

Оцінка цілісності обладнання та трубопроводів АС на основі пов'язаних розрахунків в ANSYS і RELAP CODE

- **Деменков Володимир Миколайович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2000-0783>
- **Шугайло Олексій Петрович**, канд. техн. наук
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0997-7830>
- **Мустафін Марат Анатолійович**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9340-6223>
- **Макаренко Маргарита Вікторівна**
Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» м. Київ, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3406-6860>

Однією з основних складових переходу енергоблока до довгострокової експлуатації є оцінка поточного технічного стану обладнання та трубопроводів під час виконання періодичної переоцінки безпеки. Невід'ємною частиною оцінки поточного технічного стану обладнання та трубопроводів є розрахунки на міцність, під час проведення яких, здебільшого, необхідним є врахування зміни теплогідрравлічних параметрів під час перебігу нестационарних перехідних процесів в обладнанні та трубопроводах. Виконання всього комплексу теплогідрравлічних і міцнісних розрахунків одним програмним кодом зазвичай досить ускладнене та потребує окремого підходу. В цій статті описані результати застосування комплексного підходу за допомогою зв'язаних розрахунків у теплогідрравлічному та міцнісному кодах.

Ключові слова: комплексний підхід, субмоделювання, напружено-деформований стан, аварійна ситуація, граничні умови.

© Деменков В. М., Шугайло О-й П., Мустафін М. А., Макаренко М. В., 2020

Вступ

Перехід енергоблока до довгострокової експлуатації ґрунтується на результатах періодичної переоцінки безпеки, під час якої аналізуються фактичні умови експлуатації обладнання, зокрема: наявність дефектів і можливих стоншень стінок обладнання та трубопроводів, зміна механічних властивостей матеріалів, історія навантаження та фактичне спрацювання режимів навантаження [1].

Всі ці фактори враховуються під час проведення розрахунків на міцність, необхідність виконання яких зумовлюється поточним технічним станом, який може відрізнитись від стану нового обладнання старінням, супутніми факторами (стоншення стінки, втома металу тощо) та змінами, внесеними в нормативні документи в межах їх удосконалення та перегляду [2]. Під час виконання оцінки міцності обладнання та трубопроводів, яка виконувалась на етапі проектування реакторної установки (РУ), розрахункові можливості були обмежені й враху-

вання всіх аспектів було проблематичним, тому в проєктних розрахунках закладався істотний консерватизм через використання різних коефіцієнтів запасу [1]. Сучасний розвиток науки та техніки з аналізу напружено-деформованого стану (НДС) дає можливість виконати більш детальні розрахунки міцності, як під час стаціонарних, так і нестаціонарних процесів. Так, у процесі виконання нестаціонарних розрахунків НДС обладнання та трубопроводів, може бути застосований комплексний підхід, який полягає в аналізі перехідних процесів, які відбуваються в РУ в конкретний момент часу, та врахування зміни теплогідравлічних параметрів під час їх перебігу, як вихідних даних в аналізі міцності. Так, наприклад, зазначений підхід було використано для обчислення НДС теплообмінних трубок парогенератора під час аварійної ситуації. Він дозволяє отримати більш точну оцінку залишкового ресурсу обладнання, зменшити надлишковий ступінь консерватизму та спрогнозувати визначальні параметри технічного стану на подальший строк експлуатації РУ [3].

Зазвичай теплогідравлічні розрахунки виконуються в розрахунковому коді RELAP5, а оцінка міцності в інших програмних комплексах (ПК) скінченно-елементного (СЕ) аналізу, наприклад, таких як ПК ANSYS. Вирішення цих задач комплексно пов'язане зі специфічними питаннями [4], які потребують вирішення, а саме:

- необхідність створення уніфікованої моделі обладнання і трубопроводів першого та другого контурів РУ з метою подальшого аналізу будь-якого нестаціонарного сценарію;

- реалізація коректного й оптимального (за обчислювальними можливостями) перенесення даних (пов'язані розрахунки), отриманих теплогідравлічним кодом, до застосування у ПК аналізу міцності.

Далі наведені основні кроки виконання робіт, які забезпечують застосування вказаного підходу під час виконання оцінки міцності обладнання та трубопроводів РУ на прикладі розрахунку НДС імпульсного запобіжного пристрою компенсатора тиску (ІЗП КТ) РУ ВВЕР-1000.

Виконання теплогідравлічних розрахунків та визначення граничних умов

Виконання теплогідравлічних розрахунків під час обґрунтування міцності елементів обладнання та трубопроводів є комплексним завданням, що містить низку інженерних аналізів і розрахунків з використанням ПК. Загалом, до переліку робіт з теплогідравлічної частини входять такі основні етапи:

- збір, аналіз і документування вихідних даних аналізованого енергоблока для розроблення розрахункових моделей;

- розроблення розрахункових моделей (наборів вихідних даних) для ПК, вибраних для аналізу;

- вибір розрахункових сценаріїв для аналізу;
- виконання розрахунків, аналіз і документування результатів.

