

1551261

На правах рукописи

Падалкин Борис Васильевич

*

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
АВАРИЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
АЭС В УСЛОВИЯХ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Специальность 01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1996

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель : доктор технических н.аук,
профессор К.И.Романов

Официальные оппоненты : доктор технических наук,
профессор В.С.Зарубин
кандидат технических наук,
с.н.с. В.П.Семишкин

Ведущее предприятие - указано в решении Совета.

Защита диссертации состоится 20 июня 1996 г. на заседании
специализированного совета МГТУ им.Н.Э.Баумана Д 053.15.08 по адресу :
107005, г.Москва, 2-ая Бауманская ул., дом 5.

Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатями,
просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан “___” _____ 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
к.т.н., доцент В.В.Дубинин



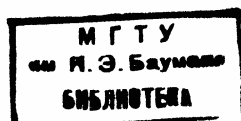
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Атомные электростанции занимают сегодня заметное место в общемировом производстве энергии, на их долю приходится около 16 % всего вырабатываемого в мире электричества. Атомные станции способны обеспечить растущие энергетические потребности человечества при приемлемых расходах и минимальных экологических последствиях, поскольку они не потребляют кислород, не выбрасывают, подобно станциям на органическом топливе, вредные и опасные вещества в окружающую среду, на них отсутствуют трудоемкие технологические процессы. Однако аварии, имевшие место в последние годы (на АЭС Three Mile Island в 1979 и на Чернобыльской АЭС в 1986), серьезно подорвав доверие к атомной энергетике, показали в то же время исключительную актуальность технических и организационных мероприятий, связанных с безопасностью эксплуатации и направленных на уменьшение последствий аварий, связанных с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду.

При проектировании атомных энергетических установок особое внимание уделяется максимальной проектной аварии (МПА), под которой понимают самый тяжелый по своим последствиям отказ оборудования, для которого рассчитывается ход и последствия аварии. Исходя из МПА, разрабатываются системы безопасности и строятся защитные сооружения.

Для создания научно обоснованных принципов проектирования и эксплуатации АЭС необходимо дальнейшее совершенствование теоретических и экспериментальных методов исследования прочности элементов АЭС как при нормальной эксплуатации, так и при авариях, в частности в условиях максимальной проектной аварии.

Максимальная проектная авария атомного реактора, например канального реактора типа РБМК, сопровождается сильным разогревом активной зоны. Температура находящихся в ней конструкций может достигать 1073-1273 К (800°- 1000°С), что приведет к развитию больших деформаций, а затем и к разрушению элементов конструкции активной зоны вследствие ползучести. Подобные задачи для АЭС до сих пор не решались. К примеру, в справочной литературе отсутствуют систематические данные по высокотемпературной ползучести широко применяемых в реакторостроении сплавов циркония.



Таким образом, для повышения уровня безопасности и совершенствования конструкции АЭС необходимо дальнейшее развитие экспериментальных, аналитических и численных методов теории ползучести, позволяющих решать практически важные задачи обеспечения безопасности АЭС.

Цель работы - экспериментальное и теоретическое исследование физико-механических свойств циркониевого сплава в диапазоне температур и нагрузок, характерных для максимальной проектной аварии, в условиях как одноосного, так и неодоосного напряженного состояния, а также разработка методов математического моделирования процессов горячего формоизменения конструкций активной зоны и, в частности, труб технологических каналов реакторов типа РБМК.

Прежде всего, необходимо разработать методику изучения кратковременной ползучести и прочности циркониевого сплава в температурно-силовом интервале, характерном для максимальной проектной аварии в условиях одноосного напряженного состояния и на основе экспериментальных исследований определить параметры уравнений состояния, необходимые для решения задач аварийного деформирования элементов конструкций.

Поскольку напряженное состояние реальных конструкций является сложным, необходима опытная проверка и уточнение выбранных в результате исследований одноосной ползучести уравнений состояния путем проведения соответствующих экспериментов, в связи с чем актуальной является задача разработки испытательной машины, позволяющей изучать ползучесть трубчатых образцов при температурах и нагрузках, могущих иметь место при максимальной проектной аварии.

