

УДК 621.039.536.2:519.283:539.43

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ВЕРОЯТНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КОРПУСА ВВЭР

*Тутнов А.А., Тутнов Ан.А., Киселев А.С., Киселев Ал.С., Лоскутов О.Д.,
Даничев В.В., Ульянов А.И. (Ин-т реакторных технологий и материалов
РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Современные тенденции в развитии математического аппарата для расчетного анализа безопасности сложных технических объектов характеризуются созданием крупных программных комплексов, реализующих решение задач в обоснование различных проектно-эксплуатационных параметров в стационарных, переходных и аварийных режимах работы. К их числу относятся и интегральные расчетные коды для определения сопротивления хрупкому разрушению корпуса ВВЭР. Результаты расчетных исследований, полученные посредством таких кодов, используются как для детерминированного, так и вероятностного анализа безопасности ЯЭУ и АЭС в целом.

В настоящей статье приведено описание комплекса расчетных методик, предназначенных для оценки прочности и вероятности разрушения корпуса ВВЭР. Наиболее сложная задача возникает при моделировании аварийных режимов, сопровождающихся подачей охлаждающей воды в опускной канал корпуса. Корректное обоснование прочности конструкции в таких условиях базируется на последовательном решении следующих задач:

расчет кинетики перемешивания теплоносителя с охлаждающей водой в опускном канале и температуры перемешиваемой среды;

расчет нестационарных полей температуры в корпусе;

расчет кинетики напряженно-деформированного состояния корпуса в процессе реализации аварийного режима;

детерминированный расчет изменения во времени параметров механики разрушения корпуса реактора и их сопоставление с предельно допустимыми значениями для текущего состояния материала корпуса;

количественно-вероятностный анализ опасности разрушения корпуса.

Турбулентно-конвективное перемешивание теплоносителя в опускном канале реактора при аварийном заливе холодной воды моделировали на основе решения двумерной гидродинамической задачи в приближении Буссинеска. При этом рассматривали плоскую развертку опускного канала, вводили декартову систему координат, где ось X направлена по азимуту опускного канала, ось Y по высоте. Для построения системы уравнений введены функция тока ψ , вихрь φ , т.е. z -компонент ротора скорости, перпендикулярный плоскости течения теплоносителя, температура T . В системе координат X, Y уравнения для φ, ψ, T имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial \varphi}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + g \beta \frac{\partial T}{\partial x}; \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} &= -\varphi; \\ \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где ν, k — эффективный коэффициент вязкости и температуропроводности, зависящий от температуры и времени соответственно; β — коэффициент объемного расширения; g — ускорение свободного падения тела.

Система уравнений (1) дополняется граничными условиями в области подачи холодной воды, которыми являются кинетика изменения температуры и скорость заливаемой воды. В нижней части опускного канала указанные условия задаются в виде

отсутствия завихренности, температура теплоносителя принимается равной средне-объемной по активной зоне. Среднеобъемная температура теплоносителя определяется из элементарного теплового баланса, учитывающего перемешивание холодной и горячей воды, а также теплоотвод от корпуса реактора.

Система (1) решается конечно-разностным методом на прямоугольной сетке, аппроксимирующей развертку опускающего канала [1]. В качестве исходных данных задается история температурно-расходного режима охлаждающей воды, геометрические характеристики опускающего канала и эффективный объем теплоносителя, участвующий в конвективном движении. На рис. 1 приведены результаты расчета температуры теплоносителя и линий тока в опускающем канале ВВЭР-440 на 15-й секунде после подачи охлаждающей воды из двух патрубков системы аварийного охлаждения реактора.

На втором этапе рассчитывают температурные поля в корпусе реактора с использованием граничных условий, полученных из решения первой задачи. Нестационарная теплопроводность корпуса определяется в трехмерной постановке на основе решения уравнения [2]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \lambda \frac{\partial T}{\partial \tau}$$

с учетом граничных условий

$$\left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) l_x + \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) l_y + \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) l_z + q + h(T - T_\infty) = 0,$$

где Q — интенсивность источника тепла; λ — параметр материала; l_x, l_y, l_z — направляющие косинусы нормали к поверхности; q — тепловой поток; h, T_∞ — константы конвективного теплообмена.

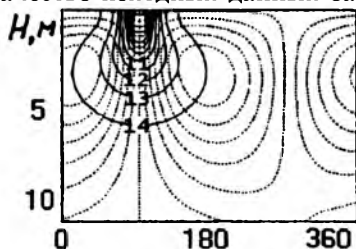
Решение задачи находится с помощью метода конечных элементов [3] на основе численного моделирования процессов нестационарной теплопроводности согласно методу Галеркина. На рис. 2 приведен пример расчетного распределения температуры внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440 при аварийном заливе воды.

