

ТЕПЛОВИЙ СТАН ВЕНТИЛЬОВАНИХ КОНТЕЙНЕРІВ ІЗ ВІДПРАЦЬОВАНИМИ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИМИ ЗБІРКАМИ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

С. В. Альохіна, В. М. Голошапов, А. О. Костіков

Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків

Шляхом комп'ютерного моделювання досліджено тепловий стан вентильованих контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива, що містять тепловиділяючі збірки з різною інтенсивністю тепловиділення. Задача розглянута в стаціонарній тривимірній спряженій постановці з урахуванням дії механізмів природної конвекції та променистого теплообміну.

Вступ

Згідно з енергетичною стратегією України на період до 2030 р. [1] поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) передбачає реалізацію „відкладеного” рішення – безпечного тривалого (50 років і більше) зберігання ВЯП із подальшим прийняттям рішення щодо його переробки або захоронення. Для реалізації такого підходу треба забезпечити безпечну експлуатацію існуючого пристанційного сховища ВЯП „сухого” типу (СВЯП) на Запорізькій АЕС, а також створити централізоване сховище „сухого” типу для ВЯП реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 діючих АЕС та пристанційні тимчасові СВЯП на деяких АЕС, що дасть змогу уникнути залежності від терміну відправлення контейнерів із ВЯП на площадку централізованого сховища.

В основу СВЯП, що вже існує, покладено використання аналогів закордонних вентильованих контейнерів зберігання ВЯП. Площадка сховища на Запорізькій АЕС розрахована на 380 контейнерів, перші з них було встановлено в 2001 р. На цей час на площадці сховища зберігається більш ніж півтори тисячі тепловиділяючих збірок, і щорічно кількість їх збільшується. Починаючи з 2003 р., на Запорізькій АЕС використовуються тепловиділяючі збірки альтернативної конструкції (ТВЗ-А) з більшим максимальним початковим збагаченням [2], зберігання яких у СВЯП не передбачено розробниками контейнерів. Тому першочерговим завданням є удосконалення іноземних технологій зберігання та їх адаптація до умов експлуатації на території України, дослідження режимів експлуатації контейнерів з метою виявлення відповідності встановленим нормам безпеки, а також розробки рекомендацій щодо ефективного дотримання цих норм.

Згідно з наказом № 198 від 29 грудня 2004 р. Державного комітету ядерного регулювання України «Про затвердження «Основних положень забезпечення безпеки проміжних сховищ відпрацьованого ядерного палива сухого типу» при зберіганні ВЯП необхідно передбачити охолодження відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) з урахуванням того, що температура захисних бар'єрів не повинна перевищувати проектні значення для умов нормальної експлуатації, порушень нормальної експлуатації та проектних аварій. Необхідність зберігати у СВЯП відпрацьовані тепловиділяючі збірки модифікації А (ВТВЗ-А) привела до формулювання задачі дослідження теплового стану вентильованих контейнерів із більшою, ніж проектна, інтенсивністю тепловиділення ВЯП. У цій роботі наведено методологічний підхід та ряд чисельних досліджень із метою обґрунтування теплової безпеки вентильованих контейнерів зберігання ВЯП реакторів ВВЕР-1000 (ВКЗ-ВВЕР) при зберіганні їх на СВЯП.

Постановка задачі

У ході дослідження розглядалися контейнери ВКЗ-ВВЕР, прототипом яких є контейнери VSC-24 американської фірми Sierra Nuclear Corporation [3]. ВКЗ-ВВЕР призначений для забезпечення ефективного тепловідведення від багатомісної герметичної корзини (БГК) з 24 ВТВЗ. Тепловиділення збірок зменшується з вигоранням палива впродовж років зберігання.

Розподіл тепловиділення збірок по висоті активної зони є рівномірним. Герметична корзина з ВТВЗ заповнена інертним газом (гелієм) для забезпечення ефективного тепловідведення, тиск внутрішнього газового середовища протягом терміну зберігання підтримується на рівні до 1 атм.

