

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»»

ВОРОБЬЕВ ЕГОР ЕВГЕНЬЕВИЧ

КИНЕТИКА ПОЛЗУЧЕСТИ И НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЦИРКОНИЕВЫХ ТРУБ  
ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Никулин С.А.

Научный консультант:  
доктор технических наук,  
Маркелов В.А.

Москва 2019

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

В ядерных энергетических реакторах в тепловыделяющей сборке (ТВС) жёсткий каркас несёт тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) – тонкие циркониевые трубы с топливным столбом-сердечником из таблеток диоксида урана. Это коренное звено активной зоны реактора, где происходит деление ядер и выделение тепловой энергии. Герметичность и размерная стабильность ТВЭЛ – основной критерий работоспособности ТВС реактора, и её нарушение может повлечь за собой радиационные аварии разного уровня опасности.

Оболочка ТВЭЛ отечественных и зарубежных реакторов типа ВВЭР при нормальных условиях эксплуатации работает при температуре 350–380 °С, и первую половину срока эксплуатации подвержена действию наружного гидростатического давления ~ 16 МПа водяного теплоносителя первого контура. Примерно через 3 года эксплуатации происходит посадка оболочки ТВЭЛ на топливный сердечник, и с этих пор до конца эксплуатации (~ 6 лет) внутреннее давление распухающего топливного столба перевешивает наружное давление теплоносителя на оболочку ТВЭЛ.

Давление вызывает ползучесть – малую и медленную пластическую деформацию при средневысоких температурах и напряжениях ниже предела текучести. Традиционно ресурс работы оболочечных труб ТВЭЛ прогнозируют при ползучести под внутренним давлением – по медленному увеличению диаметра и сжатию стенки трубы. Чаще всего такие испытания сопоставительные. Однако ресурс ТВС иногда ограничен «нештатной» местной деформацией одного из ТВЭЛ под наружным давлением: образованием резких гофров над фасками таблеток, сплющиванием оболочки (вплоть до соприкосновения сторон) в месте повреждения и несплошности топливного столба.

Замена внутреннего давления наружным не сводится к замене растяжения стенки на сжатие. Сплющивание (и гофры) – это пластическая неустойчивость и большой изгиб оболочки переменной овальности, который из уравнений

ползучести при сжатии кольца не следует. Известны решения для ползучести только при слабой овальности. Их экстраполяция на порядки вперёд прогнозировала время до сплющивания оптимистически – много дольше ресурса в эксплуатации.

Необходимо было получить общее решение задачи теории ползучести о совместном изменении формы и размеров трубы любой овальности. Такое решение сопоставляло бы ползучесть под внутренним давлением, под наружным и при стандартном одноосном растяжении, а по любому из них давало бы прогноз сплющивания.

Решение следовало проверить длительными испытаниями оболочек твэл на ползучесть под наружным и под внутренним давлением, во всём диапазоне напряжений и температур, обычном для реакторов типа ВВЭР. В плане эксперимента число и варианты условий испытаний необходимы в том количестве, чтобы сопоставить разные модели ползучести и выбрать из них адекватную.

Испытания оболочек твэл (и вообще труб) под наружным давлением немногочисленны, так как сложнее методически. И совсем нет работ, сопоставляющих ползучесть одних и тех же труб в одинаковых условиях под внутренним и под наружным давлением. Заданная точность и надёжность потребовали иной техники и плана измерений, а также алгоритмов анализа данных с предельным извлечением информации. Это и поставило цель и задачи настоящего исследования.

### **Цели и задачи**

**Целью диссертационной работы** является аналитическое решение задачи о формоизменении труб при ползучести под действием гидростатического давления и экспериментальная проверка решения – сериями долговременных испытаний труб из сплавов циркония на ползучесть во всём диапазоне условий эксплуатации оболочек твэл – при температурах 350–380 °С и окружных напряжениях 70–130 МПа (вне облучения).

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

1 Постановка и решение задачи о силах и моментах в трубе любой овальности под гидростатическим давлением, о скорости вызываемых ими изменений овальности и длины периметра вследствие ползучести.

2 Отработка методики испытаний труб под гидростатическим давлением, в том числе:

- методов прецизионных измерений овальности и периметра и их неравномерности по длине образца;

- приёмов нахождения и оценки надёжности констант процесса из анализа массива данных как многомерной нелинейной задачи на максимум правдоподобия.

3 Проведение испытаний труб из сплавов циркония для оболочек твэл на ползучесть под внутренним и под наружным давлением во всём диапазоне окружных напряжений и температур эксплуатации твэл;

4 Определение по совокупности полученных экспериментальных данных адекватности построенной модели и её констант; указание способов их использования для прогнозов неустойчивости и сплющивания трубы.

### **Научная новизна**

1 Получены единые уравнения ползучести трубы любой овальности под наружным или внутренним гидростатическим давлением. Из их исследования вытекают, в частности, качественные закономерности процессов:

- для любой исходной конфигурации трубы есть единый путь её эволюции: траектория взаимосвязанных изменений овальности и длины периметра. Температура и напряжения влияют только на скорость движения по этой траектории, а знак давления – на направление движения (наружное давление сплющивает контур, внутреннее – «выправляет» в круг);

- сплющивание при ползучести происходит при много меньших напряжениях, чем упругая потеря устойчивости контура;

- время сплющивания существенно зависит от начальной технологической овальности трубы.

