

УДК 536.244:621.039.584

ТЕПЛОВА БЕЗПЕКА СУХОГО ЗБЕРІГАННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЗБІРОК РЕАКТОРА ВВЕР-1000

С. В. Альохіна¹, В. М. Голощапов¹, А. О. Костіков¹, С.А. Письменецький², В. Г. Рудичев²

¹Інститут проблем машинобудування Національної Академії Наук України

вул. Дм. Пожарського 2/10, Харків 61046, Україна

²Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

пл. Свободи, 4, м. Харків 61077, Україна

E-mail: rud@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцію 16 січня 2009 р.

Шляхом комп'ютерного моделювання досліджено тепловий стан вентильованих контейнерів зберігання відпрацьованого ядерного палива при розміщенні в них збірок з різною інтенсивністю тепловиділення. Задача розглянута в квазістационарній тривимірній спряженій постановці з урахуванням дії механізмів природної конвекції та променевого теплообміну. Проведено обчислення різних варіантів заповнення корзин збірками. Визначена зміна їхніх температур протягом зберігання. Показана теплова безпека технології сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теплова безпека, відпрацьоване паливо, сухе зберігання, сухе сховище, вентильований контейнер.

За даними Міжнародної агенції з ядерної енергетики (МАГАТЕ) до 2006 р. у світі було накопичено більш ніж 200 тис. тон відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) та щороку ця кількість збільшується на 8 – 10 тис. тон [1 – 2]. Існує декілька основних підходів до поводження з ВЯП, серед яких можна виділити «сухий» спосіб зберігання. Сухі сховища успішно експлуатуються у Франції, Німеччині, Литві, Чехії, Угорщині, великий досвід використання технологій сухого зберігання ВЯП накопичено у США. В Україні з 2001 р. на Запорізькій АЕС успішно експлуатується перше сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП), яке за проектними нормами розраховано на зберігання відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) у 380 контейнерах.

В ССВЯП Запорізької АЕС використовуються контейнери, подібні до контейнерів марки VSC-24 американської компанії Sierra Nuclear Corporation. Вентильовані контейнери зберігання ВЯП реакторів ВВЕР-1000 (ВКЗ-ВВЕР) спроектовані для зберігання збірок з залишковою інтенсивністю тепловиділення, що не перевищує 1 кВт на збірку. Однак починаючи з 2003 р. на Запорізькій АЕС використовуються тепловиділяючі збірки альтернативної конструкції (ТВЗ-А) з інтегрованим поглиначем нейтронів, який вигоряє, зі збільшенням до 50-55 МВт·діб/кгU енерговиділенням [3]. Збірки мають більшу інтенсивність залишкового тепловиділення і зберігання їх у ССВЯП після 5 років витримки в басейнах не передбачено розробниками контейнерів.

Необхідність зберігати у ССВЯП відпрацьовані тепловиділяючі збірки модифікації А (ВТВЗ-А) привела до формулювання задачі дослідження теплового стану вентильованих контейнерів з більш високою ніж проектна інтенсивністю тепловиділення ВЯП.

Метою роботи є обґрунтування теплової безпеки ВКЗ-ВВЕР при зберіганні їх у ССВЯП, при цьому необхідно дослідити тепловий стан ВКЗ-ВВЕР зважаючи на можливість розміщення ВТВЗ-А в ВКЗ-ВВЕР разом із ВТВЗ, або окремо, розглянути різні варіанти заповнення корзини збірками з різною інтенсивністю тепловиділення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вентильований контейнер зберігання має структуру, наведену на рис. 1 [4]. Конструктивно ВКЗ-ВВЕР призначений для послаблення нейтронного і гамма випромінювань ВЯП, протидії розповсюдженню радіонуклідів ВЯП в навколишнє середовище і забезпечення ефективного тепловідведення від багатомісної герметичної корзини (БГК) з 24 ВТВЗ. Вентиляційне повітря потрапляє у нижні вентиляційні канали, проходить по каналу між стінкою контейнера та БГК, охолоджуючи останню. Герметична корзина з ВТВЗ заповнена інертним газом – гелієм для забезпечення рівномірного і ефективного тепловідведення, тиск внутрішнього газового середовища протягом терміну зберігання підтримується на рівні близькому до 1 атм.