Основною метою виконання теплогідравлічних розрахунків є отримання для представницьких розрахункових сценаріїв теплогідравлічних параметрів (тиск, температура та коефіцієнти тепловіддачі), які використовуються як вхідні дані (граничні умови) під час виконання аналізу міцності обладнання та трубопроводів РУ.

Основою теплогідравлічних розрахунків є моделювання перехідних процесів із використанням валідованої та верифікованої розрахункової моделі для коду RELAP5, приклад нодалізаційної схеми якої наведено на Рисунку 1.

Розрахунковий код RELAP5 належить до одомірних теплогідравлічних кодів із усередненням теплогідравлічних параметрів [5] у межах кожного розрахункового вузла, що з метою компенсації обмежень, зумовлених застосуванням одновимірного коду, потребує консервативних початкових та граничних умов (ПГУ). Так, наприклад:

- для всіх ПГУ обираються значення та характеристики, які призводять до більш несприятливих наслідків. Ці значення є граничними для діапазону зміни параметра за нормальної експлуатації й відповідають експлуатаційним межам, збільшеним або зменшеним (із дотриманням консервативного підходу) на величину похибки вимірювання. Додатково для деяких параметрів (наприклад, для значень потужності залишкових енерговиділень) можуть вводитись певні консервативні запаси для покриття похибок (невизначеностей) їх розрахунку;

- враховується одна, незалежна від вихідної події (ВП), відмова будь-якого з елементів системи безпеки (активного чи пасивного) або одна, незалежна від ВП, помилка персоналу (зауважимо, що принцип одиничної відмови (див. п. 2.58 НП 306.2.141-2008 [6]) застосовується до систем безпеки, тобто в процесі аналізу окремого сценарію для кожної із задіяних систем безпеки може бути врахована своя одинична відмова);

- розглядається найбільш несприятливе для ВП функціонування систем безпеки;

- враховуються відмови системи електропостачання змінного струму нормальної експлуатації (знеструмлення) в момент виникнення ВП, спрацювання аварійного захисту або відключення турбогенератора, якщо така відмова й обраний момент її виникнення призводять до більш несприятливих наслідків щодо обраних цільових параметрів аналізу;

- враховується відмова елементів інших систем нормальної експлуатації за винятком випадків, коли їх функціонування призводить до більш несприятливих наслідків щодо обраних цільових параметрів аналізу;

- враховуються визначені в протиаварійній документації дії персоналу, які призводять до більш

трубопроводів, трубопроводів вприску в КТ, трубопроводів зв'язку КТ та ББ, трубопроводів системи аварійного охолодження активної зони високого та низького тиску);

трубопроводів свіжої пари та трубопроводів живильної води.

Загальна геометрична модель РУ наведена на Рисунку 2.

Деякі елементи обладнання та трубопроводів, залежно від їх впливу на загальну жорсткість системи, не моделювались або моделювались спрощено. Так, наприклад, у КР детально змодельована патрубкова зона, опорний бурт та фланець, водночас, верхній блок та еліптичне днище не моделювались; опорні цапфи ГЦН, які сприймають його вагу, змодельовані спрощено так, щоб адекватно врахувати жорсткість у вертикальному напрямку; локальне збільшення товщини стінки в трійниках трубопроводів не моделювалося тощо.

Для оцінки адекватності отриманої розрахункової моделі реальним умовам роботи РУ проведено її валідацію, яка ґрунтується на порівняльному аналізі розрахункових значень переміщень з вимірними значеннями переміщень (відповідними системами діагностики). Для основного обладнання та трубопроводів РУ ВВЕР-1000 виконуються вимірювання переміщень на реперних точках ГЦТ і гідроамортизаторах (ГА). Вимірювачі теплових пе-

реміщень на багатьох енергоблоках експлуатуються з початку експлуатації РУ, точність їх вимірювань не регламентована, водночас точність вимірювання ГА достатня для проведення валідації та відповідно до проєктної документації складає ± 3 мм. Крім того, порівняння переміщень на ГА дає змогу проаналізувати більшу кількість точок.

ГА призначені для обмеження коливань обладнання, які можуть виникнути під час сейсмічних впливів або аварій, пов'язаних з розривом трубопроводу, та не перешкоджають температурним переміщенням обладнання в стаціонарних режимах роботи. Отже, розрахункові переміщення визначались у точках кріплення ГА до обладнання та трубопроводів і порівнювались з фактичними переміщеннями штоків ГА (Рисунок 3).

Валідація розрахункової моделі виконувалась для режиму розігріву РУ відповідно до таких параметрів теплоносія:

- початковий стан – I контур P_p 3,5 МПа, T_p 90 °С, II контур P_p 3,0 МПа, T_p 70 °С;
- кінцевий стан – I контур P_p 15,0 МПа, T_p 250 °С, II контур P_p 6,0 МПа, T_p 200 °С.