Очевидно, что решение реальных задач аварийного деформирования конструкций активной зоны возможно только численными методами. Поэтому необходимо иметь алгоритмы и программы для исследования термомеханических процессов, позволяющие исследовать формоизменение деталей в ходе аварии, с учетом их взаимодействия и изменения внешних условий. Их использование позволит проводить варианты расчетов и определять оптимальные, с точки зрения безопасности, технические решения.

Научная новизна. Предложена новая постановка задач аварийного деформирования элементов конструкций атомных энергетических установок, связанная с изучением совместно протекающих процессов

ползучести и разрушения при больших деформациях. Для реализации данного подхода :

- впервые проведено экспериментальное исследование ползучести и разрушения циркониевого сплава в широком интервале температур, при уровнях напряжений, характерных для максимальной проектной аварии реактора типа РБМК, разработана новая методика определения параметров материала и получены уравнения состояния, описывающие поведение материала в исследовавшихся условиях :

- для исследования кратковременной ползучести в условиях сложного напряженного состояния при больших перемещениях, что является характерным для изучаемых процессов, создана испытательная машина, позволяющая проводить испытания трубчатых образцов, нагруженных крутящим моментом, растягивающей силой и внутренним давлением. разработана методика проведения таких испытаний и проведены соответствующие эксперименты ;

- разработана методика математического моделирования процессов горячего формоизменения конструкций активной зоны (в работе рассмотрена труба технологического канала реактора типа РБМК) при максимальной проектной аварии, причем в качестве численного метода использован метод конечных элементов в форме метода перемещений.

Достоверность результатов работы подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных по одноосной и не одноосной ползучести, применением методов математической статистики для обработки результатов экспериментов и получения параметров уравнений состояния, а также для проверки адекватности использованных уравнений ползучести и повреждаемости результатам опытов, сравнением между собой решений, полученных различными, аналитическими и численными, методами.

Практическая ценность работы состоит в том, что предложены экспериментальные и расчетные методы, а также математические модели, для исследования аварийного деформирования конструкций активной зоны атомного реактора, выполненных из сплавов циркония, а также впервые изучены ползучесть и разрушение циркониевого сплава трех различных термомеханических обработок при характерных значениях температур и напряжений. Применение этих методов позволяет выбирать оптимальные конструктивные решения при создании новой техники, определить особенности формоизменения существующих конструкций - труб

технологических каналов (ТК) реакторов типа РБМК, при различных сценариях развития максимальной проектной аварии и, в частности, найти время разрушения трубы ТК.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты докладывались на Второй Международной научно-технической конференции "Актуальные проблемы фундаментальных наук" (Москва, 1994 г.), на научных конференциях по Межвузовской программе "Динамика, прочность и надежность машин" (Москва, 1993, 1994 и 1995 гг.), а также на научном семинаре "Пластичность" в МГТУ им.Н.Э.Баумана в 1995 г. и на научно-техническом семинаре в НИКИЭТ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, раздела с основными выводами по работе и списка литературы. Работа изложена на 178 страницах, содержит 73 рисунка и 9 таблиц. Библиография насчитывает 145 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, содержатся краткие сведения о максимальной проектной аварии атомного реактора, сформулированы основные цели настоящей диссертации.

В первой главе кратко описано устройство атомного реактора канального типа (на примере реактора РБМК), отмечены особенности конструкции его активной зоны и, в частности, технологического (топливного) канала, имеющие значение для аварийного деформирования. На основе существующих данных, проанализирован ход максимальной проектной аварии, отмечены стадии ее развития. Вид технологического канала и ход деформирования трубы при аварии представлены на рис.1. Отмечается, что при максимальной проектной аварии детали активной зоны, в частности, труба технологического канала, нагреваются до высоких температур, порядка $(0,4 - 0,6) T_m$, и деформируются за счет ползучести. Необратимые деформации достигают десятков процентов, разрушение носит, как правило, смешанный, вязко-хрупкий характер. Следовательно, необходимо исследование процессов формоизменения с учетом реальных свойств материала, а также накопления повреждений. Подобные представления о поведении материала конструкций активной зоны в условиях максимальной проектной аварии позволяют использовать для

