1560694

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени Государственный
Технический Университет им. Н. Э. Баумана

На правах рукописи

Добров Михаил Вячеславович

УДК 593.3

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕРМОПРОЧНОСТИ КОРПУСА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1998

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

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

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент Зарубин С. В.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Кувыркин Г. Н.
доктор технических наук, Бугаенко С. Е.

Ведущая организация - ОКБ «Гидропресс»

Защита состоится «9» декабря 1998 г. в ___ час. на заседании Специализированного совета К 053.15.11 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва,

иблиотеке

1560694

998 г.

Попов П. К.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1560694
Добров М.В. Разработка мет

Общая характеристика работы

Проблема остро встала в восьмидесятых годах, после аварии на АЭС Three Mile Island Unit II (TMI - 2) (1979 г.) и четвертом блоке Чернобыльской АЭС (1986 г.) в связи с опасностью крупных выбросов радиоактивных материалов в окружающую среду и, как следствие, нанесением непоправимого ущерба здоровью значительной части населения, выведением из использования обширных территорий, прилегающих к АЭС.

Отсутствие альтернативных источников энергии, способных конкурировать по эффективности и экологической чистоте с ядерными источниками при правильной эксплуатации последних, влечет за собой необходимость совершенствования существующих и разработку новых проектов АЭС, исключающих выброс радиоактивных материалов за пределы защитной оболочки реактора.

В настоящее время для надежного обоснования безопасности ЯЭУ необходимо детальное рассмотрение широкого спектра возможных аварийных ситуаций, включая тяжелые - гипотетические аварии или аварии с разрушением активной зоны. Корпус является одним из барьеров безопасности на пути распространения расплава активной зоны - кориума при тяжелой аварии в реакторах корпусного типа. Анализ термомеханических процессов в корпусе в ходе аварии позволяет ответить на вопросы: как долго корпус сохраняет целостность, по какому типу произойдет разрушение корпуса, существуют ли какие - либо факторы внешнего воздействия, способные предотвратить разрушение и/или проплавление корпуса.

1560694

Цель работы - разработка расчетных методик, позволяющих проанализировать термомеханические процессы, протекающие в нижней части корпуса ядерного реактора в ходе тяжелой аварии с разрушением активной зоны и возможность управления этими процессами, а также разработка эффективных вычислительных программ, ориентированных на конечного пользователя. Достижение этой цели предусматривает решение следующих основных задач:

- Разработка методики расчета температурного состояния корпуса реактора с учетом возможного плавления материала корпуса
- Формулировка уравнений состояния материала и разработка методик их идентификации
- Разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния корпуса с учетом нестационарного изменения геометрии корпуса за счет плавления и разрушения материала
- Алгоритмизация и программная реализация разработанных методик на ЭВМ

МГТУ
им. Н. Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

- Численное исследование влияния мер внешнего воздействия на время и характер разрушения корпуса для наиболее тяжелого сценария аварийной ситуации

<u>Научная новизна</u>. Разработана и использована на примере реакторных сталей методика идентификации физических закономерностей на основе методов оптимизации. Сформулирована методика и разработан алгоритм анализа нелинейно - вязкого деформирования тела с переменными границами. Показана высокая эффективность МКЭ в сочетании с методом фиктивных областей при анализе разрушения корпуса. Предложен критерий оценки того или иного сценария аварии с точки зрения экологической опасности.

<u>Достоверность</u> результатов обеспечивается корректностью постановки задачи, адекватностью определяющих уравнений состояния реальному поведению материала корпуса при температурах, свойственных тяжелым авариям, а также верификационными тестами, проведенными для моделей анализа температурных полей и напряженного деформированного состояния в корпусе реактора.

<u>Практическая ценность</u> работы состоит в том, что разработанные алгоритмы легли в основу программного кода HITEF (HIgh - Temperature Failure), написанного под операционную оболочку Microsoft Windows 95/98/NT, позволяющего численно исследовать влияние различных факторов (в том числе внутреннего давления, условий охлаждения и др.) на состояние корпуса в течение тяжелой аварии. Результаты такого исследования дают возможность уточнить стратегию по управлению мерами внешнего воздействия на корпус с целью минимизации последствий аварии. Результаты работы в виде расчетных методик и программного кода переданы в Опытное Конструкторское Бюро «Гидропресс».

