

УДК 539.3

ЗМІШАНА СХЕМА СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ТРИВИМІРНИХ ЗАДАЧАХ МЕХАНІКИ РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ОБЛАДНАННЯ АЕС

Сергій Кобельський

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

harry-ksv@ukr.net

Забезпечення умов безпечної експлуатації атомних енергетичних установок, зокрема, корпусів реакторів (КР), як найбільш важливих їх елементів – одне з важливих науково-практичних завдань. Одним із перспективних шляхів вирішення цього завдання є математичне моделювання кінетики термомеханічного стану КР, що потребує розв'язання нестационарних нелінійних крайових задач механіки непружного деформування. Розрахункове обґрунтування міцності КР проводиться на основі аналізу визначальних величин параметрів механіки руйнування – коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН).

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України запропоновано та теоретично обґрунтовано змішану проекційно-сіткову схему методу скінченних елементів (ЗМСЕ) підвищеної точності [1]. Схема реалізована у розрахунковому коді **SPACE-RELAX**, який за розпорядженням НАЕК «Енергоатом» № 124-р від 12.02.2010 включений до переліку розрахункових кодів, дозволених до використання для обґрунтування безпеки ядерних енергетичних установок.

Визначення локальних параметрів механіки пружно-пластичного руйнування ґрунтується на використанні концепцій J - і G -інтегралів.

Для розв'язання крайових задач в тривимірній постановці у рамках ЗМСЕ розроблені нові просторові змішані скінченні елементи на основі шестигранної 8-вузлової призми та тетраедру, з апроксимацією переміщень за допомогою інтерполяційних функцій, визначених відносно вершин елементів, а напружень і деформацій – за допомогою інтерполяційних функцій, визначених відносно вершин, центрів та додаткових внутрішніх точок елементів [2, 3]. Запропоновані елементи тестувались на задачах, які мають теоретичні або відомі чисельні розв'язки.

Розроблено тривимірні моделі фрагментів об'єктів з вбудованими тріщинами, які дозволили будувати сітки скінченних елементів в околі тріщини

з кроком порядку 10 мкм і менше.

Теоретичні положення та створене на їх основі програмне забезпечення використано для моделювання кінетики напружено-деформованого стану та проведено розрахунки опору руйнуванню КР ВВЕР-1000 за режимів термошоку для зон зварювальних з'єднань та зони вхідних патрубків, а також вузла з'єднання колектора з патрубком корпусу парогенератора ПГВ-1000М з урахуванням комбінованого дефекту у вигляді напівеліптичної тріщини в поєднанні з протяжною канавкою корозійного походження, під час проведення робіт з обґрунтування подовження строків служби енергоблоків АЕС України.

1. *Чирков А.Ю.* Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – К.: Изд-во Ин-та пробл. прочности, 2003. – 250 с.
2. *Кобельський С.В.* Чисельний аналіз просторових задач теорії тріщин на основі змішаної схеми метода скінченних елементів. – Опір матеріалів і теорія споруд: Науково-технічний збірник. – Вип. 88. – К.: КНУБА, 2011. – С. 147–156.
3. *Kobelsky S.V.* Numerical Calculations of Stress-Intensity Factors for a WWER-1000 Reactor Pressure Vessel under a Pressurized Thermal Shock // Materials and Technology. – 2013. – № 6. – P. 825–830.

MIXED SCHEME OF FINITE ELEMENTS IN THREE-DIMENSIONAL PROBLEMS OF FRACTURE MECHANICS ELEMENTS OF NPP EQUIPMENT

Based on the mixed projection-mesh scheme of finite element method, the new three-dimensional finite elements are proposed, which allowed to use the scheme to solve three-dimensional problems of incremental plasticity.

Two methods of determination of stress intensity factors based on calculations of J - and G -integrals are analyzed for the simulated emergency cooling regime of WWER-1000 reactor pressure vessel. The finite element analysis of the convergence of results for determining the stress intensity factors using different approaches and different finite element meshes is done.