теоретического описания этих процессов приемы и методы, ранее предложенные для решения технологических задач теории ползучести. Изложены подходы к построению уравнений состояния реономной среды, предложенные в работах А.А.Ильюшина, Л.М.Качанова, А.М.Локошенко, Н.Н.Малинина, С.Т.Милейко, А.Ф.Никитенко, Ю.Н.Работнова, О.В.Соснина, С.А.Шестерикова, И.Ю.Цвелодуба и других авторов. Рассмотрены известные способы оценки долговечности элементов конструкций, в связи с чем обсуждаются различные критерии длительной прочности. Так как такие критерии построены обычно по результатам экспериментов с тонкостенными трубчатыми образцами, рассматривается испытательное оборудование, позволяющее проводить эксперименты по неодноосной ползучести. Приводятся сведения о физико-механических свойствах применяемых в атомной энергетике циркониевых сплавах, в частности, о сплаве циркония с 2,5% ниобия, использованном для изготовления труб технологических каналов реакторов. Обращается внимание на существующие противоречия в представлениях различных авторов о механизмах, ответственных за ползучесть и разрушение циркониевых сплавов. Отмечается, что в имеющейся литературе, как нормативной, так и справочной, вопросы аварийного деформирования не рассматриваются, сведения о свойствах применяемых в реакторостроении материалов, в том числе циркониевых сплавов, ограничены диапазоном рабочих температур, до 623-673 К (350°-400°С). Основное внимание в рассматривавшихся работах уделено расчетам тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), поскольку они в значительной степени определяют технико-экономические характеристики реакторной установки. Проведен анализ тех публикаций, предметом рассмотрения в которых стали высокотемпературные свойства циркония, изучены предложенные уравнения состояния. Обсуждается также влияние облучения на свойства циркониевых сплавов, причем отмечено, что известное явление радиационного упрочнения исчезает при высоких температурах, что открывает возможность для проведения расчетов процессов аварийного деформирования конструкций активной зоны с использованием характеристик необлученного материала. Рассмотрены известные методики расчета ТВЭлов в условиях аварии с потерей теплоносителя, поскольку по постановке эти задачи близки к решаемым в диссертации. Выполненный обзор литературных источников привел к следующим важным выводам. Во-первых, задача изучения аварийного деформирования элементов

конструкций активной зоны по своему характеру и возможным методам решения близка к технологическим задачам теории ползучести, рассматривавшимся в работах Н.Н.Малинина и исследователей его школы. Во-вторых, систематические данные по высокотемпературным свойствам применяемых в реакторостроении циркониевых сплавов, в частности, по одноосной и не одноосной ползучести в условиях, характерных для аварийных ситуаций, практически отсутствуют.

Во второй главе изложены методика и результаты экспериментального исследования кратковременной ползучести циркониевого сплава трех различных термомеханических обработок в условиях одноосного растяжения, при температурах 773-1273 К (500° - 1000° С) и в диапазоне напряжений от 5 до 80 МПа. Приводятся кривые ползучести для всех исследованных температур и термообработок. Выяснено, что при низких температурах, до 873 К (600° С) и при заданных уровнях напряжений, деформации ползучести не превосходят 5-7% за все время развития аварии (не более 5 часов) и, следовательно, труба технологического канала не может разрушиться в данных условиях. При более высоких температурах поведение материала становится иным. Деформации ползучести достигают десятков процентов, причем по мере роста начального напряжения деформации ползучести, накопившиеся к моменту разрыва, убывают, упрочнение отсутствует. На рис.2 приведены кривые ползучести сплава Zr - 2,5% Nb штатной термомеханической обработки при температуре 1073 К (800° С). Следует отметить, что при температурах выше 1135 К (862° С) различие в свойствах между материалами различных термомеханических обработок исчезает, что связано с завершением фазового перехода. Таким образом, представляется обоснованным выбор энергетического варианта теории ползучести О.В.Соснина и сотр. для описания ползучести и разрушения циркониевого сплава в диапазоне аварийных температур и нагрузок. Согласно принятой теории, уравнения состояния могут быть выбраны в следующем виде :

$$\begin{cases} \xi = k \sigma^n / (1 - \omega) \\ \dot{\omega} = \sigma \xi / A \end{cases} \quad (1)$$

