МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр

«Чисельне визначення теплового стану контейнерів сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива в аварійних умовах експлуатації»

Виконав: студент 4 курсу, групи НФ-42
Спеціальність:
«Прикладна фізика та наноматеріали»
Освітня программа: Прикладна фізика енергетичних систем
Луньов Дмитро Ігорович
Керівник: д.т.н., проф. Мацевитий Ю.М.

Рецензент:

Харків — 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

ННІ Комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра теплофізики, молекулярної фізики та енергоефективності
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105 — прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____Юрій МАЦЕВИТИЙ
підпис ініціали, прізвище

"____" _____2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Луньова Дмитра Ігоровича
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Чисельне визначення теплового стану контейнерів сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива в аварійних умовах експлуатації».

керівник роботи Юрій Михайлович Мацевитий, д.т.н., професор .
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "___"_____2021 року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити

1) Провести огляд сучасних методів аналізу аварійних ситуацій в контейнерах з ВЯП;
2) Провести числові дослідження теплового стану контейнерів з ВЯП в умовах аварій, пов'язаних з їх падінням;
3) Розробити рекомендації щодо першочерговості усунення наслідків зазначених аварій.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1.	Огляд літератури
2.	Постановка задачі дослідження
3.	Аналіз і вибір методів розв’язання задачі
4.	Підготовка числових досліджень
5.	Проведення розрахунків
6.	Обробка результатів
7.	Підготовка пояснювальної записки

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ Дмитро ЛУНЬОВ

Керівник роботи _____ Юрій МАЦЕВИТИЙ

Перелік скорочень та абревіатур

ВЯП — відпрацьоване ядерне паливо

ССВЯП — сухе сховище відпрацьованого ядерного палива

ВВЕР — водо-водяний енергетичний реактор

ВПЗ — відпрацьована паливна збірка

БГК — багатомісний герметичний кошик

ВБК — вентильований бетонний контейнер

ТВЗ — тепловиділяюча збірка

ВТВЗ — відпрацьована тепловиділяюча збірка

РЕФЕРАТ

Робота на тему «Чисельне визначення теплового стану контейнерів сухого зберігання відпрацьованого ядерного палива в аварійних умовах експлуатації» виконана студентом четвертого курсу Луньовим Дмитром Ігоровичем.

Виконана робота за обсягом займає 44 сторінки, з них 31 сторінка основна частина, яка має 3 розділа, 4 таблиці, 21 люстрацію та 16 використаних джерел.

Ця робота присвячена дослідженню теплового стану контейнера для зберігання відпрацьованого ядерного палива в аварійніх умовах, зв'язаних з падінням контейнера на майданчик зберігання.

Дослідження та розрахунки в цій роботі показують і пояснюють, як впливає аварійний стан на температурне поле і позначає небезпеку різних варіантів, які можу мати місце.

Ключові слова: відпрацьоване ядерне паливо, теплове моделювання, проблеми теплопередачі, сухе зберігання, ВТВЗ ВВЕР-1000, аварійний стан.

ABSTRACT

The work on the topic "Numerical determination of the thermal state of spent nuclear fuel storage containers in emergency operating conditions" was done by fourth-year student Lunov Dmytro Igorovich.

The completed work is 44 pages, of which the main part is 32 pages, in which 3 sections, 4 tables, 21 illustrations and x sources are used.

This work is devoted to the study of the thermal state of the container for storing spent nuclear fuel in emergency conditions associated with the fall of the container on the storage site.

The studies and calculations in this article show and explain how an emergency affects the temperature field and indicate the danger of different options that may occur.

Key words: spent nuclear fuel, thermal modeling, heat transfer problems, dry storage, WWER-1000, emergency condition.

ЗМІСТ

ВСТУП.....7
РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....11
1.1. Загальні відомості про об’єкт дослідження.....11
1.2. Варіанти аварій, що розглядаються.....21
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ КОНТЕНЕРІВ З ВЯП.....23
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛОВОГО СТАНУ.....34
ВИСНОВКИ.....43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....44

ВСТУП

Будь який атомний реактор в процесі своєї роботи генерує відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП). Зазвичай легководний реактор на 1 ГВт виробляє від 20000 до 30000 кілограм ВЯП в рік [1]. Тому в сфері ядерної енергетики проблема відпрацьованого палива є важливою та існує безліч робіт, в яких обговорюються потенційні ризики і можливі рішення.