Тепловиділення збірок зменшується протягом років зберігання за рахунок напіврозпаду продуктів поділу і актиноїдів, які накопичились за час кампанії в ВЯП (рис. 2). Розподіл тепловиділення збірок по висоті активної зони при моделюванні припускається рівномірним.

Як вихідні дані для теплових розрахунків можуть бути використані кількісні характеристики ВТВЗ різних типів, встановлені галузевим стандартом підприємства для Українських АЕС [5]. Цим документом визначені питома активність, спектральний склад гамма-випромінювання і інтенсивність залишкового тепловиділення як традиційного відпрацьованого ядерного палива типу ВТВЗ з вигоранням 41,5 МВт·діб/кгU, так і

альтернативного – типу ВТВ3-А з вигорянням 55 МВт·діб/кгU. Використання даних стандарту [5] знижує рівень консерватизму, закладеного при розрахунках радіаційних навантажень від джерел типу ВЯП, і сприяє розробці більш економічних технічних рішень.

Раніш проведені дослідження [6] показують, що за умови відсутності вітру приплив холодного повітря

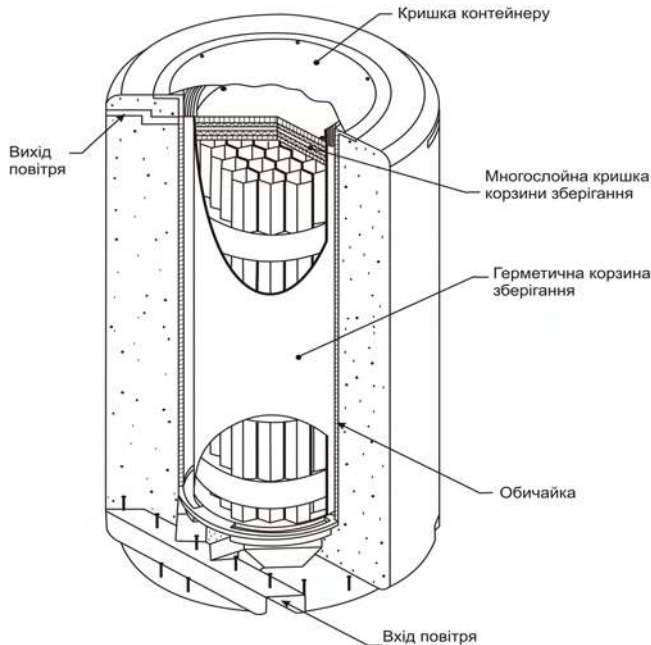


Рис.1. Структура вентильованого контейнера зберігання

частинних похідних [8, 9]:

- нерозривності (джерела та стоки маси відсутні);
- руху в'язкого газу Нав'є–Стокса осереднені по Рейнольдсу (з урахуванням зовнішньої сили тяжіння);
- 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.

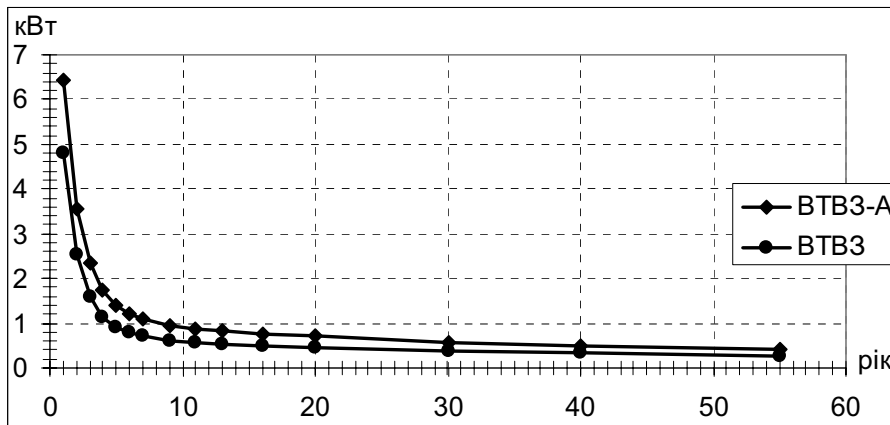


Рис. 2. Зменшення інтенсивності тепловиділення ВТВ3 протягом терміну зберігання.

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

Математична модель теплофізичних процесів всередині БГК, так само як і у вентиляційному тракті ВКЗ-ВВЕР [6], доповнена рівнянням променистого теплообміну [10].