где σ , МПа - действительное напряжение; $\xi = \frac{d\varepsilon}{(1 + \varepsilon)dt}$ - скорость деформации ползучести, 1/мин; ε - деформация ползучести, ω - параметр повреждаемости, такой, что $\omega=0$ в начале нагружения и $\omega=1$ в момент разрушения, k , n и A_* - параметры материала при определенной температуре, или в иной форме, представляющей собой обобщение уравнений (1) для случая неизотермической ползучести:

$$\begin{cases} \xi = k_0 \exp(-Q_c / RT) \sigma^n / (1 - \omega) \\ \dot{\omega} = \sigma \xi / A_* \end{cases} \quad (2)$$

где Q_c - энергия активации ползучести, T - абсолютная температура, R - постоянная.

Определение параметров уравнений (1) выполнялось методами регрессионного анализа, с учетом больших деформаций, адекватность принятой математической модели опытным данным проверялась по критерию Фишера. По уравнениям состояния (1) и (2) были построены теоретические кривые ползучести, приведенные вместе с экспериментальными на рисунках в данной главе. Экспериментальные кривые показаны сплошными линиями, а теоретические кривые, построенные по уравнениям (1) и (2), обозначены соответственно штриховыми и штрихпунктирными линиями. Сделан вывод, что процессы ползучести и разрушения циркониевого сплава в рассмотренных условиях определяются энергетическим вариантом теории ползучести О.В.Соснина и сотр., принятые уравнения состояния адекватно описывают имеющиеся экспериментальные данные.

Проверка применимости принятой теории в условиях жесткого нагружения, т.е. при растяжении с постоянной скоростью перемещения активного захвата испытательной машины, проводилась на основе имевшихся ранее опытных данных НИКИЭТ, при температурах 1173 - 1473 К (900°-1200° С). Теоретические и экспериментальные кривые деформирования β - Zr при температуре 1373 К (1100° С) приведены на рис.3. Здесь, как и раньше, экспериментальные кривые растяжения показаны сплошными, а теоретические - штриховыми линиями.

Третья глава посвящена исследованию ползучести циркониевого сплава в условиях сложного напряженного состояния. В ней описаны конструкция разработанной машины для испытаний тонкостенных

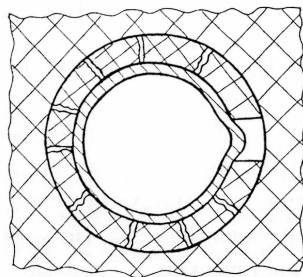
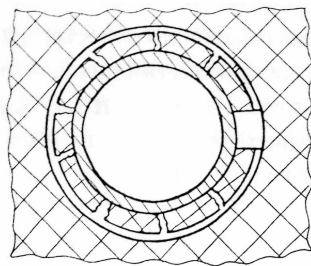
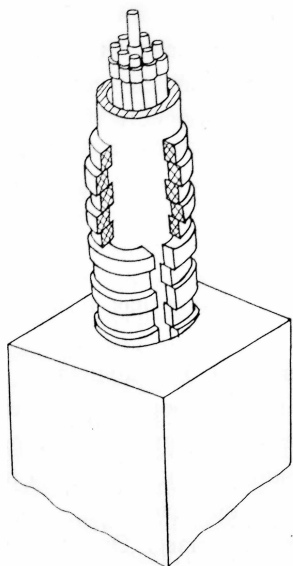


