

та модель А. Пюттера, а модель Мак-Мілана досить чітко описує криву несучості курей. Середній відсоток відхилень не перевищує 5 % поріг безпомилкового судження про вірогідність отриманих даних.

Ключові слова: кроси курей, класи розподілу, динаміка росту, крива несучості, математичні моделі.

Кучер Елена Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра лабораторной диагностики, Николаевский национальный университет им. В. А. Сухомлинского, Украина, e-mail: hrizantema84.84@mail.ru.

Пасечник Мария Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии и биохимии, Николаевский национальный университет им. В. А. Сухомлинского, Украина.

Кучер Елена Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, кафедра лабораторной диагностики, Николаевский национальный университет им. В. О. Сухомлинского, Украина.

Пасечник Мария Валерьевна, кандидат технических наук, доцент, кафедра химии та біохімії, Николаївський національний університет ім. В. О. Сухомлинського, Україна.

Kucher Elena, Mykolaiv National University named after V. O. Sukhomlynsky, Ukraine, e-mail: hrizantema84.84@mail.ru.

Pasichnyk Maria, Mykolaiv National University named after V. O. Sukhomlynsky, Ukraine

УДК 621.039.58

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.74475

Трищ Р. М.,
Гиря Н. П.,
Пахалович М. Е.,
Кучер С. О.

ВЕРИФІКАЦІЯ РОЗРАХУНКОВОГО КОМПЛЕКСУ CIRCLE_3D ДЛЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МІЦНОСТІ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ АТОМНОЇ СТАНЦІЇ

Наведена коротка характеристика призначення і режимних умов роботи відповідального обладнання атомної станції, а також алгоритм виконання комплексу робіт з оцінки технічного стану за допомогою розрахункових кодів для подальшого продовження терміну його експлуатації. Приведено опис розробленого розрахункового комплексу CIRCLE-3D для оцінки та обґрунтування міцності елементів і конструкцій обладнання, його верифікація результатів розрахунків кодом CIRCLE_3D з даними стандарту та результатами тестових завдань програмного коду ANSYS.

Ключові слова: технічний стан, код, тепломеханічне обладнання, залишковий ресурс, міцність, верифікація, деградація.

1. Вступ

В атомній енергетиці України діє цільова «Комплексна зведена програма підвищення безпеки енергоблоків атомних електростанцій (АЕС)», яка спрямована на виконання робіт з підвищення безпеки до рівня, що відповідає міжнародним і національним вимогам безпеки в рамках реалізації енергетичної стратегії України на період до 2030 року. До цілей даної Програми відноситься заміна відповідального обладнання, важливого для безпеки, що відпрацювало свій ресурс, на нове [1] або продовження його експлуатації на підставі обстежень і оцінки технічного стану. До цього відповідального обладнання відноситься тепломеханічне обладнання (ТМО) першого контуру енергоблоку АЕС: головний циркуляційний трубопровід (ГЦТ), головні циркуляційні насоси (ГЦН), компенсатор тиску (КТ), парогенератори (ПГ). Для підтримки безпечного рівня технічної та ядерної безпеки та розроблення заходів, що забезпечують продовження терміну безпечної експлуатації та недопущення аварій обладнання енергоблоків АЕС, відповідно до вимог НД [2], необхідні оцінка технічного стану та обґрунтування можливості продовження терміну експлуатації ТМО. Оцінка техніч-

ного стану передбачає перевірку відповідності значень технічних параметрів обладнання вимогам технічної документації, розрахунки, а також аналіз динаміки зміни даних параметрів в часі, враховуючи незворотні деградаційні зміни, без яких неможливо достовірно визначити ступінь старіння обладнання, що відпрацювало проектний термін експлуатації. Часто, в умовах обмежень на отримання необхідного обсягу дослідного матеріалу єдиним можливим засобом аналізу і прогнозу зміни параметрів у часі для ТМО першого контуру енергоблоку є розрахункові дослідження, наприклад, за допомогою сучасних кодів. Для обґрунтування безпеки ТМО застосовуються різні системні та розрахункові комплекси та коди: для моделювання змін фізичних процесів в обладнанні, проведення розрахунків на міцність, оцінки опору крихкому руйнуванню (ОКР) та ін. Коди характеризують наступні особливості:

- можливість детальних 3-мірних розрахунків;
- використання сучасних фізичних моделей, заснованих на новітніх теоретичних та експериментальних даних;
- сучасну архітектуру, що дозволяє організувати обмін даними між різнорідними програмними модулями і об'єднувати їх для рішення різних завдань;

— сучасні чисельні алгоритми розв'язання задач;
 — використання високоефективних алгоритмів паралельних обчислень;
 — наявність сучасних систем введення-виведення, обробки, візуалізації даних і результатів розрахунків.
 Цим обґрунтовується актуальність проведеного дослідження.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є тепломеханічне обладнання на АЕС, яке знаходиться в постійній експлуатації та його технічний рівень підтримується експлуатаційними службами шляхом постійного контролю, регулярного проведення поточного обслуговування і ремонту, забезпечуючи виконання необхідних функцій.

Головний циркуляційний трубопровід (ГЦТ), головна запірна засувка для енергоблоків «малої» серії (ГЗЗ), головні циркуляційні насоси (ГЦН), компенсатор тиску (КТ), парогенератори (ПГ) відносяться до обладнання головного циркуляційного контуру (ГЦК) реакторної установки (РУ). Система ГЦК несе захисну функцію, як система, що забезпечує циркуляцію теплоносія на вибігу при різних аваріях із знеструмленням, та дозволяє здійснювати плавний вихід на режим природної циркуляції, а ПГ забезпечує охолодження теплоносія першого контуру до необхідного рівня температур у всіх проектних режимах.

ГЦТ з'єднує між собою основне обладнання РУ, утворюючи циркуляційний контур. ГЦТ складається з чотирьох або шести петель. ГЗЗ призначені для встановлення як запірні пристрої на гарячій і холодній нитках циркуляційних петель першого контуру і служать для їх відключення в цілях проведення ремонту першого контуру, а також при появі течі в контурі. При нормальній експлуатації ГЗЗ відкриті. Якщо необхідно, за допомогою ГЗЗ, можна відключити кожен з чотирьох (шести) цир-

куляційних петель. ПГ призначений для відводу тепла від теплоносія першого контуру і генерації сухого насиченого пара. ГЦН створюють циркуляцію теплоносія в першому контурі і відводять тепло від активної зони реакторної установки. КТ призначений для роботи в складі системи компенсації об'єму першого контуру і служить для компенсації температурних змін обсягу теплоносія першого контуру при різних режимах роботи РУ, створення і підтримання необхідного тиску в контурі. Аксонометричне зображення РУ енергоблоку АЕС, що складається з чотирьох ПГ, чотирьох ГЦН, восьми ГЗЗ і чотирьох петель ГЦТ, ілюструє розташування обладнання ГЦК в будівлі реакторного відділення на рис. 1.