На Рисунку 4 наведені порівняльні діаграми з розрахунковими та фактично вимірними переміщеннями для одного з ПГ та ГЦН. По осі абсцис зазначені номери ГА, по осі ординат – відповідні їм переміщення в міліметрах.

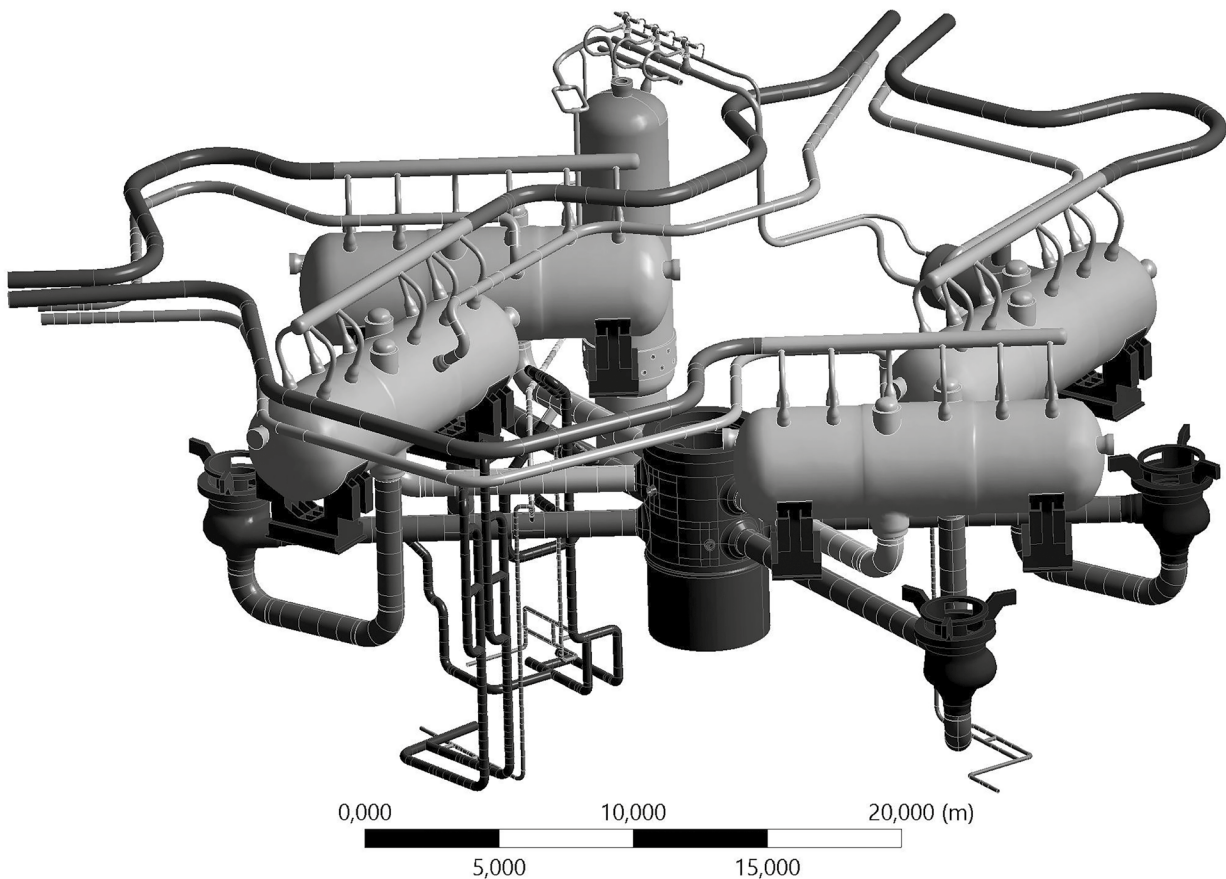


Рисунок 2 – Загальна модель РУ