Рис.1

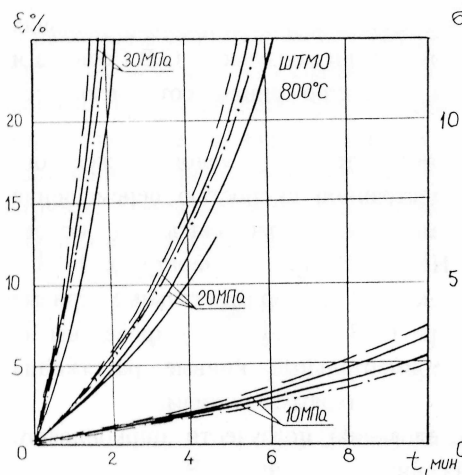


Рис.2

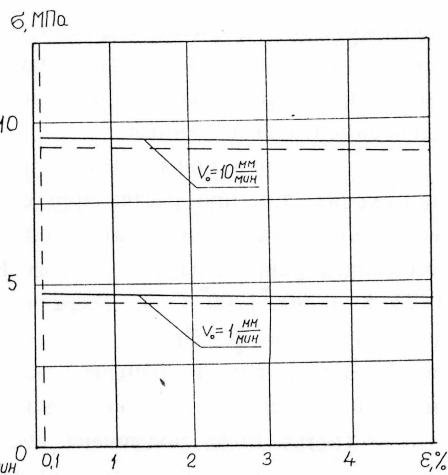


Рис.3

грубчатых образцов при высоких температурах с учетом больших перемещений и технология изготовления образцов. Изложена методика проведения испытаний, приводятся диаграммы деформирования. Отмечается, что были проведены две серии опытов: в первой образцы нагружались растягивающей силой и крутящим моментом ($M + P$ - опыты), а во второй - растягивающей силой и внутренним давлением или только внутренним давлением ($p + P$ - опыты и p - опыты). Все образцы из второй серии доводились до разрушения, а образцы, нагружавшиеся силой и моментом, при больших углах закручивания теряли устойчивость - на боковых поверхностях образцовывались спиральные складки. Во всех опытах записывались перемещения (продольное удлинение, взаимный угол поворота торцев, радиальное перемещение), в зависимости от времени испытания. На рис.4 сплошными линиями показаны диаграммы зависимостей от времени углов поворота торцев (рис.4а) и продольных удлинений (рис.4б), для первой серии, а на рис.5 - диаграммы продольных и радиальных перемещений для второй серии (рис.5а и 5б для $p + P$ - опытов и 5в для p - опытов, в последнем случае длина образцов не менялась). Отмечается, что результаты испытаний подтверждают обоснованность выбора энергетического варианта теории ползучести для описания ползучести и разрушения циркониевого сплава.

Также в главе 3 приводится решение задачи о ползучести цилиндрической оболочки, нагруженной крутящим моментом, растягивающей силой и внутренним давлением, при больших деформациях. Используются уравнения энергетического варианта теории ползучести. Для случая одноосного напряженного состояния они имеют вид :

$$\begin{cases} \dot{\xi}_e = k \sigma_e^n / (1 - \omega) \\ \dot{\omega} = \sigma_e \dot{\xi}_e / A \end{cases}$$

где $\sigma_e = \sqrt{\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij}}$ - интенсивность напряжений, а $\dot{\xi}_e = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\xi}_{ij} \dot{\xi}_{ij}}$ - интенсивность скоростей деформаций ползучести.

Результаты вычислений изображены на рис.4 и рис.5 штриховыми линиями. Сделан вывод, что ползучесть трубчатых образцов удовлетворительно описывается в рамках данной расчетной схемы.

В четвертой главе разработана новая методика решения задач аварийного деформирования элементов конструкций АЭС и рассмотрено поведение трубы технологического канала реактора РБМК в условиях максимальной проектной аварии. В качестве численного метода использован метод конечных элементов в форме метода перемещений. Предложенный для решения технологических задач теории ползучести в работах Н.Н.Малинина и К.И.Романова. При данном подходе неизвестными являются скорости перемещений узлов сетки КЭ.