Періодично для обладнання ТМО проводиться технологічний аудит і в першу чергу неруйнівний контроль стану основного металу та зварних з'єднань трубопроводів, корпусів, равлика ГЦН і окремих елементів обладнання з метою виявлення в місцях втому металу, концентрації напружень та типових пошкоджень обладнання вимогам нормативної документації (НД) і робочих креслень. Контроль якості проводиться в наступних випадках:

- в процесі вхідного контролю якості;
- в процесі підготовки обладнання під зварювання;
- в процесі зварювання і наплавлення;
- в процесі проведення термічної обробки;
- після відновлення корозійної обробки.

Виконується візуальний і вимірювальний контроль, капілярний контроль і ультразвуковий контроль. Велику роль дані контролю стану основного металу, зварних з'єднань, фізико-механічних властивостей металу корпусів і елементів ТМО мають для визначення залишкового ресурсу і продовження терміну експлуатації ТМО при оцінці його технічного стану, тому що в якості технічних параметрів повинні прийматися тільки ті фізичні параметри, зміна яких може призвести обладнання в непрацездатний або граничний стан із-за накопичення незворотних деградаційних змін, пов'язаних з процесами старіння.

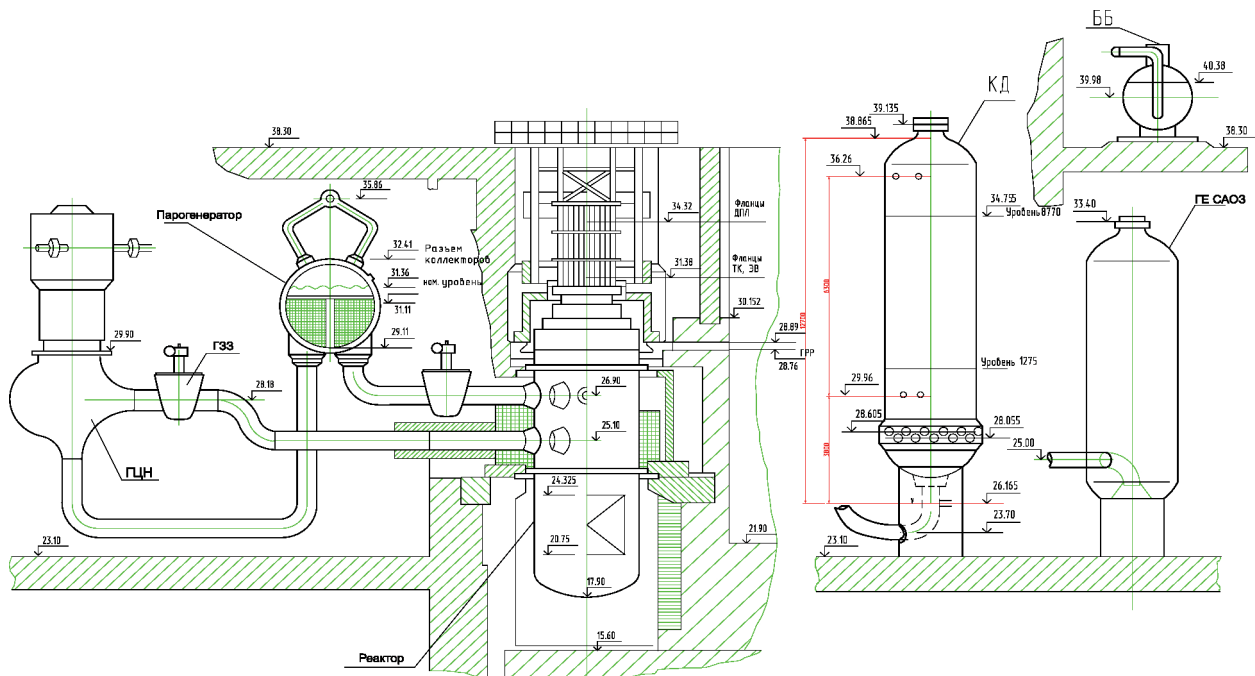


Рис. 1. Схема розташування ТМО першого контуру в будівлі реакторного відділення енергоблоку АЕС (приклад, вертикальний розріз): ГЦН — головний циркуляційний насос; ГЗЗ — головна запірна засувка; ПГ — парогенератор; КТ — компенсатор тиску

Проведений контроль та обстеження обладнання передбачає розробку заходів [3], що забезпечують підтримку необхідного рівня технічної та ядерної безпеки в процесі всього терміну експлуатації, а також спрямовані на продовження строку безпечної експлуатації та недопущення аварій ТМО першого контуру енергоблоку АЕС.

Складність розрахунків залишкового ресурсу ТМО енергоблоків, що перебувають в експлуатації в даний час, пов'язана перш за все з відсутністю повіровних розрахунків, що виконувались на стадії проектування обладнання у відповідності з розробленими в той час стандартами [4]. Тому в даний час при визначенні залишкового ресурсу доводиться виконувати великий обсяг розрахунків на підставі експериментальних даних, проведеного контролю, результатів оцінки технічного стану, для обґрунтування міцності обладнання і трубопроводів з використанням відповідних програмних комплексів, дозволених ДП НАЕК «Енергоатом», наприклад, «CIRCLE-3D» [5, 6], враховуючи для ТМО зміни механічних властивостей металу, стоншення стінок внаслідок корозії, наявність вм'ятин та ін.

3. Мета та задачі дослідження

Основою для розробки, верифікації та послідуочого проведення розрахунків з використанням відповідних програмних комплексів та кодів є накопичений авторами досвід виконання робіт, спрямованих на продовження строку експлуатації і управління старінням ТМО.