<u>На защиту выносятся</u>

- Модель анализа термического состояния системы корпус - кориум
- Методика идентификации уравнений нелинейно - вязкого состояния материала корпуса
- Модель анализа напряженно - деформированного состояния в теле с переменными границами
- Результаты численного исследования термомеханических процессов в нижней части корпуса для наиболее тяжелого сценария аварии
- Критерий оценки тяжести аварии с точки зрения экологической опасности

<u>Апробация работы</u>. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследования докладывались на Международной конференции молодежи и студентов «Шаг в будущее» (Москва, 1994), на 5 и 6 Международных симпозиумах «Ползучесть и связанные процессы»

(Белосток, 1995 и 1998), на научно - технической конференции, посвященной 165 - летию МГТУ им. Баумана (Москва, 1995), на научно-технической конференции аспирантов и молодых ученых кафедры прикладной механики МГТУ им. Баумана (Москва, 1997), на Втором международном конгрессе по структурной и многоотраслевой оптимизации WCSMO-2 (Zakopane, 1997), на 2 Международной конференции «Термические напряжения» (Rochester, 1997), на 3 Международной конференции по идентификации динамических систем и обратным задачам (Санкт-Петербург, 1998), на научном семинаре «Прикладная теория пластичности и ползучести» в МГТУ им. Баумана в 1995 - 1998 годах.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в девяти работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем составляет 148 страниц.

Содержание работы

В первой главе проводится обзор работ, в которых изучались процессы тепломассопереноса в кориуме, оценивалась тепловая нагрузка на корпус, производился анализ напряженно - деформированного состояния корпуса для различных сценариев аварийной ситуации.

В зависимости от условий аварии кориум может приобретать на днище корпуса различную структуру, а именно, а) образовывать рыхлый насыпной слой; б) при отсутствии интенсивного внешнего охлаждения корпуса плавиться, за счет генерации тепла благодаря процессам остаточного радиоактивного распада в топливе, до полностью жидкого состояния, формируя ванну оксидов урана и циркония (UO_2, ZrO_2), в) образовывать стратифицированную ванну расплава со слоем расплавленной стали на поверхности ванны UO_2 - ZrO_2, который может формироваться как из насыпного слоя диспергированных фрагментов по мере плавления обломков стальных конструкций и опускания более тяжелых UO_2 - ZrO_2, так и вследствие стекания расплавленной стали за счет плавления вышерасположенных конструкций после частичного обрушения активной зоны. В этой связи разрабатываются различные модели состояния кориума, которые позволяют оценить тепловые нагрузки на корпус для различных сценариев.

Модель тепломассопереноса в насыпном слое с учетом фазовых превращений применительно к тяжелой аварии наиболее развита в работах Досаниша и Пилча. В одномерной и осесимметричной постановке

рассматривается эволюция пористой среды, состоящей из совокупности частиц с характерным диаметром d_p, в замкнутом объеме, в композицию которой входят UO_2, ZrO_2, Zr и нержавеющая сталь. Анализ поведения пористого кориума показывает, что по мере плавления жидкая фаза аккумулируется в нижней части слоя, образуя область, окруженную коркой, причем наличие циркония в кориуме, ускоряет образование и увеличение объема ванны расплава за счет растворения диоксидов урана и циркония. В итоге возможно растворение насыпного слоя до полностью жидкого состояния. Наличие сильно разогретых расплавленных масс с внутренним энерговыделением создает наибольшую опасность выхода радиоактивных материалов за пределы корпуса. Математическая модель, позволяющая определить распределение температур, поля скоростей частиц жидкости, распределения плотности кориума во всем объеме ванны в рассматриваемый момент времени формулируется на основе уравнений Навье - Стокса, энергии и неразрывности. Привлекательность моделей такого типа теряется за счет необходимости привлечения гипотез (например, гипотеза Буссинеска для стандартной «k-ε» модели), а также эмпирических констант и функций при описании турбулентного движения (а именно условия для такого типа движения, как показывают предварительные оценки чисел Рэлея, создаются в ванне расплава).

При относительно равномерном распределении температуры по меридиану задача по определению НДС в окрестности днища полусферической формы может быть сведена к задаче деформирования и разрушения элемента пластины толщины равной толщине днища и находящегося в условиях двухосного напряженного состояния. Данный подход справедлив для реакторов типа PWR, отношение толщины стенки h днища которого к радиусу R срединной поверхности составляет ~ 0.05. Зачастую подобные расчеты проводятся с одновременным решением тепловой задачи в одномерной постановке и поэтому могут расцениваться в качестве оценочных, поскольку не лишены излишней доли консерватизма вследствие ограничений накладываемых на распространение тепла по пространственным координатам.

Более сложный подход, предложенный в работах Витта, применительно к полусферическому днищу строится на основе теории оболочек Рейсснера, модифицированной, чтобы учесть геометрическую и физическую нелинейность. Дифференциальные уравнения равновесия бесконечно малого элемента оболочки, традиционно записываемые относительно результирующих силовых факторов на единицу длины и являющихся интегралами от напряжений по толщине оболочки, приводятся к форме, в которой в качестве основных неизвестных используются перемещения. Авторы оставляют в уравнениях слагаемые вида h/R, которые обычно отбрасываются в стандартной теории оболочек,

обосновывая указанный шаг возможностью образования локальной зоны вздутия, а также учитывают сдвиг материала относительно нормали к срединной поверхности в деформированном состоянии элемента оболочки. Использование закона Гука при получении определяющих зависимостей в данной модели, подразумевает, что деформации являются малыми в течении шага.