Поставленные задачи рассматривались в двумерной постановке, причем для их решения использовались элемент плоской деформации и осесимметричный конечный элемент первого порядка, обеспечивающие достаточную сходимость и простоту при программной реализации. Все время деформирования разбивается на ряд малых шагов по времени, причем в пределах шага скорости перемещений считаются постоянными. По найденным скоростям, определяются новые координаты узлов, при этом топология системы не изменяется. Согласно принятым уравнениям состояния, материал является несжимаемым, однако в данной постановке это условие выполнено приближенно - коэффициент поперечной деформации не равен в точности 0,5, но принят близким к этому значению (0,48-0,49).

В рассматриваемых задачах могут иметь место как силовые, так и кинематические граничные условия, причем в точках на контактной поверхности между трубой технологического канала и блоком кладки замедлителя необходимо задавать граничные условия в направлениях, не совпадающих с осями глобальной системы координат. Для этого применялся алгоритм преобразования матрицы жесткости системы, учитывающий поворот осей.

В результате применения МКЭ к расчету напряженно-деформированного состояния всего тела получается система уравнений равновесия тела в скоростях

$$[K]\{\dot{Q}\} = \{R\} \quad (3)$$

где $[K]$ - матрица жесткости всего тела, $\{R\}$ - вектор узловых усилий, $\{\dot{Q}\}$ - вектор скоростей перемещений узлов. Система (3) является

нелинейной, и ее решение получается методом последовательных приближений. При соответствующем выборе шага метод последовательных приближений приводит к решению за две-три итерации.

На поверхности контакта между трубой и блоком могут существовать зоны прилипания и скольжения, причем по мере развития деформаций ползучести их границы могут изменяться. В зонах прилипания необходимо задавать кинематические граничные условия, запрещая перемещения соответствующих узлов, а в зонах скольжения следует учитывать наличие сил трения. Для определения сил трения был использован закон Кулона. Определение конфигурации областей скольжения и прилипания проводилось на каждом шаге по времени следующим образом. Вначале запрещались перемещения в нормальном и касательном направлениях, и в результате решения задачи определялись усилия в этих направлениях. Если в каком-либо узле касательная составляющая реакции оказывалась больше силы трения, подсчитанной по закону Кулона с использованием нормальной составляющей данной реакции, точка считалась принадлежащей зоне скольжения, и в ней задавалась касательная сила, определенная по закону Кулона. С уточненными таким образом граничными условиями задача решалась вновь, после чего происходило сравнение конфигураций зон прилипания и скольжения на соседних шагах. Итерационный процесс уточнения граничных условий был программно совмещен с процессом определения решения системы (3).

Особенностью рассматриваемых задач является наличие зон концентрации напряжений вблизи мест резкого изменения формы контактирующих тел. Поэтому при расчетах использовались неравномерные сетки КЭ со сгущением в подобных местах, что позволяет добиться высокой точности решения при умеренной размерности задачи.

Решение тестовых примеров показывает, насколько точен использованный численный метод. Рассматривалась задача о нагружении длинной цилиндрической оболочки внутренним давлением. Свойства материала определялись принятыми уравнениями ползучести и повреждаемости. Ранее, в главе 3, было получено аналитическое решение данной задачи, в котором использовалась гипотеза о безмоментном напряженном состоянии в оболочке. Использование МКЭ позволяет отказаться от данного предположения. Исследовались различные варианты граничных условий. Сравнение численного и аналитического решений

показало : в случае, если край оболочки не закреплен, результаты практически совпадают, а напряженное состояние действительно является безмоментным; при запрещении радиального перемещения на краю оболочки имеет место краевой эффект, не приводящий, однако, к существенному изменению времени разрушения оболочки. Таким образом, использование в главе 3 аналитических решений для моделирования ползучести трубчатых образцов представляется вполне обоснованным. На рис.5в штрихпунктирной линией показана зависимость диаметра образца от времени по данным расчета МКЭ.