Проведені розробки та дослідження ставили за мету створення програмного розрахункового комплексу «CIRCLE-3D» для оцінки лінійного (пружного) напружено-деформованого стану (НДС) трубопроводів та елементів ТМО при статичному термомеханічному навантаженні, для розрахункового аналізу та обґрунтування міцності і оцінки ОКР відповідальних конструктивних елементів ТМО АЕС з корозійними дефектами. Розроблений комплекс повинен містити, в першу чергу, фізичну обґрунтованість реалізованих в ньому фізико-математичних моделей та використовуватися для подальшого наукового обґрунтування методів оцінки технічного стану ТМО і його залишкового ресурсу, враховуючи процеси його деградації.

Для досягнення поставленої мети треба:

- проаналізувати особливості існуючих розрахункових кодів для обладнання першого контуру енергоблоку АЕС;
- запропонувати програмний розрахунковий комплекс нового покоління для проведення досліджень ТМО за функціональним призначенням;
- провести верифікацію розрахункового комплексу для підтвердження правильності програмної реалізації розрахункової методики на прикладі рішення ряду тестових завдань.

4. Аналіз літературних даних

Математичне моделювання, яке застосовується для аналізу штатних перехідних і аварійних режимів роботи станції становить ідеологічну та програмно-алгоритмічну основу для забезпечення ефективної і безпечної експлуатації АЕС, і на самперед, обладнання першого контуру. Використовувані в системах, важливих для

безпеки, розрахункові коди, по суті, є найважливішим, а в деяких випадках і єдиним, засобом обґрунтування безпеки діючих об'єктів атомної енергетики. При цьому постійне підвищення вимог до якості такого обґрунтування, в свою чергу, викликає необхідність безперервного вдосконалення програмних засобів, що використовуються для моделювання [7]. Протягом тривалого часу для розрахункових досліджень в атомній галузі застосовувалися виключно, так звані, «системні коди», розроблені в середині 60-х років на основі методів зосереджених параметрів і теорії пористого тіла. Основною особливістю цього підходу було необхідність наявності великої кількості експериментальних даних [8]. Як альтернатива «системним кодам» світовим співтовариством на чолі з МАГАТЕ розглядалися CFD коди, основою яких є механіка суцільних середовищ, тобто рішення рівнянь Нав'є-Стокса або Рейнольдса чисельними методами. Також велася робота по верифікації CFD кодів за допомогою зіставлення результатів моделювання та результатів прецизійних експериментів, у рамках так званих «бенчмарків», організованих МАГАТЕ [9, 10]. Надалі інтенсивно розроблялися комплексні розрахункові комп'ютерні програми (системні коди поліпшеної оцінки), які істотно перевершували попередників програмних продуктів досконалістю обчислювальних алгоритмів, а також фізичною обґрунтованістю реалізованих в них фізико-математичних моделей. До числа найбільш відомих зарубіжних кодів нового покоління, призначених для комплексного аналізу перехідних та аварійних режимів обладнання першого контуру, слід віднести TRAC, RELAP5 (США), CATHARE (Франція), ATHLET (Німеччина), APROS (Фінляндія), THYDE (Японія), CATHENA (Канада). В межах Міжнародного агентства з атомної енергії (IAEA) технічною групою фахівців під назвою «взаємне порівняння та валідація розрахункових кодів для теплогідравлики» було проведено тест точності коду FFTBM, побудованого на вдосконаленні методу перетворення Фур'є [11]. Метою дослідження також було продемонструвати, що новий FFTBM є потужним інструментом для кількісної оцінки теплогідравлічних кодів. Сліпий аналіз точності було виконано на основі тільки експериментальних і розрахункових даних, а результати тесту показали, що точність розрахунків можна порівняти з кращими міжнародними розрахунками для експерименту з вододіючим реактором. В «Росатомі» (РФ) на базі Інституту проблем безпечного розвитку атомної енергетики Російської академії наук (ІБРАЕ РАН) створено центр відповідальності по реалізації проекту «Розробка інтегрованих систем кодів нового покоління для розробки і обґрунтування безпеки ядерних реакторів, проектування АЕС, створення технологій та об'єктів ядерного паливного циклу» («Коди нового покоління»). В рамках цього проекту ІБРАЕ РАН розробляє лінійку універсальних розрахункових кодів для моделювання різних режимів роботи діючих і перспективних реакторів на швидких нейтронах [12]. Серед кодів — інтегральний код СОКРАТ-БН, що включає програмні модулі для розрахунку теплогідравлічних процесів у натрієвому теплоносії, нейтронно-фізичних процесів і процесів переносу продуктів поділу в першому контурі. В рамках робіт по крос-верифікації проведено порівняння результатів розрахунків низки завдань кодом СОКРАТ-БН з російськими кодами, призначеними для моделювання

важких аварій швидких реакторів з натрієвим теплоносієм (COREMELT, DIN-800). Аналіз отриманих результатів для експерименту по спрацюванню блоку аварійного захисту на БН-600 дозволяє зробити висновок, що код СОКРАТ-БН описує експеримент точніше. В даний час в Інституті проблем безпеки АЕС НАН України, тривають роботи по створенню кодів нового покоління, в основі яких закладені найбільш досконалі фізико-математичні моделі. У числі відмітних особливостей розроблених кодів [7]:

- розширення номенклатури та експлуатаційних умов модельованого обладнання;
- більш сучасні фізико-математичні моделі й чисельні методи;
- модульна структура функціонального наповнення;
- сучасні інтерфейси;
- дані їх верифікації та досвід їх практичного застосування.

Проблема розробки нових розрахункових кодів останнім часом актуалізувалася також у зв'язку з появою нових завдань в атомній енергетиці — удосконалення та продовження термінів експлуатації діючого на АЕС обладнання, яке відпрацювало проектний термін служби [13–15]. Для рішення даного комплексу завдань необхідна розробка розрахункових кодів нового покоління, які б для ТМО першого контуру враховували перехідні режими, протікання процесів, які характеризуються нестационарністю, зміною режимних параметрів, таких як тиск, температура, швидкість потоку та ін. і які враховували б деградаційні зміни в обладнанні.

Існуючі стандарти з безпечної експлуатації АЕС, серед яких стандарт Національної енергогенеруючої компанії «Енергоатом» України (НАЕК «Енергоатом») [6] містять методичні вказівки до порядку використання розрахункових кодів для обґрунтування безпеки ядерних енергетичних установок АЕС України. Цим стандартом дозволено розробка і застосування кодів для розрахунків на міцність корпусів реактора, трубопроводів, обладнання першого контуру АЕС.

