

Влияние истории термомеханического нагружения на напряженность корпусов реакторов ВВЭР АЭС при термошоке

В. В. Харченко^а, А. Ю. Чирков^а, С. В. Кобельский^а, В. И. Кравченко^а,
В. А. Пиминов^б, И. Ф. Акбашев^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б ОАО ОКБ "Гидропресс", Подольск, Россия

Представлены результаты расчетов кинетики напряженно-деформированного состояния и коэффициентов интенсивности напряжений для поверхностных и поднаплавочных кольцевых трещин при моделировании режима аварийного охлаждения активной зоны реактора ВВЭР-1000. Методика расчета базируется на смешанной формулировке метода конечных элементов, обеспечивающей устойчивость численного решения и высокую точность получения результатов как для перемещений, так и для напряжений и деформаций. Выполнен анализ влияния густоты конечноэлементного разбиения в окрестности вершины поверхностной и поднаплавочной кольцевых трещин на точность и сходимость вычисления параметров механики разрушения при моделировании термошока. Приведены результаты расчетов кинетики коэффициентов интенсивности напряжений с учетом истории термосилового нагружения и полей остаточных технологических напряжений. Показано, что игнорирование в расчетах коэффициентов интенсивности напряжений для поднаплавочных трещин истории упругопластического деформирования и полей остаточных технологических напряжений может привести к переоценке прочности и ресурса корпуса реактора.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, остаточные напряжения, коэффициент интенсивности напряжений, кольцевая трещина, корпус реактора, термошок, смешанная схема метода конечных элементов.

Введение. Обеспечение условий безопасной эксплуатации реакторных установок АЭС требует усовершенствования расчетных моделей и методик расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) корпусов реакторов (КР) с учетом их дефектности и истории термомеханического нагружения при различных режимах эксплуатации.

При математическом моделировании кинетики термомеханического состояния корпуса реактора необходимо решать весьма сложные нелинейные термомеханические нестационарные краевые задачи. Расчет кинетики НДС корпуса реактора можно свести к последовательному решению задач нестационарной теплопроводности и нелинейной термомеханической краевой задачи. Для адекватного описания изменения напряженности КР при реальных режимах эксплуатации, включая аварийное охлаждение (термошок), следует учитывать совместное влияние таких факторов, как история нагружения, неоднородность нагрева и охлаждения, пластическое деформирование, неоднородность физико-механических свойств материала.

В литературных источниках [1–14] представлены многочисленные данные, отражающие опыт и различные аспекты расчетного обоснования прочности корпусов реакторов ВВЭР и PWR. Приведены также нормативные подходы, действующие эксплуатационные нагрузки, а также нагрузки, реали-

зубые в режимах аварийного охлаждения активной зоны реактора и проектных авариях. Представлены данные о физико-механических свойствах основного металла и металла наплавки КР, затронуты материаловедческие аспекты обеспечения прочности. Подробно описано современное состояние программного обеспечения расчетов на прочность, приведены примеры применения для различных типов расчетов и расчетных моделей КР.

В настоящее время при оценке прочности КР используется подход, включающий расчет параметров механики разрушения, в основном коэффициентов интенсивности напряжений (КИН). В то же время известные программные продукты оказываются недостаточно точными и эффективными при решении прикладных задач механики разрушения, в которых учитывается неупругое деформирование материала в окрестности фронта трещины, поскольку большая размерность дискретной задачи и существенная нелинейность свойств материала в вершине трещины могут привести к потере устойчивости или нарушению сходимости вычислительных процессов. Традиционные подходы повышения точности путем увеличения густоты конечно-элементных разбиений или перехода к более сложным конечным элементам не всегда эффективны даже в случае линейных задач. Для нестационарных и нелинейных пространственных задач термомеханики они практически неприемлемы, так как увеличение порядка решаемой системы нелинейных алгебраических уравнений и большое количество временных шагов и итераций приводят к значительному росту вычислительных затрат. В связи с этим возникает необходимость в разработке более совершенного аппарата проведения расчетных исследований, включающего новые подходы и алгоритмы решения нелинейных термомеханических задач и задач механики разрушения.

