НА ПРАВАХ РУКОПИСИ
НЕ ПЕЧАТАЕТСЯ

На правах рукописи
УДК 593.3

ФРИЗЕН ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ В УСЛОВИЯХ АВАРИИ С БОЛЬШОЙ ТЕЧЬЮ

01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2004

Работа выполнена в Федеральном Государственном Унитарном Предприятии Опытном Конструкторском Бюро «Гидропресс».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор В.Л. Данилов

Официальные оппоненты:

Д.т.н., профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана Б.С. Сарбаев

Д.т.н., начальник лаборатории РНЦ «Курчатовский институт» Ан.А. Тутнов.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «ГНЦ РФ-ФЭИ»

Защита состоится 14 октября 2004 г. в 14.00 час на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 в Московском Государственном Техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан «9» сентября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.м.н., доцент Карпачев А.Ю.

704

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

При обосновании безопасности реакторной установки в аварийных режимах проводится расчетное определение температуры и механического состояния оболочек твэлов. В нормативных документах установлены максимальные проектные пределы, ограничивающие температуру оболочек твэла и степень их окисления, а также количество разгерметизированных твэлов. Превышение этих пределов приводит к тяжелым запроектным авариям, вызывающих разрушение активной зоны. Наиболее важной задачей обоснования безопасности является корректное, без чрезмерного консерватизма расчетное моделирование связанных процессов теплопроводности в твэле и теплообмена твэла с теплоносителем с одной стороны и термомеханического поведения оболочки твэла с другой.

В условиях аварии с большой течью происходит ухудшение теплоотвода от твэлов. Возникающий при этом перепад давления на оболочке твэла в сочетании с высокой температурой приводит к интенсификации процессов вязкопластического деформирования оболочки твэла. При соответствующем уровне температуры может произойти локальное раздутие оболочек твэлов, которое приводит к увеличению гидравлического сопротивления проходного сечения тепловыделяющей сборки (ТВС) и к ухудшению теплоотвода от твэлов, а также их возможному разрушению. В связи с этим тематика диссертационной работы направлена на разработку новых расчетных и экспериментальных методов анализа термомеханического состояния твэлов в целях обеспечения безопасности реакторной установки с ВВЭР-1000 в условиях постулируемой проектной аварии с течами теплоносителя из первого контура реакторной установки с ВВЭР-1000.

Цель и задача работы

Цели и задачи данной диссертационной работы заключались в разработке новых и уточнении известных методов расчета термомеханического поведения твэлов, сопряженных с теплофизическими процессами в самом твэле, как в анализах безопасности по критериям ПНАЭ Г-1-024-90 Правила ядерной безопасности реакторных установок (ПБЯ-89), так и в анализах прочности в постулируемой проектной аварии с течами теплоносителя из первого контура РУ с ВВЭР-1000.

Научная новизна работы заключается в:

1) разработке методики расчета температурного и механического состояния твэла в процессе аварии с большой течью теплоносителя из первого контура РУ с ВВЭР-1000;

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1698533
Фризен Е.А. Разработка мето
МГТУ им. Баумана БИБЛИОТЕКА

2) проведении экспериментальных исследований раздутий одиночных трубчатых образцов выполненных из штатных оболочек твэлов, в условиях моделирующих аварию с большой течью теплоносителя из первого контура;

3) построении уравнений ползучести материала циркониевых труб в диапазоне температур 600-1200 °С по результатам испытания трубчатых образцов;

4) развитии новых расчетных и экспериментальных подходов к анализу локального раздутия оболочек твэлов;

5) разработке методик решения частных задач термомеханики твэла;

Практическая ценность работы состоит в том, что методические разработки реализованы в виде вычислительных программ ТВЭЛ-3 и ТВЭЛ-3/2, применяемых в уточненных расчетных обоснованиях проектных решений для РУ с ВВЭР-1000 и для пред- и посттестовых анализов стендовых и внутриреакторных экспериментальных исследований.

Достоверность и обоснованность научных положений определяется использованием фундаментальных физико-математических положений механики сплошных сред для решения поставленной задачи, использованием апробированных математических методов, сопоставлением результатов расчетов по разработанным программам с аналитическими решениям, а также сравнением результатов численных расчетов с экспериментальными данными.

Апробация работы

В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследований докладывались на:

- 6-ой Российской конференции по реакторному материаловедению в НИИАР, г. Димитровград, 2000 г;
- конференции Методы и программное обеспечение расчетов на прочность, г. Туапсе, 2000 г;
- 3-й научно-технической конференции Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР, г. Подольск, 2003 г.;
- научных семинарах кафедры РК-5 Прикладная механика МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1999-2003 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Структура, объем и содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 186 стр., включая 68 рис., 15 табл. и список литературы из 81 наименования.

Во **введении** отмечена актуальность работы, сформулированы цель и задачи диссертации. Дано краткое изложение содержания диссертации.

В **первой** главе выполнен анализ существующих экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в рамках исследуемой проблемы.

Во **второй** главе описаны экспериментальные и теоретические исследования высокотемпературной ползучести циркониевых сплавов при сложном термомеханическом нагружении.

Третья глава посвящена изложению методики и алгоритмов численных моделей раздутия оболочек твэлов, как в осесимметричной, так и в трехмерной постановке.

В **четвертой** главе представлены результаты численных расчетов поведения оболочки твэла в аварии с большой течью теплоносителя из первого контура, как для одиночного твэла, так и для пучка твэлов.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы по проделанной работе.

Ниже охарактеризовано научное содержание и результаты диссертации.