Як показали раніше проведені дослідження [4], за умови відсутності вітру нагріте повітря з контейнера піднімається вертикально вгору, приплив холодного повітря рівномірний по вхідних каналах і забезпечується прийнятими відстанями між рядами контейнерів. При обчисленні теплового стану корзини з ВТВЗ необхідно враховувати променистий теплообмін між зовнішньою стінкою БГК і внутрішньою поверхнею ВКЗ-ВВЕР [5].

Необхідно дослідити тепловий стан ВКЗ-ВВЕР, зважаючи на необхідність розміщення більш гарячих ВТВЗ-А в БГК разом із ВТВЗ або окремо. Для розрахункового дослідження теплового стану ВКЗ-ВВЕР температура зовнішнього повітря приймалася рівною 24 °С, що відповідає умовам нормальної експлуатації, та 40 °С – для екстремального теплового стану. Обидва варіанти розглядалися в умовах штилю.

Математична модель

У проведених дослідженнях використовувалась математична модель теплофізичних процесів, що відбуваються при зберіганні відпрацьованих збірок у вентильованих контейнерах системи ВКЗ-ВВЕР, яка дозволяє враховувати перенесення тепла як усередині БГК (передача тепла від ВТВЗ до поверхні корзини за рахунок природної конвекції під час руху гелію), так і зовні (передача тепла від поверхні БГК до оточуючого зовнішнього повітряного середовища за рахунок природної тяги у вентиляційних каналах). Задача відведення тепла, що виділяється у відпрацьованих збірках, розв'язувалась у спряженій постановці, тобто з урахуванням теплообміну між твердими тілами та обтікаючим їх газом – повітрям зовні БГК та гелієм усередині корзини.

Оцінка характеру течії всередині БГК у каналах між збірками, перегородками та стінками корзини за критерієм Рейнольдса [6, 7] показує, що течію гелію всередині БГК, викликану архимедовими силами, необхідно розглядати як ламінарну ($Re \sim 100 \div 500 < 2300$). Оцінка характеру течії повітря у вентиляційних каналах контейнера показала, що її слід розглядати як розвинену турбулентну.

Беручи до уваги характер залежності теплової потужності, що виділяється однією збіркою, від терміну зберігання та припускаючи незмінність штильових погодних умов, задача оцінки тепловиділення в контейнерах ВКЗ-ВВЕР розглядається в стаціонарній постановці.

Математична модель стаціонарного теплофізичного процесу, що розглядається, містить у собі наступні рівняння в часткових похідних [8, 9]:

- нерозривності (джерела та стоки маси відсутні);
- руху в'язкого газу Нав'є–Стокса, осередненого за Рейнольдсом (з урахуванням зовнішньої сили ваги);
- енергії (для областей, що зайняті повітрям та гелієм);
- теплопровідності (для областей, що зайняті твердими тілами).

Для замикання система диференціальних рівнянь доповнюється рівнянням стану газу у вигляді залежності його щільності від тиску та температури.

Для області, зайнятої повітрям, при обчисленні турбулентних складових теплофізичних констант використовувалась стандартна модель турбулентності k - ϵ [9], що містить два диференціальних рівняння – для турбулентної кінетичної енергії k та швидкості її дисипації ϵ .

Для виявлення необхідності врахування теплообміну шляхом випромінювання було проведено оцінювання, яке показало, що кількість теплоти, що передається всередині БГК шляхом теплообміну випромінюванням, близька до кількості теплоти, що відводиться шляхом конвекції. Отже, математичну модель теплофізичних процесів усередині БГК, так само, як і у вентиляційному тракті ВКЗ-ВВЕР, необхідно доповнити рівнянням променистого теплообміну [5].

Результати розрахунку

Для розрахункового дослідження теплового стану збірок усередині БГК з огляду на осьову симетрію розглядається четверта частина поперечного перерізу корзини при моделюванні теплообміну по всій висоті контейнера. Геометричну модель ВКЗ-ВВЕР наведено на рис. 1. Вона включає зовнішній бетонний корпус із металевою внутрішньою обичайкою, яка разом із зовнішньою циліндричною поверхнею корзини формує вертикальний циліндричний канал, з'єднаний вхідними та вихідними вентиляційними каналами із зовнішнім простором. Моделювання вхідних та вихідних каналів виконано з урахуванням їх фактичного гідравлічного опору.