Для розрахункового дослідження теплового стану збірок всередині БГК з огляду на осьову симетрію розглядається четверта частина поперечного перетину корзини ВКЗ-ВВЕР при моделюванні теплообміну по всій висоті контейнера. Геометрична модель об'єкту дослідження наведена на рис. 3. Моделювання вхідних та

рівномірний по вхідним каналам, нагріте повітря з контейнера піднімається вертикально вгору. При обчисленні теплового стану БГК необхідно враховувати променистий теплообмін між зовнішньою стінкою корзини та внутрішньою поверхнею ВКЗ-ВВЕР [7]. 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.

З вищесказаного випливає наступне формулювання для постановки задачі. Треба розрахунковим шляхом обґрунтувати та підтвердити безпеку сухого контейнерного зберігання ВЯП з точки зору виконання умов припустимого теплового режиму.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Математична модель стаціонарного теплофізичного процесу, що розглядається, містить у собі наступні рівняння у

вихідних вентиляційних каналів виконано з урахуванням їх фактичного гідравлічного опору. Впливом віконних переділів в шестигранних напрямних всередині БГК на гідравлічні характеристики каналів між збірками та напрямними через малі розміри переділів можна знехтувати, приймаючи підвід робочого середовища всередині герметичної корзини до кожного каналу навколо збірки рівномірним.

Для розрахунку були прийняті такі граничні умови:

– на поверхнях П1, П2 (див. рис. 3) атмосферний тиск та температура повітря (24 °С або 40 °С)

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

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

де T_n – температура навколишнього повітря, °С;

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

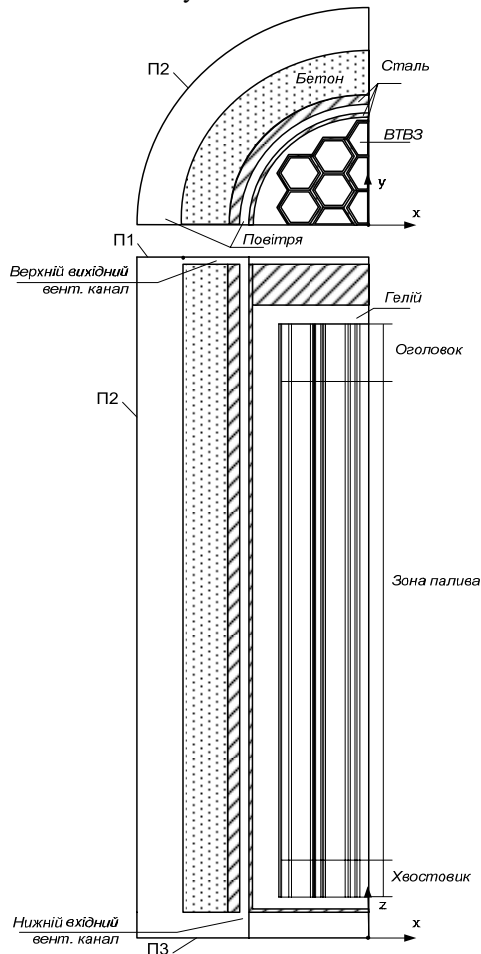


Рис. 3. Геометрична модель та розрахункова область для окремо розташованого ВК3-ВВЕР.

№ 3, 10 та 12 перевищують припустиму максимальну температуру $T_{прп} = 350$ °С. При температурі навколишнього повітря $T_n = 24$ °С це перевищення сягає 27,1 °С, при збільшенні навколишньої температури до $T_n = 40$ °С це перевищення збільшується ще на 7,18 °С. Перевищення максимальної температури в центрі ВТВЗ-А, які розташовані в середній частині корзини, свідчить про те, що завантаження збірок ВТВЗ-А для зберігання в ССВЯП при комплектації БГК лише цими збірками припустимо лише тоді, коли термін їх витримки становитиме більше 5 років. Про таке обмеження свідчать дослідження теплового стану БГК з ВТВЗ-А, тепловиділення яких складає у першому випадку $Q = 1220$ Вт (після 6 років витримки), у другому – $Q = 1100$ Вт (після 7 років витримки) згідно з даними [5]. При $Q = 1220$ Вт та $T_n = 40$ °С максимальна температура у корзині сягатиме 341,83 °С, при $Q = 1220$ Вт – 317,77 °С. В обох випадках температурне поле не змінить своєї форми (див. рис. 4).