ВВЕДЕНИЕ

Основой АЭС является реактор и, в первую очередь, его активная зона, состоящая из тепловыделяющих сборок (ТВС) с твэлами, омываемыми теплоносителем. Поведение реактора в аварийных режимах в значительной степени зависит от работоспособности и надежности твэлов. В постулируемых авариях с большими и, частично, малыми течами ожидается, что оболочки твэлов в области активной зоны с наибольшим перегревом раздуются, часть из них разорвется, и это создаст условия для блокировки проходного сечения, что приведет к ухудшению теплоотвода от твэлов, особенно при повторном заливе. Наихудшие условия для твэлов могут быть в аварии с большой течью теплоносителя из первого контура. Раздутие и разрушение оболочек твэлов происходит при высоком перепаде давления на стенке оболочки в области больших деформаций по вязкому типу. Поэтому основной задачей обоснования безопасности является корректное расчетное моделирование связанных процессов теплопроводности в твэле и теплообмена твэла с теплоносителем с одной стороны, и термомеханического поведения оболочки твэла с другой.

ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Деформированное состояние оболочки твэла в осесимметричной постановке может быть определено из решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих большие деформации ортотропной осесимметричной тонкостенной оболочки. При больших деформациях прогибы оболочки могут быть соизмеримы с ее начальными размерами, поэтому в процессе деформирования учитывается изменение размеров оболочки. Напряженное состояние является двумерным, т.к. радиальные напряжения σ_r малы в сравнении с окружными σ_t и

меридиональными σ_m и ими можно пренебречь. При рассмотрении осесимметричного раздутия касательные напряжения в меридиональном и окружных направлениях оболочки отсутствуют.

Осесимметричная схема локального раздутия построена на основе уравнений равновесия

$$p \cdot \pi \cdot r_0^2 = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h \cdot \sigma_m \cdot \sin\theta, \tag{1}$$

$$\sigma_m \cdot r \cdot \frac{d\theta}{dS} + \sigma_t \cdot \sin\theta = \frac{p \cdot r}{h}, \tag{2}$$

дифференциальных зависимостей текущего радиуса r от угла наклона θ касательной к меридиану (dS- элемент дуги меридиана оболочки,)

$$\frac{dr}{dS} = \cos\theta \tag{3}$$

и зависимостей между приращениями деформаций в меридиональном $d\varepsilon_m$, окружном $d\varepsilon_t$ и радиальном $d\varepsilon_r$ направлениях от приращений длины дуги, радиуса и толщины h с учетом условия несжимаемости

$$d\varepsilon_m + d\varepsilon_t + d\varepsilon_n = 0 \qquad d\varepsilon_m = \frac{d(\Delta S)}{\Delta S}, \quad d\varepsilon_t = \frac{dr}{r}, \quad d\varepsilon_r = \frac{dh}{h} \tag{4}$$

где p – перепад давления на оболочке твэла; r_0 – начальный срединный радиус оболочки твэла; h – текущая толщина оболочки твэла.

Поскольку анизотропия деформирования оболочек твэлов имеет ортотропный характер, то зависимости скоростей деформаций ползучести в меридиональном и окружном направлениях для тонкостенных оболочек имеют вид:

$$\begin{aligned} \xi_m^c &= \frac{3}{2 \cdot (F+G+H)} \cdot \frac{\xi_e^c}{\sigma_e} \cdot \left(H \cdot (\sigma_m - \sigma_t) + G \cdot \sigma_t\right); \\ \xi_t^c &= \frac{3}{2 \cdot (F+G+H)} \cdot \frac{\xi_e^c}{\sigma_e} \cdot \left(F \cdot \sigma_m + H \cdot (\sigma_t - \sigma_m)\right); \end{aligned} \tag{5}$$

где интенсивности напряжений и скорости ползучести вычисляются по формулам:

$$\sigma_e = \sqrt{F \cdot (\sigma_t - \sigma_m)^2 + G \cdot \sigma_m^2 + H \cdot \sigma_t^2}$$

$$\xi_e = \frac{1}{HF + FG + GH} \cdot \sqrt{H \cdot (F \cdot \xi_z - G \cdot \xi_t)^2 + F \cdot (G \cdot \xi_t - H \cdot \xi_r)^2 + G \cdot (H \cdot \xi_r - F \cdot \xi_z)^2}. \tag{6}$$

Здесь F,G,H – коэффициенты анизотропии.

Связь между интенсивностью напряжений и скоростью ползучести определяется на основе энергетической теории ползучести и повреждения. Решение задачи о деформировании отрезка оболочки при ползучести проводится шаговым методом по времени. Шаг по времени выбирается из условия, что при переходе к новому состоянию от предыдущего приращения деформаций являются малыми, а решение устойчивым.

НЕОСЕСИММЕТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Для описания процесса неосесимметричного раздутия применяется МКЭ. Рассматриваемый отрезок оболочки твэла разбивается на треугольные конечные элементы по регулярной схеме. Соотношение, связывающее скорости узловых перемещений $\{\dot{\delta}\}$ со скоростями деформаций по объёму конечного элемента, определяется линейным преобразованием

$$\{\xi\} = [B] \cdot \{\dot{\delta}\}. \tag{7}$$

Матрица [B] не зависит от координат и, следовательно, напряженно-деформированное состояние по объему конечного элемента является однородным. Это исключает необходимость численного интегрирования при вычислении матрицы жесткости элементов. Соотношения между скоростями деформаций $\{\xi\}$ и напряжениями имеют вид

$$\{\sigma\} = \sigma_e / \xi_e \cdot [D] \cdot \{\xi\}, \tag{8}$$

где $\{\sigma\} = \{\sigma_m \quad \sigma_t \quad \tau_{mt}\}^T$ - вектор действительных напряжений; [D]- квадратная матрица, зависящая только от коэффициентов анизотропии.