В настоящей работе получены новые результаты расчетов кинетики КИН КР ВВЭР-1000 АЭС с дефектами типа трещин, расположенными в области активной зоны. Расчеты выполнены для КР с трещиной, “встроенной” в конечноэлементную модель, что соответствует мировой практике и рекомендациям МАГАТЭ [15], с учетом неоднородного трехмерного нагружения КР, которое обусловлено появлением холодных “язычков” при термошоке.

Методика расчета базируется на смешанной формулировке МКЭ, обеспечивающей устойчивость численного решения и высокую точность получения результатов как для перемещений, так и для напряжений и деформаций [16]. Методика реализована в виде программных продуктов RELAX [16] и SPACE [17] для решения широкого круга прикладных задач, рассматриваемых при математическом моделировании процессов формирования и перераспределения напряжений в ответственных конструктивных элементах реакторных установок ВВЭР АЭС.

Расчетная модель корпуса реактора ВВЭР-1000. Конечноэлементная модель КР ВВЭР-1000 представляет собой толстостенный цилиндрический сосуд с эллиптическим днищем и крышкой (рис. 1). Толщину антикоррозионной наплавки на внутренней поверхности КР в расчетах принимали равной 7 мм. Физико-механические свойства металла корпуса и наплавки принимали зависящими от температуры. Для моделирования аварийной ситуации – термошока – задавали на внутренней поверхности корпуса изменяющиеся во времени и пространстве граничные условия конвективного теплообмена (тем-

пературы теплоносителя и коэффициенты теплопередачи) и давление в опускной камере корпуса с использованием результатов теплогидравлических расчетов, выполненных в ОКБ “Гидропресс”. Наружную поверхность корпуса полагали теплоизолированной. При расчете напряженно-деформированного состояния в качестве нагрузок задавали внутреннее давление в КР, распределения температур, полученные при решении задачи нестационарной теплопроводности, и остаточные напряжения. Полагали, что постулируемая кольцевая трещина расположена на уровне сварного шва № 4 под входным патрубком на оси “языка” холодной воды. Расчеты напряженности КР выполняли для поверхностной и поднаплавочной кольцевых трещин с применением процедуры фрагментации (рис. 1).

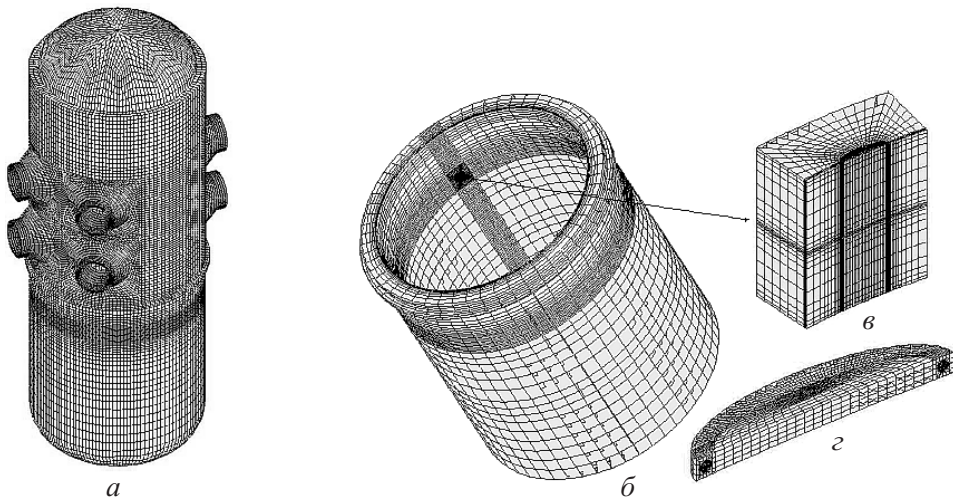


Рис. 1. Расчетные дискретные модели КР ВВЭР-1000: *а* – полная модель; *б* – модель цилиндрической части; *в* – фрагмент с “встроенной” трещиной; *г* – сетка, распространяемая вдоль фронта трещины.

Расчет тепловых полей. Решали нестационарную задачу теплопроводности с учетом зависимости теплофизических свойств материала от температуры. На рис. 2 показано распределение температуры на внутренней поверхности КР при моделировании аварийной ситуации с термошоком в момент времени 500 с. Характерной особенностью температурного распределения является его существенная неоднородность по угловой координате, обусловленная появлением “языков” холодной воды. Сравнение полученных температурных полей с результатами расчетов, полученными в ОКБ “Гидропресс”, свидетельствует об их согласовании (различие в температурах не превышает 1%).

Расчет остаточных технологических напряжений. Разработана и реализована численная процедура оценки полей остаточных напряжений (ОН) в КР при моделировании технологического цикла наплавка–отпуск–гидроиспытания. С ее использованием проведен численный анализ процессов формирования и перераспределения полей ОН для технологического цикла: нанесение антикоррозионной наплавки; нагрев под термообработку; выдержка при температуре высокого отпуска; охлаждение до нормальной температуры и гидравлические испытания на заводе-изготовителе.

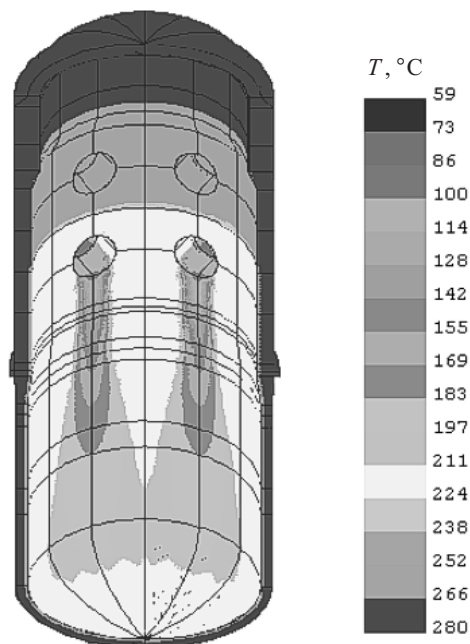


Рис. 2. Распределение температуры на внутренней поверхности КР в момент времени 500 с.

Выполнен анализ применимости данной процедуры расчета ОН для выбранных параметров указанного технологического цикла. При этом получены растягивающие остаточные осевые и окружные напряжения в наплавке, составляющие 250 и 200 МПа соответственно. В области основного металла, примыкающей к наплавке на расстоянии 12 мм, действуют также растягивающие остаточные напряжения, которые не превышают 40 МПа. Далее в основном металле действуют сжимающие напряжения (14 МПа). Отметим, что зона растягивающих напряжений локализуется не только в металле наплавки, но и в области основного металла КР, прилегающей к ней. Указанная особенность имеет важное значение, поскольку расположение дефектов в этой области приводит к наибольшей опасности разрушения КР при аварийном охлаждении. Полученное распределение ОН согласуется с известными результатами, представленными в [2, 6]. Сравнение расчетных ОН, определенных с помощью используемой методики, с данными нормативного документа МРКР-СХР-2004 показывает, что в металле наплавки их расхождение не превышает 1,5%, в зоне основного металла, примыкающей к наплавке, – 17% и в остальной части корпуса – 9%.

Расчет кинетики НДС КР при аварийном охлаждении. При моделировании режима аварийного охлаждения активной зоны реактора решали задачу неизотермической термопластичности с учетом поэтапного прослеживания истории нагружения [18].

Результаты расчетов НДС представлены на рис. 3 в виде распределения осевых напряжений по толщине стенки КР ВВЭР-1000 на уровне 4-го сварного шва, как одного из соответствующих наибольшим напряжениям при рассматриваемом режиме термошока, для момента времени 2000 с.

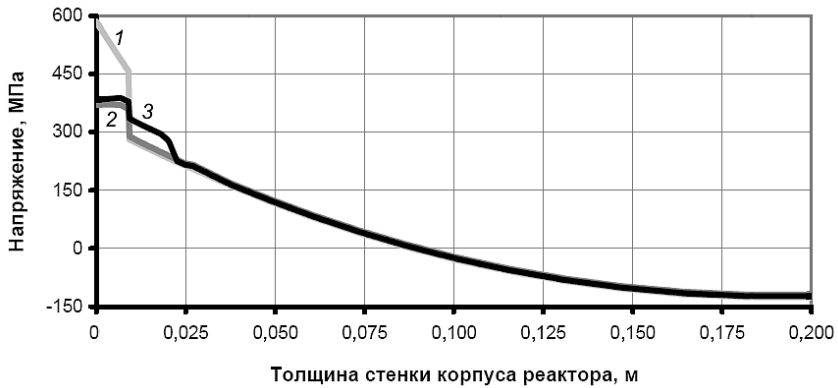


Рис. 3. Распределение осевых напряжений по толщине стенки КР при аварийном охлаждении для момента времени 2000 с: 1, 2 – упругий и упругопластический расчет соответственно; 3 – упругопластический расчет с учетом остаточных напряжений.

Расчет кинетики КИН для поднаплавочных и поверхностных трещин.

На рис. 4 представлены результаты упругого расчета КИН для наиболее глубокой точки поднаплавочной кольцевой полуэллиптической трещины глубиной 15 мм, расположенной на уровне 4-го сварного шва КР ВВЭР-1000, полученные при моделировании режима аварийного охлаждения активной зоны реактора. Для определения КИН применяли метод эквивалентного объемного интегрирования [19]. Шаг сетки в окрестности вершины трещины принимали равным 100 мкм. Сравнение расчетных значений КИН с полученными в ОКБ “Гидропресс” свидетельствует об их согласовании (расхождение между максимальными значениями не превышает 1%).

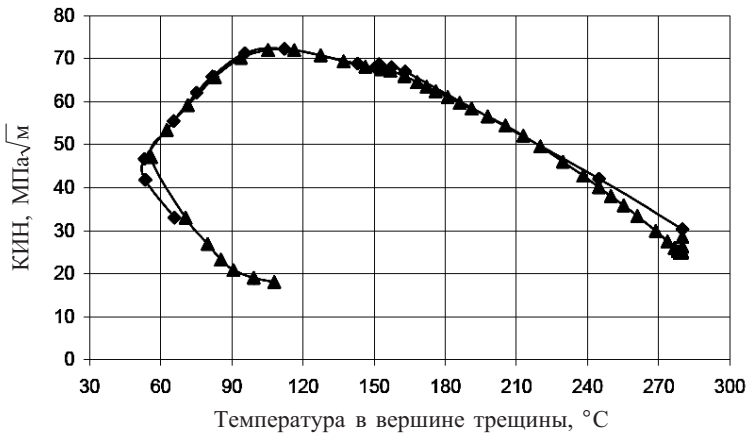


Рис. 4. Изменение КИН в зависимости от температуры в вершине поднаплавочной кольцевой трещины глубиной 15 мм: \blacklozenge – данные, полученные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины; \blacktriangle – данные ОКБ “Гидропресс”.

При решении задачи в упругопластической постановке для определения КИН применяли методику, основанную на концепции вычисления G -интеграла закрытия трещины [20]. Проанализировано влияние густоты конечно-элементного разбиения в окрестности вершины поверхностной и поднапла-

вочной кольцевых трещин на точность, сходимость и устойчивость вычисления КИН при моделировании термошока. Использовали равномерное конечно-элементное разбиение в окрестности вершины трещины. Расчеты проводили в осесимметричной постановке на последовательности сгущаемых сеток. Величину шага сетки h в окрестности вершины трещины принимали равной 1000; 100; 10; 1; 0,1 и 0,01 мкм. Наибольшее расхождение в результатах наблюдалось на ниспадающих ветвях, связанных с разгрузкой материала в вершине трещины. Установлено, что для сеток с величиной шага 0,1 и 0,01 мкм погрешность в определении расчетных значений КИН не превышает 1%. Поэтому все последующие расчеты в осесимметричной постановке проводили для сеток с величиной шага в окрестности вершины трещины, равной 0,1 мкм.

В качестве иллюстрации на рис. 5 представлены результаты упругопластических расчетов по сходимости КИН на последовательности сгущаемых сеток для поверхностной кольцевой трещины глубиной 22 мм при моделировании термошока.

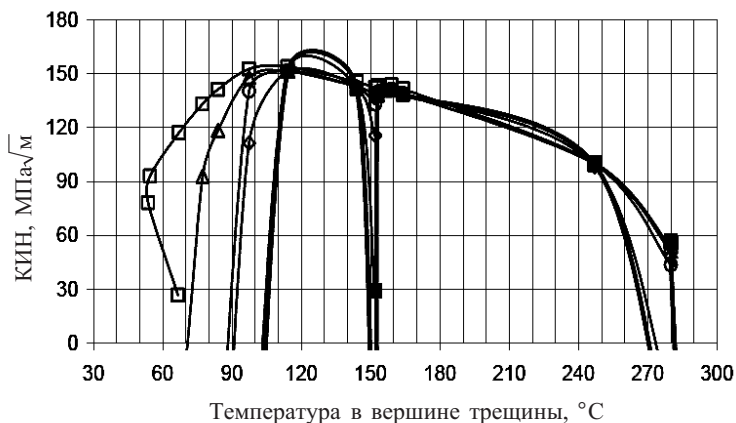


Рис. 5. Зависимость КИН от величины шага сетки при упругопластическом расчете для поверхностной кольцевой трещины глубиной 22 мм: □ — $h = 1000$ мкм; ◇ — $h = 1$ мкм; △ — $h = 100$ мкм; ■ — $h = 0,1$ мкм; ○ — $h = 10$ мкм; ▲ — $h = 0,01$ мкм.

Согласно полученным результатам, величина шага сетки в окрестности вершины трещины играет существенную роль при определении расчетных значений КИН. Характерной особенностью упругопластического решения, полученного с использованием сетки с достаточно мелкими разбиениями, является наличие ниспадающих ветвей в начале, середине и в конце температурной зависимости КИН, что связано с разгрузкой материала и возникновением зоны сжимающих напряжений в окрестности вершины трещины. Наблюдаемые ниспадающие участки (рис. 5) обусловлены соответствующими по времени участками замедления падения температуры теплоносителя в граничных условиях режима термошока. Установлено, что область сжимающих напряжений для поднаплавочной и поверхностной кольцевых трещин распространяется в глубь основного металла на величину 140 и 480 мкм соответственно. Для поднаплавочной трещины область сжимающих напряжений на границе раздела основного металла и металла наплавки распространяется в глубь наплавки на величину 900 мкм.

Таким образом, использование в упругопластических расчетах недостаточно мелких разбиений в окрестности вершины трещины не позволяет выявить зоны разгрузки, что искажает истинную зависимость КИН от температуры, полученную на достаточно густых сетках, при которых имеет место сходимость численных результатов.

На рис. 6–8 представлены данные расчетов кинетики КИН для поднаплавочной и поверхностной кольцевых трещин глубиной 15 и 22 мм соответственно. Рассматривали три варианта решения задачи: упругий расчет; упругопластический расчет с учетом истории нагружения и упругопластический расчет с учетом технологического цикла формирования и перераспределения ОН.

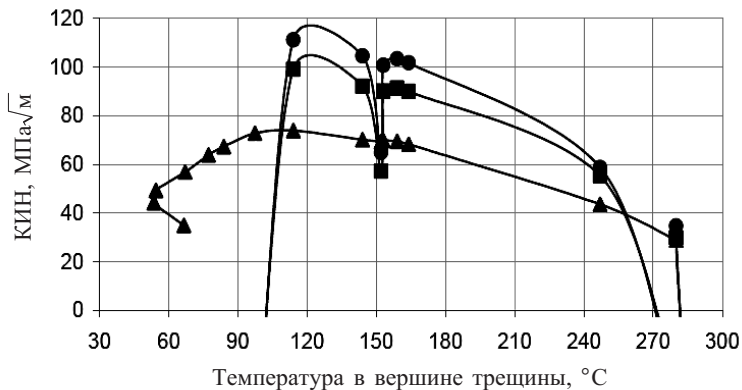


Рис. 6. Кинетика КИН для наиболее глубокой точки поднаплавочной кольцевой трещины глубиной 15 мм. (Здесь и на рис. 7, 8: ▲, ■ – упругий и упругопластический расчет соответственно; ● – упругопластический расчет с учетом ОН.)

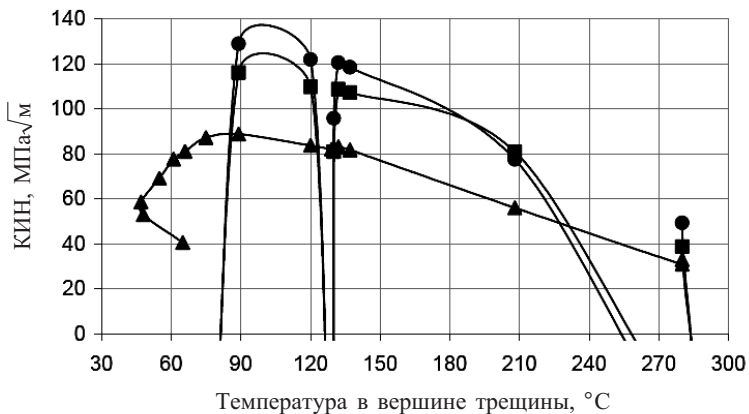


Рис. 7. Кинетика КИН на границе раздела основного металла и наплавки поднаплавочной кольцевой трещины глубиной 15 мм.

Анализ результатов расчетов для поднаплавочной трещины показывает, что максимальные значения КИН получены при использовании варианта решения задачи, при котором учитываются технологический цикл формирования и перераспределения полей ОН, а также история упругопластического

деформирования КР с трещиной при аварийном охлаждении активной зоны реактора. При упругом расчете получены заниженные значения КИН по сравнению с упругопластическим моделированием истории нагружения, т.е. использование линейной механики разрушения может приводить к завышенной оценке допустимых нагрузок. При упругопластическом расчете без учета остаточных технологических напряжений значения КИН примерно на 25...30% больше, чем при упругом расчете. В то же время при решении задачи в упругопластической постановке с учетом ОН, обусловленных наплавкой, отпуском и гидроиспытаниями, получен дополнительный рост значений КИН на 10...15% для рассмотренных условий нагружения КР. Для всех приведенных вариантов расчетов значения КИН на границе раздела основного металла и наплавки оказываются выше, чем для наиболее глубокой точки поднаплавочной кольцевой трещины.

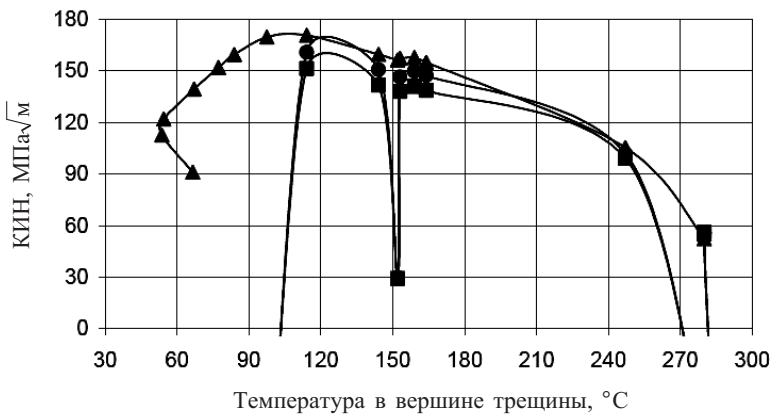


Рис. 8. Кинетика КИН поверхностной кольцевой трещины глубиной 22 мм.

Таким образом, игнорирование при расчетах КИН для поднаплавочных трещин истории упругопластического деформирования и полей остаточных технологических напряжений может привести при оценке прочности и ресурса службы КР к опасным ошибкам. Для поверхностных кольцевых трещин упругий расчет является более консервативным по сравнению с упругопластическим моделированием истории нагружения. Отметим, что при упругопластическом расчете по сравнению с упругим наблюдается более резкое падение зависимости КИН от температуры в конце режима аварийного охлаждения как для поверхностных, так и поднаплавочных трещин. Указанная особенность обусловлена разгрузкой материала и возникновением зоны сжимающих напряжений в вершине трещины, что может быть использовано для обоснования дополнительных резервов прочности КР при аварийных ситуациях.

Резюме

Представлено результати розрахунків кінетики напружено-деформованого стану та коефіцієнтів інтенсивності напружень для поверхневих і піднаплавних кільцевих тріщин при моделюванні режиму аварійного охолодження

активної зони реактора ВВЕР-1000. Методика розрахунку базується на змішаному формулюванні методу скінченних елементів, що забезпечує стійкість числового розв'язку і високу точність одержання результатів як для переміщень, так і для напружень і деформацій. Проведено аналіз впливу густоти скінченноелементного розбиття в околі вершини поверхневої і піднаплавної кільцевих тріщин на точність і збіжність обчислення параметрів механіки руйнування при моделюванні термошоку. Одержано результати розрахунків кінетики коефіцієнтів інтенсивності напружень з урахуванням історії термосилового навантаження і полів залишкових технологічних напружень. Встановлено, що ігнорування при розрахунку коефіцієнтів інтенсивності напружень для піднаплавних тріщин історії пружно-пластичного деформування і полів залишкових технологічних напружень може привести до переоцінки міцності і ресурсу корпусу реактора.

1. Акбашев И. Ф., Максимов Ю. М., Пиминов В. А., Марголин Б. З. Основные результаты апробации новых подходов в определении ресурса корпусов АЭС с ВВЭР // Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС. – СПб., 2002. – С. 6 – 11.
2. РД ЭО 0606-2005. Методика расчета на сопротивление хрупкому разрушению корпусов реакторов АЭС с ВВЭР (МРКР-СХР-2004). – СПб.; М., 2004. – 65 с.
3. Шарый Н. В., Семшикин В. П., Пиминов В. А., Драгунов Ю. Г. Прочность основного оборудования и трубопроводов реакторных установок ВВЭР. – М.: Изд. АТ, 2004. – 496 с.
4. Резепов В. К., Денисов В. П., Кирилюк Н. А. и др. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций. – М.: ИКЦ “Академкнига”, 2004. – 333 с.
5. Марголин Б. З., Ривкин Е. Ю., Карзов Г. П. и др. Новые подходы к расчету хрупкой прочности корпусов реакторов // Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС. – СПб., 2000. – С. 100 – 119.
6. Kostylev V. I. and Margolin B. Z. Determination of residual stress and strain fields caused by cladding and tempering of reactor pressure vessels // Int. J. Press. Vess. Piping. – 2000. – 77. – P. 723–735.
7. Krasowsky A. Ja., Orynyak I. V., and Gienko A. Y. Approximate closed-form weight function for elliptic crack in an infinite body // Int. J. Fract. – 1999. – 99. – P. 123 – 134.
8. Харченко В. В., Кобельский С. В., Кравченко В. И. и др. Определение коэффициента интенсивности напряжений для поверхностных полуэллиптических трещин в корпусе реактора ВВЭР-1000 по результатам решения краевых задач термоупругости на основе смешанной схемы МКЭ // Пробл. прочности. – 2007. – № 2. – С. 45 – 51.
9. МТ-Д.0.03.391-06. Методика оценки прочности и ресурса корпусов реакторов ВВЭР в процессе эксплуатации. – Киев, 2009. – 50 с.

10. *Unified Procedure for Lifetime Assessment of Components and Piping in VVER NPPs "Verlife"*. – Version 8. – P. 275.
11. *Moinereau D., Bezdikian G., and Faidy C.* Methodology for the pressurized thermal shock evaluation: recent improvements in French RPV PTS assessment // *Int. J. Press. Vess. Piping*. – 2001. – **78**, No. 2-3. – P. 69 – 83.
12. *Keim E., Schmidt C., Schöpfer A., and Hertlein R.* Life management of reactor pressure vessels under pressurized thermal shock loading: deterministic procedure and application to Western and Eastern type of reactors // *Ibid.* – P. 85 – 98.
13. *Ill-Seok Jeong, Changhuei Jang, Jun-Hyun Park, et al.* Lessons learned from the plant-specific pressurized thermal shock integrity analysis on an embrittled reactor pressure vessel // *Ibid.* – P. 99 – 109.
14. *Bass B. R., Pugh C. E., Sievers J., and Schulz H.* Overview of the international comparative assessment study of pressurized thermal-shock in reactor pressure vessels (RPV PTS ICAS) // *Ibid.* – P. 197 – 211.
15. *IAEA-EBP-WWER-08 (Rev. 1).* Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Power Plants. – Vienna: IAEA, 2006. – P. 65.
16. *Чирков А. Ю.* Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – Киев: Изд. Ин-та пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.
17. *Програмне забезпечення "Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій" (SPACE)* // Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. – 2004.
18. *Чирков А. Ю.* Анализ краевых задач, описывающих неизотермические процессы упругопластического деформирования с учетом истории нагружения // *Пробл. прочности*. – 2006. – № 1. – С. 69 – 99.
19. *Вычислительные методы в механике разрушения* / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 391 с.
20. *Чирков О. Ю.* Розвиток та реалізація змішаного методу скінченних елементів у задачах міцності коливань та стійкості елементів конструкцій: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – К., 2008. – 41 с.

Поступила 21. 06. 2009