С помощью метода конечных элементов можно решать разнородные задачи термомеханики сплошной среды и механики разрушения на основе задания единой полномасштабной модели корпуса в конечно-элементном представлении, адекватно отражающем его конструктивные особенности (рис. 3). Расчет напряженно-деформированного состояния корпуса относится к классу краевых задач механики сплошной среды, основанному на решении системы дифференциальных уравнений, которые в трехмерном варианте имеют вид

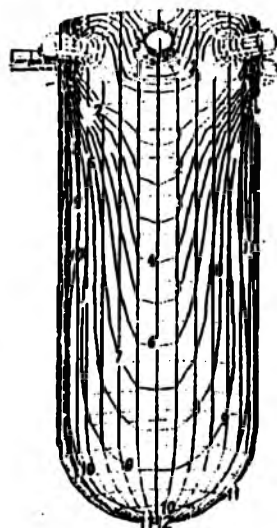
уравнения равновесия (статические)

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0 \quad (j = 1, 2, 3),$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений;



Р и с. 1. Плоская развертка опускающего канала с нанесенными линиями 5—14 уровня температуры 87,1, 103,9, 120,6, 137,4, 154,2, 171,7, 187,7, 204,5, 221,3, 238,1 °С теплоносителя (—) и потока (- -)



Р и с. 2. Распределение температуры 140 (1), 180 (6), 220 (11), 252 °С (15) на внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440 при аварийном заливе охлаждающей воды



Р и с. 3. Конечно- и суперэлементное представление модели корпуса реактора

решения. Однако для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости такой сложной конструкции, как корпус реактора, требующей подробной дискретизации объемной модели на конечные элементы (10 тыс. квадратных 20-узловых элементов), использование метода конечных элементов в его классической постановке оказывается неэффективным из-за ограниченных компьютерных ресурсов (по объему требуемой памяти и времени счета). Эффективность численного решения поставленной задачи существенно повышается за счет применения метода суперэлементов [4], который базируется на основных соотношениях метода конечных элементов и является надстройкой к нему. Указанный метод позволяет рассматривать конструкцию в виде совокупности соподчиненных подконструкций-суперэлементов различных уровней (см. рис. 3). Ключевым моментом является возможность на каждом уровне рассматривать подконструкции, которые состоят из суперэлементов более низких уровней, связанных между собой только в граничных узлах. Все внутренние узлы, т.е. узлы, не являющиеся граничными для подконструкции, исключаются из рассмотрения на следующем уровне с помощью специально разработанного алгоритма. Суть последнего заключается в представлении основного матричного уравнения метода конечных элементов $KP = P$ в виде

$$\begin{pmatrix} K_{ii} & K_{is} \\ K_{si} & K_{ss} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_i \\ U_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_i \\ P_s \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где K — матрица жесткости конечноэлементной модели конструкции; U — вектор узловых перемещений; P — вектор узловых усилий; i относится к внутренним узловым параметрам, s — к граничным.

Далее в соответствии с [4] вводится понятие матрицы формы суперэлемента:

$$F = \frac{-K_{ii}^{-1}K_{is}}{E}, \quad (3)$$

где E — единичная матрица порядка S .

уравнения совместности деформаций, связывающего между собой перемещения и деформации в любой точке расчетной области:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right);$$

уравнения связи компонентов тензоров напряжений и деформаций (упругая модель материала)

$$\epsilon_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} S_{ij} + 2G \epsilon_{ij},$$

где λ , G — упругие постоянные Ламе; $\epsilon_{kk} = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$; $\delta_{ij} = 1$ при $i = j$ и 0 при $i \neq j$.

Граничные условия на поверхности тела — силовые, кинематические и смешанные.