Уточненные модели формулируются на основе представления о корпусе как о теле вращения. Как правило расчеты проводятся с использованием доступных конечно - элементных коммерческих кодов, не учитывающих специфики протекания тяжелой аварии (ABAQUS и др.), интегральных компьютерных кодов, разработанных для полного анализа протекания аварии, начиная с деградации активной зоны и заканчивая взаимодействием кориума с бетоном защитной оболочки (MARCH, ESCADRE и др.), а также более детальных кодов (SCDAP/RELAP5 и др.). В большинстве своем, модели, заложенные в данные коды, а также в расчетные модели других авторов построены на основе упруго - пластического, упруго - вязкопластического, упруго - нелинейно - вязкого поведения материала. Использование моделей, основанных на представлении об упруго - пластическом материале, представляется не убедительным в силу проявления реономных свойств корпусными материалами при температурах, свойственных тяжелым авариям.

При описании реономного деформирования корпуса в основном используются соотношения технических теорий ползучести. Для оценки повреждения материала корпуса в рассматриваемой точке в большинстве работ вводится изотропный параметр поврежденности ω, вычисляемый на основе принципа линейного суммирования повреждений с использованием температурно - временного параметра Ларсона - Миллера. Помимо вязко-хрупкого типа разрушения в одной из работ рассматривается также чисто вязкое корпуса. Критерием окончания счета автор принимает отсутствие сходимости численного процесса при больших деформациях.

Как следует из анализа температурного состояния корпуса для различных сценариев, в ходе аварии возможно изменение геометрии корпуса как вследствие теплофизических так за счет механических процессов (здесь имеется ввиду как образование разрушенных зон, так и изменение формы за счет больших деформаций). Данные процессы могут приводить к изменению силовых и кинематических граничных условий. Поэтому в самом общем случае имеем задачу деформирования осесимметричного тела с нестационарно изменяющимися границами. В работах Теофануса и др. при упруго - пластическом конечно - элементном анализе априори задается форма корпуса с учетом выплавленной зоны, полученная из анализа установившегося температурного состояния в

системе кориум - корпус. Таким образом не рассматривается история «исчезновения толщины» в подверженном силовому воздействию корпусе. Из всего спектра работ посвященных термомеханическому анализу корпуса реактора лишь в работе Витта учитывается перераспределение напряжений из-за образования областей, потерявших несущую способность при достижении в них параметром повреждаемости критического значения.

На основании проведенного обзора формулируются цель и задачи данной работы.

Вторая глава посвящена формулировке основных уравнений термического состояния корпус - кориум с учетом плавления/затвердевания и их конечно - элементной реализации.

Распространение тепла в твердом теле при нестационарном термическом воздействии на границах, а также при распределении температуры в теле, не удовлетворяющем в начальный момент времени тепловому равновесию в системе тело - окружающая среда, описывается дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности, устанавливающим связь между временными и пространственными изменениями температуры в теле. Явление теплопереноса в расплавленном кориуме также описывается при помощи данного уравнения, но с эффективным коэффициентом теплопроводности, в котором заложен теплоперенос посредством конвективного перемешивания. Поглощение (выделение) тепла фазового перехода учитывается посредством функции источника тепла Q_{SL}, вводимого непосредственно в уравнение нестационарной теплопроводности. Учет теплоты фазового перехода путем введения функции источника тепла позволяет удовлетворить требованиям концепции сплошного счета, т. е. использовать одно уравнение для определения поля температуры T во всей расчетной области и, следовательно, использовать фиксированную дискретизацию в пространстве при численной реализации тепловой задачи. Путем введения относительного количества твердой фазы φ в элементарном объеме двухфазной зоны и конкретизации Q_{SL} уравнение теплопроводности приводится к виду

$$c_{eff}(T)\rho(T)\frac{\partial T(\mathrm{M},t)}{\partial t} = \nabla[\lambda(T)\nabla T(\mathrm{M},t)] \qquad (1)$$

$$c_{eff}(T) = \begin{cases} c_s(T) & \text{если } T < T_{solidus} \\ c_s(T)\varphi + c_l(T)(1-\varphi) - L\dfrac{d\varphi}{dT} & \text{если } T_{solidus} < T < T_{liqidus} \\ c_l(T) & \text{если } T > T_{liqidus} \end{cases}$$

где L - удельная теплота плавления, а плотность ρ, эффективная удельная теплоемкость c_{eff}, удельные теплоемкости жидкой c_l и твердой c_s фазы, коэффициент теплопроводности λ в общем случае являются функциями координат, времени и абсолютной температуры. Таким образом учет поглощения (выделения) тепла в двухфазной зоне сводится к соответствующему заданию зависимости эффективной теплоемкости материала от температуры. Множественность сценариев развития аварии подразумевает различные условия на внешних и внутренних границах корпуса и кориума. Поэтому в программной реализации задачи предусматривается возможность задания граничных условий 1- 3 родов.