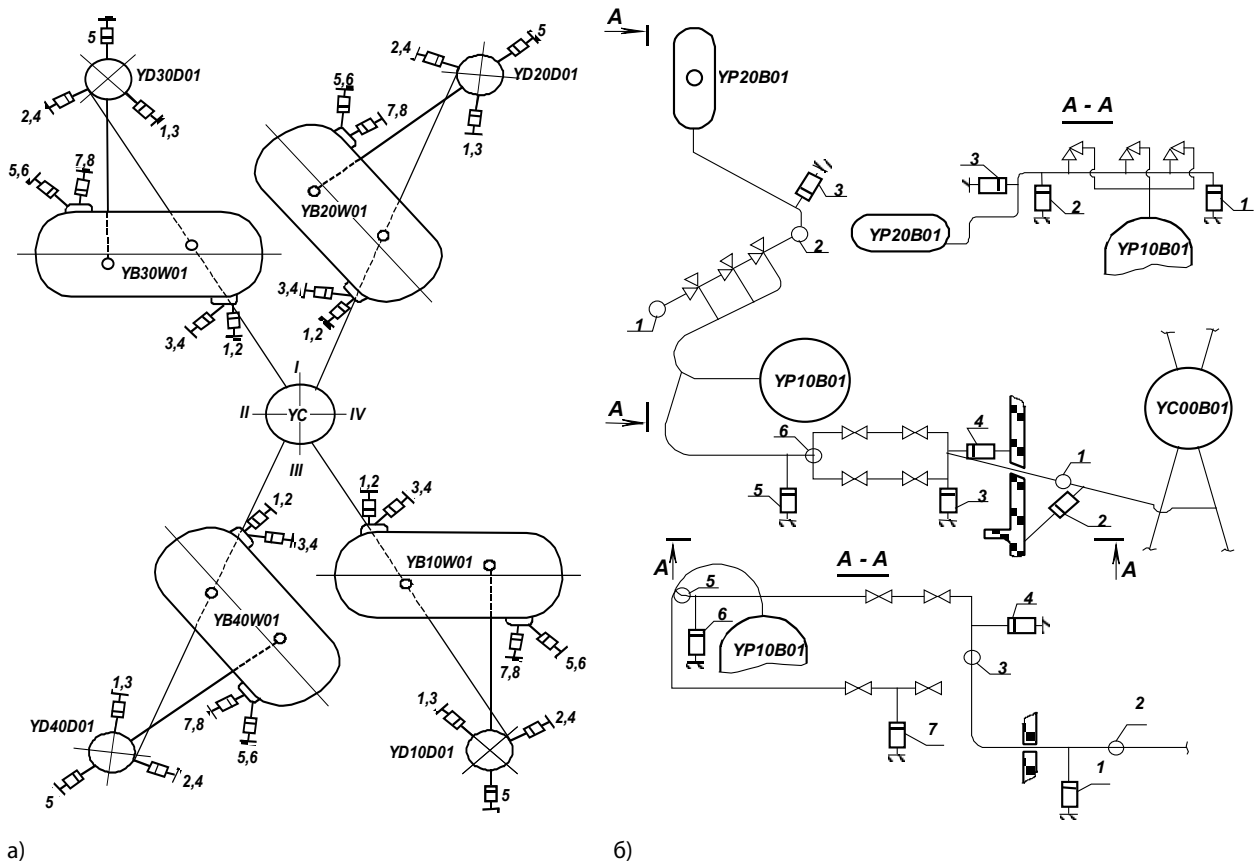


Рисунок 3 – Розташування ГА на ПГ і ГЦН (а) та на трубопроводах системи компенсації тиску (б)

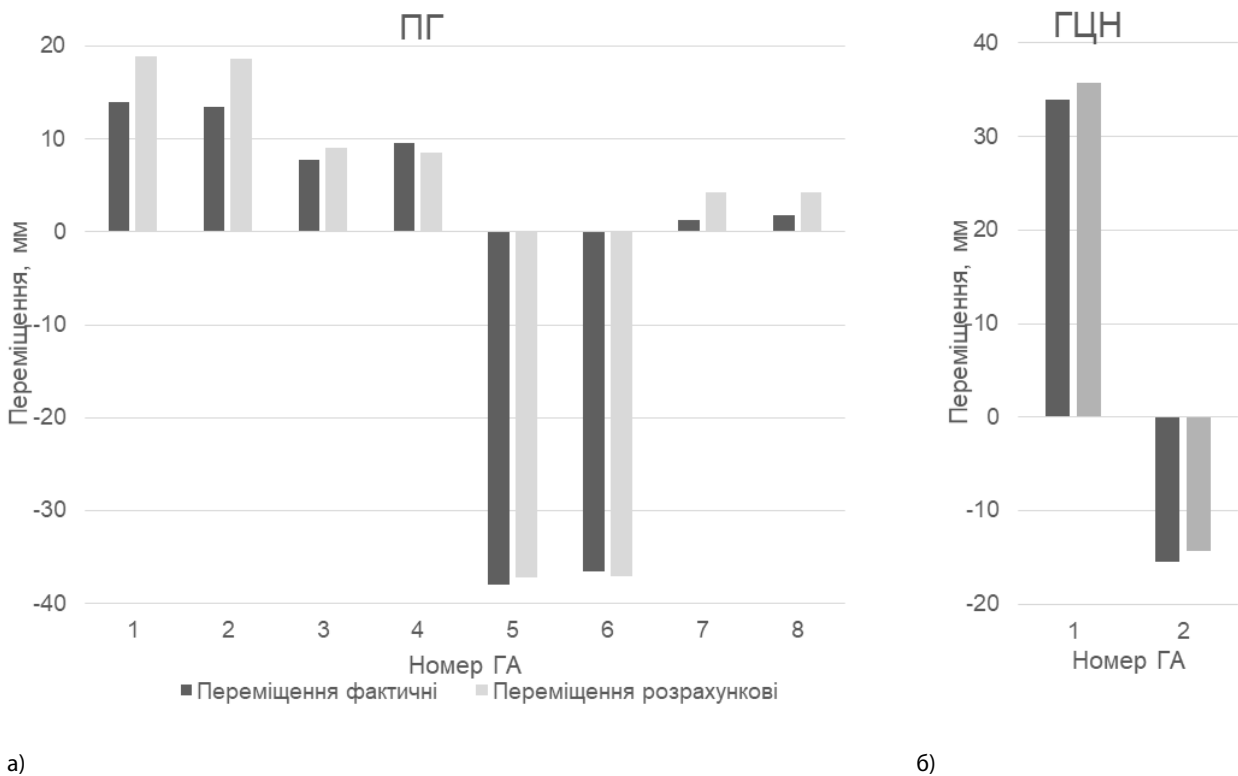


Рисунок 4 – Порівняння розрахункових і фактичних переміщень обладнання для ПГ (а) та ГЦН (б)