Аналитическое решение указанной системы уравнений для реальной конструкции корпуса получить невозможно, что предопределяет применение универсального метода конечных элементов для ее численного

Матрица жесткости K и вектор узловых усилий P суперэлемента с учетом уравнения (2) примут вид

$$K = K_{ss} - K_{si} K_{ii}^{-1} K_{is} = F^T K F; \quad (4)$$

$$P = P_s - K_{si} K_{ii}^{-1} P_i = F^T P. \quad (5)$$

При проведении расчета сначала в соответствии с формулами (3)—(5) строятся матрицы K и P суперэлементов нулевого уровня (см. рис. 3). Затем они асSEMBлируются в матрицы жесткости и вектора нагрузок суперэлементов первого уровня и т.д. Процесс сборки матриц идентичен алгоритму традиционного метода конечных элементов. После формирования матриц для суперэлементов высшего уровня решается система уравнений (2) относительно узловых перемещений, которые являются граничными для суперэлементов нижнего уровня. Проводя последовательно указанные действия над суперэлементами всех уровней, получим значения перемещений узлов исходной конечноэлементной модели, по которым определяется напряженно-деформированное состояние конструкции в целом. Метод суперэлементов позволяет использовать в вычислительной процедуре типовые неоднократно повторяющиеся суперэлементы, что дает возможность сформировать, например, конечноэлементную модель корпуса ВВЭР-440, используя всего 8% суперэлементов нулевого уровня от общего числа конечных элементов. Это эквивалентно сокращению числа степеней свободы модели более чем в 10 раз. На рис. 4 приведены результаты расчета деформирования корпуса ВВЭР-440 во время аварийного залива охлаждающей воды в зону реактора.

Для оценки трещиностойкости конструкций используется аппарат механики разрушения, в общей постановке моделирующий хрупкое, хрупковязкое и вязкое разрушение материалов [5]. Для корпуса реактора в основном используется критерий хрупкого разрушения, соответствующий условию начала лавинообразного развития трещины: $K_I \leq K_{Ic}$, где K_I , K_{Ic} — коэффициент интенсивности напряжения в устье трещины и его критическое значение (свойство материала) соответственно.

Коэффициент интенсивности напряжений для трещин нормального отрыва в некотором объеме материала определяется по формуле

$$K_I = \sqrt{J_l E}, \quad (6)$$

где J — интеграл по поверхности фрагмента малой трубки радиусом l коаксиальной линии фронта трещины протяженностью Δ :

$$J_k = \frac{1}{\Delta} \lim_{l \rightarrow 0} \int_{A_l} \left(W n_k - \sigma_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} n_j \right) dA, \quad k = 1, 2.$$

Здесь W — плотность энергии деформации; n_j — компоненты вектора нормали к поверхности A_l .

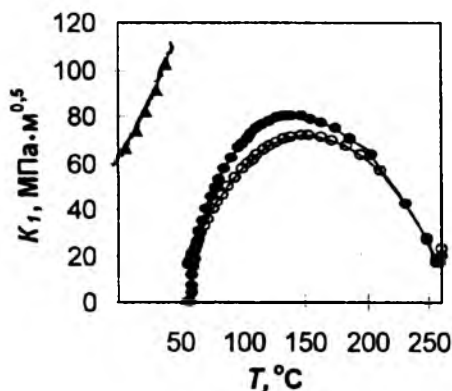
Для расчета J_k применен метод эквивалентного объема интегрирования [6]. Вводится понятие S -функции — безразмерной и непрерывной в объеме $\Delta V = V - V_p$, которая равна нулю на поверхности объема V и отлична от нуля на поверхности A_p . При этом выражение (6) преобразуется к виду

$$J_k = -\frac{1}{f} \int_{\Delta V} \left[\left(W \frac{\partial S}{\partial x_k} + S \frac{\partial W}{\partial x_k} \right) - \sigma_{ij} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_k} \frac{\partial S}{\partial x_j} + S \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_k} \right) \right] dV,$$

где f — площадь S -функции на поверхности A_p .



Рис. 4. Деформация корпуса через 900 с после начала аварийного залива воды



Р и с. 5. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от температуры в вершинах трещин, расположенных в сварных швах корпуса ВВЭР-440 в зоне максимального облучения (●) и вне ее (○); K_{Ic} (▲) — вязкость разрушения материала

более перспективное средство решения безопасности ЯЭУ. Методический аппарат решения данной задачи основан на расчете вероятности хрупкого разрушения, определении исходных распределений дефектов по размеру и плотности вероятности их текущего распределения [7].