Последовательная конечно-элементная дискретизация в пространстве и во времени с использованием метода взвешенных невязок на основе применения процедуры поточечной коллокации применительно к уравнению (1) приводит его к виду

$$\frac{\mathbf{C}(\mathbf{T}_{n+\theta})}{\Delta t_n}(-\mathbf{T}_n + \mathbf{T}_{n+1}) + \mathbf{K}(\mathbf{T}_{n+\theta})[(1-\theta)\mathbf{T}_n + \theta\mathbf{T}_{n+1}] = \mathbf{F}_{n+\theta}, \qquad (2)$$

где матрица теплоемкости $\mathbf{C}$, матрица теплопроводности $\mathbf{K}$, вектор узловых тепловых сил $\mathbf{F}$, обусловленных действием распределенного по поверхности S_q теплового потока q и тепловой конвекции на поверхности S_α. Точка коллокации θ определяет тип интегрирования по времени двухслойной схемы (2).

Использование стандартных процедур интегрирования по элементу при получении дискретного аналога (2) уравнения теплопроводности в случае присутствия зоны фазового превращения в элементе может привести к тому, что данный момент не будет учтен при формировании матрицы теплоемкости элемента (точка интегрирования - одна для симплекса или несколько при использовании криволинейных элементов не попадает в переходную зону), либо будет учтен некорректно (точка находится в зоне перехода, но зона занимает небольшой объем элемента, поэтому теплоемкость элемента будет завышенной) и, следовательно, решение уравнения (2) будет неверно характеризовать перенос тепла при наличии фазовых превращений. Выходом из данной ситуации могло бы служить измельчение сетки, но при перепадах температур возможных при тяжелой аварии и небольшой разнице температур ликвидус и солидус этот подход приводил бы к чрезвычайно мелкой дискретизации и резкому завышению времени расчета. Поэтому для решения указанной проблемы вычисление матрицы $\mathbf{C}$ осуществлялось с учетом возможного скачка теплоемкости в пределах элемента, а именно, вместо $c_{eff}\rho$ в гауссовой точке для симплекс - элемента использовалось значение

$$\overline{c_{eff}\rho} = \int_{V^a} c_{eff}\rho dV / V^a \quad (V^a \text{ - объем элемента}). \qquad (3)$$

На верификационном тесте показано хорошее соответствие с результатами других авторов, получивших решение другими методами на основе МКР.

В **третьей главе** анализируются механические свойства материала корпуса для условий, свойственных тяжелым авариям.

При описании высокотемпературной ползучести корпусных сталей принят за основу вариант теории ползучести Малинина - Хажинского как теории наиболее полно отвечающей условиям деформирования корпуса при тяжелой аварии. Согласно данной теории полные напряжения представляются в виде суммы активных и добавочных. Добавочные напряжения являются структурными параметрами, позволяющими количественно описать два противоположно протекающих процесса деформационного упрочнения и термического разупрочнения на этапе упрочнения и установившейся стадии. В уравнение для скорости деформации ползучести вводится функция зависящая от параметра ω, характеризующего накопленное повреждение материала в рассматриваемой точке и оказывающая влияние на скорость деформаций ползучести на третьей стадии.

При конкретизации констант в уравнениях ползучести обычно используют результаты опытов на одноосное растяжение и различные варианты метода наименьших квадратов, возможности которого для рассматриваемых уравнений состояния ограничены. Для уравнений, сформулированных в данной работе, применяются методы безусловной оптимизации такие как метод деформируемого многогранника (метод Нелдера - Мида) в сочетании со случайным поиском. Приближение формулируемого закона к экспериментальным данным осуществляется путем варьирования констант, входящих в уравнения состояния, таким образом, чтобы устремить к нулю минимизируемую целевую функцию, принимаемую в виде

$$\Phi = \sum_{i}^{N} (\alpha_i S_i^2 + \beta_i (\frac{L_i^{calc}}{L_i^{expr}} - 1)^2) + \psi, \qquad (4)$$

где S_i - площадь, заключенная между i - той экспериментальной и соответствующей ей расчетной кривой, L_i^{calc} и L_i^{expr} - длины расчетной и экспериментальной кривых, α_i, β_i - настраиваемые числовые коэффициенты, ψ является функцией штрафа и вводится для ограничения областей изменения искомых констант с целью получения физически

непротиворечивых результатов при интегрировании уравнений ползучести. При этом в зависимости от ситуации критерием окончания интегрирования уравнений состояния могут служить: время завершения второй стадии ползучести, наперед заданная либо предельная деформация для рассматриваемой экспериментальной кривой, момент хрупкого или вязко - хрупкого разрушения образца.