Аварийное деформирование трубы технологического канала реактора типа РБМК проводилось при следующих допущениях. Ползучесть и накопление повреждений в материале описывались уравнениями энергетического варианта теории ползучести, деформации ползучести принимались за полные деформации, условие несжимаемости выполнялось приближенно, графитовый блок кладки считался абсолютно жестким. Последнее предположение было подтверждено решением методом конечных элементов задачи о нагружении упругого блока кладки внутренним давлением. В результате проведенного моделирования выяснено, что в условиях максимальной проектной аварии трубы технологических каналов обладают определенным запасом несущей способности, разрушения трубы не происходит, хотя и наблюдается сильное искажение формы конструкции. Исследовавшиеся сценарии развития аварии были получены в организации, разработавшей реакторы РБМК, - в Научно-исследовательском и конструкторском институте энерготехники (НИКИЭТ). На рис.6 изображена конфигурация деформированной сетки КЭ. Для выявления особенностей разрушения технологического канала был проведен вычислительный эксперимент, в ходе которого расчет трубы доводился до момента разрушения.

Подтверждением точности полученных результатов служат и данные проведенного расчета деформирования трубы в ходе известного из литературы эксперимента на стенде-имитаторе технологического канала. Часть канала, во вне реакторных условиях, нагружалась внутренним давлением и нагревалась до аварийных температур. Полученные в данном опыте результаты хорошо согласуются с данными численного моделирования по описанной методике.

Изучалось также влияние соотношения между конструктивными элементами на развитие деформаций ползучести, накопление повреждений

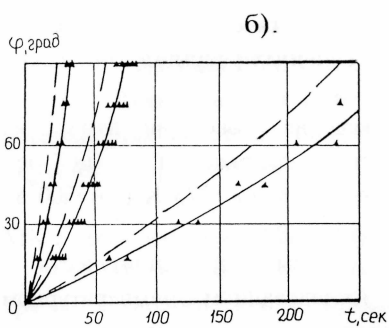
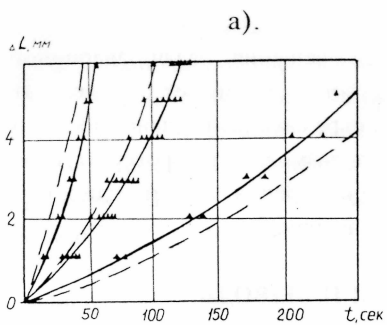


Рис.4

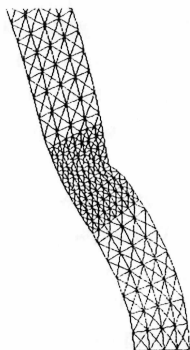


Рис.6

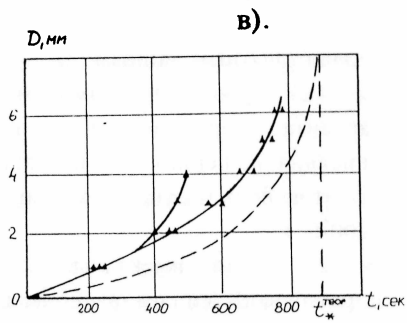
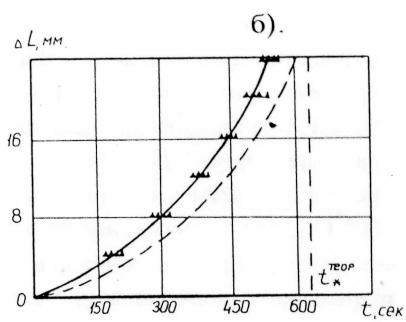
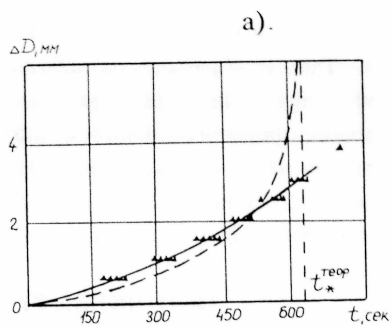


Рис.5

и разрушение трубы технологического канала, что позволяет делать выводы о наиболее желательном, с точки зрения аварийного ресурса, изменении в конструкции активной зоны.