В рамках первой задачи параметры неравенства $K_I \leq K_{Ic}$ представляются как случайные величины, плотность вероятности распределения которых $P_{K_I}(K_I)$ и $P_{K_{Ic}}(K_{Ic})$ соответственно при известной плотности вероятности распределения дефектов $P(x)$ по размеру x . Выражение (6) можно представить в виде

$$K_I = q\sqrt{x}, \quad (7)$$

где q — коэффициент, зависящий от вида нагружения, действующих напряжений, размера и формы конструкции. Тогда уравнение (7) запишется как

$$P_{K_I}(K_I) = P_x(x) \left| \frac{dx}{dK_I} \right| = P_x \left| \frac{K_I^2}{q^2} \right| \frac{2K_I}{q^2}. \quad (8)$$

Развивая соотношение (8) на случай наличия m трещин в рассматриваемом объеме материала конструкции при условии задания соответствующей вероятности $P_m(m)$, нетрудно показать, что вероятность начала хрупкого разрушения рассматриваемой области конструкции R будет определяться по формуле

$$P_R = \sum_{m=1}^{\infty} P_m(m) \left\{ 1 - \left[1 - \frac{2}{q^2} \int_0^{\infty} P_x \left[\left(\frac{K_I}{q} \right)^2 \right] K_I F_{K_{Ic}}(K_I) dK_I \right]^m \right\}, \quad (9)$$

где $F_{K_{Ic}}(K_I) = \int_0^{K_I} P_{K_{Ic}}(K_{Ic}) dK_{Ic}$.

Далее на основе использования полученных формул в общей методике выводятся зависимости вероятностей начала хрупкого разрушения отдельных протяженных зон конструкции и в ее полном объеме (интегральная оценка) для различных режимов эксплуатации во всей их совокупности с учетом вероятности реализации каждого составляющего. В итоге имеем, что для полного расчета необходимо располагать тремя

По приведенным соотношениям вычисляют параметры механики разрушения для трещины произвольной геометрии на основании результатов конечного элементного расчета напряженно-деформированного состояния конструкции, содержащей трещину. При этом в качестве области интегрирования выбирают один или несколько слоев конечных элементов, образующих фронт трещины.

В качестве примера на рис. 5 представлена зависимость K_I в наиболее глубокой точке фронта полуэллиптической трещины (размер полуосей 20 и 60 мм) на внутренней поверхности корпуса ВВЭР-440 от температуры в данной точке дефекта.

Наконец, итоговая задача предлагаемого методического комплекса — количественно-вероятностный анализ разрушения корпуса как наи-

статистическими распределениями параметров P_x , P_{xkc} , $P_m(m)$. Если два первых распределения характеризуют состояние одиночной трещины и не зависят от объема рассматриваемой зоны конструкции, то $P_m(m)$ будет меняться при варьировании объема.

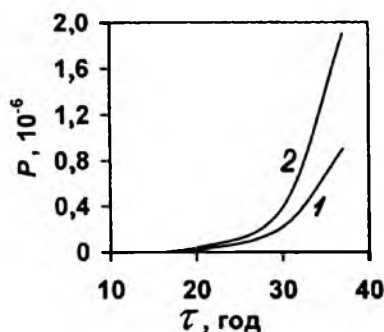
Задача определения исходных распределений дефектов по размеру заключается в получении зависимости действительной плотности распределения дефектов по размеру $P_u(a)$ от измеренной плотности $P_g(a)$ и вероятности обнаружения дефекта $P_k(a)$ размером a согласно соотношению

$$P_u(a) = P_g(a)P_k(a) / \int_0^{\infty} P_g(a)P_k(a)da.$$

Вероятность $P_k(a)$ характеризует эффективность неразрушающего контроля и в общем случае зависит от размера регистрируемого дефекта, числа дублирующих измерений, технического совершенства (эффективности) измерительной аппаратуры. Необходимая для расчета вероятности разрушения P_R [соотношение (9)] плотность распределений $P_m(m)$ дефектов, обнаруженных при контроле с учетом возможных пропусков, рассчитывается на основе нормального закона распределений.

В качестве примера расчета на рис. 6 приведены зависимости вероятности разрушения корпуса (зона сварного шва) от времени эксплуатации реактора в нормальном режиме и с учетом возникновения аварийной ситуации (вероятность однократного возникновения за 40 лет составляет 10^{-2}). В последнем случае отношение среднегодовой вероятности крупномасштабного разрушения корпуса к вероятности возникновения каких-либо течей составляет примерно 10^{-7} , что является основанием применения для конструкции корпуса концепции «течь перед разрушением».