5. Матеріали та методи дослідження

Розрахунковий код CIRCLE_3D розроблений авторами та призначений для оцінки пружного НДС трубопроводів та елементів ТМО при статичному термомеханічному навантаженні. Розрахунковий комплекс CIRCLE_3D включає програмні коди CIRCLE і CIRCLE_RPV, які також призначені для розрахункового аналізу міцності і оцінки ОКР відповідальних конструктивних елементів корпусів реакторів, парогенераторів та елементів обладнання та трубопроводів АЕС з корозійними дефектами.

Відомо, що досліджуваний фізичний процес найчастіше описується за допомогою функції декількох змінних, тому чисельний опис фізичного процесу зазвичай потребує розв'язання системи диференціальних рівнянь у частинних похідних. Процеси, що змінюються у часі, описуються рівняннями, які залежать від змінної часу t . Такі рівняння можуть бути нестационарними або еволюційними, та у загальному випадку, коли функція залежить від двох змінних, записуються таким чином:

$$A \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2B \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + D \frac{\partial u}{\partial x} + E \frac{\partial u}{\partial x} = F, \quad (1)$$

з додатковою умовою $B^2 - AC < 0$ для нестационарних рівнянь та $B^2 - AC = 0$ або $B^2 - AC > 0$ для еволюційних рівнянь. У загальному випадку коефіцієнти A, B, C, D, E, F також є деякими функціями незалежних змінних x та y , тому знак дискримінанта $B^2 - AC$ може змінюватись. В цьому випадку наведене рівняння є рівнянням мішаного типу.

Зазвичай виникає багато додаткових умов (початкові та граничні умови), яким має задовольняти шукана функція, що розглядається у деякій області. Рівняння процесу разом з усіма умовами складає систему диференціальних рівнянь, яка відображає фізичний процес. Методів розв'язання таких систем достатньо, але більшість із них має суттєві недоліки, які полягають у тому, що той чи інший метод може бути ефективним для обмеженого кола типових задач та рівнянь, заданих на простих областях. У випадку, коли область має криволінійні границі, виникають труднощі не лише із апроксимацією похідних на границі, а й процес розв'язання задачі суттєво ускладнюється.

Саме тому, в якості апарату дослідження просторового розподілу шуканих функцій (температура, переміщення, деформації, напруження) в розрахунковому коді CIRCLE_3D застосовано метод кінцевих елементів (МКЕ) на основі варіаційного формулювання Лагранжа.

За допомогою МКЕ вдається ефективно розв'язувати системи диференціальних рівнянь, що задані на складних областях, бо розв'язок початкової задачі задається в апроксимаційній формі, що має наступний вигляд:

$$u \approx \phi + \sum_{n=1}^L k_n \cdot f_n, \quad (2)$$

де u — шукана функція; ϕ — деяка функція, що спеціальним чином визначена на границі області дослідження; f_n — система базисних функцій; k_n — параметри, що обчислюються так, щоб отримати найкраще наближення. Область розбивається на елементи (підобласті) більш простої форми, які не перекриваються. Далі будується кусочна апроксимація, тобто формуються базисні функції, які є кусочними та визначені окремо для кожного елемента (підобласті) з урахуванням переходу між елементами. Якщо елементи мають відносно просту форму та базисні функції визначені на елементах однотипно, це полегшує розв'язання задачі для початкової області складної форми. Таким чином, апроксимаційне рівняння стає сумою по елементах, де кожен доданок визначає свій вклад. В цьому полягає основна ідея МКЕ та відміна від класичних методів апроксимації, де базисна функція має бути визначена єдиним чином на всій області.

При розробці розрахункового коду CIRCLE_3D розглядався підхід до розв'язання задачі у вигляді варіаційного формулювання Лагранжа, коли розв'язок мінімізує деяку величину, що визначена на всій області, тобто для всієї області має виконуватись заздалегідь визначений варіаційний екстремальний принцип.

Отже, з застосуванням МКЕ задача дискретизується та математично може бути записана у матричному вигляді за допомогою алгебраїчних операцій.

В розрахунковому коді CIRCLE_3D для інтегрування по часу матричних скінченно-елементних рівнянь динамічної рівноваги використана кінцево-різницєва

безумовно стійка неявна схема прямого інтегрування Ньюмарка, а при моделюванні процесів контактної взаємодії реалізована явна центрально-різницева схема. Для генерації сітки використано серендипово сімейство шестигранних (в загальному випадку криволінійних) призматичних елементів з кількістю вузлів від 8 до 32. Побудова інтерполяційних співвідношень для кінцевого елемента здійснено за допомогою спеціальних рекурентних співвідношень, що дозволило відмовитися від створення обширної бібліотеки кінцевих елементів різних типів. Обчислення матриць системи лінійних алгебраїчних рівнянь (далі – СЛАР) для дискретних елементів виконані чисельно. Основні операції з СЛАР – формування, накладання граничних умов, рішення – зроблені спеціально розробленими блоковими методами, що дозволяє вирішувати завдання практично необмеженої розмірності (залежить від величини вільного дискового простору).

Розрахунковий код CIRCLE_3D – високоавтоматизований програмний комплекс з розвиненими пре-і постпроцесорними частинами. Особливістю етапу препроцесорної підготовки дискретної моделі задачі є використання системи автоматизації графічних робіт AutoCAD на стадії геометричного моделювання об'єктів довільної конфігурації та автоматична побудова сітки кінцевих елементів і формування граничних умов. Постпроцесорна система дозволяє отримувати зображення полів досліджуваних функцій (температур, переміщень, деформацій, напружень) на екрані дисплея, принтера або графобудівнику.

Основні особливості розрахункового коду CIRCLE_3D:

- інтерфейс з користувачем через систему ієрархічних багаторівневих меню;
- геометричне моделювання з використанням AutoCAD;
- концепція підструктур при геометричному моделюванні;
- автоматична генерація сітки кінцевих елементів;
- інтерактивне введення граничних умов (в точках, лініях і поверхнях);
- велика база даних матеріалів;
- вбудований редактор бази даних матеріалів;
- ієрархічна система кінцевих елементів (порядок апроксимації від лінійного до кубічного);
- інтерактивна система постпроцесорної обробки (зображення кольорових ізоліній виведених функцій, можливості створення рухомих зображень).

