



ЧИРКОВ

Олександр Юрійович — доктор технічних наук, в.о. директора Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

НОВІ МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ КРИТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ОБЛАДНАННЯ АЕС

Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 7 вересня 2022 року

Доповідь присвячено результатам досліджень, проведених в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України щодо створення уточнених моделей і методів розв'язання актуальних прикладних задач механіки, пов'язаних з обґрунтуванням міцності та прогнозуванням ресурсу елементів обладнання реакторних установок АЕС з водо-водяним енергетичним реактором (ВВЕР).

Вельмишановний Анатолію Глібовичу!

Шановні члени Президії та запрошені!

До вашої уваги пропонується доповідь, яка стосується фундаментальних та прикладних результатів, отриманих в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, щодо розвитку і застосування уточнених моделей та методів розв'язання актуальних задач механіки з обґрунтування міцності та ресурсу обладнання атомних станцій.

Доповідь складається з двох частин. Першу частину присвячено розвитку й теоретичному обґрунтуванню математичних моделей і методів розв'язання нелінійних крайових задач, що описують неізотермічні процеси непружного деформування в умовах інтенсивного термосилового навантаження, тривалого нейтронного опромінення і докритичного пошкодження металу. Друга частина містить практичні результати, які демонструють можливості та переваги розроблених методів розрахунку для оцінки міцності критичних елементів обладнання першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000.

Слід зазначити, що розвиток моделей і методів розрахунку на міцність та їх застосування в аналізі задач механіки конструкцій є одним із пріоритетних напрямів у діяльності нашого Інституту за останні 40 років.

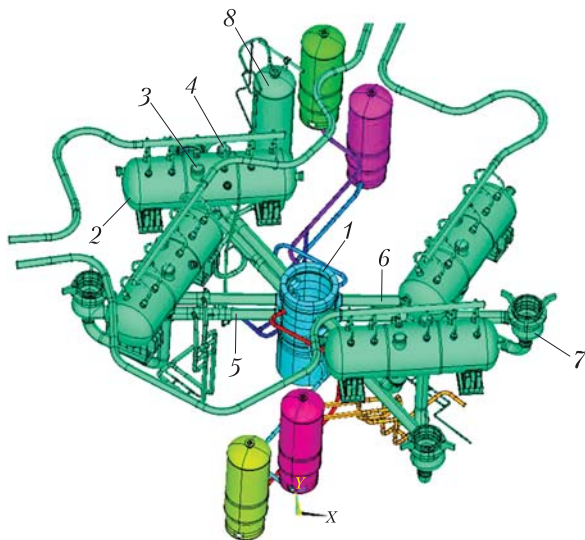


Рис. 1. Схематизована модель елементів обладнання реакторної установки ВВЕР-1000: 1 – корпус реактора; 2 – парогенератор; 3 – холодний колектор парогенератора; 4 – гарячий колектор парогенератора; 5 – холодна нитка головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ); 6 – гаряча нитка ГЦТ; 7 – головний циркуляційний насос; 8 – компенсатор тиску

Науково-прикладні розробки, пов'язані з удосконаленням методології уточненого розрахунку напружено-деформованого стану та опору руйнуванню обладнання атомних станцій, розвиваються в Інституті під керівництвом академіка В.В. Харченка.

Наразі в Україні на чотирьох АЕС експлуатується 15 енергоблоків ВВЕР, більшість з яких уже відпрацювали свій проектний ресурс, розрахований на 30 років. Для обґрунтування подовження строку їх служби необхідна висококваліфікована науково-технічна підтримка, зокрема актуальним завданням є оцінка конструкційної міцності та ресурсу обладнання АЕС.

Критичні елементи атомної станції – це елементи обладнання, заміна та відновлення яких неможливі через технічні або інші обставини, а тому саме строк їхньої служби обмежує термін експлуатації ядерного енергоблока. Схематизовану модель та критичні елементи обладнання першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000 наведено на рис. 1.

