

М. В. Франкова, Ю. Ю. Воробйов,
М. П. Вишемірський, О. І. Жабін

Державний науково-технічний центр
з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна

Розробка моделі контейнера довгострокового зберігання відпрацьованих тепловидільних збірок реактора ВВЕР-1000 для програмного засобу ANSYS CFX

Досліджуються теплогідрравлічні аспекти моделювання багатоцільового контейнера (БЦК-31) з відпрацьованим ядерним паливом реакторів типу ВВЕР-1000 для довгострокового зберігання БЦК-31 у контейнері HI-STORM виробництва компанії Holtec International. Наведено основні підходи та припущення, прийняті в процесі розробки розрахункової моделі БЦК-31 для програмного засобу ANSYS CFX, а також основні результати розрахунку одного з варіантів завантаження БЦК-31. Отримані результати використано в експертизі технічних специфікацій на БЦК-31 та відповідних тематичних звітів з обґрунтування безпеки.

Ключові слова: теплогідрравлічний аналіз, відпрацьоване ядерне паливо, розрахункові коди, ANSYS, CFX.

М. В. Франкова, Ю. Ю. Воробьев, М. П. Вышемирский, О. И. Жабин

Разработка модели контейнера долгосрочного хранения отработанных тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 для программного средства ANSYS CFX

Исследуются теплогидравлические аспекты моделирования многоцелевого контейнера (МЦК-31) с отработанным ядерным топливом реакторов типа ВВЭР-1000 для долгосрочного хранения МЦК-31 в контейнере HI-STORM производства компании Holtec International. Представлено описание основных подходов и предположений, принятых при разработке расчетной модели МЦК-31 для программного средства ANSYS CFX, а также основные результаты расчета одного из вариантов загрузки МЦК-31. Полученные результаты использованы при выполнении экспертизы технических спецификаций на МЦК-31 и соответствующих тематических отчетов по обоснованию безопасности.

Ключевые слова: теплогидравлический анализ, отработанное ядерное топливо, расчетные коды, ANSYS, CFX.

© М. В. Франкова, Ю. Ю. Воробйов, М. П. Вишемірський, О. І. Жабін,
2017

Протягом тривалого періоду ядерно-енергетичний комплекс (ЯЕК) забезпечує суттєву частку в загальному виробництві електроенергії в Україні (близько 50 %), що робить його функціонування важливою умовою стабільного розвитку економіки всієї країни.

Одним з компонентів технологічного циклу АЕС є поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП), питання переробки та зберігання якого залишається не вирішеним до кінця: проектна схема поводження з ВЯП передбачає тимчасове зберігання відпрацьованих тепловидільних збірок (ВТВЗ) у приреакторних басейнах витримки (БВ) з подальшим вивезенням ВТВЗ на переробку до Росії.

З урахуванням обмежених обсягів приреакторних БВ, а також ускладнень з вивезенням ВЯП на переробку до Росії, Україна, як і більшість країн, що розвивають атомну енергетику, прийняла для себе так зване «відкладене рішення», яке полягає в організації довгострокового зберігання ВЯП. Тому Енергетичною стратегією України на період до 2030 року передбачається створення й забезпечення безпечної експлуатації централізованого сховища «сухого» типу для ВЯП реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 діючих АЕС, а також ВЯП нових ядерних енергоблоків.

Проект централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива (ЦСВЯП) передбачає розміщення й довгострокове, не менше за 100 років, сухе зберігання (із застосуванням технологій компанії Holtec International) ВЯП в інертному середовищі з природним повітряним охолодженням [1] 12010 ВТВЗ реакторів ВВЕР-1000 і 4519 ВТВЗ реакторів ВВЕР-440.

Технологія зберігання ВЯП в ЦСВЯП охоплює [1]:

- 1) завантаження ВТВЗ у багатоцільові контейнери (БЦК), розраховані на зберігання 31 ВТВЗ ВВЕР-1000 (БЦК-31) або 85 ВТВЗ ВВЕР-440 (БЦК-85), у реакторних відділеннях енергоблоків АЕС;
- 2) транспортування БЦК з ВЯП до ЦСВЯП у спеціальному контейнері HI-STAR для транспортування;
- 3) розміщення БЦК з ВЯП у захисні вентильовані оболонки (контейнери) HI-STORM та їх зберігання на території ЦСВЯП.