Как показывает вычислительный эксперимент, последовательное определение значений групп констант: (а) использующихся при описании чисто вязкого деформирования, (б) отвечающих за накопление повреждений, позволяет добиться лучшего соответствия с экспериментальными данными более эффективно по сравнению с одновременным определением всех констант. В данной работе при идентификации на этапе (б), интегрирование уравнений состояния ограничивается величиной заданной деформации. Причем эта деформация соответствует равномерной деформации, при которой происходит потеря устойчивости первоначальной формы образца. Данный подход существенно упрощает подготовку экспериментальных данных для процесса построения закона ползучести, и в то же время позволяет с достаточной точностью прогнозировать время разрушения при силовом нагружении конструкции.

Идентифицированы законы ползучести для сталей SA508-CL2 и 15Х2НМФА-А. Определены интервалы вязкого и вязко - хрупкого разрушения. На рис. 1 показано сопоставление экспериментальных и расчетных кривых ползучести для стали 15Х2НМФА-А (пунктирная и сплошная линия являются расчетными кривыми построенными, соответственно, без учета и с учетом влияния параметра повреждаемости на скорость ползучести на третьей стадии, точки отвечают данным эксперимента)

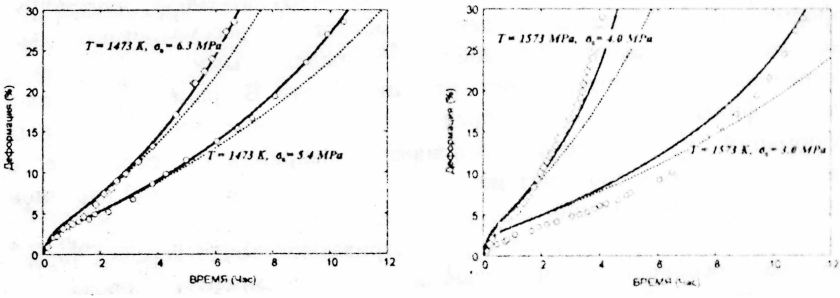

Рис. 1

В **четвертой главе** формулируется модель напряженно - деформированного состояния и потери несущей способности нижней части корпуса в осесимметричной постановке.

Вектор скоростей полных деформаций представляется в виде суммы векторов скоростей упругих деформаций, деформаций ползучести, температурных и радиационных деформаций.

Специфика задачи состоит в том, что рассматривая процесс деформирования корпуса, необходимо учитывать движение фронта возможного механического разрушения, а также распространение расплавленных областей в материале корпуса. Указанные процессы могут приводить к изменению как кинематических, так и силовых граничных условий во времени. В частности, необходимость корректировки условий закрепления для расчетной схемы корпуса в осесимметричной постановке возникает в случае разрушения материала в окрестности полюса. При образовании расплавленных зон на внутренней поверхности корпуса необходимо учитывать изменение поверхности нагружения остаточным давлением. Для сценариев низкого давления механическая потеря несущей способности происходит за счет накопления рассеянных повреждений. Разрушаться материал может в различных условиях с точки зрения знака компонент шарового тензора напряжений. При $\sigma_0 = (\sigma_r+\sigma_z+\sigma_\theta)/3 < 0$ поврежденная точка среды неспособна воспринимать нагружение компонентами девиатора, но в то же время сохраняет способность сопротивляться всеобщему сжатию. Поэтому было бы не совсем верно пересматривать конфигурацию конструкции в этом случае. В данной работе используется подход, который позволяет рассматривать термомеханические процессы в корпусе без модификации граничных условий и геометрии конструкции на протяжении всего процесса деформирования. Для этого в областях, потерявших несущую способность по тому или иному физическому механизму, вводятся фиктивные деформации ε^f. Материал в данных областях рассматривается как фиктивная среда, обладающая определенными свойствами, обеспечивающими непрерывность решения задачи. В процессе решения в точках фиктивной среды определяется распределение фиктивных деформаций ε^f, позволяющее привести напряженное состояние в указанных точках в соответствие с действительной физической картиной распределения напряжений.