Зважаючи на виявлений характер розподілу температур всередині БГК, можливо корегувати форму температурного поля та рівень температур шляхом комбінації розміщення ВТВЗ та ВТВЗ-А різної інтенсивності тепловиділення. Були розглянуті такі варіанти:

– варіант 1: На місцях № 1, 6–10, 13–24 розташовані збірки ВТВЗ-А з інтенсивністю тепловиділення $Q = 1220$ Вт, на місцях № 2–5, 11, 12– ВТВЗ з $Q = 909$ Вт;

Математична модель, що використовувалась, дозволяє враховувати перенесення тепла як всередині 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 в вентиляційних каналах). Задача відведення тепла, що виділяється в відпрацьованих збірках, розв'язувалась в спряженій постановці, тобто з урахуванням теплообміну між твердими тілами та обтікаючим їх газом – повітрям зовні БГК та гелієм всередині корзини. Беручи до уваги характер залежності теплової потужності, що виділяється однією збіркою, від терміну зберігання, задача оцінки теплового стану контейнерів ВК3-ВВЕР розглядається в квазістаціонарній постановці.

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ

У ході дослідження розглядалась можливість заповнення корзини лише ВТВЗ-А з різною інтенсивністю тепловиділення, ВТВЗ-А разом із ВТВЗ у різних комбінаціях, та зміна температур у центрі збірок з часом.

При заповненні БГК збірками з однаковим тепловиділенням максимальний рівень температур всередині корзини спостерігається у збірках, що розташовані поблизу осі корзини. По мірі наближення до стінок БГК температура ВТВЗ меншає. По висоті збірок максимальний рівень температур приходить на висоту 1,92 м від початку зони тепловиділення.

На рис. 4 наведено температурне поле корзини у горизонтальному перетині на висоті зони максимальних температур на початку терміну зберігання. Тепловиділення кожної із збірок складає $Q = 1410$ Вт, що відповідає витримці протягом 5 років в басейні витримки. Температури ВТВЗ-А

– варіант 2: На місцях № 2 –5, 11, 12 розташовані збірки ВТВЗ-А з інтенсивністю тепловиділення $Q = 1220$ Вт, на місцях № 1, 6–10, 13–24 – ВТВЗ з $Q = 909$ Вт.

Температурні поля, що отримані шляхом розрахункового дослідження для вищезгаданих варіантів на момент часу, що відповідає початку зберігання, наведені на рис. 5.

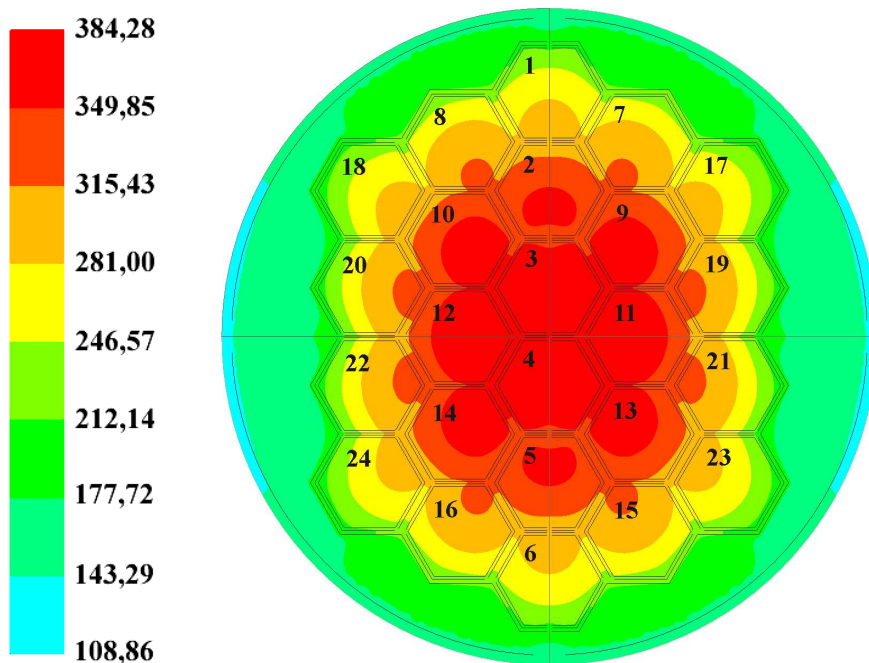


Рис. 4. Температурне поле БГК у горизонтальному перетині при $T_n = 40$ °С, тепловиділення кожної збірки $Q = 1410$ Вт.