Найбільш відповідальним елементом реакторної установки є корпус ядерного реактора разом із циліндричною частиною та зоною патрубків; найбільш проблемний елемент конструкції парогенератора – вузол приварки колектора теплоносія до корпусу парогенератора; найбільш опромінюваний елемент внутрішньокорпусних пристроїв – це вигорodka активної зони реактора.

Обґрунтування безпечної експлуатації, оцінювання міцності та прогнозування ресурсу обладнання АЕС значною мірою залежать від достовірності результатів розрахунку напружено-деформованого стану та опору руйнуванню елементів обладнання першого контуру АЕС, а тому прогнозування залишкового ресурсу критичних елементів обладнання у понадпроектний строк (до 60 років) зумовлює необхідність розроблення нових наукових підходів до уточненого розрахунку.

Чинна нормативна база, що регламентує вимоги до розрахунку на міцність обладнання енергетичних установок, постійно удосконалюється і розвивається. Найважливішим аспектом цього процесу є розроблення та впровадження в практику методів виконання додаткових уточнених розрахунків для отримання адекватних результатів оцінки конструкційної міцності.

Уточнений аналіз напружено-деформованого стану обладнання першого контуру ґрунтується на розв'язанні крайових задач термо-в'язкопластичності з урахуванням сумісного впливу таких чинників:

- просторовий характер напружено-деформованого стану конструкцій;
- взаємовплив елементів приєднаного обладнання реакторної установки;
- неоднорідність та нестационарність нагрівання й охолодження;
- непружне деформування та історія термосилового навантаження;
- залишкові технологічні напруження і деформації;
- постульовані та схематизовані дефекти крихко-в'язкого руйнування;
- радіаційні ефекти зміцнення, розпухання і повзучості;

- залежність властивостей металу від температури і дози опромінення;
- деградація початкових властивостей металу в процесі експлуатації.

Отже, моделювання кінетики напружено-деформованого стану та аналіз опору руйнуванню конструкцій АЕС належать до найскладніших задач механіки матеріалів і конструкцій та потребують нових математичних і розрахункових методів аналізу.

Рівняння стану матеріалу, сформульовані з урахуванням специфіки фізико-механічних процесів із залученням наявних та розроблених математичних моделей, ґрунтуються на визначенні тензора повних деформацій у вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_T + R/3 + \varepsilon_p + \varepsilon_{cT} + \varepsilon_{cR} + K/3, \quad (1)$$

де ε_e – пружна складова деформації, що визначається законом Гука; ε_T – термічна деформація за рівнянням типу Дюамеля–Неймана; R – радіаційне розпухання металу з урахуванням впливу напружень; ε_p – миттєва деформація пластичності за рівнянням Прандтля–Рейса; ε_{cT} – деформація термічної повзучості за підвищеної температури; ε_{cR} – деформація радіаційної повзучості за умови тривалого опромінення; K – об’ємна концентрація мікропор за моделями Райса–Трейсі–Хуанга та запропонованого розв’язку рівняння Качанова для сферичної порожнини.

Моделі, що дають змогу описувати процеси непружного деформування з урахуванням впливу радіаційних ефектів та накопичених пошкоджень, приводять до неklasичних рівнянь стану матеріалу, а тому необхідно визначити умови, що забезпечують їх коректність.

На основі розвинутих енергетичних підходів, що ґрунтуються на загальних принципах нелінійної механіки суцільних середовищ, встановлено таку умову коректності: якщо в процесі довантаження елементи пружно-пластичного середовища зазнають впливу радіаційного розпухання і радіаційної повзучості та відбувається зростання концентрації пор в’язкого руйнування, то потужність дисипації додаткових впливів буде невід’ємною лише в

разі виконання нерівності

$$(d\sigma, d\varepsilon_n) \geq 0. \quad (2)$$

Умова (2) узагальнює постулат Друкера стосовно опроміненого пористого матеріалу, оскільки вона сформульована в приростах для повних компонентів напружень і деформацій на відміну від класичних теорій пластичності та повзучості, в яких обмеження (2) визначено лише для девіаторних компонент.