Описанные методы решения отдельных задач легли в основу единого вычислительного программного комплекса МАВР 2.1 (CORPUS), в котором автоматизированы многочисленные интерфейсные связи между отдельными программными блоками, реализующими решение частных задач по обработке и передаче массивов информации при переходе от одного этапа расчета к другому. Ключевые программные блоки — расчет напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости конструкции верифицированы на большом числе экспериментальных данных об исследовании прочностных характеристик различных реакторных конструкций. Верификацию проводили и в рамках международных исследовательских программ FALSIRE II [8], RPVICAS [9]. Расчеты гидродинамики теплоносителя в опускном канале ВВЭР-440 тестировали по экспериментальным данным, полученным в период высокотемпературной обкатки блока на Кольской АЭС. Хорошие результаты верификационных исследований дают основание использовать разработанные методические и программные комплексы для практических расчетов прочности и надежности корпуса ВВЭР.



Р и с. 6. Зависимость вероятности разрушения сварного шва (цилиндрическая часть корпуса) от срока эксплуатации: 1 — нормальные условия работы; 2 — режим с аварийным заливом холодной воды

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тутнов Ан.А., Кульжик М.Н. Моделирование перемешивания теплоносителя в опускном канале реактора при аварийном заливе холодной воды: Препринт ИАЭ-5693/4, 1993.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
3. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964.

4. Постнов В.А., Тарануха Н.А. Метод модуль-элементов в расчетах судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990.
5. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974.
6. Вычислительные методы в механике разрушения. Под ред. С. Аттлури. М.: Мир, 1990.
7. Тутнов А.А., Ткачев В.В. Расчет вероятности начала хрупкого разрушения сосудов под давлением. — Атомная энергия, 1988, т. 64, вып. 3, с. 188—194.
8. FALSIRE-PHASE II. CSNI Project for Fracture Analyses of Large-Scale International Reference Experiments. OCDE /GD (96) 187, 49689, Paris, November 1996.
9. International Comparative Assessment Study on Reactor Pressure Vessel Pressurised-Thermal-Shock. OECD, 69751, Orlando, Florida, 1998.

Поступила в Редакцию 26.05.99

УДК 666.764.2+666.97.4.2:621.039.58

ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ПОКРЫТИЯ ЛОВУШКИ ИЗ ДИОКСИДЦИРКОНИЕВОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

*Акопов Ф.А., Вальяно Г.Е., Минеев В.Н., Фунтиков А.И., Чернышов Г.П.
(НИЦ ТИВ ОИВТ РАН)*

Предотвращение последствий запроектной тяжелой аварии посредством удержания расплава материала активной зоны связано с созданием ловушки, расположенной вне корпуса реактора. Применение для этого высокотемпературных материалов, обладающих высокой химической стойкостью, в частности, на основе диоксида циркония в значительной мере позволит локализовать и длительно удерживать расплав [1, 2].

Керамика на основе диоксида циркония нашла широкое применение в современной технологии. Ее используют в металлургии высокотемпературных металлов и специальной стали, лабораторном оборудовании. Добавка относительно небольшого количества щелочно- или редкоземельных оксидов дает возможность стабилизировать оксид циркония в одной из его высокотемпературных фаз (кубической) и тем самым повысить термостойкость. Такая технология, в частности, была разработана в 70—80-х годах в ИВТАНе для газового канала магнетогидродинамического генератора с температурой потока до 2800 К [3].

Взаимодействие керамики на основе оксида циркония с расплавом активной зоны и его отдельными компонентами изучали в работах [1,2]. Однако низкая теплопроводность материалов вызывала необходимость уточнения термостойкости при внезапном начальном разогреве, так называемом тепловом ударе. Термостойкость изделий из диоксида циркония, как правило, повышается за счет создания микротрещиноватости, а также добавки к основной части материала со стабилизированной кубической структурой мелкодисперсной моноклинной фазы [3].

В настоящей работе приведены результаты испытаний термической стойкости элементов, которые изготовлены из оксидной керамики кубической фазы, имеющей зернистое строение. Для испытаний взяты образцы диаметром и высотой по 30 мм и полномасштабные изделия — кирпичи размером 230×115×65 мм.

Образцы из диоксида циркония, стабилизированного Y_2O_3 молярной долей 10%, изготавливали прессованием при давлении 200 МПа с последующим обжигом при 2000 К в течение 13 ч. Технология приготовления исходного материала была близка к промышленной и заключалась в измельчении электроплавленного состава, выделении отдельных фракций по размеру зерен и их смешении в определенной пропорции. Технология изготовления кирпичей из материала кубической структуры, стабилизированного СаО молярной долей 6%, включала помол брикетов с размером зерен менее 2 мм, добавку моноклинной фазы диоксида циркония молярной долей 13,5% с размером зерен менее 0,088 мм, прессование при давлении 100 МПа и обжиг при 2000 К в течение 6 ч [4].