2 Испытания 59 труб из сплавов типа Э110 до 4250 ч во всём диапазоне напряжений и температур эксплуатации твэл показали, что ползучесть под внутренним давлением следует обычному «двухстадийному» закону с переходом в стационарный процесс за время  $\sim 1000$  ч;

3 Системой экспериментов подтверждены основные выводы модели: в одинаковых условиях ползучести скорости удлинения периметра под внутренним и под наружным давлением совпадают. Они определяют скорость изменения овальности под наружным давлением, и эта жёсткая связь не зависит от условий ползучести.

### **Практическая значимость**

1 Отработана методика испытаний труб на ползучесть под наружным гидростатическим давлением, с прецизионными измерениями овальности, периметра, их неравномерности и с предельным извлечением информации из массива данных для описания процесса;

2 Указана возможность прогнозировать время в эксплуатации: до посадки оболочки твэл на топливо и до «нештатного» повреждения оболочки сплющиванием; экспериментально найдены необходимые константы кинетики ползучести;

3 Указана взаимозаменяемость испытаний под наружным и под внутренним давлением и её пределы;

4 Предложено оценивать предел возможного совершенствования структуры за счёт режимов термомеханической обработки – по полной величине деформации в переходном процессе ползучести.

### **Положения, выносимые на защиту**

- изложенное выше научное и прикладное обоснование цели работы; рациональность последовательности задач;

- за счёт полного учёта сил и моментов получено уравнение ползучести под гидростатическим давлением при контуре трубы любой, а не только малой овальности; из его решения вытекают качественные закономерности:

- существует единый путь эволюции контура трубы: изменение овальности и длины периметра жёстко связаны;

- при ползучести неустойчивость контура и сплющивание – пластические (не упругие);

- отработанная методика испытаний труб, точность измерений и приёмы анализа данных достаточно полно и надёжно описывают процессы ползучести под гидростатическим давлением;

- ползучесть под внутренним давлением складывается из переходного и стационарного процесса, которые чётко разделены анализом данных:

- ползучесть под наружным давлением нестационарная, так как складывается из сжатия и изгиба стенки трубы;

- все основные выводы модели подтверждены испытаниями, объём и режимы которых достоверно описывают закономерности ползучести труб из сплавов типа Э110 под давлением при напряжениях и температурах эксплуатации твэл;

- из найденных в эксперименте уравнений ползучести возможен прогноз времени до сплющивания оболочки.

### **Достоверность и апробация**

Достоверность обеспечена адекватными средствами и объёмом измерений, последовательным метрологическим анализом погрешностей и воспроизводимости первичных данных, использованием алгоритмов максимума правдоподобия при анализе моделей, их констант и погрешностей. Показано общее и поэтапное согласие совокупности экспериментов и построенной модели явления.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в постановке целей и задач настоящей работы, разработке модели кинетики ползучести и неустойчивости труб

под давлением, проведении экспериментов с разработкой и отработкой методик испытаний, обработке и анализе результатов исследований.

Автор выражает благодарность наставникам и учителям Никулину С.А., Маркелову В.А. и Штремелю М.А. за руководство и консультации, коллективу отдела разработки циркониевых материалов П-345 и автоклавщикам АО «ВНИИНМ» за помощь в проведении испытаний, родителям, родным, друзьям и Дарье Г. за поддержку.

### **Публикации**

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях в рецензируемых изданиях:

1 Воробьев Е.Е., Штремель М.А. Особенности прочности объектов низкой размерности // Деформация и разрушение материалов. 2017. № 11. с. 2–15. Vorob'ev E.E., Shtremel' M.A. Strength of low-dimensional objects // Russian Metallurgy (Metally). 2018. v. 2018 (4). p. 303–315.

2 Никулина А.В., Перегуд М.М., Воробьев Е.Е., Хохунова Т.Н. Размерная стабильность конструкционных изделий ТВС ВВЭР-1000 из циркониевого сплава Э-635 // Атомная энергия. 2017. т. 123 (4). с. 197–202. Nikulina A.V., Peregud M.M., Vorob'ev E.E., Khokhunova T.N. Dimensional stability of the structural parts of VVER-1000 FA made of E-635 zirconium alloy // Atomic Energy. 2018. v. 123 (4). p. 235–243.

3 Воробьев Е.Е., Перегуд М.М., Хохунова Т.Н., Милешкина О.Ю., Бекренев С.А., Маркелов В.А., Штремель М.А. Ползучесть труб под наружным давлением // Деформация и разрушение материалов. 2019. № 7. с. 24–37.

4 Воробьев Е.Е., Перегуд М.М., Маркелов В.А., Штремель М.А. Ползучесть труб под внутренним давлением // Деформация и разрушение материалов. 2019. №10. с. 17–30.

### **Структура и объём работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка использованной литературы. Работа содержит 82 страницы основного текста, 9 таблиц, 34 рисунка. Список используемой литературы включает 52 наименования.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы настоящей работы, поставлена цель и задача исследования, сформулирована научная новизна и практическая значимость результатов работы и приведены положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

**Глава 1** содержит аналитический обзор литературы, на основании которого сформулированы цели и задачи работы. В первой обзор описаны условия эксплуатации оболочечной трубы твэл применительно к реакторам типа ВВЭР и доказывається возможность их имитации испытаниями на ползучесть под давлением. Приведены основные положения дислокационной модели ползучести на примере испытаний на растяжение, а также принципиальные зависимости скорости установившейся стадии ползучести от основных параметров испытаний – температуры и величины напряжений. Обозначены особенности схем нагружения труб и их неустойчивость при испытаниях. Описаны результаты работ по исследованию труб на ползучесть при растяжении и под внутренним и наружным давлением. Отмечена нехватка экспериментальной базы для прогнозирования кинетики ползучести и неустойчивости труб под давлением.