Перенесення даних та виконання розрахунків на загальній СЕ моделі РУ

Для перенесення даних теплогідрравлічного аналізу, розрахункова СЕ модель умовно розділяється на ділянки, які відповідають розбиттю на ГЕ теплогідрравлічної моделі (Рисунок 5). Далі на межі двох сусідніх ділянок задається розраховане значення необхідного параметра в ГЕ. Проміжні значення в межах однієї ділянки визначаються лінійною інтерполяцією.

Задані таким способом граничні умови і отримані далі результати розрахунку НДС ураховують зміну параметрів теплоносія, отриману за допомогою коду RELAP5 у кожному ГЕ.

Накладання кінематичних граничних умов та детальна оцінка міцності обладнання

Для виконання детальної оцінки міцності кожної окремої одиниці обладнання попередньо створюється розрахункова модель, яка враховує всі геометричні особливості об'єкта розрахунку, що впливають на його міцність (особливу увагу приділяють моделюванню зон потенційного розташування концентраторів напружень), а також із загальної кількості рахункових нестационарних сценаріїв обираються ті, які мають вплив безпосередньо на об'єкт розрахунку.

Далі, під час підготовки моделі до розрахунку, як кінематичні граничні умови використовуються поля переміщень на патрубках, які переносяться з загальної моделі РУ методом субмоделінгу

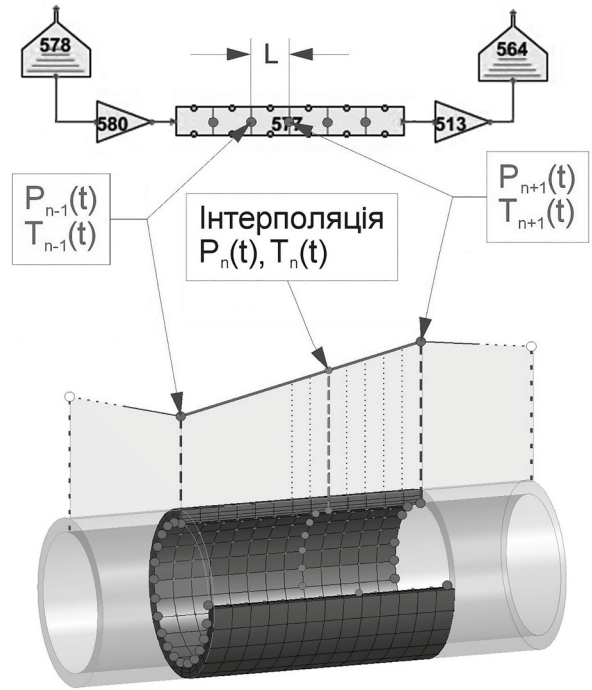
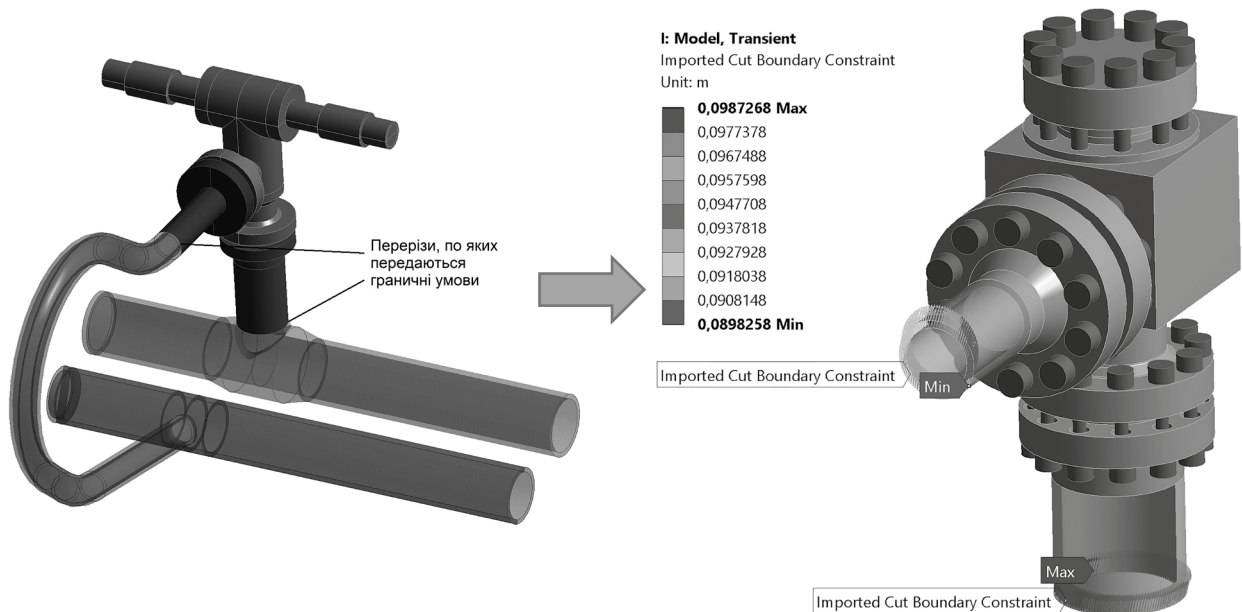