6. Результати дослідження

Метою верифікації розрахункового комплексу CIRCLE_3D є підтвердження правильності програмної реалізації розрахункової методики, заснованої на МКЕ. З цією метою представлені вирішення ряду тестових завдань. Результати рішення задач зіставлялися з відомими аналітичними рішеннями та рішеннями, отриманими на верифікованих кодах контрольних елементів обладнання. Проведено порівняння результатів розрахунків кодом CIRCLE_3D з даними стандарту [16] та результатами тестових завдань всесвітньо визнаного програмного коду ANSYS (США), який є найбільш універсальним і доступним інженерним інструментом, що дозволяє враховувати різні комплексні та міждисциплінарні явища в області гідродинаміки і міцнос-

ті [17]. При виконанні розрахунку на вибір основних розмірів враховується тиск (внутрішній та зовнішній), який діє на обладнання. З метою зниження помилок округлення всі обчислення в підпрограмах проводяться з «подвійною точністю».

Приклад 1. Назва тесту: Тонкостінна циліндрична оболонка. Навантаження – внутрішній тиск.

Посилання: ПНАЕ Г-7-002-86 [15].

Специфікація:

$R_s = 500$ мм;

$s = 10$ мм;

$T = 293$ К;

$P = 0,01$ кгс/мм². Рівномірний внутрішній тиск p та осьова сила $N_z^p = pR_s/2$.

Розрахункова модель представлена на рис. 2.

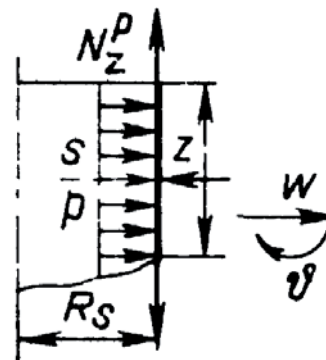


Рис. 2. Розрахункова модель тонкостінної циліндричної оболонки

Навантаження – внутрішній тиск.

Порівняльний аналіз представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз результатів розрахунків кодом CIRCLE_3D з даними стандарту ПНАЕ Г-7-002-86

№	Значення напруж, яке порівнюється	Circle 3D	ПНАЕ Г-7-002-86	Похибка, %
1	w^p	0,1042145	0,104167	0,05
2	s_z^p	2,502879	2,5	0,12
3	s_θ^p	4,959811	5,0	0,80

Висновок: відмінна збіжність результатів.

Результати розрахунку представлені в графічному вигляді на рис. 3.

Приклад 2. Назва тесту: Однорідний товстостінний циліндр, навантажений внутрішнім тиском.

Посилання: ANSYS/Mechanical.

Специфікація:

$R_a = 1000$ мм;

$R_b = 1200$ мм;

$P_a = 10$ МПа;

$P_b = 0$ МПа.

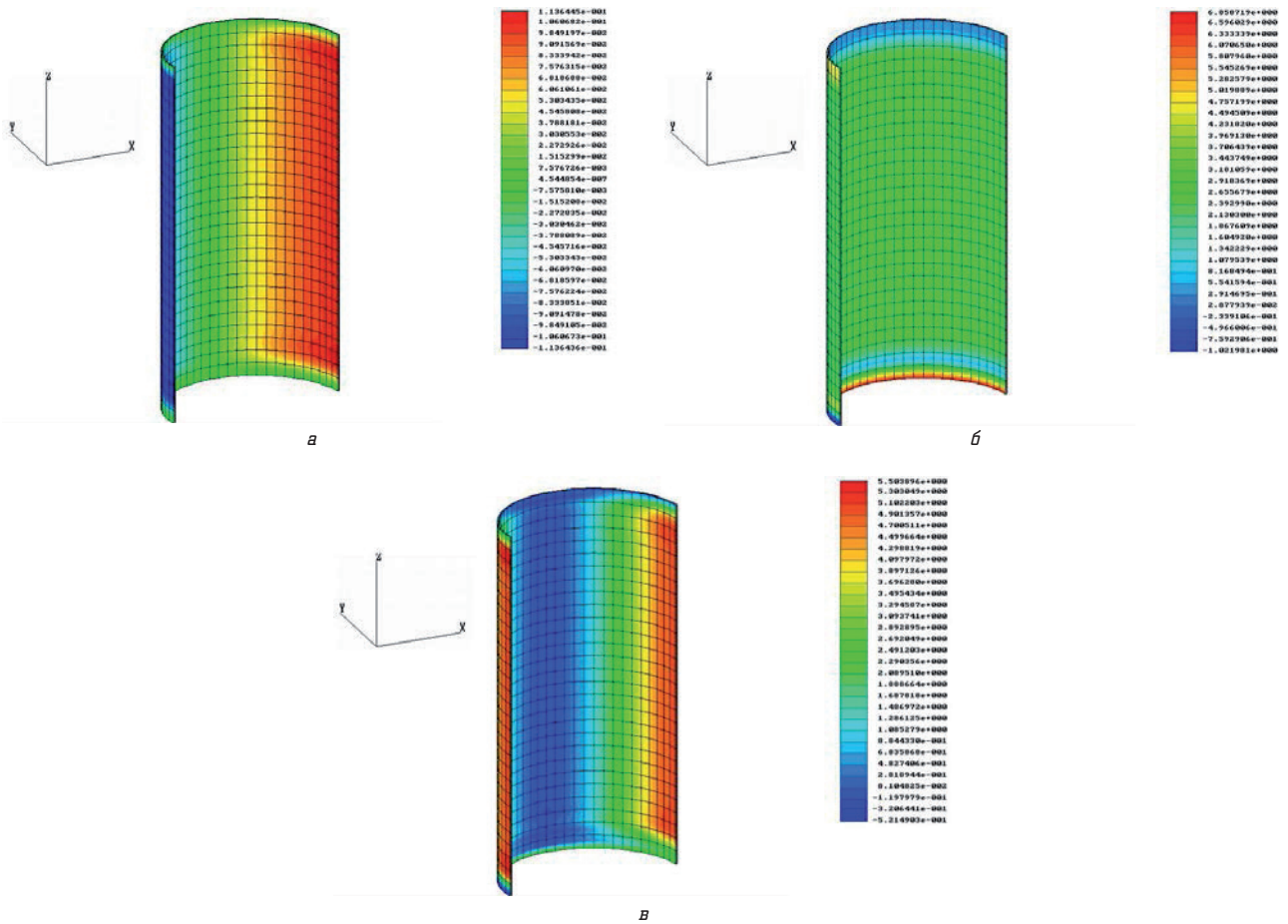


Рис. 3. Тонкостінна циліндрична оболонка. Навантаження — внутрішній тиск: а — w^p ; б — s_r^p ; в — s_θ^p

Розрахункова модель однорідного товстостінного циліндру представлено на рис. 4.