Під час виконання державної експертизи проектної документації, пов'язаної зі зберіганням ВЯП у централізованому сховищі, виникає потреба в оцінці коректності проектних розрахункових обґрунтувань безпеки, що в свою чергу потребує розробки відповідних розрахункових моделей. Значимо, що в обґрунтуванні теплового стану контейнера HI-STORM компанії Holtec International було використано програмне забезпечення (ПЗ) ANSYS FLUENT. Перевірні розрахунки, виконані ДНТЦ ЯРБ, здійснено за допомогою ПЗ ANSYS CFX, щоб отримати всебічну оцінку результатів за допомогою іншого розрахункового продукту. Мета статті — навести короткий опис конструкції БЦК-31 та контейнера HI-STORM і відповідної розрахункової моделі для ПЗ ANSYS CFX, розробленої в ДНТЦ ЯРБ для проведення перевірних розрахунків, а також представити основні результати розрахунку теплового стану ВТВЗ у разі довгострокового зберігання останніх за технологією компанії Holtec International.

Геометрична модель та розрахункова сітка для БЦК-31. БЦК-31 складається з герметичного пенала та розміщеного в ньому паливного кошика. У паливному кошику розміщуються 31 ВТВЗ реактора типу ВВЕР-1000 з максимальним сумарним залишковим енерговиділенням 38 кВт. Основні елементи БЦК-31 наведені на рис. 1.

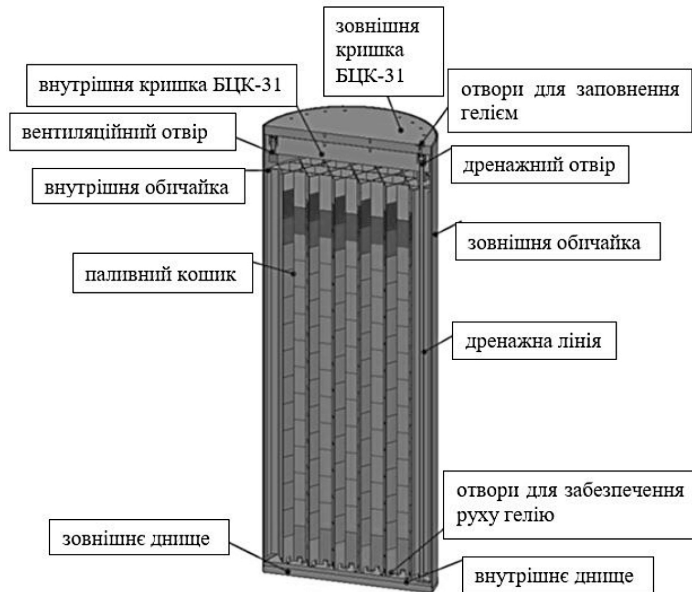


Рис. 1. Основні конструктивні елементи БЦК-31

Герметичний пенал контейнера забезпечує два незалежні локалізуючі бар'єри на шляху виходу радіоактивних продуктів поділу з БЦК до навколишнього середовища. Внутрішня обичайка, внутрішнє днище, внутрішня кришка та кришки отворів формують внутрішню локалізуючу оболонку. Зовнішня обичайка, зовнішнє днище, зовнішня кришка та кришки отворів формують зовнішню локалізуючу оболонку. Герметичний пенал БЦК має суцільнозварну конструкцію, виконану повністю з нержавіючої сталі.