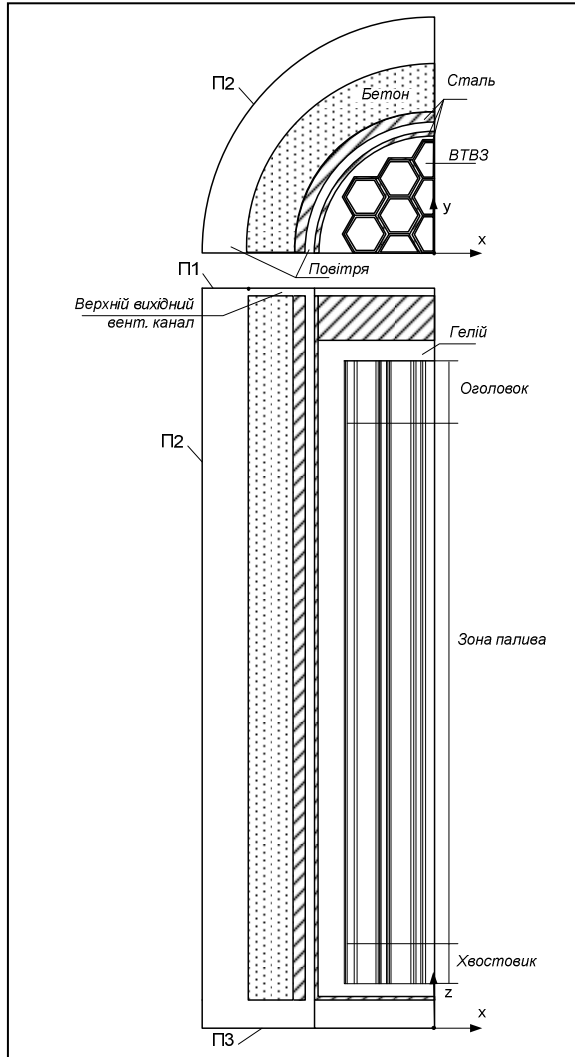


Рис. 1. Геометрична модель та розрахункова область для окремо розташованого ВКЗ-ВВЕР.

Форма розрахункової області БГК містить блок шестиграних напрямних труб та тепловіділяючі збірки. Впливом отворів у шестиграних напрямних на гідравлічні характеристики каналів між збірками та напрямними через малі розміри отворів можна знехтувати, приймаючи підвид робочого середовища всередині герметичної корзини до кожного каналу навколо збірки рівномірним.

Для розрахунку приймаються такі граничні умови:

на площинах П1, П2 (див. рис. 1) атмосферний тиск та температура повітря (24 °С або 40 °С)

$$p|_{\text{П1}} = p|_{\text{П2}} = p|_{\text{П3}} = 101300 \text{ Па},$$

$$T|_{\text{П1}} = T|_{\text{П2}} = T|_{\text{П3}} = T_n,$$

де T_n – температура зовнішнього повітря, °С;

на границі П3 приймаються умови непроникності для повітря, тепловим потоком на цій границі в силу його малості знехтуємо.

Результати розрахункового дослідження температурного стану БГК, що розташована в ВКЗ-ВВЕР і містить 24 ВТВЗ, тепловіділення кожної з яких $Q = 909$ Вт при $T_n = 40$ °С, наведено на рис. 2. Такий розподіл температур типовий для БГК, що заповнена ВТВЗ або ВТВЗ-А з

однаковою інтенсивністю тепловіділення. Відмінності між цими двома варіантами відбуватимуться лише в рівнях температур. Якщо заповнювати корзину збірками, що не пройшли витримку в басейні мінімум п'ять років, то максимальний рівень температур у центральній зоні БГК може перевищити встановлену при проектуванні температуру 350 °С.