Крайову задачу, що описує неізотермічні процеси непружного деформування з урахуванням радіаційних ефектів та пошкодження металу, сформульовано у квазістатичній постановці у вигляді інтегральних тотожностей щодо переміщень–деформацій–напружень:

$$(\varepsilon, \delta\sigma) = (Bu, \delta\sigma);$$

$$(\sigma, \delta\varepsilon) = (D(\varepsilon, \xi)(\varepsilon - \xi), \delta\varepsilon); \quad (3)$$

$$(\sigma, B\delta u) = (f, \delta u).$$

Перше рівняння в (3) відповідає співвідношенням Коші, друге – описує фізичний закон деформування матеріалу, третє – забезпечує статичну рівновагу тіла у вигляді варіаційного рівняння Лагранжа.

Для обґрунтування математичної коректності крайової задачі перетворимо її на нелінійне операторне рівняння у гільбертовому просторі:

$$A(u, \xi) = f. \quad (4)$$

На основі одержаних енергетичних нерівностей, що забезпечують коректність уточнених моделей деформування, апарату функціонального аналізу і теорії нелінійних операторів встановлено властивості сильної монотонності та ліпшиць-неперервності оператора рівняння (4), що й забезпечує існування, єдиність і неперервну залежність розв’язку від збурень вихідних даних.

Для розв’язання нелінійних крайових задач радіаційної повзучості розроблено модифіковані ітераційні процеси пружних розв’язків і змінних параметрів пружності та доведено їхню збіжність з урахуванням деформаційної історії навантаження.

Розв’язання аналітичними методами більшості практичних задач є неможливим. Тому

застосовують наближені методи розрахунку, зокрема найбільш універсальний метод скінченних елементів.

Водночас необхідно враховувати недоліки класичних схем цього методу, що полягають у розривному розподілі та нижчому порядку збіжності апроксимації напружень проти переміщень. Проте напруження зазвичай є основними шуканими функціями в задачах механіки деформівного тіла і мають визначатися з високим ступенем точності.

Отже, перспективним у чисельному аналізі задач механіки є застосування концепції так званих змішаних формулювань, у яких напруження входять у розв'язувальні рівняння поряд із переміщеннями як рівноправні невідомі. Це дає змогу апроксимувати напруження та переміщення за допомогою різного набору базисних функцій, що підвищує точність визначення напружень і деформацій.

За аналогією з континуальною задачею рівняння змішаного методу сформульовано у вигляді:

$$\begin{aligned}(\varepsilon_h, \delta\sigma_h) &= (\mathbf{B}\mathbf{u}_h, \delta\sigma_h); \\(\sigma_h, \delta\varepsilon_h) &= (\mathbf{D}(\varepsilon_h, \xi)(\varepsilon_h - \xi), \delta\varepsilon_h); \\(\sigma_h, \mathbf{V}\delta\mathbf{u}_h) &= (\mathbf{f}, \delta\mathbf{u}_h).\end{aligned}\quad (5)$$

Основні переваги розвинутих змішаних схем полягають у безперервній апроксимації напружень і деформацій, а також у розв'язанні задачі з урахуванням точного виконання статичних умов на поверхні тіла.

Проте підходи, що застосовуються до аналізу класичних схем, не придатні для дослідження умов коректності та збіжності розв'язків на основі змішаного методу.

Умову, що є ключовою в обґрунтуванні стійкості та збіжності змішаного методу, визначено завдяки розвинутим підходам до аналізу проєкційно-сіткових схем із залученням побудованих проєкційних операторів.

Саме на підставі сформульованої умови стійкості у вигляді:

$$\|\mathbf{I}_h \mathbf{B}\mathbf{v}_h\| \geq d \|\mathbf{B}\mathbf{v}_h\|, \quad d > 0 \quad (6)$$

доведено оцінки збіжності змішаної апроксимації для напружень та переміщень.

Апріорні оцінки не лише встановлюють збіжність змішаного методу в задачах нелінійної механіки, а й свідчать про точніший розподіл напружень і деформацій порівняно зі звичайною апроксимацією скінченними елементами.