**В главе 2** описаны материал и методика исследований, алгоритм обработки диаграмм ползучести. Материалом исследований являлись оболочечные трубы двух типоразмеров, различающиеся диаметром и толщиной стенки и предназначенные для твэлов реакторов типа ВВЭР и PWR. Трубы  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм (для реакторов ВВЭР) были из сплава Э110шт, а  $9,5 \times 8,33$  мм (для PWR) – из Э110опт. Эти сплавы различались содержанием железа и кислорода (0,008 и 0,055 мас. % [Fe], 330 и 860 мас. % [O]) и шихтой (электролитический и губчатый цирконий), а трубы из них – отношением  $R/h = 6,16$  и  $7,63$  – радиуса средней линии ( $R = 4,220$  и  $4,465$  мм) к толщине стенки ( $h = 0,685$  и  $0,585$  мм) для  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм и  $9,5 \times 8,33$  мм, соответственно. Указано, что существенных различий по механическим свойствам на растяжение между трубами нет.

Для испытаний под внутренним и наружным давлением при температуре 350 и 380 °С и окружных напряжений 70–130 МПа (типичные условия эксплуатации твэл) было отобрано 12 труб  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм и 18 и 17 труб  $\varnothing 9,5 \times 8,33$  мм, соответственно. На всех трубах были нанесены лазером метки, разделяя образец на пять участков длиной 15 мм.

Толщину стенки образцов измеряли трубным микрометром по двум краям исходной трубы с точностью до 1 мкм (8 промеров, крест-накрест). Она существенно не отличалась у образцов одного типоразмера, и разнотолщинность по периметру окружности была в пределах допуска технических условий.

С точностью до 2 мкм лазерным микрометром измеряли наибольший и наименьший наружный диаметр  $D_{\max}$  и  $D_{\min}$  центре каждого участка образца (с шагом 15 мм вдоль оси). За исходно овальную форму сечения принимали эллипс – единственную замкнутую кривую второго порядка, – а за меру его овальности – эксцентриситет эллипса

$$e = \sqrt{1 - \left( \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \right)^2}. \quad (1)$$

За наружный диаметр  $D$  – эквивалентный диаметр периметра эллипса

$$D = (2 / \pi) D_{\max} E(e), \quad (2)$$

где

$$E(\pi / 2, e) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \theta} d\theta \quad (3)$$

– полный эллиптический интеграл II рода.

Образцы для испытаний под внутренним давлением герметизировались с помощью заглушки и ниппеля в атмосфере аргона. Герметичность подтверждали измерениями наружного диаметра образцов: после заполнения и заварки он вырастал, а эксцентриситет почти у всех образцов снижался.

Образцы для испытаний под наружным давлением были без ниппеля – к ним подваривали аргонно-дуговой сваркой две глухие заглушки. Заварка существенно не изменяла диаметры труб, но у некоторых образцов увеличивала эксцентриситет выше допустимого.

В испытаниях под внутренним давлением образцы укладывали стопкой в печь, которую затем нагревали до температуры испытаний 350 и 380 ° – от этого давление аргона внутри образцов поднималось и обеспечивало величину окружных напряжений 70–130 МПа.

Такие же величины окружных напряжений задавали наружным давлением воды (в жидком или газообразном состоянии) в автоклавах объёмом 1,2–1,9 л.

Промер образцов после цикла испытаний проводили во всех испытаниях после охлаждения образцов до комнатной температуры. Рассчитывали эксцентриситет эллипса (1) и длину контура

$$L=2D_{\max} E(e) \quad (4)$$

в зависимости от длительности испытаний.

Образцы каждый раз до загрузки в печь или автоклав и после выгрузки отмывались техническим спиртом. Тем не менее, в течение испытаний все образцы теряли металлический блеск, равномерно чернели, а в местах сварных швов и маркировки появлялись белые осыпающиеся выделения. Влиянием толщины образующегося на образцах оксида на замеры наружных диаметров пренебрегали.

Диаграммы ползучести в координатах деформация–время обрабатывали по модели дислокационной ползучести

$$\lambda(\tau) = \lambda_0 + \lambda_{II}'\tau + \lambda_{II}'\tau_0 \ln \left[ 1 + \left( \frac{\lambda_0'}{\lambda_{II}'} - 1 \right) \left( 1 - \exp\left( -\frac{\tau}{\tau_0} \right) \right) \right], \quad (5)$$

где  $\lambda_0$  – начальная пластическая деформация «прежде ползучести»,  $\lambda_0'$  – начальная и  $\lambda_{II}'$  – стационарная скорость ползучести,  $\tau_0$  – постоянная времени переходного процесса между ними.

Анализ полученных данных экспериментов проводился как нелинейная задача на максимум правдоподобия.