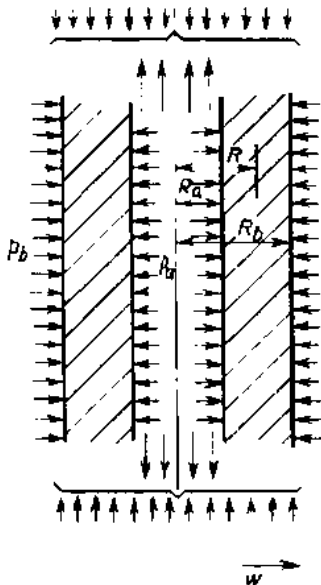


Рис. 4. Розрахункова модель однорідного товстостінного циліндру, навантаженого внутрішнім тиском

Порівняльний аналіз представлено у табл. 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз результатів розрахунків кодом CIRCLE 3D з результатами розрахунків програмного коду ANSYS

№	Значення напруг, яке порівнюється	Circle 3D		ANSYS/Mechanical		Похибка, %	
		Внутрішня поверхня	Зовнішня поверхня	Внутрішня поверхня	Зовнішня поверхня	Внутрішня поверхня	Зовнішня поверхня
1	w	0,26312	0,241328	0,2718	0,2485	-3,19	-2,89
2	s_r	-9,77342	0,00111	-9,828	0,00115	-0,56	-3,48
3	s_θ	55,72058	45,42156	54,794	45,685	1,69	-0,58
4	s_z	21,70123	21,65437	22,0564	22,0327	-1,61	-1,72

Висновок: відмінна збіжність результатів. Результати розрахунку представлені в графічному вигляді на рис. 5.

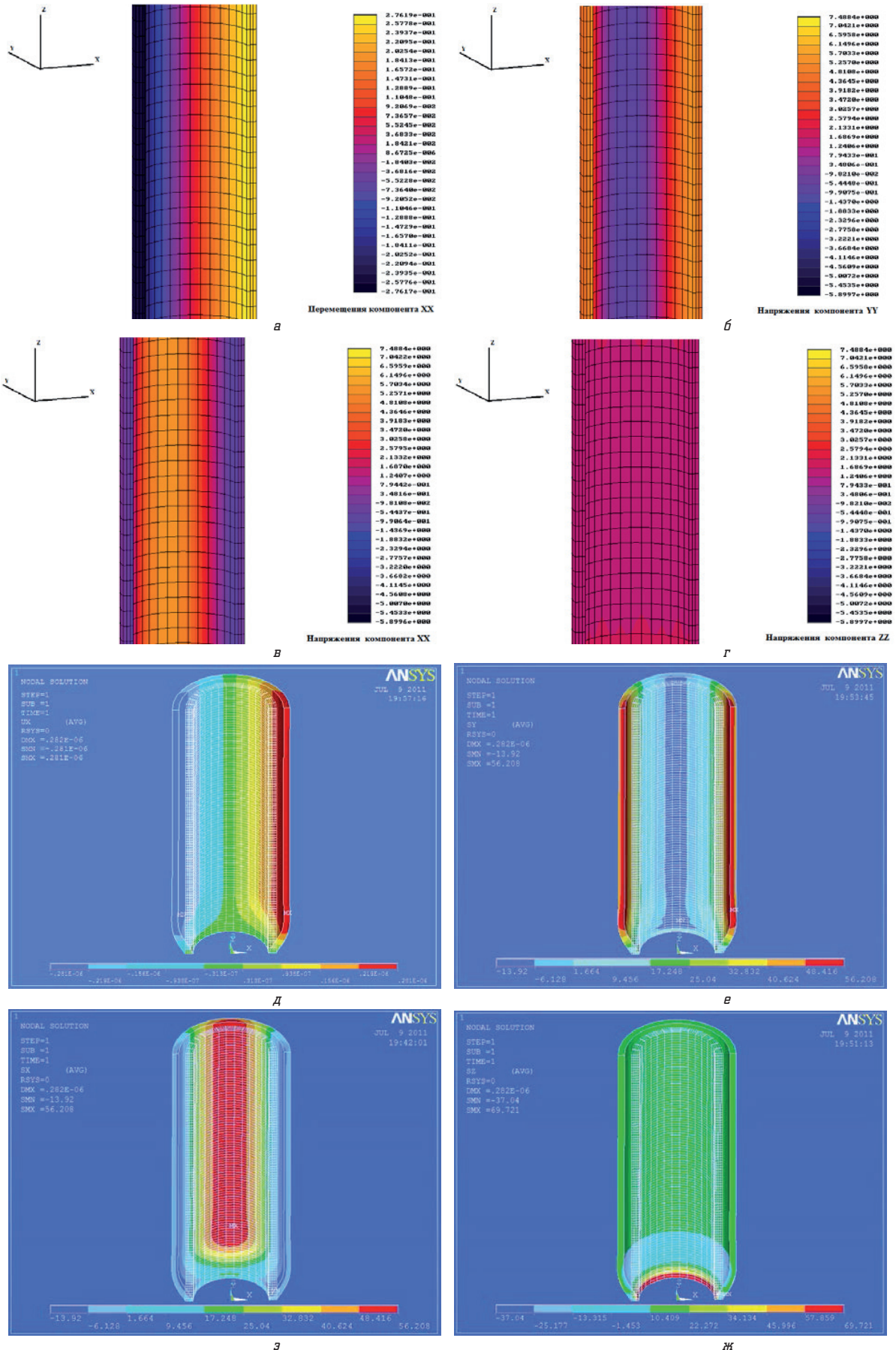


Рис. 5. Однорядный толстостенный цилиндр, нагруженный внутренним давлением. Расчетная модель Circle 3D: *а* — перемещения компонента *XX*; *б* — напряжения компонента *YY*; *в* — напряжения компонента *XX*; *г* — напряжения компонента *ZZ*. Расчетная модель ANSYS/Mechanical: *д* — *w*; *е* — *s_r*; *е* — *s_r*; *ж* — *s_z*