Матрица [D] имеет следующий вид

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{H+F}{HG+HF+FG} & \frac{H}{HG+HF+FG} & 0 \\ \frac{H}{HG+HF+FG} & \frac{H+G}{HG+HF+FG} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{N} \end{bmatrix}. \tag{9}$$

Матрица жесткости каждого конечного элемента в локальной системе координат получается из принципа возможных перемещений

$$[k_L] \cdot \{\dot{\delta}\} = \{f\},$$

где $[k_L] = \sigma_e / \xi_e \cdot [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot h \cdot s$ - матрица жесткости конечного элемента в локальных координатах; h, s – толщина и площадь элемента; {f} - вектор узловых усилий в локальной системе координат.

Матрица жесткости конечного элемента в глобальной системе координат вычисляется с помощью преобразования

$$[k_G] = [L]^T \cdot [k_L] \cdot [L], \tag{10}$$

где [L] –матрица направляющих косинусов.

После вычисления матриц жесткости отдельных элементов в глобальной системе координат принцип возможных перемещений применяется ко всему рассматриваемому отрезку оболочки. В итоге получается основное матричное уравнение МКЭ

$$[K]\{V\}=\{R\}, \tag{11}$$

где {V} и {R} - векторы скоростей перемещений и усилий в узлах сетки конечного элемента; [K] - матрица жесткости всего отрезка оболочки.

Матричное уравнение (11) представляет собою систему нелинейных дифференциальных уравнений со многими неизвестными, поскольку коэффициенты матрицы жесткости [K] зависят не только от узловых координат $\bar{a}_i$, но и от истории изменения напряженно-деформированного состояния конечных элементов в процессе их нагружения, а также от скоростей узловых перемещений в данный момент времени, определяющих коэффициент σ_e/ξ_e в уравнениях (8). Компоненты вектора {R} также нелинейно зависят от скоростей узловых перемещений. Таким образом, систему уравнений (11) расчета высокотемпературной ползучести оболочек можно записать в виде

$$\left[K\left(\bar{a}_i, \left\{\sigma_e/\xi_e\right\}\right)\right]\cdot\{V\} = \{R(\{V\})\}, \tag{12}$$

а решение проводится путем линеаризации по приращениям деформаций на временном шаге интегрирования по схеме Эйлера

$$\Delta\varepsilon^c_{mk} = \xi^c_{m,k-1}\cdot\Delta t_k, \quad \Delta\varepsilon^c_{tk} = \xi^c_{t,k-1}\cdot\Delta t_k, \; \omega_k = \omega_{k-1} + \dot{\omega}_k\cdot\Delta t_k \tag{13}$$

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ В ТВЭЛЕ

Нестационарное нелинейное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\rho\cdot C(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial\tau} = \frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda(T)\cdot r\cdot\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right] + \frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial}{\partial\varphi}\left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial\varphi}\right] + q_v(r,z,\varphi,\tau) \tag{14}$$

при следующих начальных:

$T(r,z,\varphi,\tau=0) = T_0(r,z,\varphi)$;

и граничных условиях:

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{при } r = R_{Твн}$$

$$-\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_B(\tau)\cdot(T - T_B(\tau)) \quad \text{при} \quad r = R_{Тн}$$

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial\varphi} = 0 \quad \text{при} \quad \varphi = 0 \quad \text{и} \quad \varphi = \pi$$

где ρ - плотность, C(T) –удельная теплоемкость, $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности, q_V – объемное энерговыделение в твэле, $R_{Твн}$ – внутренний радиус топливного сердечника, $R_{Тн}$ – наружный радиус оболочки твэла, $\alpha_B(\tau)$ - коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности оболочки твэла, $T_B(\tau)$ - температура теплоносителя.

Тепловой поток через газовый зазор между оболочкой твэла и топливным сердечником определяется через коэффициент теплопередачи, рассчитываемый по формуле:

$$\zeta = \zeta^{ТЕПЛ} + \zeta^{ИЗЛ} + \zeta^{КОНТ} \qquad (15)$$

где $\zeta^{ТЕПЛ}$ - коэффициент теплопередачи за счет теплопроводности, $\zeta^{ИЗЛ}$ - коэффициент теплопередачи за счет излучения, $\zeta^{КОНТ}$ - коэффициент теплопередачи за счет контакта топливного сердечника и оболочки твэла.

Коэффициент теплопередачи за счет теплопроводности рассчитывается по формуле:

$$\zeta^{ТЕПЛ} = \frac{\lambda_Г}{\Delta_Г + g_1 + g_2} \qquad (16)$$

где g_1 , g_2 - длина температурного скачка, соответственно, на границе топливо-газ и оболочка-газ, $\Delta_Г$ - величина газового зазора, $\lambda_Г$ - коэффициент теплопроводности газа в зазоре.

Величина зазора вычисляется из решения сопряженной задачи термомеханического поведения твэла.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ И ПОВРЕЖДЕНИЯ

Ранее были проведены исследования текстурированного сплава Э110 в интервале температур 295-1475К с целью выявления особенностей пластического деформирования и определения параметров анизотропии пластический деформации, которые могут быть использованы для предсказания поведения оболочек при разогреве их до температуры 1500 К. Эти исследования показали, что анизотропия пластической деформации сплава по мере увеличения температуры уменьшается, хотя уменьшение анизотропии до температуры 625 К незначительно, а при температурах выше 1275 К сплав становится изотропным.