В главе 3 представлено аналитическое решение задачи о больших деформациях ползучести труб давлением. Уравнения равновесия сил и моментов в окружном направлении труб под давлением получены с помощью теорем гидростатики. У трубы под давлением изгибающий момент  $M$  наибольший у

большого диаметра эллипса  $A$  (у максимального диаметра  $D_{\max}$ ,  $2a$ ) и зависит от эксцентриситета

$$|M_A| = qe^2 a^2 / 4. \quad (6)$$

Уравнение траектории деформирования труб любой овальности в координатах удлинение контура  $\lambda$  – квадрат эксцентриситета  $X$

$$4\lambda = -(X - X_0) - (5/16)(X^2 - X_0^2) + \dots + f[\beta(X^m, a/h, m)] + \dots, \quad (7)$$

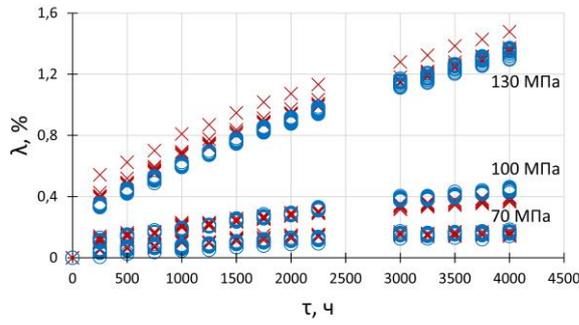
где  $\lambda$  – окружное растяжение-сжатие,  $2a_0$  и  $h_0$  – начальный максимальный диаметр  $D_{\max}$  и толщина трубы,  $m$  – показатель степенной ползучести, получено с помощью представления стационарной ползучести как два диссипативных термодинамических процесса – растяжение–сжатие и изгиб контура трубы.

От конкуренции сжатия и изгиба у трубы под наружным давлением  $D_{\max}$  изменяется немонотонно – сначала уменьшается, а затем резко возрастает.

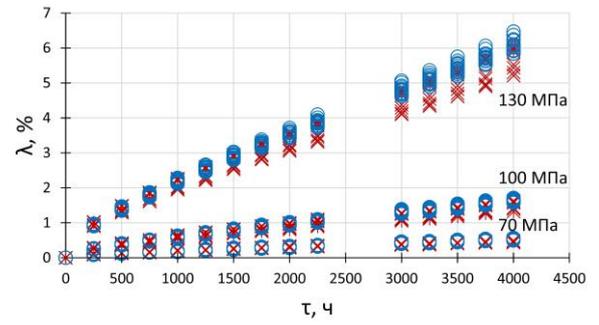
В главе 4 представлены результаты испытаний труб на ползучесть под внутренним и наружным давлением.

Первичные диаграммы ползучести  $\lambda(\tau)$  «удлинение–время» были построены для каждого из образцов, отдельно для каждого сечения. Все они сведены на Рисунке 1 (2 образца×5 сечений – трубы  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм; 3 образца×5 сечений – трубы  $9,5 \times 8,33$  мм).

Изменение эксцентриситета в зависимости от времени (Рисунок 2а) и от деформации ползучести (Рисунок 2б) построены для по всем 5 сечениям 30 образцов при всех 6 режимах испытаний). Под внутренним давлением ожидаемо растяжение окружности и «выпрямление» овала в круг (7), что подтвердилось испытаниями (Рисунок 2б).

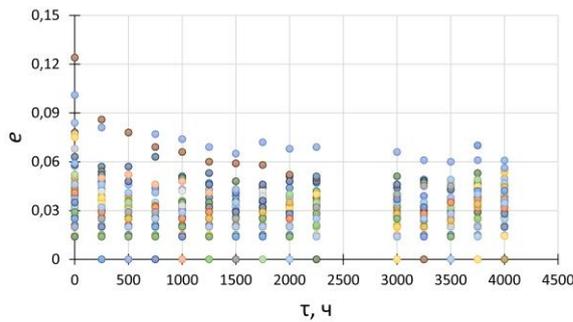


а) 350 °С

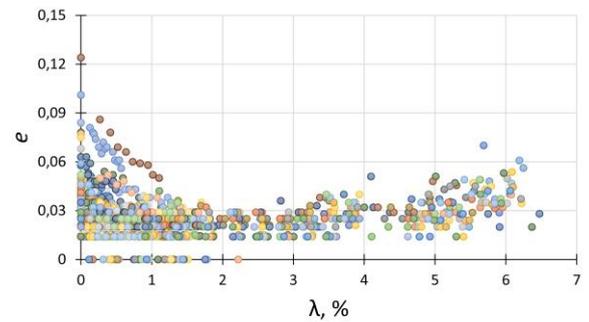


б) 380 °С

Рисунок 1 – Диаграммы ползучести под внутренним давлением по всем 5 сечениям образцов: × – Ø 9,1×7,73 мм; ○ – Ø 9,5×8,33 мм



а) со временем испытания



б) в зависимости от удлинения

Рисунок 2 – Изменение эксцентриситета  $e$  образцов при ползучести под внутренним давлением

Для дальнейшего анализа диаграмм ползучести использовались диаграммы  $\lambda(\tau)$  всех образцов, для каждого в сечении наибольшей деформации.

Для каждого режима испытаний под внутренним давлением найдена (Таблица 1) ошибка  $s_i$  первичных измерений, константы уравнения (5) с их вариациями: начальная  $\lambda_0'$  и стационарная  $\lambda_{II}'$  скорость ползучести, постоянная времени  $\tau_0$  её установления и ожидаемый из предельный вклад  $\lambda_I$  переходного процесса

$$\lambda_I = \lambda_{II}' \tau_0 \ln \frac{\lambda_0'}{\lambda_{II}'} \quad (8)$$

Для всех данных расчёты проведены дважды. В первом варианте допускалось превышение предела текучести – начальная пластическая деформация  $\lambda_0$  «прежде ползучести» (уравнение (5) с  $f=4$  константами). Вторым вариантом – без такой деформации  $\lambda_0$  ( $f=3$ ). Приемлемость моделей сопоставляют по отношению дисперсий для них  $s_i^2(f=4)/s_i^2(f=3)$ . Это отношение значимо не отличалось от единицы, а в таких случаях принимается вариант с меньшим числом параметров:  $f=3$ .