Як видно з рисунку, при розміщенні ВТВЗ-А по краю групи (варіант 1) розподіл температур в корзині стає більш рівномірним порівняно з заповненням БГК збірками з однаковим тепловиділенням. Максимальні температури при такому варіанті заповнення не перевищують $308,76$ °С. 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

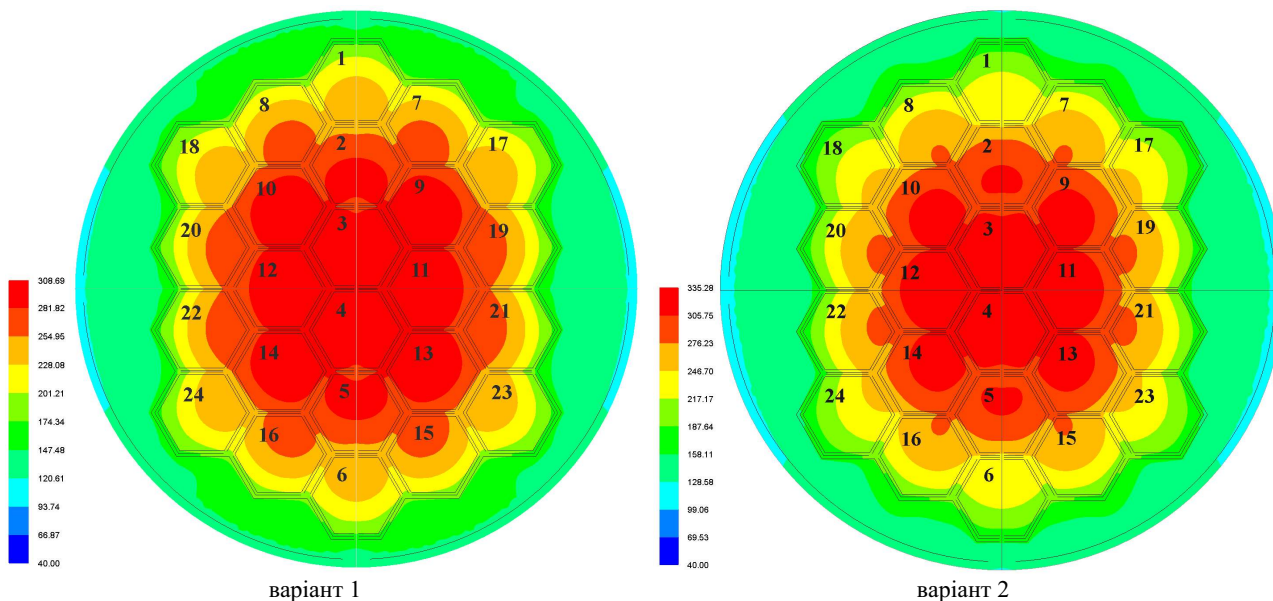


Рис. 5. Температурне поле БГК в центральному перетині при заповненні комбінаціями ВТВЗ та ВТВЗ-А.

і необхідно додаткове дослідження поля радіації зовні корзини зберігання.

При розміщенні збірок згідно варіанту 2 температурне поле матиме більший градієнт, максимальні температури в центрі групи збірок підвищуються порівняно з варіантом 1 приблизно на 26 °С та сягатимуть

335,37 °С. Такий варіант розміщення ВТВЗ та ВТВЗ-А є більш привабливим з точки зору зовнішнього випромінювання, тому що збірки з меншими інтенсивністю тепловиділення та радіактивністю слугуватимуть додатковим захисним бар'єром для збірок типу ВТВЗ-А.

Для аналізу зміни температурного стану ВТВЗ-А за час зберігання на майданчику ССВЯП була розглянута корзина з 24 ВТВЗ-А, яка розміщена у ВКЗ-ВВЕР на майданчику СВЯП, в штильову погоду при $T_n = 40$ °С для $Q = 1220$ Вт. При цьому не враховувалось, що фактичні температури навколишнього повітря за один рік змінюються від максимальних (влітку) до мінімальних (взимку), коли остигання збірок буде більш інтенсивним.