Для описания взаимосвязанных процессов ползучести и повреждения используется энергетический вариант теории ползучести и прочности. В качестве структурного параметра целесообразно использовать параметр ω, отражающий накопление рассеянных по объему тела повреждений, который в начальный момент времени равен ω=0, а в момент разрушения – ω=1.

Экспериментально подтверждено, что протекание процессов деформирования с одинаковой интенсивностью напряжений и удельной энергией рассеяния A=A(t) не зависит от вида напряженного состояния и предыстории нагружения, т.е. принимается, удельная энергия рассеяния, накопленная к моменту разрушения, A_* - величина постоянная, характерная для каждого материала, не зависящая ни от уровня действующих нагрузок, ни от характера их изменения и имеющая постоянное значение в довольно широком диапазоне. Таким образом, параметр повреждаемости ω имеет конкретный механический смысл, используя который можно получить

$$\frac{A(t)}{A_*} = \omega(t); \qquad \int_0^t \frac{W dt}{A_*} = \int_0^t \dot{\omega} dt; \qquad \dot{\omega} = \frac{\sigma_e \cdot \xi_e^c}{A_*} \qquad (17)$$

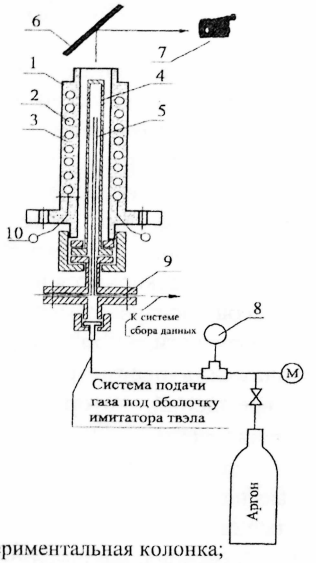
где $\sigma_e \cdot \xi_e^c = \sigma_{ij} \cdot \xi_{ij}^c$.

Кинетические уравнения ползучести и повреждения для заданного температурного интервала имеют вид

$$\begin{cases} \xi_e^c = \dfrac{k_0 \cdot \exp\left(-\dfrac{Q_c}{RT}\right) \cdot \sigma_e^n}{1-\omega}, \\ \dot{\omega} = \dfrac{\sigma_e \cdot \xi_e^c}{A_*} \end{cases} \qquad (18)$$

Здесь k_0 , n – коэффициенты, получаемые по результатам испытаний; $\dot{\omega}$ – скорость накопления повреждаемости; Q_c – удельная энергия активации материала; R – постоянная Больцмана; A_* – удельная энергия рассеяния, накопленной к моменту разрушения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ***ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗДУТИЯ И*** *РАЗРУШЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ*



1 - экспериментальная колонка;
2 - спираль электрообогрева;
3 - засыпка из окиси алюминия;
4 - имитатор твэла;
5 - установка термопар;
6 - зеркало;
7 - видеокамера;
8 - датчик давления;
9 - узел вывода термопар;
10 - подвод электропитания.

Рис.1 Схема экспериментальной установки

Целями экспериментальных исследований являлось изучение процесса раздутия трубчатых образцов оболочек твэл из сплавов Э635 и Э110, определение максимальной окружной деформации и времени разрыва от статических параметров нагружения: внутреннего давления и температуры оболочки. Кроме того, характеристики ползучести и пластичности, получаемые на плоских микрообразцах, не могут быть применены для стадии быстрого роста деформаций, в то время как эти же характеристики, получаемые из кривых изменения максимальных окружных деформаций для трубчатых образцов, могут быть использованы для учета третьей стадии ползучести. Целями проведенных экспериментов также являлось получение уравнений состояния циркониевых сплавов Э110 и Э635, а также верификация моделей раздутия (баллунинга), реализованных в разработанных программах ТВЭЛ-3 и ТВЭЛ-3/2, применяемых в уточненных расчетных обоснованиях проектных решений для РУ с ВВЭР-1000 и для пред- и посттестовых анализов стендовых и

внутриреакторных экспериментальных исследований.

Эксперименты проводились с использованием видеосъемки всего процесса раздутия оболочек твэл, начиная с момента подачи давления в разогретый образец и до окончательной разгерметизации оболочек. Известные отечественные и зарубежные работы при использовании общепринятой методики, которая предполагает в результате одного опыта получение только одной точки в трехмерном пространстве (температура, перепад давления, время), дают только дискретные точки в отдельные моменты времени. Особенно мало информации о моментах быстрого раздутия оболочки перед разрывом, от чего прежде всего зависит величина предельной деформации. Предложенная в настоящей работе методика записи процесса деформации с помощью видеосъемки позволяет получить эту информацию на одном образце для каждого фиксированного значения температуры и перепада давления. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1

Испытуемый трубчатый образец представлял собой заглушенный сверху вертикальный отрезок оболочки длиной 362 мм. Снизу под оболочку подавался аргон. Через нижнюю открытую часть оболочки во внутрь вводились кабельные термопары. Образец помещался в трубчатую печь со спиральным электрообогревом. Толщина окисленного слоя в этих условиях в диапазоне исследуемых температур и продолжительности опытов не превышала 0,5-2 % от начальной толщины оболочки. Видеосъемка производилась сверху через направляющее зеркало, установленное над верхним торцом нагревательной печи, закрытой кварцевым стеклом.