В одном варианте режима (труба  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм при самом низком напряжении и температуре: 70 МПа, 350 °С) ползучесть за время испытаний  $\tau = 4000$  ч ещё не вышла на стационарную стадию, что видно и по диаграмме – Рисунок 1а. Для него расчёт по частному уравнению логарифмической ползучести с  $f=3$  коэффициентами

$$\lambda(\tau) = \lambda_{II}' \tau_0 \ln \left[ 1 + \frac{\lambda_0' \tau}{\lambda_{II}' \tau_0} \right]. \quad (9)$$

дал меньшую дисперсию модели (Таблица 1).

Таблица 1 – Параметры измеренных диаграмм ползучести (5) с 3 коэффициентами нелинейной регрессии

Труба	T, °С	$\sigma_{00}$ , МПа	$\lambda_0', 10^{-5}$ %/ч	$\nu_{\lambda_0}'$	$\lambda_{II}', 10^{-5}$ %/ч	$\nu_{\lambda_{II}'}$	$\tau_0$	$\nu_{\tau_0}$	$\lambda_I$ , %	$\lambda_{4000 \text{ ч}}$ , %	$s_i$ , %
$\varnothing 9,1 \times 7,73$ мм	350	70	44,7	0,05	0,98	0,02	> 4000	–	0,15	0,17	0,0100
		70*	34,4*	0,04*	2,8*	0,02*	1812*	0,02*	–*	0,17*	0,0096*
		100	103	0,03	5,23	0,01	1200	0,01	0,19	0,39	0,011
		130	591	0,07	20,22	0,02	905	0,02	0,62	1,42	0,068
	380	70	60,4	0,03	7,33	0,01	1182	0,02	0,18	0,47	0,013
		100	198	0,07	29,10	0,02	630	0,04	0,35	1,52	0,068
		130	799	0,08	120,45	0,01	439	0,04	1,00	5,82	0,213
$\varnothing 9,5 \times 8,33$ мм	350	70	59,5	0,06	2,84	0,01	775	0,02	0,07	0,18	0,009
		100	159	0,03	8,57	0,01	463	0,01	0,12	0,46	0,009
		130	306	0,02	22,75	0,00	774	0,01	0,46	1,37	0,021
	380	70	205	0,07	11,37	0,01	286	0,03	0,09	0,55	0,015
		100	148	0,01	34,04	0,00	666	0,01	0,33	1,69	0,018
		130	636	0,02	132,35	0,00	471	0,01	0,98	6,27	0,077

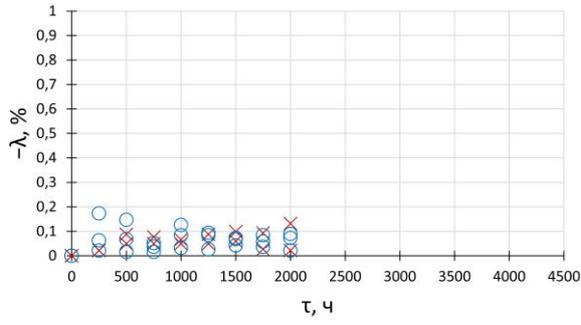
Примечание: Звёздочкой отмечены данные, расчёты которых проводились по (9)

Найденные для всех вариантов значения показателя степенной ползучести  $m \pm s_m$  (вместе с условной постоянной  $a$ ) приведены в Таблице 2. Дисперсия  $s_m$  довольно высокая, так что изменение  $m$  с температурой и различие в показателе  $m$  между сплавами не прослеживается. Средневзвешенное для всех вариантов значение  $m = 3,82 \pm 0,18$ .

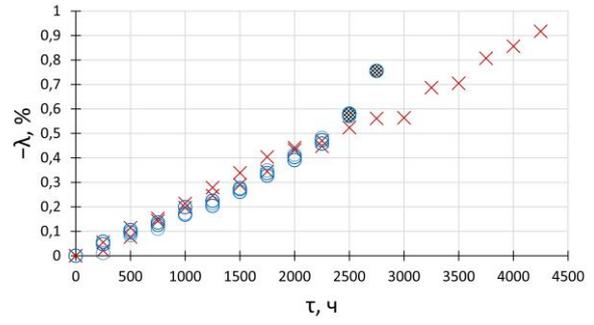
Таблица 2 – Показатель  $m$  степенной зависимости напряжение–скорость ползучести

Труба	$T, ^\circ\text{C}$	$m$	$s_m$	$a$
Ø 9,1×7,73 мм	350	3,38	1,39	-1,67
	380	4,46	0,33	0,05
Ø 9,5×8,33 мм	350	3,51	0,22	-1,31
	380	4,31	0,78	0,16