Як видно з рис. 2, максимальний рівень температур усередині корзини спостерігається в збірках, що розташовані поблизу осі корзини. По мірі наближення до стінок БГК температура ВТВЗ меншає. По висоті збірок максимальний рівень температур припадає на висоту 1,92 м від початку зони тепловіділення.

Зважаючи на виявлений характер розподілу температур усередині БГК, можливо корегувати форму температурного поля та рівень температур шляхом комбінації розміщення ВТВЗ та ВТВЗ-А різної інтенсивності тепловіділення. Було розглянуто такі варіанти:

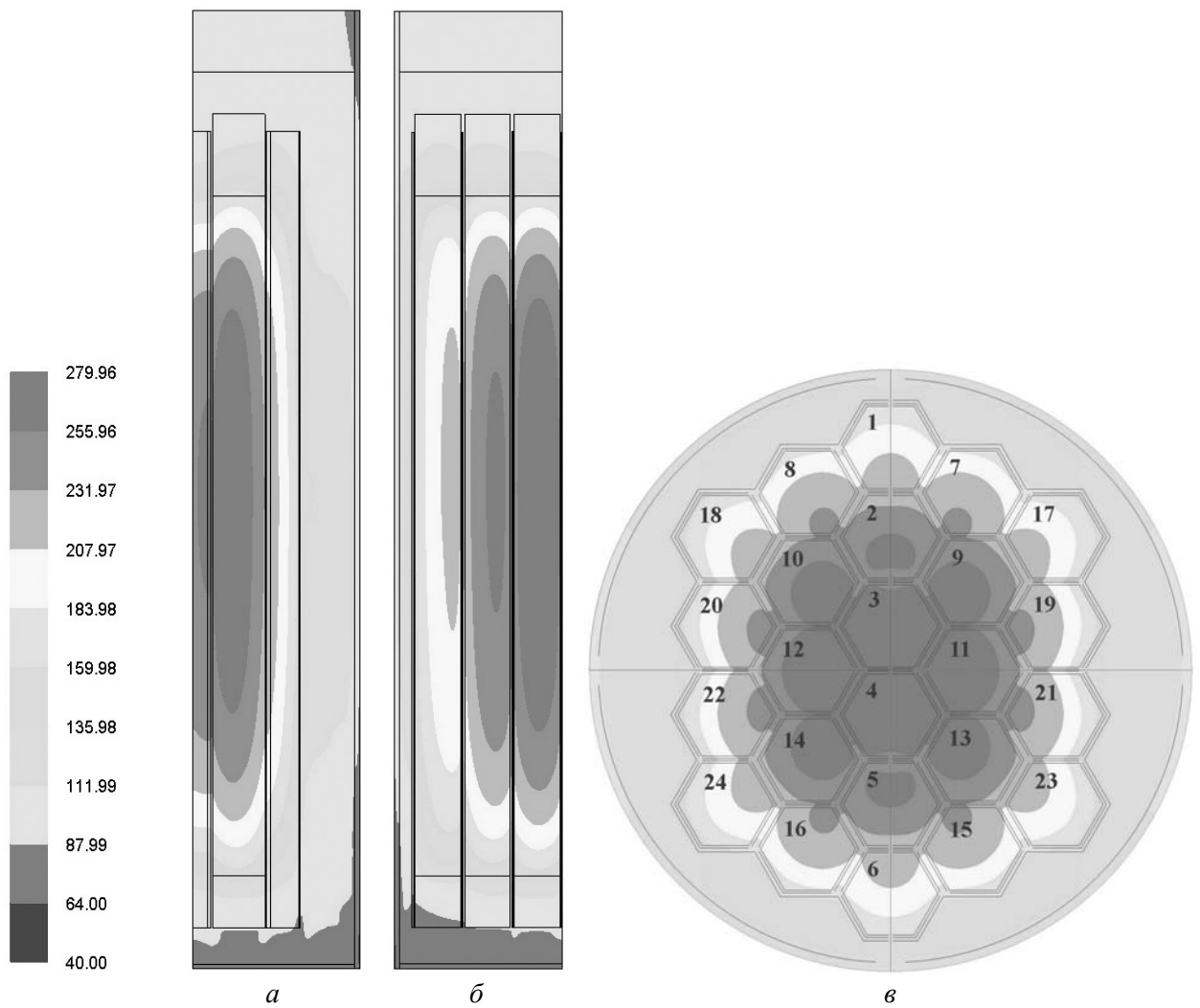


Рис. 2 . Температурне поле БГК:
 а – переріз у площині zOy ; б - переріз у площині zOx ; в - центральний горизонтальний переріз.