Полагается, что материал в рассматриваемой точке корпуса теряет несущую способность за счет плавления, когда температура превышает нижнюю границу $T_{solidus}$ интервала фазового перехода корпусной стали. В данном случае напряженное состояние в указанной точке приводится к состоянию гидростатического сжатия, которое определяется суммарным давлением, равным сумме гидростатического и остаточного давления в

реакторе. В случае механического разрушения ($\omega = 1$) рассматриваются два варианта условий потери несущей способности, а именно, а) состояние растяжения $\sigma_0 > 0$ и б) состояние сжатия $\sigma_0 < 0$. В случае а) в ходе решения необходимо определить поле фиктивных деформаций, обеспечивающих полную разгрузку разрушенных областей. Для варианта б) напряженное состояние приводится к всестороннему сжатию напряжением $|\sigma_0|$.

Кроме вышеперечисленных типов потери несущей способности, в интервале температур 1173 - 1373 К необходимо учитывать возможность чисто вязкого разрушения корпуса за счет локального утонения стенки.

Численно модель механического состояния реализована на основе шаговой процедуры интегрирования по времени с применением МКЭ. При появлении разрушенных/расплавленных областей на каждом шаге по времени осуществляется корректировка НДС при помощи внутришагового итерационного процесса, т. е. процесса полностью реализуемого после выполнения вычислений по определению НДС на рассматриваемом шаге по времени.

Определяющие соотношения фиктивных деформаций для трех вариантов потери несущей способности: 1) $T > T_{solidus}$, 2) $\omega = 1$, $\sigma_0 > 0$, 3) $\omega = 1$, $\sigma_0 < 0$ конкретизируются следующим образом. В первом случае, необходимо обеспечить состояние гидростатического сжатия в расплавленных областях. Следовательно, вектор приращений фиктивных деформаций на k шаге внутришагового цикла имеет вид

$$\Delta\varepsilon_k^f = (2G)^{-1}\mathbf{s}_{*k} + (3K)^{-1}(\sigma_{0k} + \mathbf{p}), \tag{5}$$

где $\mathbf{p} = (p, p, p, 0)^T$, p - суммарное - гидростатическое плюс остаточное давление в реакторе), $\mathbf{s}_* = \{s_r, s_z, s_\theta, 2s_{rz}\}^T$- вектор, составленный из компонент девиатора полных напряжений, $\sigma_0 = (\sigma_0, \sigma_0, \sigma_0, 0)^T$, σ_0 - среднее полное напряжение.

Во втором случае материал полностью теряет способность сопротивляться нагрузкам и

$$\Delta\varepsilon_k^f = (2G)^{-1}\mathbf{s}_{*k} + (3K)^{-1}\sigma_{0k}. \tag{6}$$

В третьем варианте материал еще способен воспринимать всеобщее сжатие. Поэтому, в данном случае

$$\Delta\varepsilon_k^f = (2G)^{-1}\mathbf{s}_{*k}. \tag{7}$$

Критерием окончания итерационного процесса является выполнение следующих условий:

- для расплавленных областей: $|\sigma_0 - p| \le \Delta_T$, $\sigma_e \le \Delta_T$; (8)
- для разрушенных областей: $\sigma_0 \le \Delta_T$, $\sigma_e \le \Delta_T$; (9)

где Δ_T - задаваемая точность численного решения. Отметим, что при подстановке среднего напряжения σ_0 в (8, 9) учитывается его текущий знак.

Результаты верификационного теста показывают хорошее согласование с аналитическим решением.

В **пятой главе** численно проанализирован один из наиболее тяжелых сценариев аварии в зависимости от уровня воды, охлаждающей внешнюю поверхность корпуса. Показано, что при отсутствии принудительного внешнего охлаждения разрушение корпуса происходит в окрестности полюса (На рис. 2 изображено распределение повреждаемости непосредственно перед разрушением). С повышением уровня воды контур истечения кориума за пределы корпуса увеличивается, но в то же время существенно увеличивается и время сохранения целостности корпуса.

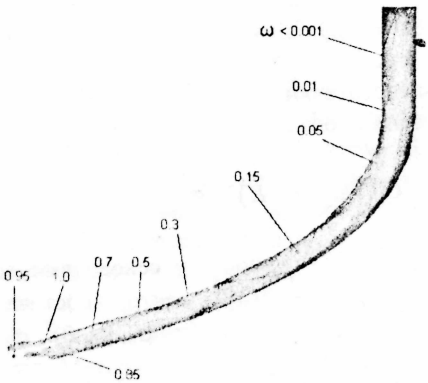

Рис. 2

Полученные закономерности позволили сформулировать критерий оценки опасности протекания аварии с точки зрения экологической опасности, согласно которому опасность минимальна, если будут найдены такие условия внешнего охлаждения, численно характеризующиеся коэффициентом теплоотдачи между корпусом и окружающей средой и являющегося функцией меридиональной координаты, интенсивности охлаждения и времени, при которых будет обеспечен минимум функционала экологической опасности