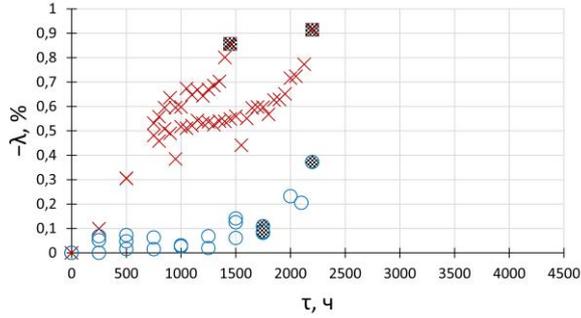
В испытаниях под наружным давлением в диаграммах ползучести обнаружили рассеяние значений окружного сжатия  $\lambda(\tau)$  по сечениям и ускоренную стадию ползучести (Рисунок 3). Как и предсказывает траектория деформирования (7) в испытаниях под наружным давлением у трубы растёт эксцентриситет  $e$ , а её контур сжимается  $\lambda < 0$  вплоть до сплющивания. В Таблице 3 и 4 приведены общая выдержка  $\tau_{\max}$ , последняя выдержка  $\Delta\tau_{\max}$  и эксцентриситет  $e_{\max}$  перед потерей устойчивости (до схлопывания). Для «толстостенных» труб диаметром 9,1 мм ( $2a_0/h = 13,28$ ) эксцентриситет эллипса  $e_{\max} = 0,25-0,50$ , для «тонкостенных» труб диаметром 9,5 мм ( $2a_0/h = 16,24$ ) получено  $e_{\max} = 0,15-0,50$ .



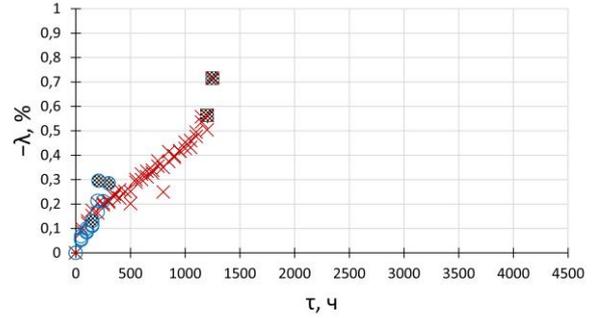
а) 350 °С, 70 МПа



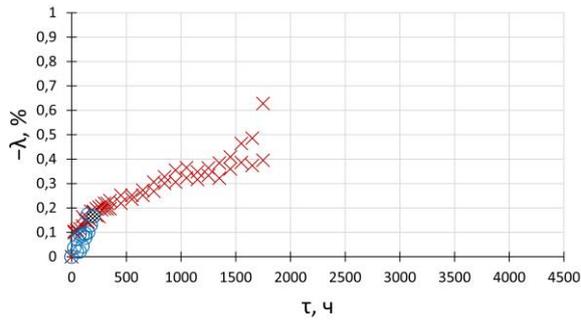
з) 380 °С, 70 МПа



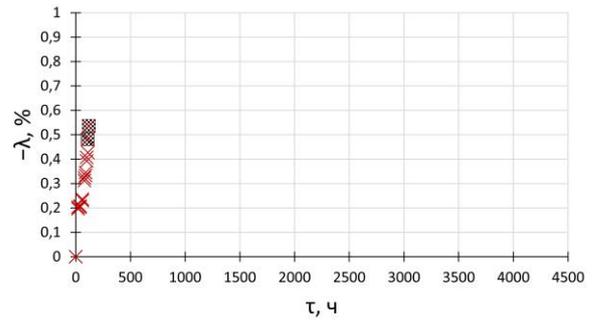
б) 350 °С, 100 МПа



д) 380 °С, 100 МПа



в) 350 °С, 130 МПа



е) 380 °С, 130 МПа

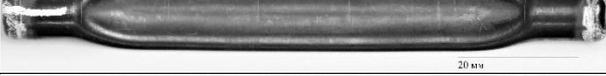
Рисунок 3 – Диаграммы ползучести труб под наружным давлением в сечении с  $e_{\max}$  (темные точки – результаты измерения непосредственно перед схлопыванием трубы):  $\times$  –  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм;  $\circ$  –  $\varnothing 9,5 \times 8,33$  мм

Таблица 3 – Результаты испытаний на ползучесть труб  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм под наружным давлением

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{00}, \text{МПа}$	$\tau_{\text{max}}, \text{ч}$	$\Delta\tau_{\text{max}}, \text{ч}$	$\epsilon_{\text{max}}$	Образец после испытаний (вид со стороны прокрашенной риски)
350	70	2000	–	0,102 (5)	
350	70	2000	–	0,114 (1)	
350	100	2200	75	0,502 (5)	
350	100	1450	50	0,471 (5)	
350	130	1750	–	0,237 (5)	
350	130	1750	–	0,392 (5)	
380	70	4250	–	0,396 (5)	
380	70	2250*	–	0,208 (1)	
380	100	1200	50	0,367 (1)	
380	100	1250	50	0,395 (1)	
380	130	110	10	0,313 (2)	
380	130	120	10	0,312 (2)	

Примечания: 1. В скобках приведен номер сечения трубы с максимальным эксцентриситетом. 2. Звёздочкой отмечено время от начала испытания, при котором произошла разгерметизация трубы.