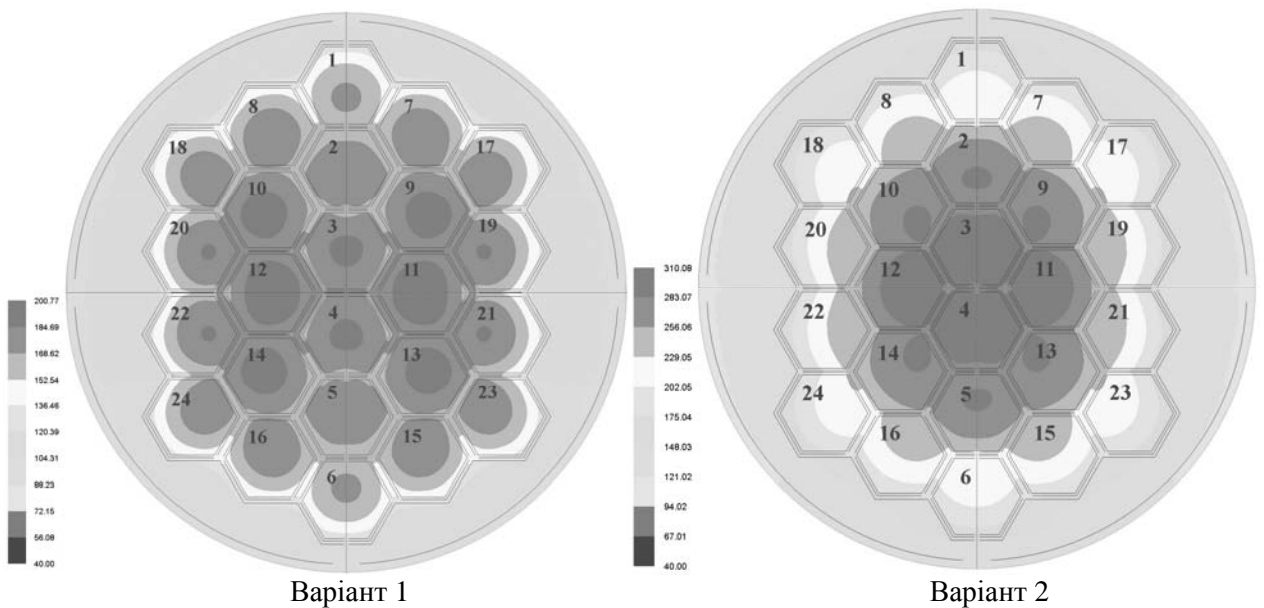


Рис. 3 . Температурне поле БГК у центральному перерізі при заповненні ВТВ3 та ВТВ3-А.

варіант 1 - на місцях № 1, 6–8, 15–24 розташовані збірки ВТВ3-А з інтенсивністю тепловиділення $Q = 1220$ Вт, на місцях № 2–5, 9–14 – ВТВ3 з $Q = 909$ Вт;

варіант 2 - на місцях № 2–5, 7–16, 19–22 розташовані збірки ВТВЗ-А з інтенсивністю тепловиділення $Q = 1220$ Вт, на місцях № 1, 6, 17, 18, 23, 24 – ВТВЗ з $Q = 909$ Вт.