Після вилучення збірок з реактора вони все ще термічно гарячі, достатньо радіоактивні та потенційно небезпечні. Тому збірки ВЯП переміщують в басейни, які розташовані при всіх реакторах. Збірки охолоджуються в даних басейнах протягом 3-4 років. Після достатнього охолодження вибирається один з варіантів подальшого життєвого циклу відпрацьованого палива: тривале зберігання (поховання) або переробка.

Переробка відпрацьованого палива здійснюється в країнах із замкнутим ядерним циклом (Франція, Росія, Велика Британія). Країни з відкритим циклом як рішення вибирають тривале зберігання. Також вибір стратегії ґрунтується на політиці проведеної в області ядерної енергетики.

Тривале зберігання відпрацьованого ядерного палива більш поширено і можливо двома способами: мокре і сухе. Мокре сховище – це басейни, в які поміщається ВЯП і за рахунок прокачування води знімається залишкове тепловиділення збірок. Через необхідність примусової циркуляції води є ймовірність виникнення аварійних ситуацій. При припиненні циркуляції вода починає перегріватися і через кілька діб температура досягає значень, при яких інтенсивність випаровування стає неприпустимою. Така ситуація виникла на АЕС "Фукусіма-1" (Японія) у 2011 році [2].

Більш універсально і ефективно проявив себе метод сухого зберігання ВЯП. Він менш витратний ніж мокре зберігання, не вимагає великої кількості контролю після завантаження і транспортування, більш безпечний в порівнянні

з мокрим зберіганням, а також має менші репутаційні витрати, на відміну від поховання. Ключовою перевагою є те, що система є пасивною, тому після установки бетонних контейнерів вона не вимагає значного технічного обслуговування. І на даний момент це найпоширеніший спосіб вирішення проблеми ВЯП (США, Росія, Швеція, Німеччина та інші). Зазвичай під сухим зберіганням мається на увазі зберігання ВЯП в бетонних вентильованих контейнерах з герметичним металевим кошиком всередині. Охолодження в ньому відбувається за рахунок природної конвекції повітря.

З 2001 року в Україні на Запорізькій АЕС експлуатується сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП), призначеного для зберігання відпрацьованих збірок ВВЕР-1000. Також в розробці знаходяться проекти по зведенню ССВЯП-2 на Чорнобильській АЕС для зберігання збірок РБМК-1000 і централізоване сховище - для інших діючих реакторів атомних станцій України.

У минулому були проведені розрахунки теплового стану як вітчизняними, так і іноземними дослідниками для контейнерів сухого зберігання різних типів при нормальних умовах. Але існує не так багато робіт, що розглядають контейнер при аварійних умовах. Згідно з вимогою Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ), в якості аварійних умов розглядаються пожежа, дуже низька температура і повна або часткове блокування вентиляційний каналів.

На Запорізькій АЕС використовується система вентильованих контейнерів зберігання палива реакторів ВВЕР (ВКЗ-ВВЕР) для сухого зберігання ВЯП, що складається з чотирьох основних компонентів: вентильований бетонний контейнер, багатомісний герметичний кошик, перевантажувальний контейнер, допоміжні площі, системи та обладнання.

У кожному кошику зберігається по 24 відпрацьовані паливні збірки (ВПЗ) потужність, котрих 1 кВт. Вони поміщаються в шестигранні вертикальні напрямні труби. Кошик заповнен гелієм, що забезпечує суху, інертну,

теплопередающу середу на протязі всього періоду зберігання. Герметичний кошик в свою чергу поміщається в бетонний контейнер таким чином, щоб між кошиком і внутрішньою стінкою контейнера був кільцевої вентиляційний канал, в якому і відбувається передача тепла між стінкою кошика і вентильованим повітрям. Всередину бетонного контейнера повітря потрапляє через нижні вентиляційний канали, за рахунок нагріву піднімається та виходить через верхні канали.

Одним з основних критеріїв безпеки при експлуатації ССВЯП є контроль теплового стану вентильованого контейнера зберігання (ВКЗ), а тобто температури оболонок твелів для ВТВЗ. У літературі досить широко висвітлені питання дослідження теплового стану вентильованих контейнерів зберігання ВЯП [3, 4], однак мало уваги приділено дослідженню теплових процесів, що відбуваються в вентильованих контейнерах.

Аналіз теплового стану контейнерів сухого зберігання ВЯП при аварійних умовах, пов'язаних з виникненням часткового або повного блокуванням вентиляційних каналів, проводився і раніше, але він проводився для контейнерів, призначених для зберігання інших видів паливних збірок [5].

Аналіз можливих аварійних ситуацій дуже важливий для ліцензування обладнання для ССВЯП [6].