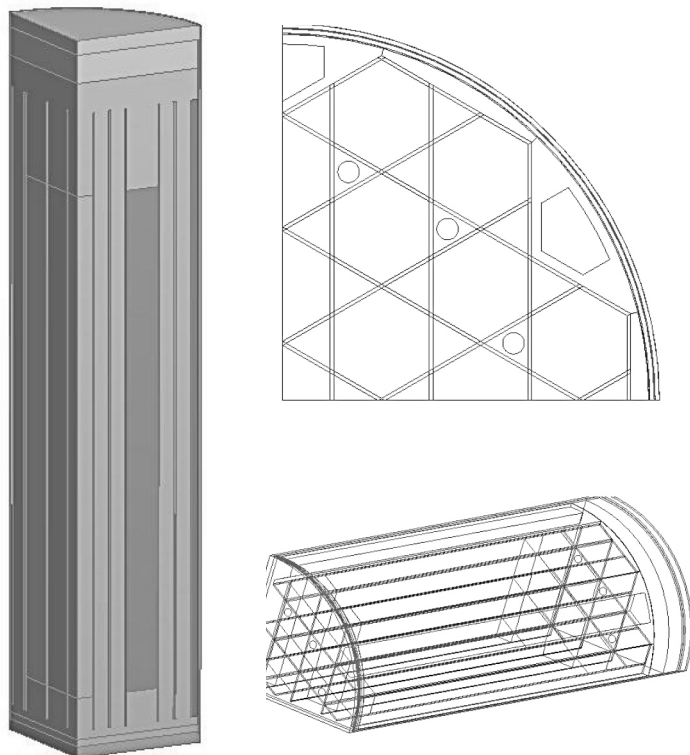


Рис. 2. Геометрична модель БЦК-31

Внутрішній простір БЦК-31 заповнено гелієм з тиском 689,5 кПа.

Геометричну модель БЦК-31 (рис. 2) побудовано за допомогою модулю ANSYS DesignModeler на основі креслень [2, 3].

Для розробки геометричної моделі реальну конструкцію контейнера було спрощено, наприклад не моделювалися отвори для заповнення гелієм, дренажний отвір і дренажна лінія, вентиляційний отвір, болтові з'єднання.

Геометрична модель БЦК-31 складається з внутрішньої обичайки, кришки та днища; зовнішньої обичайки, кришки та днища; паливного кошика; ВТВЗ; алюмінієвих прокладок; гелію.

Після створення геометричної моделі згенеровано розрахункову сітку за допомогою ПЗ ANSYS Meshing. Оскільки створення розрахункової сітки є одним з основних етапів у розробці моделі, від якого залежить достовірність і точність отриманих результатів, розрахункову сітку перевірено на якість відповідно до рекомендацій [4].

Контейнер довгострокового зберігання HI-STORM. Контейнер зберігання HI-STORM 190UA виконаний зі сталі та бетону; у його верхній і нижній частині є вен-

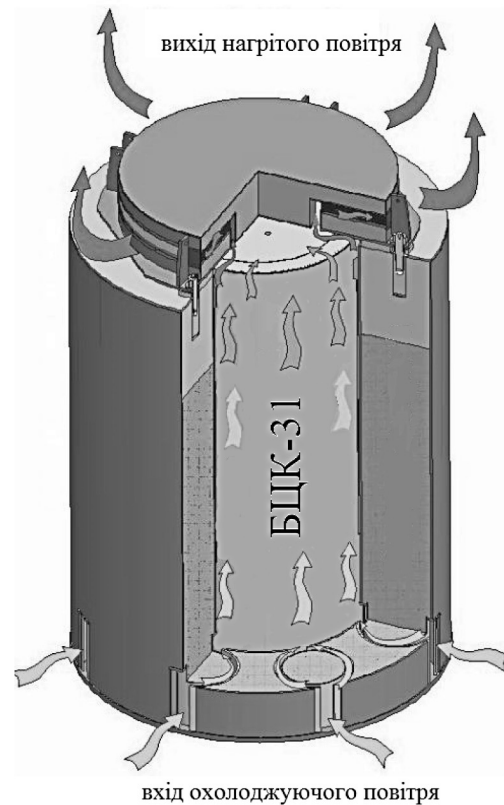


Рис. 3. Загальний вигляд контейнера HI-STORM

тиляційні отвори для забезпечення циркуляції повітря та пасивного охолодження БЦК (рис. 3).

Моделювання процесів теплообміну. Відведення залишкових тепловиділень ВТВЗ забезпечується: конвективним теплообміном від ВТВЗ до герметичного пенала БЦК і далі конвективною тепловіддачею від герметичного пенала до вентиляційного повітря; теплопровідністю; випромінюванням.