Температурні поля, що отримані шляхом розрахункового дослідження для вищезгаданих варіантів, наведено на рис. 3. Як видно з рисунка, при розміщенні ВТВЗ-А по краю групи (варіант 1) розподіл температур у корзині стає більш рівномірним порівняно з заповненням БГК збірками з однаковим тепловиділенням. Максимальні температури при такому варіанті заповнення не перевищують $200,77$ °С, що значно менше максимальних температур при заповненні корзини збірками однакового типу зі значно меншою інтенсивністю тепловиділення. Такий варіант заповнення корзини є привабливим з точки зору теплової безпеки, тому що відбувається зменшення загального рівня температур у групі. Однак ВТВЗ-А мають більш високий рівень випромінювання, ніж ВТВЗ, тому при використанні варіанта 1 необхідне проведення додаткового дослідження радіаційної безпеки корзини зберігання.

При розміщенні збірок згідно з варіантом 2 температурне поле матиме більший градієнт, максимальні температури в центрі групи збірок значно підвищуються порівняно з варіантом 1 і сягатимуть $310,08$ °С. Такий варіант розміщення ВТВЗ та ВТВЗ-А більш безпечний з точки зору радіаційного випромінювання, тому що збірки з меншими інтенсивністю тепловиділення та радіаційного випромінювання будуть захисним бар'єром для збірок типу А.

Висновки

Для розв'язання задачі переносу тепла у вентилязованих контейнерах з БГК зберігання відпрацьованих тепловиділяючих збірок на площадці СВЯП в умовах розміщення у них збірок з різною інтенсивністю тепловиділення внаслідок різної тривалості витримки в басейні було розроблено математичну модель та розв'язано спряжену задачу теплообміну з урахуванням конвективних та променистих складових теплових потоків.

Використання тривимірної моделі контейнера дало змогу врахувати всі основні особливості його конструкції, їх вплив на формування температурного поля в корзині зберігання в цілому та кожної тепловиділяючої збірки зокрема як для випадку розміщення в контейнері збірок з однаковим тепловиділенням, так і для випадку з різним тепловиділенням збірок унаслідок розміщення в корзині збірок різного типу (ВТВЗ та ВТВЗ-А) або з різним строком витримки в басейні.

Урахування особливостей переносу тепла навколо кожної збірки в корзині дало змогу значно підвищити порівняно з раніше проведеними нами дослідженнями [4] точність визначення максимальних температур у центрі кожної збірки при різних комбінаціях заповнення корзини збірками з різним тепловиділенням.

Слід відзначити, що розроблений підхід працює і у випадку порушення осьової симетрії тепловиділення при розміщенні ВТВЗ. При цьому треба моделювати не четверту частину контейнера, а його цілком.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. «Енергетична стратегія України на період до 2030 року», затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 145-р від 15 березня 2006 р.
2. Депенчук А. А. Опыт эксплуатации ТВСА на Запорожской АЭС / А. А. Депенчук, Ю. А. Шишков, О. С. Кабаков // Тр. Одес. политехн. ун-та. – Одесса, 2008. - Вып. 1(29). – С. 23 – 29.
3. Бейнер К. С. Анализ безопасности ВКХ-ВВЭР 1000 // Symposium within XV international youth nuclear festival “DYSNAI”. – Visaginas, 2002. – С. 22 – 34.
4. Алёхина С. В. Решение сопряженной задачи тепломассообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / С. В. Алёхина, В. Н. Голощاپов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Проблемы машиностроения. – Харьков, 2005. - Т. 8, № 4. – С. 12 – 20.
5. Алёхина С. В. Исследование теплового состояния вентилируемого контейнера с отработавшим ядерным топливом путем решения сопряженной задачи тепломассообмена / С. В. Алёхина,

- В. Н. Голощапов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // VI Минский междунар. форум по тепло- и массообмену, 19 - 23 мая 2008 г.: тез. докл. и сообщ. – Минск, 2008. – Т. 1. – С. 185 – 186.
6. *Кутателадзе С. С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
 7. *Тепло- и массообмен.* Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общей ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
 8. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1970. – 742 с.
 9. *Launder B. E.* The Numerical Computation of Turbulent Flow / B. E. Launder, D. B. Spalding // *Comp. Meth. Appl. Eng.* – 1974. – № 3. – P. 269 – 289.

Надійшла до редакції 14.01.09