Результати розрахунку наведені на рис. 6. Для всіх ВТВЗ-А найбільш швидке зниження температури в їх

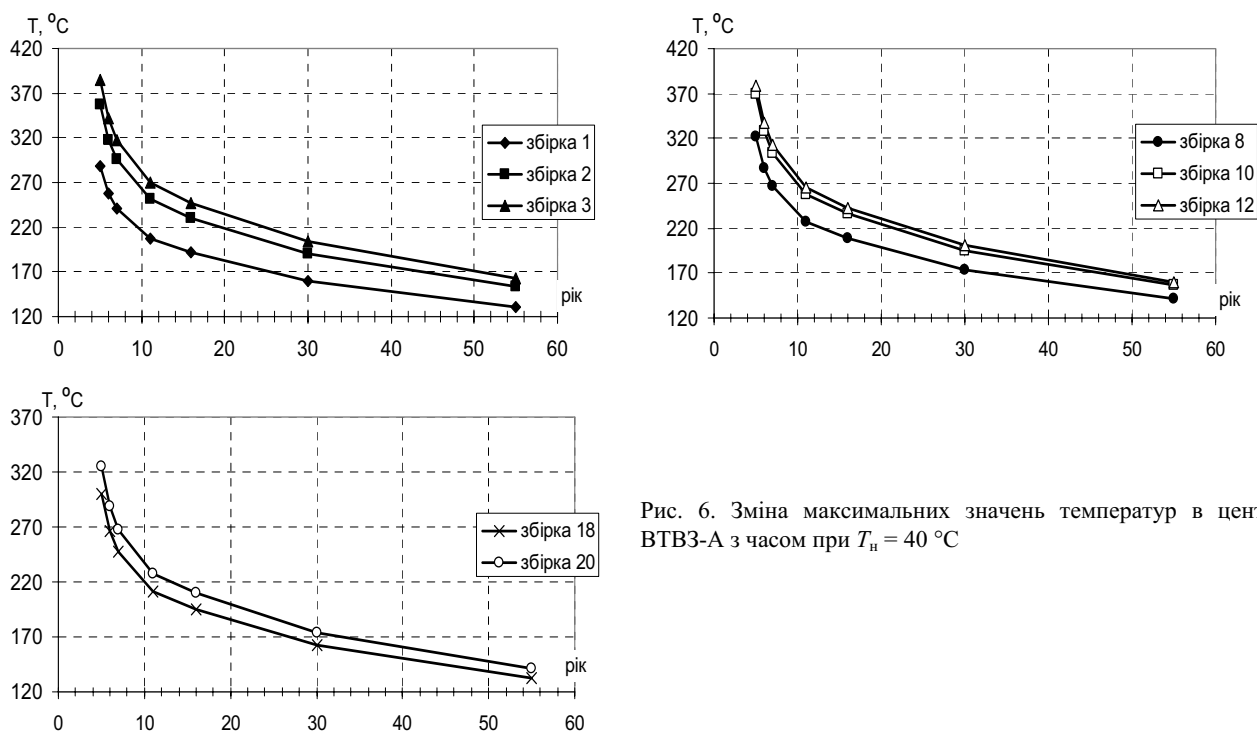


Рис. 6. Зміна максимальних значень температур в центрі ВТВЗ-А з часом при $T_n = 40$ °С

центрі проходить за перші 6 років остигання. По мірі остигання більш гарячими залишаються збірки, що розташовані в центральній частині БГК. Якщо за перший рік зберігання температура збірок № 3 та 4 знижується від 384,3 °С до 341,8 °С, то в подальші 25 років зберігання від 204,4 °С до 163,3 °С. Темп остигання залишається приблизно однаковим для всіх збірок в корзині, що обумовлено механізмом відводу тепла від збірок.

ВИСНОВКИ

Дослідження теплового стану ВКЗ-ВВЕР, в яких зберігаються відпрацьовані тепловиділяючі збірки, проводилося із застосуванням розв'язання спряжених задач теплообміну з урахуванням конвективних та променевих складових теплових потоків. Використання тривимірної моделі контейнеру дозволило врахувати усі основні особливості його конструкції та особливості переносу тепла навколо кожної збірки в корзині, що дало змогу підвищити в порівнянні з раніш проведеними нами дослідженнями [6] точність визначення максимальних температур в центрі кожної збірки.