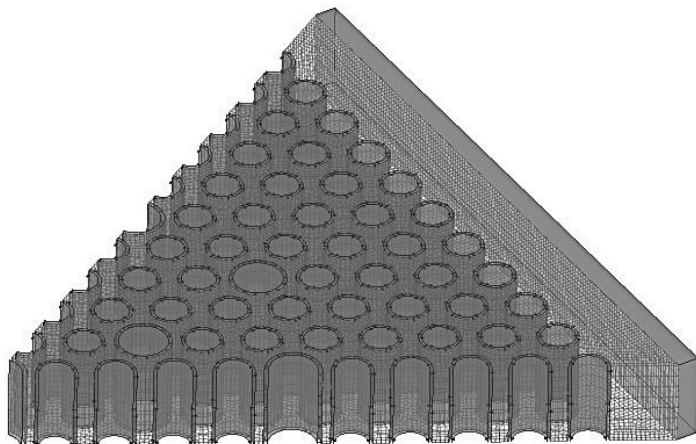


Рис. 4. Модель 1/6 частини ТВЗ-А

Для моделювання трубних пучків у програмних засобах розрахункової гідродинаміки (Computation Fluid Dynamics — CFD) прийнято використовувати пористі структури. Такий самий підхід застосовано і до моделювання ВТВЗ: кожна з ВТВЗ представлена пористою шестигранною структурою.

Оскільки тепловидільні елементи не моделюються окремо, а є частиною пористої структури, коефіцієнти теплопередачі для зони палива не можна безпосередньо застосовувати в розрахунках. Отже, для пористої структури визначено ефективні коефіцієнти теплопровідності, для чого розроблено модель 1/6 частини решітки ТВЗ-А для ПЗ ANSYS CFX. У моделі закладено теплофізичні властивості матеріалів, які відповідають паливу ТВЗ-А [5], а також властивості гелію [6]. Коефіцієнт випромінювальної спроможності оболонок твєлів консервативно прийнято рівним 0,7. В якості обмежувачої конструкції змодельовано бокову стінку, відносно якої й визначатиметься теплопровідність; тому в подальшому процесі моделювання вважається, що ефективна модель ТВЗ («пористе тіло») займає весь обсяг шестигранної труби-чарунки (конструкції). Висота моделі (рис. 4) становить 0,02 м, умови по висоті та на межах симетрії розрахункових доменів є симетричними.

З метою визначення теплопровідності для інтервалу температур задано постійну температуру на поверхні шестигранної труби і невелике об'ємне енерговиділення в зоні палива. Далі визначено стаціонарний розподіл температури по перетину ТВЗ: від центра ТВЗ до грані шестигранної труби та від центра ТВЗ до ребра труби. Потім підібрано значення теплопровідності, яке задовольняє даним розподілів температури в припущенні тепловідведення від суцільного циліндра з постійним джерелом енерговиділення. За такого підходу температура всередині циліндра, °С,

$$T(r) = T(0) - \frac{q_v \cdot r^2}{4\lambda},$$

де r — радіус циліндра; q_v — об'ємна густина енерговиділення, Вт/м³; λ — теплопровідність, Вт/(м·°С).

За результатами аналізу отримано залежність коефіцієнта теплопровідності решітки ТВЗ-А в шестигранній трубі від температури в радіальному напрямку:

Температура, °С	42,25	117,25	212,91	318,54	414,55	511,05	618,02
Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·°С)	0,43	0,545	0,707	0,975	1,21	1,53	1,93

Дані з теплопровідності для ТВЗ-А в попередньому звіті з аналізу безпеки (ПЗАБ) ЦСВЯП майже збігаються з даними ССВЯП ЗАЕС [5] (рис. 5). Отримані розбіжності в основному зумовлені використанням у ПЗАБ дещо більшого значення випромінювальної спроможності оболонки твєла ТВЗ-А (0,75 замість 0,7), а також відмінностями в методиці визначення консервативного значення теплопровідності.