Одним з основних положень уточненого розрахунку є універсальний підхід, який полягає у фрагментації моделі конструкції. Згідно з цим підходом, розрахунок окремого її вузла проводять у два етапи. На першому етапі виконують розрахунок глобального напружено-деформованого стану для повної моделі конструкції, а на другому – уточнений розрахунок локального стану досліджуваного вузла із застосуванням процедури фрагментації та більш дрібного скінченно-елементного розбиття.

Опір руйнуванню оцінюють на основі додаткового розрахунку локального стану з включенням постульованого дефекту в модель фрагмента конструкції, що повністю узгоджується з рекомендаціями МАГАТЕ.

Розроблені методи впроваджено у спеціалізованому програмному комплексі Spase-Relax, створеному в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України для аналізу напружено-деформованого стану та опору руйнуванню елементів обладнання АЕС. Цей комплекс пройшов всебічне тестування і дозволений до застосування в ядерній галузі України.

Методичні рекомендації та методи розрахунку обладнання АЕС втілено в розробленому стандарті для профільних організацій України – стандарті ІПМіц НАН України.

Для оцінки міцності та ресурсу корпусів реакторів ВВЕР у процесі експлуатації розроблено галузевий нормативний документ МТ-Д.0.03.391-09, який використано для обґрунтування подовження строків служби енергоблоків АЕС України.

Далі я наведу лише кілька прикладів практичного застосування отриманих результатів, що демонструють можливості розроблених методів розрахунку та уточненого аналізу.

За основний критерій міцності та цілісності корпусу реактора приймають його здатність чинити опір руйнуванню під час термошоку.

Для моделювання кінетики напружено-деформованого стану створено тривимірні скінченно-елементні моделі корпусу реактора ВВЕР-1000, що включають еліптичне днище, сферичну кришку, зону патрубків і циліндричну частину зі зварними швами обичайок із постульованими напівеліптичними тріщинами, вбудованими у розрахункову модель (рис. 2).

На основі результатів досліджень впливу історії пружно-пластичного деформування на опір руйнуванню корпусу реактора із залученням сучасних концепцій прогнозування в'язкого руйнування корпусних реакторних сталей виявлено так звану «спадну гілку», яка зумовлена утворенням локальної зони стискальних напружень під час розвантаження металу перед фронтом тріщини в процесі аварійного охолодження активної зони реактора.

Запропонований підхід до аналізу опору руйнуванню враховує процеси активного навантаження і локального розвантаження металу перед фронтом тріщини, що дозволяє обґрунтувати додаткові резерви міцності та ресурсу корпусу реактора.

Запропонований підхід до аналізу опору руйнуванню враховує процеси активного навантаження і локального розвантаження металу перед фронтом тріщини, що дозволяє обґрунтувати додаткові резерви міцності та ресурсу корпусу реактора.

Проблемним елементом першого контуру реакторної установки залишається вузол приварки колектора теплоносія до корпусу парогенератора. Під час проектного строку експлуатації було виявлено характерні пошкодження внутрішньої поверхні патрубка вузла приварки в зоні галтельного переходу та зварного шва.

Для визначення залишкових напружень та глобального стану корпусу парогенератора було створено тривимірні скінченно-елементні моделі обладнання петлі першого контуру реакторної установки. Побудовані моделі враховують взаємовплив парогенератора та елементів приєднаного обладнання на визначення напружено-деформованого стану парогенератора в цілому. Слід зазначити, що перші результати розрахунків вузла приварки з використанням тривимірних моделей, в яких ураховано вплив приєднаного обладнання, було отримано в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, і вони засвідчили високий рівень розтягувальних напружень у місці виявлених пошкоджень.