Недоліком під час теплового аналізу аварійних ситуацій можна вважати суттєве обмеження переліку можливих ситуацій. Так, наприклад, не розглядаються варіанти часткового перекриття каналів, а лише ситуації з повним та 50 %-м перекриттям [7, 8]. Отже, у такому випадку додатковий тепловий аналіз аварійних ситуацій є необхідним для оцінки безпеки експлуатації сховищ ВЯП.

Як показав огляд літератури, таким проектним аваріям, як перекидання контейнера, зсув кошика зберігання тощо, увага приділяється лише під час аналізу цілісності обладнання зберігання [9, 10]. Зазвичай результати

досліджень показують надійність обладнання і відсутність механічних пошкоджень ВЯП, що зберігається, проте питання, наскільки зміняться теплові режими зберігання внаслідок аварії, залишається відкритим. Обмежений перелік аварійних ситуацій розглянуто і для єдиного в Україні сухого сховища ВЯП на Запорізькій АЕС, звіт про аналіз безпеки якого не містить даних щодо рівня можливих температур ВЯП за умов деяких проектних аварій [11].

Аналіз сучасних досліджень показав, що аварійні ситуації під час зберігання ВЯП сухим способом розглядаються лише частково, не узагальнюються процеси, що відбуваються під час аварії, та, як наслідок, не висуваються рекомендації щодо поліпшення конструктивних характеристик основного обладнання зберігання. Проведення додаткових досліджень та узагальнення результатів у цій сфері є необхідною складовою створення науково-методологічних основ безпеки експлуатації сухих сховищ ВЯП.

РОЗДІЛ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

1.1. Загальні відомості про об’єкт дослідження

На 2021 рік в Україні експлуатується одне сухе сховище відпрацьованого ядерного палива (ССВЯП-1). Розташовується воно на території Запорізької Атомної Електростанції (ЗАЕС). Даний ССВЯП вміщує 380 контейнерів в кожному з котрих по 24 ВТВЗ ВВЕР-1000, що в загальному більше ніж 9000 штук. В середньому на майданчик зберігання вивозять по 14 контейнерів за рік.

Загалом система складається з двох основних частин: багатомісний герметичний кошик (БГК) та вентильований бетонний контейнер (ВБК).

Тривале зберігання відпрацьованого палива ВВЕР-1000 на майданчику ССВЯП здійснюється в бетонних контейнерах охолодження, в яких відбувається пасивно, тобто після введення в експлуатацію система не вимагає значного технічного обслуговування. Кожен контейнер містить герметичний кошик зберігання в якому і знаходяться відпрацьовані збірки (рис. 1.1).

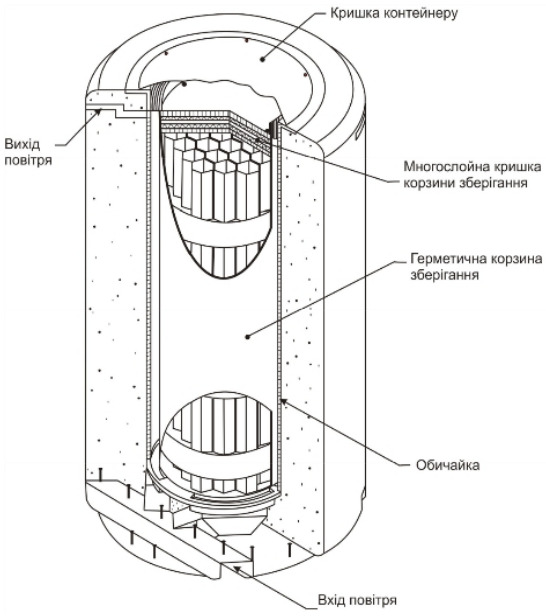


Рис. 1.1. Вентильований контейнер, що містить відпрацьовані паливні збірки

Ядерне паливо реактора ВВЕР-1000 компонується в тепловиділяючі збірки (ТВЗ), що складаються з 5 частин: головка, тепловиділяючий елемент, дистанціююча решітка, нижня решітка і хвостовик (рис. 1.2). Для запобігання контакту між теплоносієм і паливним сердечником її укладають в герметичну оболонку, це захищає від корозійного впливу на теплоносій та від виходу продуктів поділу. Відведення теплоти від палива здійснюється через оболонку і теплоносій.