Обработка полученного видеоматериала производилась на персональном компьютере с использованием платы видеоввода-вывода и стандартного программного обеспечения. Максимальная погрешность определения относительной деформации не превышала 2,5 % при стандартном экранном разрешении.

Исследования проведены в стационарных условиях в диапазоне температур от 680 до 900 °С и при перепадах давлений на оболочке от 2 до 12 МПа. С оболочками из сплава Э110 было проведено 24 опыта. Оболочки из сплава Э110 имели наружный диаметр 9,15 мм, внутренний 7,72 мм. С оболочками из сплава Э635 проведено 25 опытов. Наружный диаметр оболочек из сплава Э635 9,13 мм, внутренний 7,73 мм.

В качестве примера на рис. 2-3 приведены графики изменения окружной деформации двух серий опытов для различных значений температур оболочек твэл при давлении 2 МПа

Из графиков видно, что изменение окружной деформации в начале опыта имеет линейный характер. Далее происходит ускоренное развитие деформации, переходящее в разрыв. Из этих графиков можно видеть, что верхняя граница изменения деформации, подчиняющаяся линейному закону, находится в пределах 10 - 15 %.

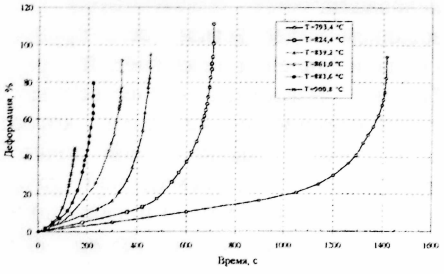


Рис. 2 Изменение окружной деформации (сплав Э635)

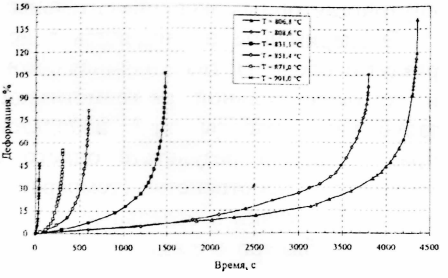


Рис. 3 Изменение окружной деформации (сплав Э110)

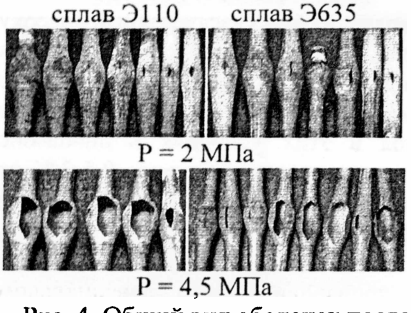


Рис. 4 Общий вид оболочек после опытов

На рис. 4 приведен общий вид оболочек твэл после опытов. Имитаторы твэл расположены по возрастанию температуры слева направо. Из рис. 4 видно, что значение окружной деформации с увеличением температуры уменьшается, а степень раскрытия оболочки увеличивается. При температуре до 850 °С и низком давлении в результате разгерметизации в местах раздутия образуется едва заметная трещина, а деформация достигает высоких значений. С увеличением температуры до 850-900 °С степень раскрытия заметно увеличивается при незначительной деформации. При высоких значениях давления при разрыве оболочки возникали реактивные силы, которые приводили к значительному раскрытию оболочки и образованию широкого зева с вывернутыми краями.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЗУЧЕСТИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На стенде ФГУП ОКБ Гидропресс проведены испытания трубчатых образцов оболочек твэлов из сплавов Э110 и Э635 в температурных и силовых условиях, характерных для аварии с большой течью теплоносителя из первого контура. Определение параметров k_0 , n, A_* системы уравнений (18) сплавов Э110 и Э635 по результатам экспериментов осуществлялось путем решения задачи раздутия в соответствии с осесимметричным подходом (1) – (6). С учетом зависимости $\sigma_t=2\sigma_z$ и (5), (6) скорости деформаций ползучести для анизотропного материала определяются зависимостями:

$$\xi_t^c = \frac{3}{2\cdot(F+G+H)}\cdot\frac{\xi_e^c}{\sigma_e}\cdot\sigma_z\cdot[2\cdot F+H]$$

$$\xi_z^c = \frac{3}{2\cdot(F+G+H)}\cdot\frac{\xi_e^c}{\sigma_e}\cdot\sigma_z\cdot[G-H] = \frac{3}{2\cdot(F+G+H)}\cdot\xi_t^c\cdot\frac{G-H}{2\cdot F+H} \qquad (19)$$

$$\xi_r^c = -\frac{3}{2\cdot(F+G+H)}\cdot\frac{\xi_e^c}{\sigma_e}\cdot\sigma_z\cdot[2\cdot F-G] = -\frac{3}{2\cdot(F+G+H)}\cdot\xi_t^c\cdot\frac{G-H}{2\cdot F+H}$$

Интенсивность скоростей деформаций ползучести выражается через скорость деформации в окружном направлении:

$$\xi_e = \xi_t\cdot\left[\frac{1}{HF+FG+GH}\cdot\sqrt{H\cdot\left(F\cdot\frac{G-H}{2\cdot F+H}-G\right)^2+F\cdot\left(G+H\cdot\frac{2\cdot F+G}{2\cdot F+H}\right)^2+G\cdot\left(-H\cdot\frac{2\cdot F+G}{2\cdot F+H}-F\cdot\frac{G-H}{2\cdot F+H}\right)^2}\right] \qquad (20)$$

После ряда преобразований можно придти к следующему выражению для параметра повреждаемости

$$\omega = \int_0^t\frac{\sigma_e\cdot\xi_e}{A_*}dt = \frac{\sqrt{4F+G+H}}{2F+H}\cdot\frac{\sigma_{e0}}{A_*}\cdot\int_1^x x\cdot dx = \frac{\sqrt{4F+G+H}}{2F+H}\cdot\frac{\sigma_{e0}}{2\cdot A_*}\cdot\left(x^2-1\right), \qquad (21)$$

где безразмерный диаметр оболочки твэла $x = D/D_0$, а $\sigma_{e0} = \frac{\pi\cdot D_0}{4\cdot h_0}\cdot\sqrt{4\cdot F+G+H}$.