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок о відмінній збіжності результатів і точності чисельних рішень, отриманих за допомогою комплексу CIRCLE_3D.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Перевага запропонованого розрахункового комплексу CIRCLE_3D при розгляданні питань оцінки технічного стану та продовження ресурсу обладнання полягає насамперед у чіткості та однозначності обраних напрямків виконання даних робіт. Розрахункове обґрунтування міцності елементів, конструкцій обладнання і трубопроводів зазвичай виконується за наступною схемою: аналіз результатів попередніх обстежень технічних деградаційних параметрів, контролю металу, контролю механічних властивостей по твердості, відомостей про напруження та обліку циклів навантаження, аналіз умов експлуатації елементів конструкції обладнання і встановлення фізично можливої послідовності експлуатаційних режимів роботи і навантаження (вимога пункту 5.3.1 [15]), створення повномасштабної розрахункової моделі досліджуваного контрольного елемента обладнання (рис. 6), розрахунки на статичну міцність,

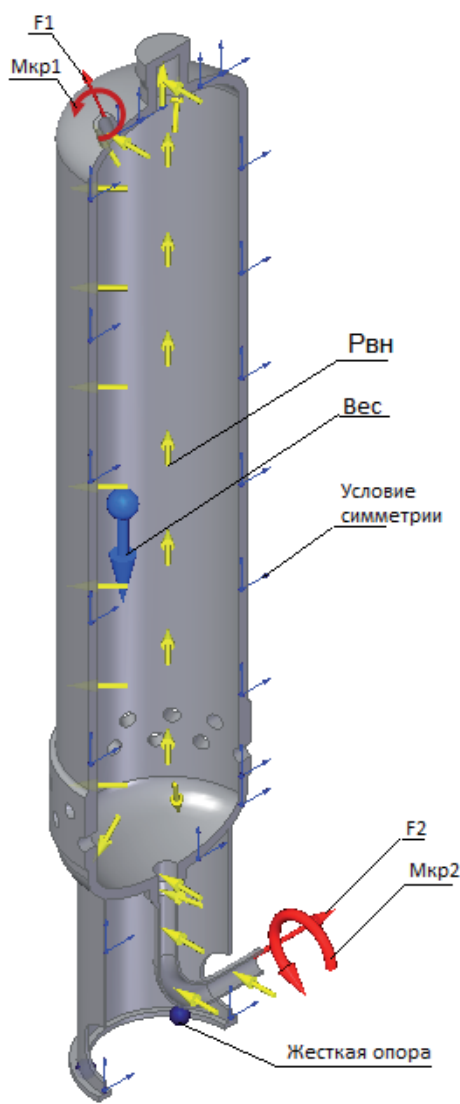


Рис. 6. Модель компенсатора тиску. Навантаження і граничні умови

циклічну міцність, міцність при сейсмічних впливах з метою визначення найбільш навантажених зон конструкцій (елементів обладнання) та перевірки виконання умов статичної міцності стосовно до розрахункових навантажень.

На рис. 6: $P_{вн}$ – внутрішній тиск; $F1$, $M_{кр1}$ – навантаження на патрубок трубопроводу впорскування, $F1 = 9900$ Н, $M_{кр1} = 2,27 \cdot 10^4$ Н·мм; $F2$, $M_{кр2}$ – навантаження від живильного трубопроводу, $F2 = 106414$ Н, $M_{кр2} = 2,1 \cdot 10^6$ Н·мм.

Верифікація розрахункового комплексу CIRCLE_3D представлена чисельними розв'язками тестових завдань, що мають аналітичне рішення. Наведені відомості про відносні погрішності результатів порівняльного розрахунку свідчать про гарну збіжність розрахункових значень.

Тим не менш, можна виділити ряд недоліків і обмежень, які притаманні даній розробці. До них слід віднести: обмеженість логічної бази графічних і аналітичних засобів, що не дозволяє реалізувати всі можливості алгебри і логіки і неможливість використання множинних критеріїв виникнення неординарної ситуації.

В подальшому, за допомогою розробленого комплексу CIRCLE_3D та його складових CIRCLE і CIRCLE_RPV, а також при достатній кількості даних оперативної діагностики або експериментальних даних, можливе проведення розрахунків на міцність іншого тепломеханічного обладнання, наприклад, судин і насосів систем, важливих для безпеки АЕС.

8. Висновки

Необхідність створення та верифікації розрахункового комплексу CIRCLE_3D для обґрунтування міцності тепломеханічного обладнання першого контуру енергоблоку АЕС виникла у зв'язку з появою нових завдань в атомній енергетиці – удосконалення та продовження термінів експлуатації діючого на АЕС обладнання, яке відпрацювало проектний термін служби. З цієї позиції для ефективного обґрунтування підходів до питання продовження термінів експлуатації відповідального обладнання, як ТМО першого контуру енергоблоку, необхідні достовірні методи оцінки технічних деградаційних параметрів, і в першу чергу, по міцності, при різних режимах експлуатації і циклах навантаження обладнання АЕС, що ймовірно може бути зроблено за допомогою розрахункових програмних кодів. Після проведення аналізу особливостей існуючих в практиці розрахункових кодів для обладнання першого контуру енергоблоку АЕС, було розроблено розрахунковий комплекс CIRCLE_3D та проведено верифікацію для підтвердження правильності програмної реалізації розрахункової методики.

Проведений комплекс робіт дозволяє:

- виявити технічні параметри, що визначають процеси деградації обладнання з метою обґрунтування методу оцінки його поточного технічного стану;
- виявити взаємозв'язок між оцінкою технічного стану обладнання та його залишковим ресурсом з урахуванням експлуатаційних факторів та режимів;
- створити інженерні програми і провести дослідно-виробничі дослідження ТМО на конкретних АЕС з урахуванням удосконаленого нормативного забезпечення.

Комп'ютерна програма CIRCLE_3D присутня у переліку дозволених до використання в ДП НАЕК «Енергоатом» розрахункових кодів, а участь авторів у виконанні таких робіт на АЕС, як «Обстеження механічних властивостей металу та прогноз технічного стану трубопроводів після 150 000 годин експлуатації», «Виконання розрахунків на міцність обладнання і трубопроводів систем, важливих для безпеки у відповідності з вимогами НД» лише підтверджує важливість і необхідність даної розробки.