Таблица 4 – Результаты испытаний на ползучесть труб  $\varnothing 9,5 \times 8,33$  мм под наружным давлением

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{00}, \text{МПа}$	$\tau_{\text{max}}, \text{ч}$	$\Delta\tau_{\text{max}}, \text{ч}$	$\epsilon_{\text{max}}$	Образец после испытаний (вид со стороны прокрашенной риски)
350	70	2000	–	0,084 (5)	
350	70	2000	–	0,151 (5)	
350	70	2000	–	0,135 (1)	
350	100	1750	250	0,195 (1)	
350	100	2200	2250	0,362 (4)	
350	100	1750	250	0,209 (5)	
350	130	150*	–	0,276 (3)	
350	130	200	25	0,203 (2)	
380	70	2750	50	0,488 (1)	
380	70	2500	250	0,378 (1)	
380	70	2500	250	0,383 (1)	
380	100	300	50	0,298 (3)	
380	100	150	25	0,149 (4)	
380	100	210	10	0,298 (3)	
380	130	–	< 3	–	
380	130	–	< 3	–	
380	130	–	< 3	–	

Примечания: 1. В скобках приведен номер сечения трубы с максимальным эксцентриситетом. 2. Звёздочкой отмечено время от начала испытания, при котором произошла разгерметизация трубы.

В главе 5 представлено обсуждение полученных результатов и сопоставление проведённых экспериментов с решением задачи о больших деформациях ползучести труб давлением.

Отмечается, что при ползучести под постоянным наружным давлением  $q$  кольцо становится эллиптическим, окружное напряжение растёт: от появления моментов  $M$  и от увеличения большого диаметра  $2a$ . У большого диаметра на поверхности трубы окружное напряжение наибольшее:

$$|\sigma|_{\max} = |6M_A / h^2| + |P_A / h|. \quad (10)$$

При (6) это соответствует

$$|\sigma|_{\max} / \sigma_0 = 1 + [3a_0 / (2h)] e^2 (1 - e^2). \quad (11)$$

В момент, когда в точке А достигается предел текучести  $|\sigma|_{\max} = \sigma_s$ , к ползучести добавляется «мгновенная» пластическая деформация. Далее зона текучести расширяется по толщине и окружности, сплющивание ускоряется: изменяется геометрия образца и окружные напряжения круто растут вместе с моментом  $M$ . Это не «третья стадия» от изменений в структуре материала или порообразования. Для трубы под постоянным наружным давлением  $q$  теряет смысл само понятие «стадия стационарной ползучести».

Наибольшему эксцентриситету (Таблица 3 и 4) перед пластическим схлопыванием «толстостенных» труб  $\varnothing 9,1 \times 7,73$  мм ( $a_0/h_0 = 6,25$ ) соответствует предельное окружное напряжение (11): у поверхности близ точки А  $\sigma_{\max} = 259$ – $274$  МПа при  $350$  °С и  $\sigma_{\max} = 207$ – $235$  МПа при  $380$  °С. Для «тонкостенных труб»  $\varnothing 9,5 \times 8,33$  мм ( $a_0/h_0 = 7,62$ ) получено  $\sigma_{\max} = 142$ – $230$  МПа при  $350$  °С и  $\sigma_{\max} = 124$ – $215$  МПа при  $380$  °С. Предел текучести сплава Э110 в окружном направлении  $\sigma_{0,2} \approx 160$ – $170$  МПа при  $350$ – $380$  °С – значительно ниже. Превышение ожидаемого  $\sigma_{\max}$  над пределом текучести  $\sigma_{0,2}$  означает, что у поверхности на концах большого диаметра при последнем промере уже была пластическая зона – очаг схлопывания. Поскольку критическая деформация  $\lambda_{\text{кр}}(e_{\text{кр}})$  до начала быстрого смятия довольно малая ( $0,15$ – $0,90\%$ , Рисунок 3), прогнозирование сплющивания от ползучести с экстраполяцией на порядки вперёд по времени даёт

оптимистичные результаты: они не предвидят катастрофу ускорения ползучести по достижении общей текучести.

В уравнении (7) при малых эксцентриситетах у любой трубы траектория

$$e = \sqrt{e_0^2 - 4\lambda}. \quad (12)$$

Его кривые проходят через точку  $\lambda = 0$ ;  $e_0 \neq 0$ , то есть сильно зависит от начальной овальности трубы  $e_0$ . В разных трубах этот эксцентриситет  $e_0 = 0,03$ – $0,08$ . Он менялся и по длине трубы. Но стабильно меняется траектория в диапазоне  $e_1 > e_0$  – разность

$$|\lambda_1| - |\lambda| \approx (1/4)(e_1^{-2} - e^{-2}).$$

На Рисунке 4 в единых координатах  $e(\lambda)$  приведены данные о ползучести исследованных труб под наружным давлением, полученные при всех выбранных режимах. Действительно, после большого рассеяния при  $e \leq 0,1$  устанавливается единая траектория  $e(\lambda)$  – каждая для своей толщины труб ( $h_0/a_0$ ).

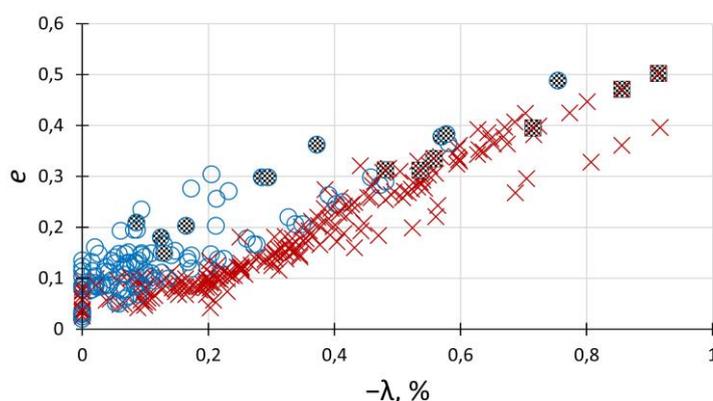


Рисунок 4 – Траектория деформирования исследованных труб при ползучести под наружным давлением в сечении с  $e_{\max}$  при всех параметрах испытания:  
темные точки – результаты измерения непосредственно перед схлопыванием трубы;  $\times$  –  $\emptyset 9,1 \times 7,73$  мм;  $\circ$  –  $\emptyset 9,5 \times 8,33$  мм