Из условия того, что при разрушении оболочки твэла ω=1, можно найти удельную энергию рассеяния, накопленную к моменту разрушения, которая является постоянной величиной и зависит только от температуры.

$$A_* = \frac{\sqrt{4F+G+H}}{2F+H}\cdot\frac{\sigma_{e0}}{2}\cdot\left(x^2-1\right) \qquad (22)$$

Удельная энергия рассеяния связана с энергией активации механизмов ползучести, действующих в данном температурном интервале. В данной работе, экспериментально получена зависимость удельной энергии рассеяния, накопленной к моменту разрушения в зависимости от температуры в виде:

$$A_* = a_1\cdot\exp(-a_2\cdot T) \qquad (23)$$

После логарифмирования выражения (23) получается линейная зависимость для аппроксимации удельной энергии рассеяния, накопленной к моменту разрушения. Определение параметров a_1 и a_2 осуществлялось методом наименьших квадратов.

Для отыскания коэффициентов в системе уравнений (18) применялась методика регрессионного анализа.

После нахождения коэффициентов в системе уравнений (18) были проведены верификационные расчеты по разработанным программам ТВЭЛ-3 и ТВЭЛ-3/2.

На рис. 5 и 7 приведено сравнение экспериментальных значений времени разгерметизации оболочек твэлов в опытах с численными значениями для Э110 и Э635, а на рис. 6 и 8 аналогичные графики для максимальной относительной окружной деформации. Также было проведено по два опыта для каждого из сплавов при изменяющейся во времени температуре и постоянном избыточном

давлении. На рис. 9 приведены параметры опытов при изменяющейся температуре оболочки, выполненной из сплава Э110, а на рис.10 графики изменения относительной окружной деформации для сплава Э110 полученные расчетным и экспериментальным путем, а на рис. 11,12 аналогичные графики для сплава Э635.

Сплав Э110

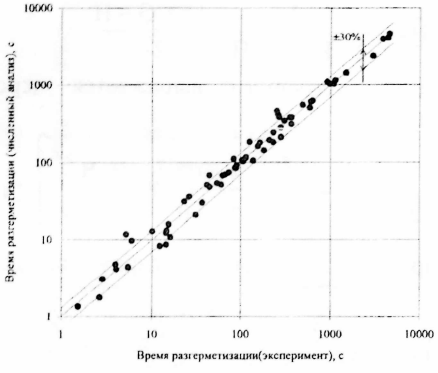


Рис.5 Сравнение экспериментальных значений времени разгерметизации с численными значениями

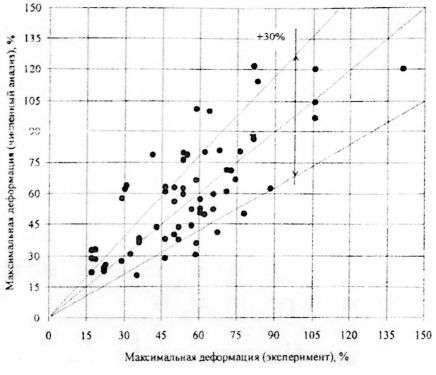


Рис.6 Сравнение экспериментальных значений максимальной окружной деформации с численными значениями

Сплав Э635

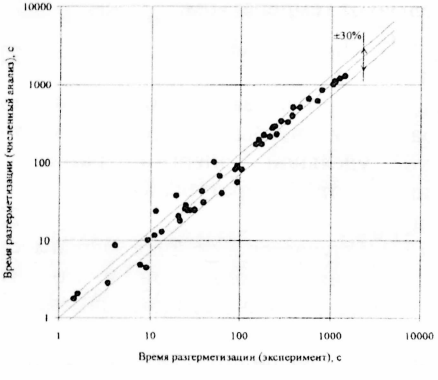


Рис.7 Сравнение экспериментальных значений времени разгерметизации с численными значениями

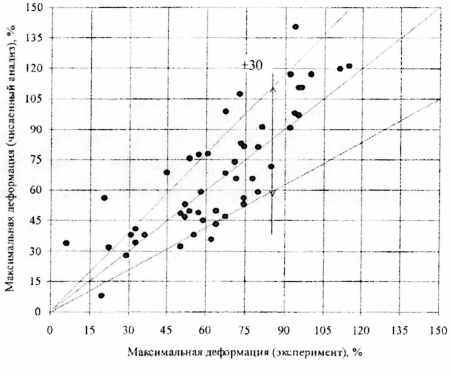


Рис.8 Сравнение экспериментальных значений максимальной окружной деформации с численными значениями