Рисунок 5 – Перенесення даних на СЕ модель РУ

(Рисунок 6). На Рисунок 6,а зображена частина загальної спрощеної моделі РУ, яка моделює ІЗП КТ, на Рисунок 6,б – детальна модель, яка використовується під час уточнених розрахунків ІЗП КТ з накладеними полями переміщень на патрубках.

На поверхнях клапана, які контактують з робочим середовищем задаються параметри тепло-



а) Спрощена модель ІЗП КТ з ділянками приєднаних трубопроводів

б) детальна модель ІЗП КТ

Рисунок 6 – Перенесення граничних умов із загальної моделі РУ на детальну модель ІЗП КТ

носія, окремо на вході та на виході ІЗП КТ, отримані за результатами теплогідравлічного аналізу для обраних розрахункових режимів. Найбільш представницьким розрахунковим сценарієм для ІЗП КТ є режим, який моделює аварійну ситуацію «Непередбачуване відкриття ІЗП КТ» оскільки в момент відкриття на запірному органі клапана під час скидання теплоносія виникає значний перепад тиску, а також великий градієнт температур, що, так само, спричиняє значні додаткові температурні та механічні напруження.

У деяких випадках, на етапі проєктування обладнання існує певна невизначеність під час задання граничних умов, через те, що низка обладнання (трубопровідна арматура, теплообмінники тощо) може використовуватись у різних системах, і заздалегідь врахувати робочі параметри та експлуатаційні навантаження обладнання для конкретних умов експлуатації неможливо. В таких випадках може бути використаний підхід, за якого оцінку міцності виконують у статичній постановці з використанням максимальних розрахункових параметрів і нормативних значень навантажень. Так, наприклад, для трубопровідної арматури як навантаження на патрубки від приєднаних трубопроводів використовуються згинальний момент і повздожнє зусилля, які визначаються відповідно до ОТТ-87 [8]. Вибір напрямку дії цих навантажень залежить від виконавця та його досвіду проведення розрахунків аналогічного обладнання. Водночас у реальних умовах експлуатації навантаження від приєднаних трубопроводів у загальному випадку складаються з 3-х компонент моментів і зусиль, кожна з

яких змінюється як за величиною, так і за напрямком залежно від режиму експлуатації, що й спричинює невизначеність. Також значною мірою НДС обладнання залежить від швидкості зміни параметрів робочого середовища, навіть у випадках, коли вони значно нижчі за розрахункові. Тому вказаний вище підхід з оцінки міцності, за якого задача вирішується в статичній постановці на розрахункові параметри, в окремих випадках не дає змогу отримати консервативні результати.

На Рисунках 7 та 8 зображені результати розрахунків ІЗП КТ під час зазначеного нестационарного перехідного режиму, а також під час стаціонарного режиму навантаження. Порівнюючи результати розрахунків можна зробити висновок, що отриманий НДС для нестационарного режиму є вищим, ніж отриманий для стаціонарного режиму за розрахункових параметрів. Запропонований підхід дає змогу оцінити НДС обладнання в умовах найбільш наближених до перебігу перехідного процесу, а також уникнути невизначеності щодо врахування впливу приєднаних трубопроводів, враховуючи принцип необхідності систематичного підвищення якості розрахунків із оцінки ядерної та радіаційної безпеки обладнання АЕС України [9].

Висновки за результатами виконаного дослідження

Виконане дослідження показує, що нестационарні режими роботи РУ суттєво впливають на міцність та цілісність обладнання та трубопроводів і повинні відповідно враховуватися під час