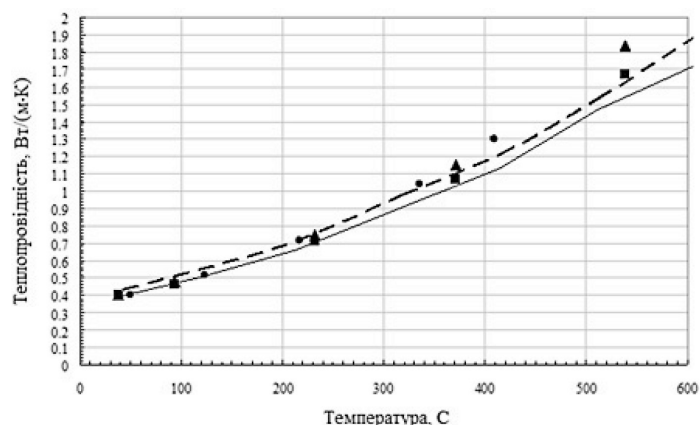


Рис. 5. Залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності від температури:

- — дані, отримані для ТВЗ-А, в обґрунтуванні ССВЯП;
- — дані, отримані для ТВЗ-WR, у розрахунках, виконаних Holtec;
- ▲ — дані, отримані для ТВЗ-А, в розрахунках, виконаних Holtec;
- — дані, отримані ДНТЦ ЯРБ для ТВЗ-А за допомогою методу найкращої оцінки;
- — консервативні дані, отримані ДНТЦ ЯРБ для ТВЗ-А

Для вибору консервативного варіанта завантаження БЦК-31 виконано варіантні розрахунки, за результатами яких обрано представницький варіант для теплового аналізу довгострокового зберігання ВТВЗ.

У розрахунках з використанням ANSYS CFX контейнер довготривалого зберігання (HI-STORM) не моделювався. Замість цього параметри на зовнішній поверхні БЦК-31 задавалися за допомогою граничних умов — коефіцієнта теплопередачі та температури, отриманих з використанням розрахункового коду RELAP, для якого було створено окрему розрахункову модель контейнера HI-STORM. У розрахунку кодом RELAP задавалися температура повітря 38 °С, атмосферний тиск, а також враховувалась наявність інсоляції (з максимальним тепловим потоком) на поверхні контейнера HI-STORM.

Результати розрахунків. Розрахунковий аналіз виконано для чотирьох варіантів розподілу енерговиділення ВТВЗ:

Варіант розподілу енерговиділення	Максимальна температура ВТВЗ, °С
1. Радіальне та аксіальне профілювання	326,5
2. Тільки радіальне профілювання	310,8
3. Тільки аксіальне профілювання	322,8
4. Без аксіального та радіального профілювання, рівномірне енерговиділення	305,9

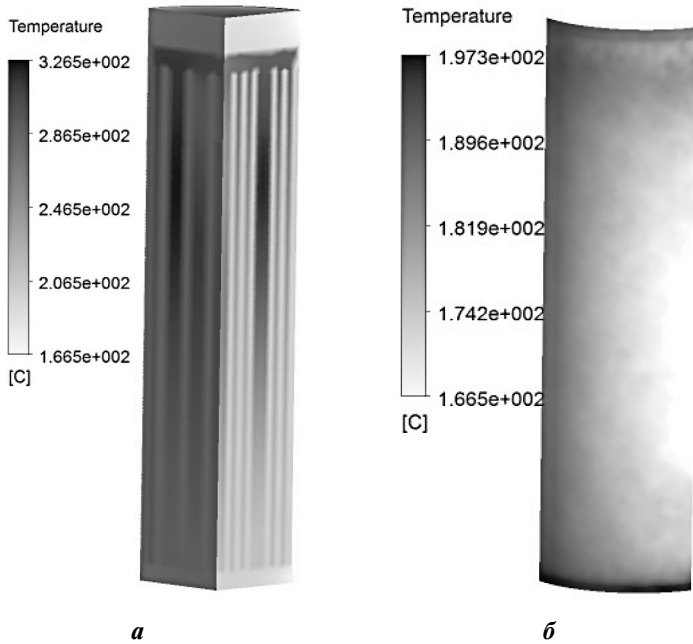


Рис. 6. Варіант 1. Розподіл температури в БЦК-31:
а — на межі симетрії; б — на поверхні БГК-31

Загальна потужність БЦК-31 в усіх випадках дорівнює 38 кВт. Розподіл температур для найбільш консервативного варіанта завантаження БЦК-31 наведено на рис. 6.