Сплав Э110

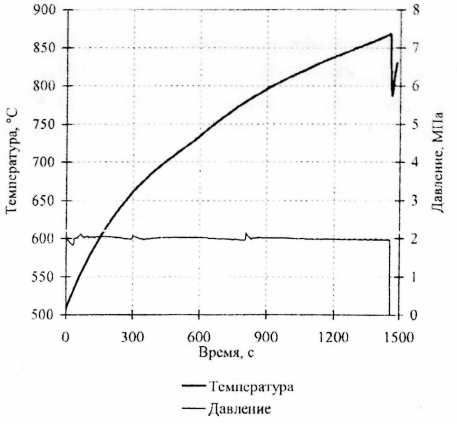


Рис.9 Изменение параметров опыта

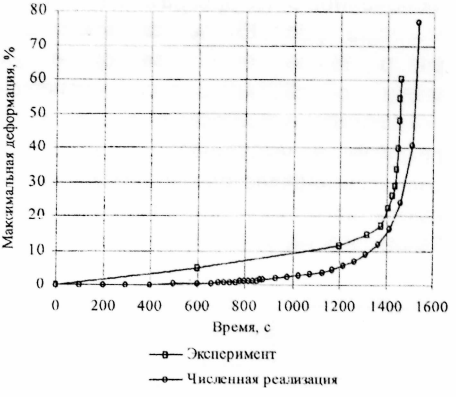


Рис.10 Зависимость максимальной окружной деформации от времени.

Сплав Э635

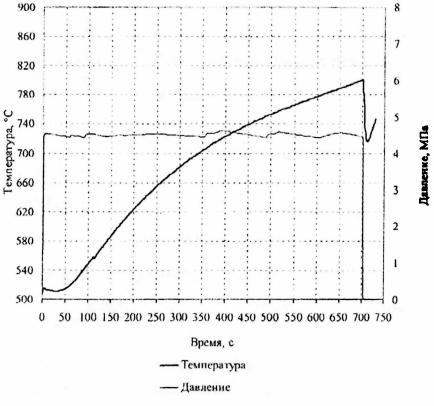


Рис.11 Изменение параметров опыта

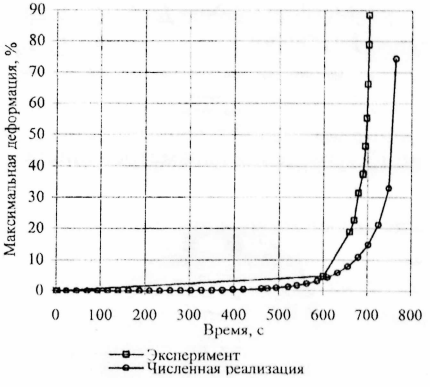


Рис.12 Зависимость максимальной окружной деформации от времени.

ПОСТТЕСТОВЫЙ РАСЧЕТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СТЕНДЕ ПАРАМЕТР-М

На стенде ПАРАМЕТР-М в ФГУП НИИ НПО ЛУЧ были проведены испытания модельной сборки, состоящей из 37 имитаторов твэлов в условиях, характерных для протекания аварии с большой течью. Теплофизическое состояние в межтвэльном пространстве и температура оболочек твэлов определялись из

решения связанной задачи с использованием теплогидравлической программы с включенной в нее программой ТВЭЛ-3.

На рис. 13 показано изменение параметров опыта, а на рис. 14 - распределение относительной окружной деформации по длине имитатора модельной сборки, а также экспериментально замеренные значения. В случае локального перегрева в экспериментальных сборках имеет место локальное раздутие и выпучивание, показанное на рис. 15 и 16. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных подтверждает правильность выбранного подхода к анализу поведения твэлов в активной зоне в обоснованиях безопасности.

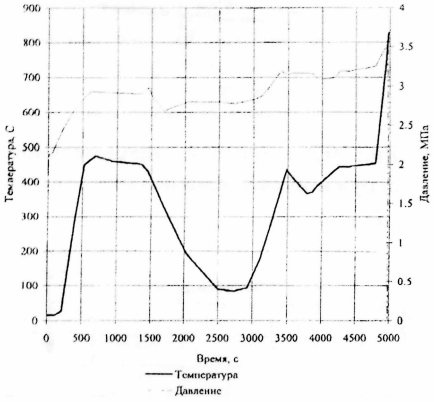


Рис.13 Изменение параметров опыта

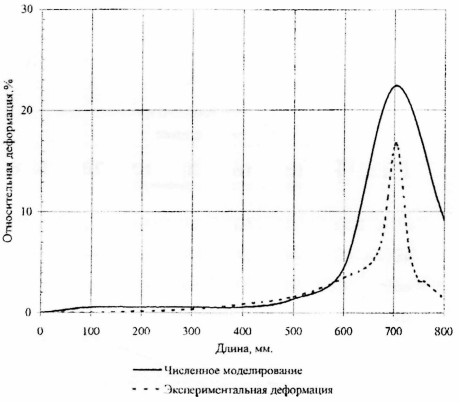


Рис. 14 Распределение относительной окружной деформации по длине имитатора

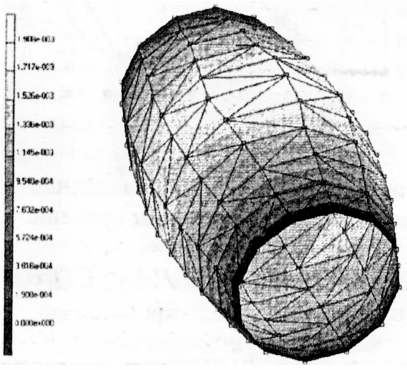


Рис. 15 Расчетный вид отрезка оболочки твэла при локальном раздутии

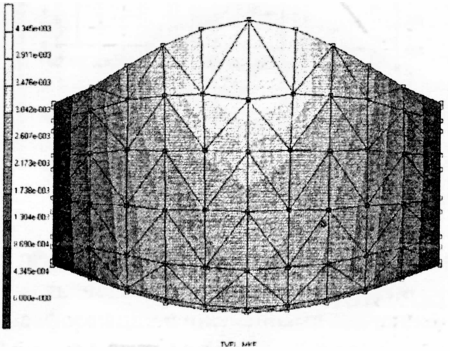


Рис. 16 Расчетный вид отрезка оболочки твэла при локальном раздутии

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Диссертационная работа посвящена разработке расчетных методик, позволяющих анализировать термомеханические процессы, протекающие в твэле тепловыделяющей сборки реакторной установки с ВВЭР-1000 в условиях протекания аварии с большой течью теплоносителя из первого контура, а также разработке вычислительных программ, позволяющих выполнять расчеты при обосновании безопасности реакторной установки при проектных авариях.