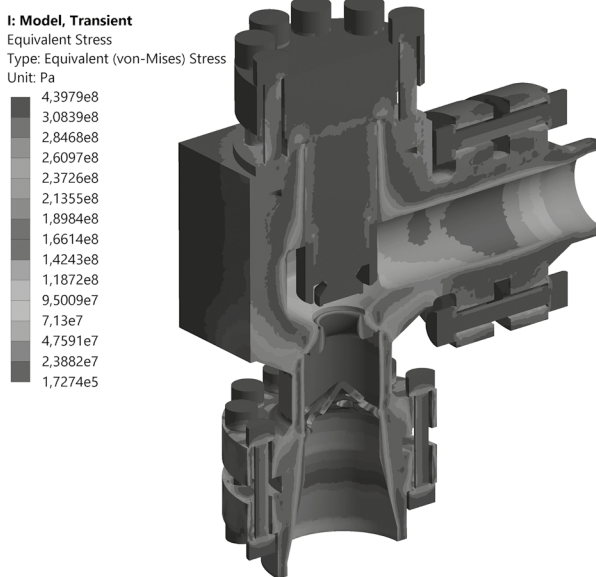


Рисунок 7 – Розподіл напружень в ІЗП КТ у момент його спрацювання

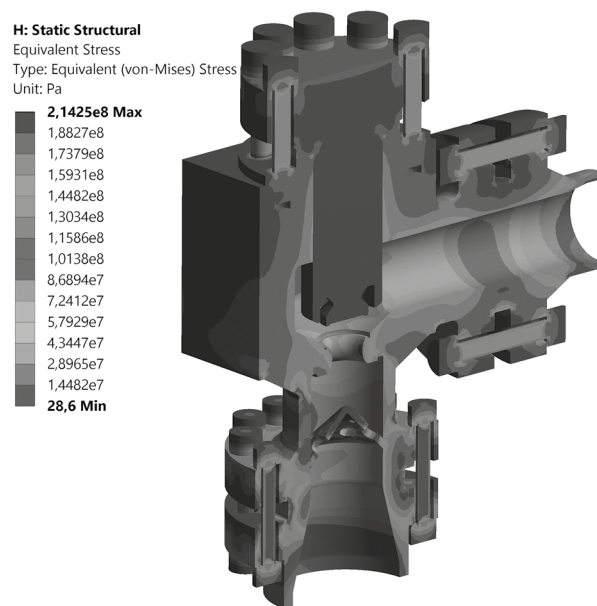


Рисунок 8 – Розподіл напружень в ІЗП КТ під час стаціонарного режиму навантаження

обчислення НДС. Найбільш точні результати аналізу НДС дає підхід, який полягає в послідовному дослідженні перебігу перехідних процесів за допомогою аналізу теплогідрравлічних параметрів, які були отримані з використанням відповідного розрахункового коду, наприклад, RELAP5, та оцінки міцності в ПК СЕ аналізу, наприклад, ПК ANSYS. Під час реалізації такого підходу виникає необхідність вирішення двох важливих питань:

створення уніфікованої моделі обладнання і трубопроводів першого та другого контурів РУ з метою подальшого аналізу нестационарних сценаріїв;

перенесення даних (пов'язані розрахунки) від ПК для аналізу теплогідрравлічних аспектів у розрахункові коди аналізу міцності.

Найважчий досвід виконання пов'язаних розрахунків свідчить про те, що задачі перенесення даних доволі успішно вирішуються, і такий підхід дає можливість:

визначити та оцінити НДС обладнання, отриманий для умов найбільш наближених до перебігу перехідного процесу;

уникнути невизначеності щодо врахування впливу приєднаних трубопроводів.

Список використаної літератури

1. Шугайло Ол-й П., Гребенюк Ю.П., Зелений О.В., Рыжов Д.И., Шугайло Ол-р П., Брик Д.С., Черняк Я.П. Отриманий досвід та вивчені уроки щодо діяльності з переходу енергоблоків АЕС України до довгострокової експлуатації. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2020. № 1 (85). С. 15 – 28. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).02.

2. Шугайло О.П., Плачков Г.І., Гребенюк Ю.П., Шевченко І.А., Дибач О.М., Зелений О.В., Москалішин Р.І. Основні результати аналізу стану управління старінням атомних електростанцій в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2018, № 3(79). С. 3-9. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).01.

3. Шугайло Ал-й П., Мустафін М.А., Шугайло Ал-р П., Рыжов Д.И., Жабин О.И. Основные результаты оценки целостности теплообменных трубок парогенератора энергоблока № 3 Ривненской АЭС в процессе управления аварией. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2017, № 3(75). С. 18 – 24. doi: 10.32918/nrs.2017.3(75).03.

4. Деменков В.М., Мустафін М.А. Розробка комплексного підходу до оцінки цілісності обладнання атомних станцій на прикладі структурного аналізу ІПУ КТ під час аварійного сценарію за допомогою зв'язаних розрахунків (FSI метод нестационарного аналізу з теплогідрравлічним кодом RELAP 5). XXXV Міжнародна МСЕ конференція, 28 – 29 жовтня 2019. Віченца, Італія.

5. Воробьев Ю. Ю., Кочарьянц О. Р. Теплогидравлическая модель реактора ВВЭР-1000 для получения граничных условий для оценки сопротивления хрупкому разрушению с использованием компьютерного кода RELAP5/MOD3.2. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2011. № 2(50). С. 13 – 19.