При одноосном растяжении или сжатии скорости ползучести обычно равные. На Рисунке 5 показана связь измеренной деформации  $\lambda(\tau)$  окружного сжатия под наружным давлением (конечной перед сплющиванием) и деформации  $\lambda(\tau)$  за это же время под внутренним давлением при равном начальном напряжении и

температуре на этих же трубах (точка – среднее по 2–3 образцам, под внутренним давлением значения  $\lambda(\tau)$  в такой же момент найдены интерполяцией: из уравнения (5) с константами по Таблице 1). В одинаковых условиях ползучести изменения длины периметра под внутренним и под наружным давлением совпадают (Рисунок 5).

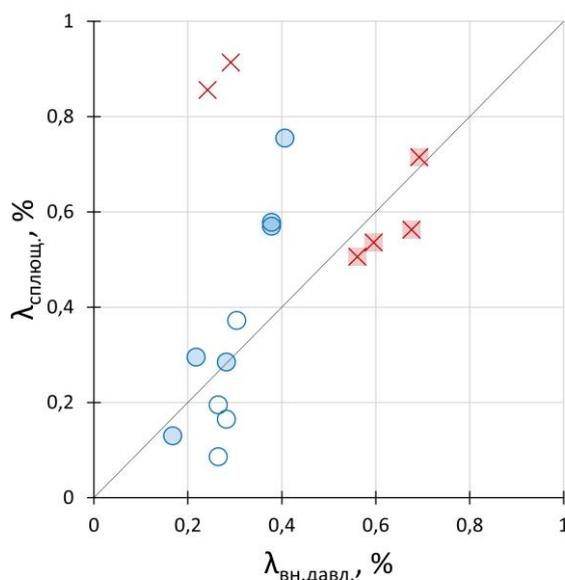


Рисунок 5 – Связь деформации  $\lambda(\tau)$  окружного сжатия под наружным давлением (конечной перед сплющиванием) и деформации  $\lambda(\tau)$  за это же время под равным внутренним давлением:  $\times$  –  $\text{Ø } 9,1 \times 7,73$  мм;  $\circ$  –  $\text{Ø } 9,5 \times 8,33$  мм; пустые точки – 350 °С; окрашенные точки – 380 °С

Во всех случаях начальная скорость  $\lambda_0'$  на порядок и более превышает стационарную  $\lambda_{II}'$  (Таблица 1). Если, изменяя исходную структуру, приблизить её к стационарной  $\rho_{\infty}(\sigma_{\theta\theta})$  при наибольшем напряжении  $\sigma_{\theta\theta}$ , то при  $\rho_0 = \rho_{\infty}(\sigma_{\theta\theta})$  исчезнет быстрая первая стадия ( $\lambda_I = 0$ ) и ресурс вырастет. Таким образом, термомеханические режимы технологии, повышающие долговечность трубы, в принципе возможны. Но полная возможная величина  $\lambda_I$  первой стадии (Таблица 1) указывает предел достижимого при такой оптимизации.

## ВЫВОДЫ

1 Поставлена и решена общая задача о кинетике ползучести трубы любой овальности под гидростатическим давлением. Описаны качественные различия изменений размера и формы: под внутренним давлением устойчивая форма трубы – окружность, под наружным давлением труба пластически неустойчива – изменяет овальность до сплющивания (или гофрирования).

2 Оптимизирована методика испытаний труб на ползучесть под гидростатическим давлением, в том числе приёмы измерений овальности и её неравномерности, анализ данных с предельным извлечением информации о константах кинетики, их надёжности и об адекватности сопоставляемых моделей ползучести.

3 Испытаны на ползучесть до 4000 ч (и более) 59 труб из циркониевого сплава типа Э110, применяемых для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) ядерных энергетических реакторов ВВЭР. Режимы испытания на ползучесть под наружным и под внутренним давлением охватывали весь диапазон условий эксплуатации оболочек ТВЭЛ: окружные напряжения 70–130 МПа при температурах 350–380 °С (вне облучения).

4 Анализ данных экспериментов как нелинейной задачи на максимум правдоподобия показал, что во всём диапазоне напряжений и температур ползучесть под внутренним давлением следует обычному «двухстадийному» закону: неустановившийся процесс и стационарный чётко разделимы, время перехода между ними ~ 1000 ч. Ползучесть под наружным давлением нестационарная, сжатие и изгиб стенки трубы складываются с ростом напряжения до предела текучести.

5 Системой экспериментов подтверждены основные выводы из аналитического решения задачи. В одинаковых условиях ползучести скорости изменения длины периметра под внутренним и под наружным давлением совпадают, и они жёстко связаны со скоростью изменения овальности. Поэтому

при всех условиях ползучести под наружным давлением конфигурация трубы меняется по единой траектории вплоть до сплющивания.

6 Из уравнения кинетики ползучести трубы под давлением при экспериментально найденных его константах возможно прогнозировать потерю ресурса и риск при «нештатном» повреждении топливного столба – из-за неустойчивости и сплющивания или образования гофров оболочки твэл.