Висновки

Результати перевірних розрахунків, виконаних за допомогою ПЗ ANSYS CFX, в цілому узгоджуються з результатами розрахунків за допомогою ПЗ ANSYS FLUENT, представленими в матеріалах обґрунтування безпеки зберігання ВТВЗ в ЦСВЯП [7, том Б], та підтверджують виконання критерію прийнятності: не перевищення допустимої температура оболонки твєлів у ВТВЗ за нормального режиму довгострокового сухого зберігання в гелієвому середовищі 350 °С.

Список використаної літератури

1. Предварительный отчет по анализу безопасности ЦХОЯТ. Гл. 1 : Общие сведения : ГС-07/15-10-02. Ред. 1. К. : Гос. науч.-инж. центр систем контроля и аварийного реагирования, 2016.
2. Holtec International. Многоцелевой контейнер МЦК-31. Чертеж. Формат D. Номер проекта 1449. Номер чертежа 5435. 22 листа. Ред. 7.

3. Holtec International. Топливная корзина МЦК-1. Чертеж. Формат D. Номер проекта 1449. Номер чертежа 5436. 19 листов. Ред. 6.
4. ANSYS Meshing User's Guide, Release 15.0, ANSYS, 484 p.
5. Дополнение к отчету по анализу безопасности СХОЯТ ЗАЭС. Хранение ТВСА в СХОЯТ ОП ЗАЭС, 2010.
6. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1972. 720 с.
7. Отчёт о результатах теплового анализа для HI-STAR 190ML, HI-STORM 190 и HI-TRAC 190. Проект Holtec International: 1449. Отчет Holtec No: HI-2083902.

References

1. Preliminary Safety Analysis Report on Centralized SFSF. Chapter 1. General Information. Revision 1 [Predvaritelnyi otchiot po analizu bezopasnosti TsHOIaT. Glava 1. Obshchie svedeniia. Redaktsiia 1. GS-07/15-10-02], 2016. (Rus)
2. Holtec International. Multipurpose Container MPC-31. Drawing. Sheet Format D. Project Number 1449. Drawing Number 5435. 22 Lists. Revision 7. [Holtec International. Mnogotselovoi konteiner MTSK-31. Chertiozh. Format D. Nomer proekta 1449. Nomer chertezha 5435. 22 lista. Redaktsiia 7]. (Rus)
3. Holtec International. MPC-31 Fuel Cask. Drawing. Sheet Format D. Project Number 1449. Drawing Number 5436. 19 Lists. Revision 6. [Holtec International. Toplivnaia korzina MTSK-1. Chertiozh. Format D. Nomer proekta 1449. Nomer chertezha 5436. 19 listov. Redaktsiia 6]. (Rus)
4. ANSYS Meshing User's Guide, Release 15.0, ANSYS, 484 p.
5. Amendments to Safety Analysis Report for ZNPP spent Nuclear Fuel Dry Storage Facility. TVSA Storage in ZNPP Spent Nuclear Fuel Dry Storage Facility [Dopolneniia k OAB SKhOIaT ZAES. Khraneniie TVSA v SKhOIaT OP ZAES], 2010. (Rus)
6. Varhaftyk, N.B. (1972), "Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids" [Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhydkostei], 2-nd Edition, Moscow, Nauka, 720 p. (Rus)
7. Report on the Results of the Thermal Analysis for the HI-STAR 190ML, HI-STORM 190 and HI-TRAC 190. Design of Holtec International: 1449, Report Holtec No: HI-2083902 [Otchiot o rezultatakh teplovogo analiza dlia HI-STAR 190ML, HI-STORM190 I HI-TRAC 190, Proekt Holtec International: 1449, Otchiot Holtec No: HI-2083902]. (Rus)

Отримано 16.03.2017.