В работе получены следующие основные результаты:

1. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование ползучести циркониевых сплавов Э110 и Э635.

1.1 Разработана методика проведения экспериментов по изучению процессов раздутия трубчатых образцов оболочек твэл из сплавов Э635 и Э110 и определению максимальной окружной деформации и времени разрыва.

1.2 Проведены экспериментальные исследования по изучению процесса раздутия трубчатых образцов, вырезанных из штатных оболочек твэлов, по результатам которых определены зависимости максимальной окружной деформации от времени для различных диапазонов внутреннего давления и температуры оболочки твэла.

1.3 По результатам серии экспериментов получены кривые ползучести для циркониевых сплавов Э110 и Э635 в диапазоне температур 600-1200 °С и перепада давления на стенке оболочки твэл 2-12 МПа.

1.4 Установлены уравнения состояния, описывающие ползучесть и разрушение циркониевых сплавов в исследованном температурном диапазоне, и разработана методика определения параметров материала, входящих в данные уравнения.

2.Разработаны математические модели деформирования и разрушения твэла в условиях аварии с большой течью теплоносителя из первого контура.

2.1 Разработаны модели термомеханического поведения оболочки твэл в двумерной (осесимметричной) и трехмерной (неосесимметричной) постановках, на основе метода конечных элементов в форме метода перемещений, включающие в себя модели теплопроводности в твэле и деформацию оболочки твэла в условиях высокотемпературной ползучести.

2.2 Разработаны модели двумерной и трехмерной теплопроводности в твэле.

2.3 По разработанным методикам написаны вычислительные программы ТВЭЛ-3 и ТВЭЛ-3/2, которые введены в опытно-промышленную эксплуатацию в ФГУП ОКБ Гидропресс.

3. Проведена верификация моделей деформирования и локального раздутия оболочек твэлов на испытаниях трубчатых образцов и модельных сборок имитаторов твэлов на стенде ПАРАМЕТР-М. Стендовые испытания были использованы как для верификации моделей термомеханического поведения оболочки твэла, так и для верификации модели связанного решения задач

теплообмена твэла с теплоносителем и деформированием твэла. Разработанные вычислительные программы ТВЭЛ-3 и ТВЭЛ-3/2 внедрены в опытно-промышленную эксплуатацию в ФГУП ОКБ Гидропресс, в том числе как включенные модули в теплогидравлический код. Эти программы, в отдельности и вместе с теплогидравлическим кодом используются для проведения уточненных расчетов по обоснованию безопасности ВВЭР-1000 при существенном снижении консервативности этих обоснований, а также в посттестовых анализах стендовых и внутриреакторных испытаний модельных твэльных сборок.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Фризен Е.А., Семишкин В.П, Каретников Г.В. Построение численной модели осесимметричного раздутия оболочке твэлов ВВЭР-1000 в максимальной проектной аварии //Сборник докладов шестой Всероссийской конференции по реакторному материаловедению. -Димитровград, 2000. -Т.2, часть 3. -С. 89-94

2. Экспериментальное исследование раздутия и разрушения оболочек твэлов ВВЭР-1000 в условиях максимальной проектной аварии /Г.В.Каретников, А.С. Богданов, Е.А.Фризен и др. //Сборник докладов шестой Всероссийской конференции по реакторному материаловедению. -Димитровград, 2000. -Т.2, часть 3. -С. 249-257

3. Моделирование локального раздутия оболочек твэлов в авариях с течами. /В.П. Семишкин, Е.А. Фризен, В.Л. Данилов и др. // Методы и программное обеспечение расчетов на прочность. Сборник докладов 1-й Российской конференции. -М.:ФГУП НИКИЭТ, 2001. . -С.39-45

4. Стендовые и реакторные эксперименты для верификации вычислительной программы ТВЭЛ-3. Теплофизические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация) /В.П. Семишкин, С.И. Зайцев, Е.А. Фризен и др. //Тезисы докладов Всероссийской конференции. -Обнинск, -2001. -С. 38

5. Семишкин В.П., Фризен Е.А. Реализация методов расчета деформирования твэлов в вычислительных программах ТВЭЛ-3 и ТВЭЛ-3/2, предназначенных для использования в теплогидравлических кодах // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сборник докладов 3-й Всероссийской научно-технической конференции. -Подольск, 2003. -Т.3. -С.194-201

6. Данилов В.Л., Фризен Е.А., Семишкин В.П.. Расчетное моделирование раздутия оболочек твэлов ВВЭР-1000 в авариях с большой течью // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2003. -№12 – С.8-12.

7. Dragunov Yu., Semishkin V., Frizen Eu. Calculation of Fuel Rod Cladding Deformation for a Reactor Plant WWER-1000 under LB LOCA // Transaction of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17). -Prague, 2003. -Paper C05-3

Подписано в печать 02.09.2004 заказ 156 объем 1.0 п.л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана