

Определение коэффициента интенсивности напряжений для поверхностных полуэллиптических трещин в корпусе реактора ВВЭР-1000 по результатам решения краевых задач термоупругости на основе смешанной схемы МКЭ

В. В. Харченко, С. В. Кобельский, В. И. Кравченко, А. Ю. Чирков, А. А. Звягинцева

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

Приведены результаты численного анализа коэффициентов интенсивности напряжений K_I для поверхностных полуэллиптических трещин в корпусе ядерного реактора ВВЭР-1000 при моделировании режима аварийного охлаждения, полученные с помощью известных инженерных методик, метода эквивалентного объемного интегрирования и прямого метода. Инженерные методики базируются на результатах численного решения краевых задач термоупругости в осесимметричной постановке на основе смешанной схемы метода конечных элементов, реализованной в программном обеспечении RELAX. Для определения K_I в пространственной постановке применяется программное обеспечение SPACE.

Ключевые слова: метод конечных элементов, смешанная схема, коэффициент интенсивности напряжений, метод эквивалентного объемного интегрирования, прямой метод, полуэллиптическая трещина, корпус реактора.

Одним из условий безопасной эксплуатации оборудования АЭС является обеспечение целостности корпуса реактора как в нормальных условиях эксплуатации, так и в аварийных ситуациях. При режимах работы реакторов, вызванных аварийными ситуациями, в частности термошоком, за основной критерией прочности материала корпуса принимается его способность сопротивляться хрупкому разрушению. Необходимой базой для этого является расчет коэффициентов интенсивности напряжений K_I .

В настоящей работе приведены результаты сравнения расчетных значений K_I для продольной поверхностной полуэллиптической трещины в корпусе реактора ВВЭР-1000, полученные с помощью инженерных и численных методик. К первым относятся методики, основанные на применении приближенных формул [1, 2] и использующие безразмерные значения K_I , полученные с помощью метода весовых функций (МВФ) [3, 4], ко вторым – методики, реализующие метод эквивалентного объемного интегрирования (ЭОИ) [5] и прямой метод (ПМ) [6] на основе решения краевой задачи термоупругости с помощью смешанной схемы метода конечных элементов (МКЭ) [7], позволяющей повысить точность определения полей деформаций и напряжений по сравнению с классическим МКЭ в форме метода перемещений.

Коэффициент интенсивности напряжений при использовании инженерных методик [1–4] определяется из соотношения

$$K_I = \sigma Y a^{1/2}, \quad (1)$$

где σ – расчетное напряжение; Y – безразмерные функции для различных точек фронта трещины, учитывающие размеры трещины и толщину стенки корпуса.

Напряженное состояние на поверхности трещины (рис. 1) приводится в зависимости (1) к напряжениям, которые предлагается вычислять с использованием различных аппроксимирующих функций вдоль длины трещины по данным расчета напряженно-деформированного состояния конструкции без трещины.

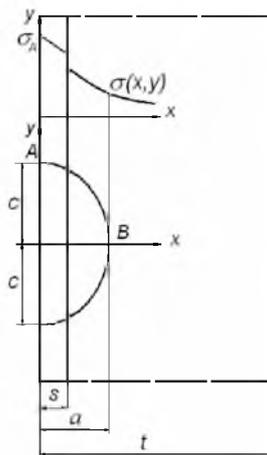


Рис. 1. Схема поверхностной полуэллиптической трещины.

При определении K_I для продольной поверхностной полуэллиптической трещины по методике [1] предполагалось линейное распределение нормальных напряжений по длине трещины, в качестве которых используются окружные напряжения.

Поскольку окружные напряжения на границе наплавки и обечайки корпуса терпят разрыв, для корректного их вычисления на поверхности наплавки (на рис. 1 точка A) и в наиболее глубокой точке трещины (точка B) эти напряжения приводятся к статически эквивалентной системе сил в предположении линейного распределения нормальных напряжений в наплавке и корпусе.

Для определения расчетных окружных напряжений в точках A и B (рис. 1) главный вектор P и главный момент M сил относительно центральной точки трещины записываются в виде

$$\begin{aligned} P &= P^H + P^O; \\ M &= M^H + M^O, \end{aligned} \quad (2)$$

где P^H , P^O , M^H и M^O – соответственно усилия и моменты, создаваемые напряжениями в наплавке и обечайке.

Представляя величины P и M через напряжения в точках A и B (рис. 1), а усилия и моменты в наплавке и обечайке через напряжения, полученные путем расчета по МКЭ, определяем неизвестные напряжения σ_A и σ_B .

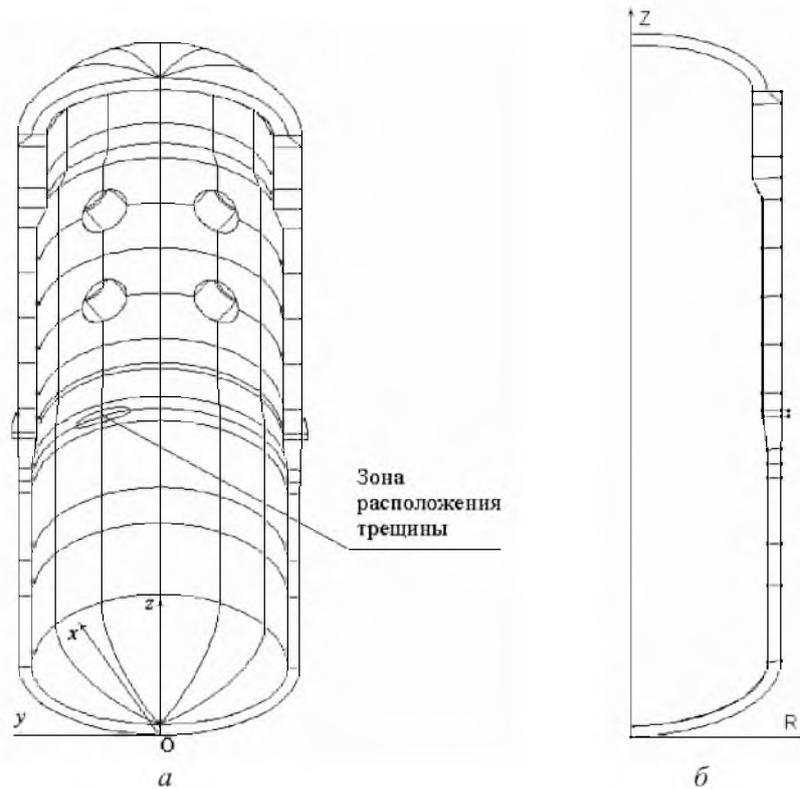


Рис. 2. Геометрическая модель корпуса реактора с встроенной трещиной: *a* – пространственная; *б* – осесимметричная.

Согласно методике, изложенной в [2], реализуется процедура вычисления K_I при произвольном распределении напряжений по длине трещины. Основное отличие этой методики от методики [1] заключается в аппроксимации нормальных напряжений их дискретными значениями, вычисленными с помощью МКЭ в 20-узловых точках по длине трещины.

Подход, основанный на определении K_I с помощью МВФ [3, 4], предполагает линейное распределение напряжений по длине трещины и принцип суперпозиции двух видов нагружения – однородного и линейного.

В соответствии с одной из известных численных методик при определении K_I используется энергетический J -интеграл Черепанова–Райса, рассчитываемый методом эквивалентного объемного интегрирования. При численной реализации метода использовались формулы вычисления J -интеграла в точках фронта произвольной трещины для задач линейной и нелинейной механики разрушения [5].

С помощью инженерных методик проведен сравнительный анализ величин K_I , рассчитанных для режима аварийного охлаждения корпуса реактора в предположении наличия на его внутренней стенке продольной поверхностной полуэллиптической трещины, проникающей через антикоррозионную наплавку. Толщина s наплавки составляла 9 мм. Трещина расположена на уровне сварного шва, соотношение полуосей трещины $a/c = 2/3$, глубина трещины – $1/10$ толщины стенки корпуса.

Термонапряженное состояние корпуса определяли для осесимметричной модели (рис. 2) при внешних воздействиях, обусловленных средой теплоносителя и давлением в опускной камере при разных моментах времени t : 600, 800, 1000, 1200, 1400, 2000, 2500, 3000, 3500 и 4000 с. При этом использовали эпюры распределения упругих окружных напряжений по толщине стенки корпуса на уровне сварного шва (рис. 3) для моментов времени 600, 2000 и 4000 с. Предполагали, что в момент начала аварийного охлаждения стенка корпуса равномерно прогрета до 290°C . Температурные напряжения в наплавке и основном металле принимали нулевыми. Задачу решали с учетом изменения физико-механических свойств металлов корпуса и наплавки от температуры.

Кинетика K_I на поверхности наплавки (на рис. 1 точка A) и в наиболее глубокой точке трещины (точка B) в процессе охлаждения корпуса показана на рис. 4.

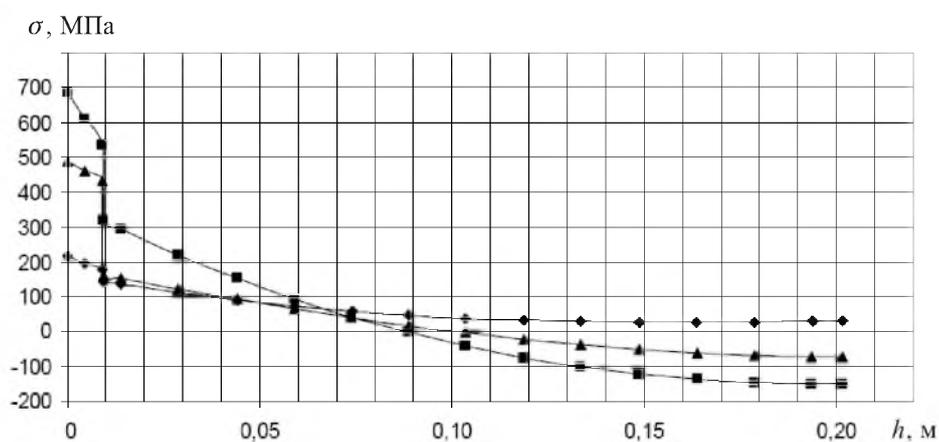


Рис. 3. Распределение упругих окружных напряжений по толщине стенки h корпуса реактора при аварийном охлаждении в моменты времени 600 (◆), 2000 (▲) и 4000 с (■).

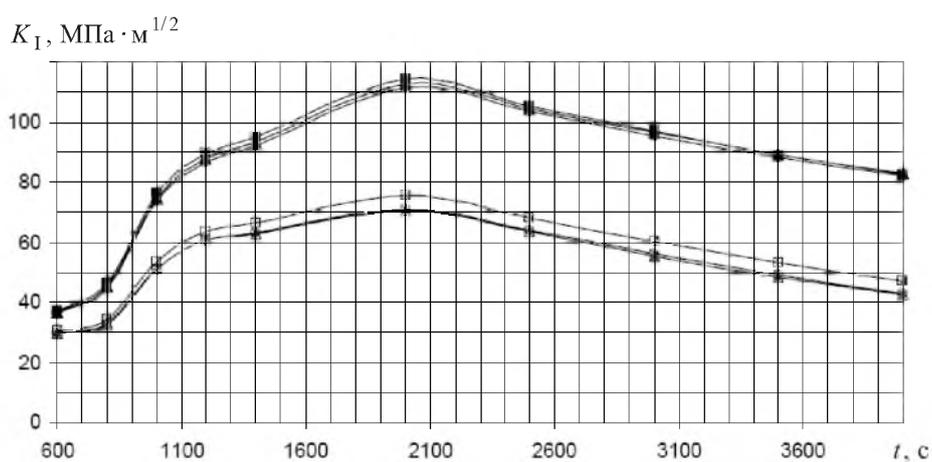


Рис. 4. Изменение во времени K_I на поверхности наплавки (A): ▲, ■, ● – соответственно данные [3], [4] и [5, 6] и в наиболее глубокой точке трещины (B): △, □, ○ – соответственно данные [3], [4] и [5, 6].

Из представленных данных видно, что результаты, полученные по инженерным методикам, достаточно близки. Вычисленные с помощью методики [2] максимальные значения K_I в наиболее глубокой точке трещины приблизительно на 6% выше, чем по методикам [1] и [3, 4]. Наибольшие значения $K_I = 75,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ получены в момент времени 2000 с. На поверхности наплавки различие между расчетными значениями K_I составляет приблизительно 2%, при использовании методики [2] K_I достигают максимума ($114,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

На рис. 5 приведено изменение во времени температуры на поверхности наплавки (на рис. 1 точка *A*) и в наиболее глубокой точке трещины (точка *B*), на рис. 6 – зависимости K_I от температуры, вычисленные с применением методики [1].

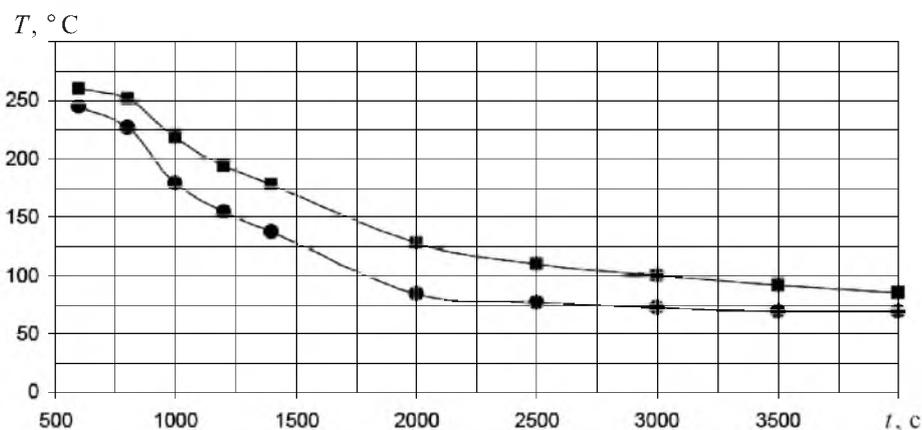


Рис. 5. Изменение во времени температуры на поверхности наплавки (●) и в наиболее глубокой точке трещины (■).

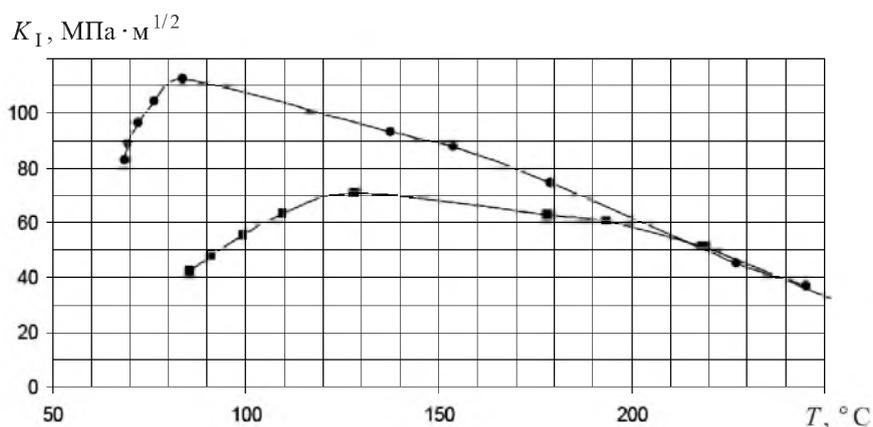


Рис. 6. Зависимость K_I от температуры на поверхности наплавки (●) и в наиболее глубокой точке (■).

Видно, что при понижении температуры в процессе расхолаживания корпуса реактора значения K_I на поверхности наплавки (на рис. 1 точка *A*) увеличиваются максимально ($112,4 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) при температуре поверх-

ности наплавки 84°С, в то время как в наиболее глубокой точке трещины (на рис. 1 точка *B*) максимум K_I (71,1 МПа · м^{1/2}) достигается при температуре 128°С.

Для сравнения результатов, полученных по инженерным и численным методикам, использовали ЭОИ и прямой метод в пространственной модели корпуса реактора со встроенной поверхностной продольной полуэллиптической трещиной (рис. 2, *a*). Расчеты термонапряженного состояния корпуса проводили с использованием программного обеспечения SPACE [8] при осесимметричных граничных условиях теплообмена на поверхности корпуса с учетом давления теплоносителя в опускной камере. Для вычисления K_I методом ЭОИ строили специальную сетку со сгущением вдоль фронта трещины (рис. 7).

Расчетные значения K_I приведены в таблице для моментов времени 600, 2000 и 4000 с. Сравнительный анализ показал, что значения K_I , определенные в наиболее глубокой точке трещины с помощью инженерных методик, метода ЭОИ и прямого метода, удовлетворительно согласуются между собой.

Результаты расчетов коэффициента интенсивности напряжений K_I

<i>t</i> , с	K_I^A					K_I^B				
	ЭОИ	ПМ	[1]	[2]	[3, 4]	ЭОИ	ПМ	[1]	[2]	[3, 4]
600	37,7	38,7	36,9	37,1	36,4	34,7	33,3	29,8	30,4	29,6
2000	115,2	107,3	112,4	114,2	111,2	78,9	72,5	70,7	75,5	71,1
4000	84,7	79,5	82,5	82,0	79,5	48,3	44,8	42,3	47,1	43,0

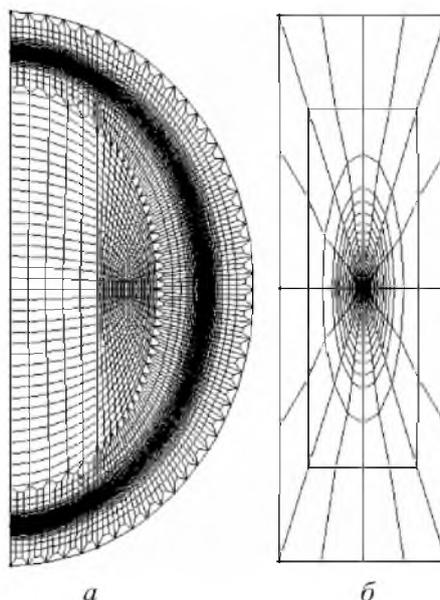


Рис. 7. Конечноэлементная сетка в окрестности трещины (*a*) и в поперечном сечении ее фронта (*б*).

Отметим, что лучшая корреляция наблюдается между значениями K_I , полученными с использованием инженерной методики [2] и метода ЭОИ, что объясняется более точной, по сравнению с методиками [1] и [3, 4], аппроксимацией распределения напряжений вдоль длины трещины.

Резюме

Наведено результати числового аналізу коефіцієнтів інтенсивності напружень K_I для поверхневих напівеліптичних тріщин у корпусі ядерного реактора ВВЕР-1000 при моделюванні режиму аварійного охолодження, що отримані за допомогою інженерних методик, методу еквівалентного об'ємного інтегрування та прямого методу. Інженерні методики базуються на результатах числового розв'язку задач термопружності в осесиметричній постановці на основі змішаної схеми методу скінченних елементів, що реалізована в програмному забезпеченні RELAX. Для визначення K_I у просторовій постановці використано програмне забезпечення SPACE.

1. *Овчинников А. В.* Приближенная формула определения коэффициентов интенсивности напряжений K_I для тел с поверхностными трещинами // Пробл. прочности. – 1986. – № 11. – С. 44 – 47.
2. *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.
3. *Orynyak I. V. and Borodii M. V.* Point weight function method application for semielliptical mode I cracks // Int. J. Fracture. – 1995. – 70. – P. 117 – 124.
4. *Krasowsky A. Ja., Orynyak I. V., and Gienko A. Y.* Approximate closed-form weight function for elliptic crack in an infinite body // Ibid. – 1999. – 99. – P. 123 – 134.
5. *Вычислительные методы в механике разрушения* / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 391 с.
6. *Саврук М. П.* Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. – Киев: Наук. думка, 1988. – 620 с.
7. *Чирков А. Ю.* Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – Киев: Ин-т пробл. прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.
8. *Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04.* – 2004.

Поступила 13. 06. 2006