Література

1. Комплексна (зведена) програма підвищення рівня безпеки енергоблоків атомних станцій» (КзПБ) [Текст]. — Введ. 07.12.2010. — К.: ГКЯР України, 2010.
2. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій [Текст]. — Введ. 08.04.2001. — К.: ГКЯР України, 2008. — 62 с.
3. СОУ НАЕК 080:2014. Довгострокова експлуатація діючих енергоблоків АЕС. Загальні положення [Текст]. — Затверджено наказом Президента ДП «НАЕК «Енергоатом» від 23.01.2015 № 74.
4. Пахалович, М. Є. Класифікаційні ознаки нормативного забезпечення з продовження ресурсу тепломеханічного обладнання атомних станцій [Текст] / М. Є. Пахалович, С. О. Кучер, Ю. П. Левуцький, С. П. Малишко, М. П. Гіря // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2016. — № 1/8(79). — С. 21–28. doi:10.15587/1729-4061.2016.59441
5. СТП 0.41.076-2008. Анализ и оценка безопасности. Порядок использования расчетных кодов для обоснования безопасности ядерных энергетических установок. Методические указания [Текст]. — Введ. 02.12.2008. — К.: НАЭК «Енергоатом» України, 2008.
6. Комп'ютерна програма «Расчетный комплекс CIRCLE-3D» [Текст]: свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 50314 від 19.07.2013 р. / Левуцький Ю. П., Кучер С. О., Пахалович М. Є. — Державна служба інтелектуальної власності України.
7. Шараевский, И. Г. Проблемы совершенствования компьютерных теплогидравлических кодов [Текст] / И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, А. В. Носовский, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2015. — Вып. 25. — С. 30–38.
8. Крутиков, А. А. Методические основы CFD для поддержки проектирования РУ [Текст] / А. А. Крутиков, А. В. Николаева, А. П. Скибин, Ю. Н. Надинский. — ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2013. — 22 с.
9. NEA/CSNI/R(2007)5. Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications [Text]. — Nuclear Energy Agency, 15 May 2007. — 154 p.
10. Nea/CSNI/R(2007)13. Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems [Text]. — Nuclear Energy Agency, 28 January 2008. — 180 p.
11. Prošek, A. Quantitative assessment of thermal-hydraulic codes used for heavy water reactor calculations [Text] / A. Prošek, F. D' Auria, D. J. Richards, B. Mavko // Nuclear Engineering and Design. — 2006. — Vol. 236, № 3. — P. 295–308. doi:10.1016/j.nucengdes.2005.07.004
12. Безопасность объектов атомной энергетики и промышленности. Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения» [Электронный ресурс] // Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук. — Режим доступа: \www/URL: http://www.ibrae.ac.ru/contents/86/. — 20.06.2016.
13. IAEA-EBP-SALTO. Safety Aspects of Long Term Operation of Water Moderated Reactors. Recommendations on the Scope and Content of Programmers for Safe Long Term Operation. Final Report of the Extrabudgetary Programmer on Safety Aspects Long Term Operation of Water Moderated Reactors [Electronic resource]. — Vienna: IAEA, July 2007. — 224 p. — Available at: \www/URL: https://www-ns.iaea.org/downloads/ni/salto/ebp-salto_web.pdf
14. Methodology and Supporting Research for Pressurized Thermal Shock Evaluation [Text]. — Vienna, Austria, 2000. — 458 p.
15. NEA/CSNI/R(99)3. Comparison Report of RPV Pressurised Thermal Shock International Comparative Assessment Study (PTS ICAS) [Text]. — Nuclear Energy Agency, November 1999. — 132 p.
16. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок [Текст]. — Введ. 01.07.1987. — Москва: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
17. ANSYS [Electronic resource]. — Available at: \www/URL: http://www.ansys.com/. — 20.06.2016.

ВЕРИФИКАЦІЯ РАСЧЕТНОГО КОМПЛЕКСА CIRCLE_3D ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ОТВЕТСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

Приведена краткая характеристика назначения и режимных условий работы ответственного оборудования атомной станции, а также алгоритм выполнения комплекса работ по оценке технического состояния с помощью расчетных кодов для дальнейшего продления срока его эксплуатации. Приведено описание разработанного расчетного комплекса CIRCLE-3D для оценки и обоснования прочности элементов и конструкций оборудования, его верификация результатов расчетов кодом CIRCLE_3D с данными стандарта и результатами тестовых заданий программного кода ANSYS.

Ключевые слова: техническое состояние, код, тепломеханическое оборудование, остаточный ресурс, прочность, верификация, деградация.

Триш Роман Михайлович, доктор технічних наук, професор, кафедра охорони праці, стандартизації та сертифікації, Українська інженерно-педагогічна академія, Харків, Україна.

Гіря Наталія Петрівна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, кафедра вищої математики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна, e-mail: n_girya@mail.ru.

Пахалович Микола Євгенович, директор, ТОВ «Експертно-технічний центр «ЕНЕРГОРЕСУРС», Київ, Україна, e-mail: expert-center@meta.ua.

Кучер Сергій Олександрович, начальник відділу міцності судів і насосів ЯУ, ТОВ «Експертно-технічний центр «ЕНЕРГОРЕСУРС», Київ, Україна.

Триш Роман Михайлович, доктор технических наук, профессор, кафедра охраны труда, стандартизации и сертификации, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков, Украина.

Гиря Наталия Петровна, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра высшей математики, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Украина.

Пахалович Николай Евгеньевич, директор, ООО «Экспертно-технический центр «ЭНЕРГОРЕСУРС», Киев, Украина.

Кучер Сергей Александрович, начальник отдела прочности судов и насосов ЯУ, ООО «Экспертно-технический центр «ЭНЕРГОРЕСУРС», Киев, Украина.

Trisch Roman, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine.

Girya Nataliya, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: n_girya@mail.ru.

Pakhalovich Nikolai, LLC «Expert Technical Center «ENERGORESURS», Kyiv, Ukraine, e-mail: expert-center@meta.ua.

Kucher Sergey, LLC «Expert Technical Center «ENERGORESURS», Kyiv, Ukraine