$$\Phi = \omega_{max}(\alpha_k) + f(\beta_i, \alpha_k, t), \qquad (10)$$

где ω_{max} - есть максимальная величина повреждаемости во всем рассматриваемом объеме корпуса реактора. Функция $f(\beta_i, \alpha_k, t)$ содержит в себе факторы влияния, характеризующие степень распространения и местоположение разрушенных и расплавленных областей, время сохранения целостности корпуса и увеличивает значение функционала при увеличении коэффициентов теплоотдачи α_k, поскольку увеличение α_k влечет за собой усложнение устройств внешнего аварийного охлаждения ($k=1..N_\alpha$, N_α- количество зон охлаждения внешней поверхности корпуса). β_i отражает состояние конечного элемента $\beta_i = [\beta_0 + \theta(s_i)\Delta\beta]\ \gamma_{ij}$, где β_0 указывает на то, что элемент разрушен или расплавлен, $\theta(s_i)\Delta\beta$ отражает степень удаленности i - того разрушенного или расплавленного элемента ($i=1..N_{bsl}$, N_{bsl} - количество поврежденных элементов) от оси симметрии корпуса ($\theta(s_i)$ - функция меридиональной координаты s, $\Delta\beta$ - числовой коэффициент), γ_{ij} - характеризует размеры распространения и местоположение потерявшей несущую способность области j, содержащую разрушенный элемент i.

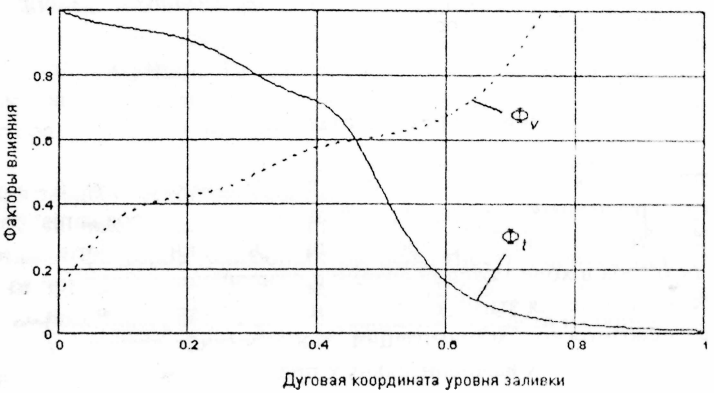

Рис. 3

Принимая величину Φ_l обратную ко времени нарушения целостности корпуса t_{water} и величину обрушивающейся при разрушении части днища Φ_v за факторы влияния и нормируя их, соответственно, по отношению ко времени разрушения при отсутствии внешнего охлаждения t_{air} и исходному состоянию корпуса (рис. 3) в первом приближении целевую функцию экологической опасности можно конкретизировать как линейную комбинацию указанных факторов

$$\Phi = w_t \overline{\Phi}_t + w_v \overline{\Phi}_v, \qquad (11)$$

$$\overline{\Phi}_t = \frac{t_{air}}{t_{water}}, \quad \overline{\Phi}_v = \frac{N_r + N_m + N_{in}}{N_\Sigma}$$

где w_t, w_v - весовые коэффициенты, N_r, N_m - количество разрушенных и расплавленных конечных элементов, N_{in} - количество элементов, охватываемых контуром сквозного разрушения, N_Σ - суммарное количество элементов. В данной реализации функционала слагаемому ω_{max} присвоено значение 1, поскольку рассмотренный сценарий предполагает разрушение корпуса.

Варьируя коэффициент теплоотдачи, можно определить оптимальный режим внешнего охлаждения, при котором достигается минимум функционала (11).

Аналогично рассматривая широкий спектр сценариев аварийной ситуации строится своеобразный "рейтинг" для каждого конкретного варианта развития аварийной ситуации при различных режимах аварийного охлаждения. Классификация аварийных ситуаций согласно "рейтингу" позволяет сформулировать оптимальную концепцию проектирования защитных устройств.

Основные результаты и выводы

Представленная диссертационная работа имела своей целью разработку расчетных методик, позволяющих проанализировать термомеханические процессы, протекающие в нижней части корпуса ядерного реактора в ходе тяжелой аварии с разрушением активной зоны и возможность управления этими процессами для предотвращения или, если последнее невозможно, минимизации последствий аварии, а также разработку эффективных вычислительных программ, ориентированных на конечного пользователя.

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Сформулирована методика определения температурных полей в системе кориум - корпус с учетом фазовых превращений с использованием равновесной модели плавления/затвердевания на основе метода конечных элементов.
2. Проведено теоретическое описание экспериментальных данных по вязкому деформированию и разрушению реакторных сталей.