6. НП 306.2.141-2008. Загальні положення безпеки атомних станцій. Затверджені наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 № 162, зареєстр. в Мін'юсті України 25.01.2008 за № 56/14747 (зі змінами). URL : zakon.rada.gov.ua/go/z0056-08.

7. Деменков В. Н., Макаренко А. А., Шмигельский С. В. Оценка целостности оборудования и трубопроводов I контура с использованием 3-х мерной модели РУ энергоблока № 3 ОП РАЭС. XIV Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики» 14 – 16 листопада 2018 р. Збірник тез доповідей. Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. С. 61.

8. ОТТ-87. Арматура для оборудования и трубопроводов атомных станций. Общие технические требования.

9. Шугайло А-й П., Шугайло А-р П., Рыжов Д. И., Крицкий В. Б., Романов С. В., Колупаев А. М. Рекомендации по совершенствованию национальной нормативной базы в части продления срока эксплуатации и управления старением энергоблоков АЭС Украины. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2013, № 3(59). С. 3 – 9.

References

1. Shugailo, O-i, Hrebenuk, Yu., Zelenyi, O., Ryzhov, D., Shugaylo, O-r, Brik, D., Cherniak, Ya. (2020). Experience obtained and lessons learnt from the transition of Ukrainian NPPs to long-term operation. *Nuclear and Radiation Safety*. 1(85), 15-28. doi: 10.32918/nrs.2020.1(85).02.

2. Shugailo, O., Plachkov, H., Hrebenuk, Yu., Shevchenko, I., Dybach, O., Zelenyi, O., Moskalishyn, R. (2018). The main results of ageing management state analysis of Ukrainian NPPs. *Nuclear and Radiation Safety*. 3(79), 3-9. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).01.

3. Shugailo, O-i, Mustafin, M., Shugaylo, O-r, Ryzhov, D., Zhabin, O. (2017). Main results of assessing integrity of RNPP-3 steam generator heat exchange tubes in accident management. *Nuclear and Radiation Safety*. 3(75), 18-24. doi: 10.32918/nrs.2017.3(75).03.

4. Diemienkov, V., Mustafin, M. (2019). Development of a comprehensive approach to strength assessment of NPP equipment on the example of structural analysis of PRZ PORV during emergency scenario using coupled calculations (FSI method of non-stationary analysis with RELAP 5 thermohydraulic code). XXXV International CAE Conference, Vicenza, Italy.

5. Vorobiov, Yu., Kochariants, O. (2011). Thermohydraulic model of VVER-1000 for obtaining boundary conditions to assess brittle fracture using RELAP5/MOD3.2. *Nuclear and Radiation Safety*. 2(50), 13-19.

6. NP 306.2.141-2008. General safety provisions for nuclear power plants. Approved by SNRIU Order No. 162 dated 19 November 2007 and registered in the Ministry of Justice of Ukraine on 25 January 2008 under No. 56/14747 (with amendments). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/z0056-08.#Text>

7. Diemienkov, V., Makarenko, A., Shmigelskii, S. (2018). Assessment of primary equipment and pipeline integrity using 3-D reactor model of RNPP-3. Proceedings of XIV International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Experts "Problems of Modern Nuclear Energy", V. Karazin Kharkiv National University, 61.

8. OTT-87. Valves for equipment and pipelines of nuclear power plants. General technical requirements.

9. Shugailo, O-i, Shugaylo, O-r, Ryzhov, D., Kritskii, V., Romanov, S., Kolupaiev, A. (2013). Recommendations on improving the national regulatory framework in terms of long-term operation and ageing management of Ukrainian NPP units. *Nuclear and Radiation Safety*. 3(59), 3-9.

Assessing Structural Integrity of NPP Equipment and Pipelines by Coupled Calculations in ANSYS and RELAP Codes

Diemienkov V., Shugailo O-i, Mustafin M., Makarenko M.

State enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation safety», Kyiv, Ukraine

One of the milestones leading to the unit transition to long-term operation is the assessment of the current technical state of equipment and pipelines during the periodic safety review. An integral part of this assessment are the strength calculations within the necessity to take into account rapid thermohydraulic parameters changing during non-stationary transients. Such calculations are characterized by the need for taking into account the relationship between equipment units and

pipelines of the reactor coolant system. This task requires additional development of a complex three-dimensional FE model of reactor coolant system. The submodeling approach was used to perform the strength calculation of primary equipment. This approach involves the step-by-step process of strength calculations including the development of a thermohydraulic model with thermohydraulic analysis, the creation of a simplified complex finite element model of the reactor unit containing basic equipment and pipelines, validation, detailed transfer of boundary condition datasets for finite element model and determination of stress strain state for all calculation modes, and performance of the specified calculations of the equipment by a method of submodeling at the end. In general, the implementation of the whole complex of thermohydraulic and strength calculations within one program code is a quite complicated task and requires creating a separate approach. This paper presents the results of developing a comprehensive approach using the coupled calculations in the thermohydraulic and strength codes.

Keywords: integrated approach, submodeling, stress strain state, accident, boundary conditions.

Отримано 26.05.2020.