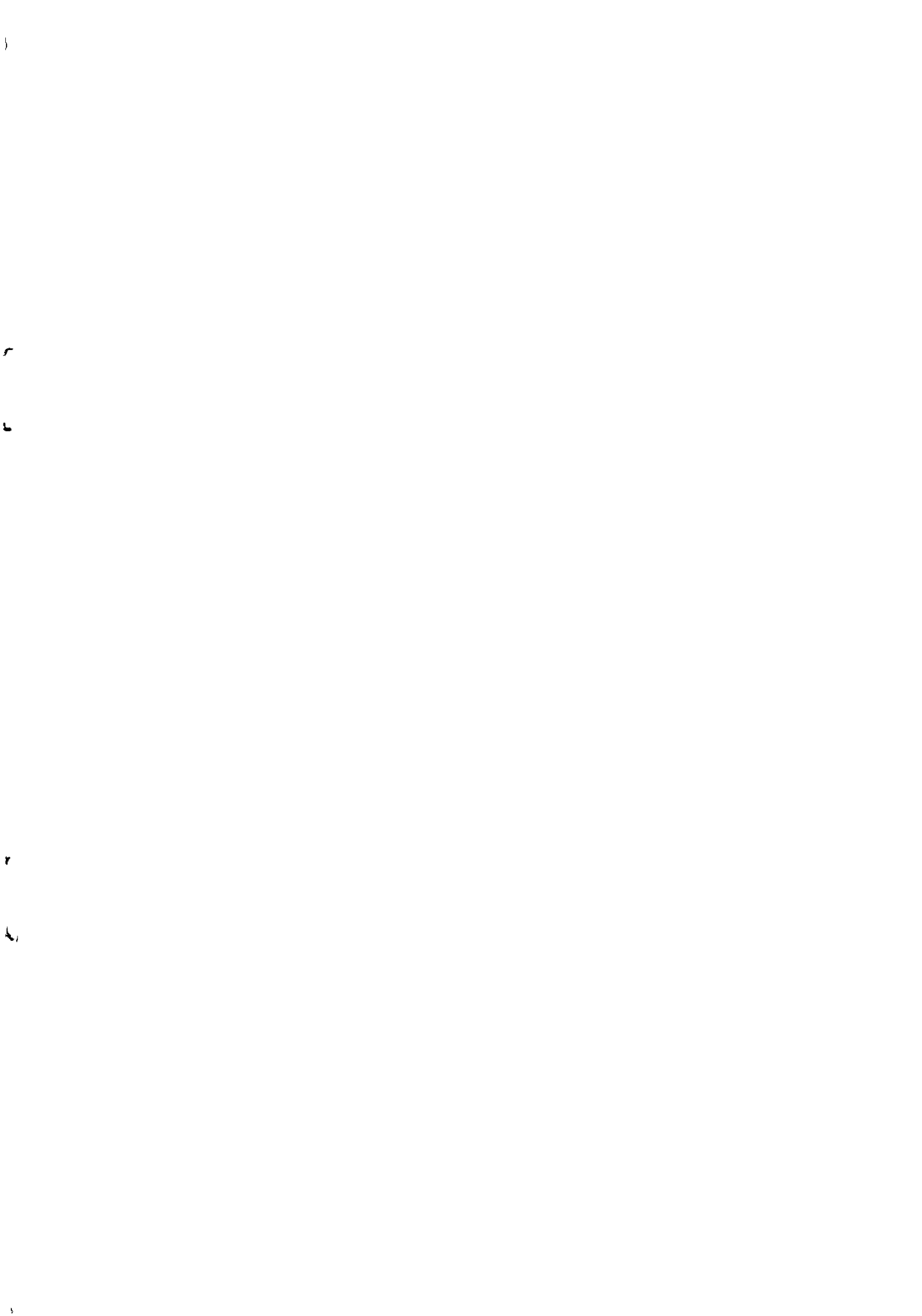
ПД № 1-00007 от 25.09.2000 г.

Подписано в печать 25.11.05

Тираж 60 экз. Усл. п.л. 1,5

**Печать авторефератов (095) 730-47-74, 778-45-60**





06 111

РНБ Русский фонд

2007-4

2743



28 ФЕВ 2008