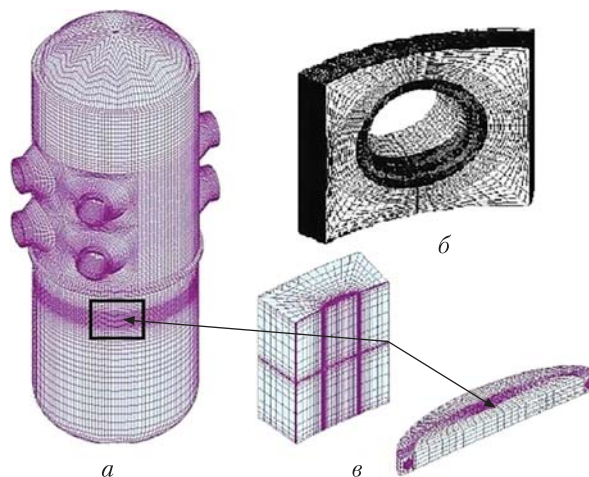


Рис. 2. Скінченно-елементні моделі корпусу реактора ВВЕР-1000: *a* – корпус реактора; *б* – фрагмент зони патрубка корпусу; *в* – фрагмент корпусу з вбудованою тріщиною

На основі скінченно-елементної моделі фрагмента вузла приварки для визначення локального напружено-деформованого стану, а також фрагментів з вбудованою в модель постульованою тріщиною в зоні галтелі було показано, що історія навантаження, залишкова технологічна спадковість та урахування протяжних пошкоджень корозійного походження на внутрішній поверхні патрубка суттєво впливають на опір руйнуванню вузла приварки. Для режиму гідравлічних випробувань на міцність за другим контуром максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень підвищується майже на 60 %, а за нормальних умов експлуатації – більш ніж удвічі.

Отже, традиційний лінійно-пружний розрахунок опору руйнуванню вузла приварки приводить до завищеної оцінки його міцності.

Прогнозування незворотної формозміни вигородки активної зони внаслідок радіаційного розпухання і радіаційної повзучості металу необхідне для контролю зазору між вигородкою та внутрішньокорпусною шахтою в процесі експлуатації, а також для обґрунтування переважанення тепловидільних збірок з активної зони реактора.

Розрахункові дані одержано на основі розв'язання зв'язаної контактної задачі теплопровідності та радіаційної повзучості. Згідно з отриманими результатами, вичерпання номінального зазору між вигородкою та шахтою в межах проектного строку служби не спостерігається. Після 50 років експлуатації та зупинення реактора залишковий зазор між гранями вигородки і решітками тепловидільних збірок також залишається не вичерпаним, а тому не відбувається їх заклинювання після завершення паливної кампанії. Обґрунтування розроблених методів розрахунку і результати моделювання напружено-деформованого стану та опору руйнуванню обладнання АЕС представлено співробітниками Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України у кількох монографіях і численних статтях у фахових виданнях. Автори цих робіт є лауреатами Державної премії України в галузі науки і техніки та премії імені О.М. Динника НАН України.

Aleksandr Yu. Chirkov

G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1916-0277>

NEW METHODS OF ASSESSING THE STRENGTH AND PREDICTING
THE SERVICE LIFE OF CRITICAL ELEMENTS OF NPP EQUIPMENT

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine,
September 7, 2022

The report is devoted to the results of research conducted at G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine on the development of refined models and methods for solving relevant applied problems in mechanics related to substantiating the strength and predicting the service life of reactor equipment elements for NPP with water-water energetic reactor (WWER).

Створений апарат розрахункових досліджень було впроваджено в практику розрахунків з обґрунтування понадпроектного строку експлуатації енергоблоків АЕС України, зокрема:

- для виконання державної експертизи робіт з обґрунтування міцності та опору руйнуванню корпусів реакторів ВВЕР-1000 на енергоблоках Запорізької, Рівненської та Південноукраїнської АЕС;
- для обґрунтування міцності основного металу та зварних швів парогенераторів ПГВ-1000М енергоблока № 3 Рівненської АЕС;
- для розрахунків на міцність корпусу (бака) та його складових частин дослідницького ядерного реактора ВВР-М, розташованого в Інституті ядерних досліджень НАН України.

Дякую за увагу!

*За матеріалами засідання
підготувала О.О. Мележик*