Проведені розрахунки показали, що розміщенням збірок з різною інтенсивністю тепловиділення в БГК можна як вирівнювати температуру корзини, так і знижувати максимальні температури в ній при одночасному забезпеченні радіаційної безпеки на майданчику ССВЯП.

Таким чином, нами показано, що розміщення 24 ВТВЗ-А з залишковим тепловиділенням 1,220 кВт кожна в контейнері ВКЗ не призводить до перевищення припустимої температури зберігання. Таке ж тепловиділення мають стандартні ВТВЗ після витримки 3,8 року. Відповідно, теплове навантаження на ВКЗ припускає його заповнення як ВТВЗ з витримкою 5 років (згідно з вимогами діючого Звіту з аналізу безпеки, версія 2), так і ВТВЗ з витримкою більше 3,8 років. Умови радіаційної безпеки при цьому слід оцінити окремо, як було показано в [11], однак можна запропонувати схему завантаження, при якій у зовнішньому шарі корзини розмістяться 14 ВТВЗ з витримкою 5 років, а всередині – усі з витримкою 3,8 років, що практично збереже існуючі радіаційні умови навколо ВКЗ.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ganguly C. Nuclear Fuel Cycle & Materials Activities // Fuel Cycle and Waste. Newsletter – Vienna, Vol. 2, No. 2, August 2006 – P. 3 – 5.
2. Nuclear technology review 2006. – International Atomic Energy Agency, Vienna, 2006 – 135 p.
3. Депенчук А. А. Опыт эксплуатации ТВСА на Запорожской АЭС / А. А. Депенчук, Ю. А. Шишков, О. С. Кабаков // Труды Одесского политехнического университета – Одесса, 2008, вып. 1(29) – С. 23 – 29
4. Бейнер К. С. Анализ безопасности ВКХ-ВВЭР 1000 // Symposium within XV international youth nuclear festival “DYSNAI” – Visaginas, 2002 – С. 22 – 34.
5. Стандарт предприятия СТП 0.41.072-2008 “Обращение с отработанным ЯТ. Радиационные характеристики и остаточное энерговыделение отработавших тепловыделяющих сборок ВВЭР-1000”. Методика расчета. Министерство топлива и энергетики. Государственное предприятие “Национальная атомная энергогенерирующая компания “Энергоатом”.
6. Алёхина С. В. Решение сопряжённой задачи тепломассообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом / С. В. Алёхина, В. Н. Голощанов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // Проблемы машиностроения – Харьков, 2005, т. 8, № 4 – С. 12 – 20.
7. Алёхина С. В. Исследование теплового состояния вентилируемого контейнера с отработавшим ядерным топливом путем решения сопряженной задачи тепломассообмена / С. В. Алёхина, В. Н. Голощанов, А. О. Костиков, Ю. М. Мацевитый // VI Минский международный форум по тепло- и массообмену, 19-23 мая 2008 г.: тезисы докладов и сообщений – Минск, 2008 – Т. 1. – С. 185 – 186
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.
10. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
11. Gamma Radiation in a Dry Spent Fuel Storage, V.T.Lazurik, V.P.Moskvin, Yu.V.Rogov, V.G.Rudychev, Proceedings "International Conference on the Physics of Nuclear Science and Technology ", October 5-8, Long Island, New York,V.2, 1998, p.1005-1011.

THERMAL SAFETY DURING DRY STORAGE OF VVER-1000 SPENT NUCLEAR FUEL ASSEMBLIES

S.V. Alehina¹, V.N. Goloshapov¹, A.O. Kostikov¹, S.A. Pismenetskiy², V.G. Rudychev²¹*Institute of problems of mechanical build of the National Academy of Science of Ukraine*²*V.N. Karazin Kharkov National University*

The thermal conditions inside the ventilated cask filled with spent nuclear fuel were investigated by computer simulation method in the case of different activity of the fuel assemblies. The problem is considered within the framework of quasy-stationary three-dimension entailing approach including the convective and radiative heat exchange. The calculations were completed for the different alternative of cask loading with the spent fuel assemblies. The assemblies temperature variation during their storage has been determined. The thermal safety has been proved of the technology of dry storage of the spent nuclear fuel.

KEY WORDS: thermal safety, spent nuclear fuel, dry storage, dry depositary, ventilated cask.