2.1. Для более точного описания деформационных свойств сталей в условиях высоких температур, присущим тяжелым авариям,

использован вариант теории ползучести, учитывающий как деформационное упрочнение так и термическое разупрочнение.

2.2. При формулировке уравнений состояния учтена третья стадия ползучести, обусловленная развитием процесса разрушения стали.

2.3. Разработана, реализована на ЭВМ и использована на примере реакторных сталей методика идентификации физических закономерностей на основе методов оптимизации.

3. Разработана методика определения напряженно - деформированного состояния корпуса, находящегося в условиях воздействия остаточного давления, нестационарного температурного поля и радиоактивного излучения.

3.1. Сформулирована методика и разработан алгоритм анализа нелинейно - вязкого деформирования тела с переменными границами.

3.2. Показана высокая эффективность МКЭ в сочетании с методом фиктивных областей при анализе разрушения корпуса.

4. Разработан комплекс программ под операционную систему Microsoft Windows 95/98/NT позволяющих анализировать термомеханические процессы в системе кориум - корпус в одномерной и осесимметричной постановках.

5. Численно проанализирован один из наиболее тяжелых сценариев аварийной ситуации. Показана зависимость времени разрушения и характера разрушения от условий внешнего охлаждения корпуса реактора.

6. Предложен критерий оценки того или иного сценария аварии с точки зрения экологической опасности.

7. Разработанные методы расчета позволяют проанализировать различные сочетания факторов, влияющих на целостность корпуса при тяжелой аварии и таким образом определить направление конструкторско - проектировочных работ в области защитных средств и сооружений.

Список публикаций

1. Данилов В.Л., Добров М.В., Зарубин С.В. Термопрочность корпуса ядерного реактора при тяжелой аварии с плавлением активной зоны //Тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 165-летию МГТУ им.Н.Э.Баумана. - М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 1995. - Часть II. - С. 120.
2. Данилов В.Л., Добров М.В., Зарубин С.В. Численное моделирование разрушения корпуса ядерного реактора при гипотетической тяжелой аварии // Тезисы докладов III Всероссийской конференции «Ползучесть в конструкциях». - Новосибирск, 1995. - С. 17.

3. Danilov V.L., Dobrov M.V., Zarubin S.V. The Process of High-Temperature Creep and Break-Down of Nuclear Reactor Vessel under Anticipated Accident //Creep and Coupled Processes: Selected & Rev.Papers, 5th Intern. Symp. C&CP'95 Bialowieza, Poland.-Bialystok: Publishers Bialystok Technical University, 1996. - P. 57 - 62.
4. Danilov V.L., Dobrov M.V., Zarubin S.V., Fautrelle Y. The Thermomechanical Material State and Integrity Retaining of Reactor Vessel under an Anticipated Accident //Proceedings of the Fourth International Colloquium on Ageing of Materials and Methods for the Assessment of Lifetimes of Engineering Plant, Cape Town, South Africa, 21-25 April 1997. - Rotterdam: Balkema, 1997. - P. 107 - 112.
5. Danilov V.L., Dobrov M.V., Fautrelle Y., Zarubin S.V. The Reactor Vessel Thermostress State and Creep Rupture Analysis under Anticipated Accident //Proceedings of the Second International Symposium on Thermal Stresses and Related Topics. June 8-11, 1997. Rochester, New York, USA. Thermal Stresses '97. - Rochester: Publishers Rochester Institute of Technology, 1997. - P. 615 - 618.
6. Danilov V.L., Dobrov M.V., Zarubin S.V., Fautrelle Y. Accident Nuclear Reactor Vessel Cooling Regime Optimization under Core Melting //Proceedings of the Second World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization. - Zakopane, (Poland), 1997. - V.2. - P. 917 - 922.
7. Добров М. В. Математическое моделирование термомеханических процессов в нижней части корпуса ядерного реактора при запроектной аварии с разрушением активной зоны //Известия ВУЗов. Машиностроение. - 1997. - №1-3. - С. 143 - 144.
8. Данилов В.Л., Добров М.В., Зарубин С.В. Идентификация законов ползучести и длительной прочности корпусных сталей //Труды третьей международной конференции по идентификации динамических систем и обратным задачам. - Москва - Санкт-Петербург, 1998. - С. 443 - 449.
9. Danilov V.L., Dobrov M.V., Zarubin S.V. High -Temperature Creep and Rupture of Reactor Steel //Creep and Coupled Processes: Selected & Rev.Papers, 6th Intern. Symp. C&CP'98 Bialowieza, Poland. - Bialystok: Publishers Bialystok Technical University, 1998. - P. 153 - 161.

Типография МГТУ им. Баумана
Заказ №192, тираж 100 экз.
Подписано к печати 5.11.98г.
Объем 1 п. л.