Таким образом, разработанный метод решения задач аварийного деформирования конструкций активной зоны позволяет исследовать процесс формоизменения и накопления повреждений в зависимости от времени, определить ресурс деталей и дает возможность проверять вновь принятые конструктивные решения с точки зрения их пригодности к работе в условиях максимальной проектной аварии.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено экспериментальное и теоретическое исследование ползучести циркониевого сплава трех различных термомеханических обработок при одноосном растяжении.

1.1. Разработана методика проведения экспериментов на кратковременную ползучесть при одноосном растяжении и по ней проведены опыты в интервале температур от 773 К до 1273 К (от 500° до 1000°С), при напряжениях от 5 до 80 МПа.

1.2. Выбраны уравнения состояния, описывающие ползучесть и разрушение циркониевого сплава в исследованном температурном диапазоне и разработана методика определения параметров материала, входящих в данные уравнения, проверена адекватность использованной теории опытным данным.

1.3. Проверена применимость принятого в работе энергетического варианта теории ползучести и повреждаемости О.В.Соснина и сотр. для описания экспериментов по растяжению образцов с постоянной скоростью захватов испытательной машины при температурах 1173-1473 К (900°-1200°С).

2. Экспериментально и теоретически изучена ползучесть циркониевого сплава в условиях неодноосного напряженного состояния, при температуре 1023 К (750°С).

2.1. Разработана испытательная машина, позволяющая проводить эксперименты на ползучесть с трубчатыми образцами, нагруженными постоянными растягивающей силой, крутящим моментом и внутренним давлением, при больших перемещениях образцов.

2.2. Проведены две серии опытов, в первой образцы нагружались крутящим моментом и растягивающей силой, а во второй - растягивающей силой и внутренним давлением.

2.3. Выполнено теоретическое исследование ползучести и разрушения цилиндрической оболочки, нагруженной растягивающей силой, крутящим моментом и внутренним давлением, с учетом больших перемещений, причем материал оболочки описывается принятыми уравнениями состояния. При этом показано, что энергетический вариант теории ползучести удовлетворительно описывает поведение циркониевого сплава при сложном напряженном состоянии в условиях, характерных для аварийных ситуаций.

3. Разработана, на основе метода конечных элементов в форме метода перемещений, математическая модель поведения конструкций активной зоны реактора типа РБМК при максимальной проектной аварии.

3.1. Разработан алгоритм учета смешанных граничных условий на поверхностях общего положения, с учетом развитых деформаций ползучести, приводящих к существенному изменению формы тела.

3.2. Точность и сходимость разработанного алгоритма и программы МКЭ проверены путем решения тестовых примеров.

3.3. Проведены варианты расчетов деформирования и разрушения трубы технологического канала реактора при различных сценариях максимальной проектной аварии, дана оценка влияния параметров конструкции на развитие деформаций.

4. Результаты работы в виде методик и опытных данных переданы в Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники (НИКИЭТ).

Основное содержание диссертации опубликовано в работах :

1. К.И.Романов, Б.В.Падалкин. Ползучесть циркониевого сплава // Актуальные проблемы механики деформируемого твердого тела : тезисы докладов Международной научной конференции - Алма-Ата, 1992. - С.15.

2. Б.В.Падалкин. Кратковременная ползучесть циркониевого сплава при температурах 600-800°С // Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1993. - N 12. - С.21-24.

3. К.И.Романов, Б.В.Падалкин. Ползучесть циркониевого сплава при сложном напряженном состоянии // Актуальные проблемы фундаментальных наук. Труды Второй Международной научно-технической конференции . - Москва, 1994. - С.45-47.

4. К.И.Романов, Б.В.Падалкин. Кратковременная ползучесть циркониевого сплава при сложном напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1995. - N 5. - С.43-47.

5. К.И.Романов, Б.В.Падалкин. Моделирование максимальной проектной аварии элементов конструкций АЭС. // Ползучесть в конструкциях : тезисы докладов III Всероссийской конференции. - Новосибирск, 1995. - С.51.