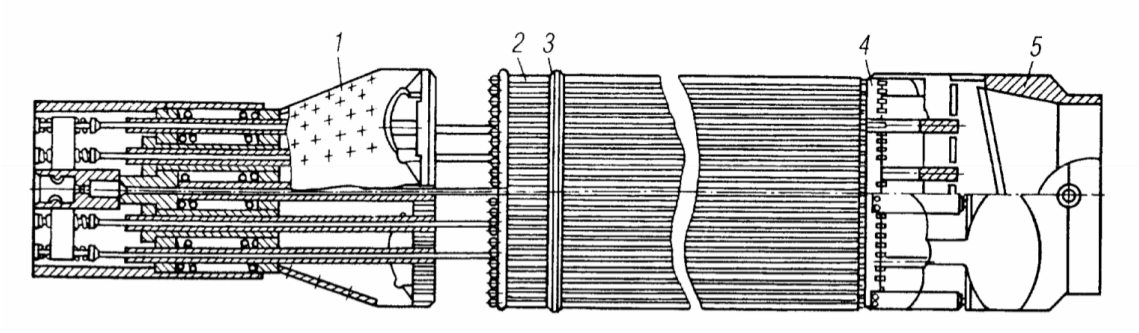


Рис. 1.2. Схема компонування тепловиділяючої збірки ВВЕР-1000: 1 - головка, 2 - тепловиділяючий елемент, 3 - дистанціююча решітка, 4 - нижня решітка, 5 — хвостовик

Герметичний кошик зберігання розрахований на 24 відпрацьовані збірки (рис. 1.3), які до завантаження витримуються в прireакторних басейнах витримки енергоблоків протягом 5-6 років. Після завантаження відпрацьованих ТВЗ в направляючі труби, кошик наповнюється інертним газом (найчастіше гелієм), який забезпечує відведення залишкового тепла атомного ділення.

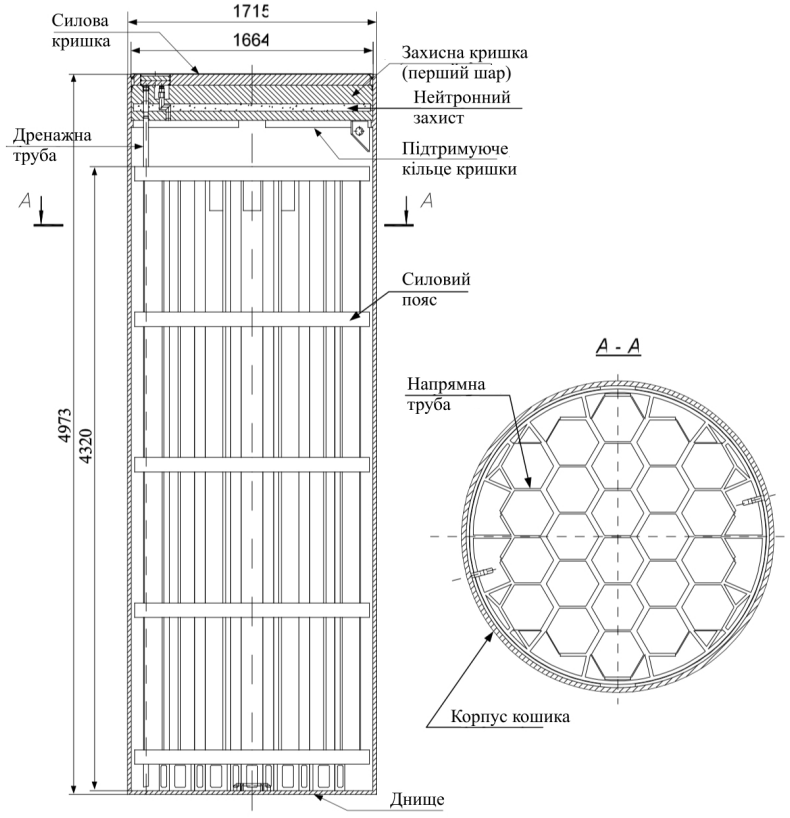


Рис. 1.3. Кошик зберігання

Кошик в свою чергу поміщається в бетонний контейнер у вертикальному положенні. Кошик складається з зовнішньої обичайки, днища, захисної та силової кришок, і блоку направляючий труб. Корпус кошика виготовляється зі сталі. Основні параметри представлені в таблиці 1.

Таблиця 1.1

Основні конструкційні параметри кошика зберігання

Компонент	**Параметр**	**Значення**
Блок шестигранних труб	Наружный диаметр силового пояса Внутренний диаметр силового пояса Высота блока Толщина силового пояса	1625,6 мм 1587,5 мм 4320 мм 19 мм

Продовження таблиці 1.1

Компонент	Параметр	Значення
Шестигранна напрямна труба	Зовнішня відстань між гранями Внутрішня відстань між гранями Повна довжина Довжина зони палива Довжина зони хвостовиків ТВЗ Довжина зони головок ТВЗ Кількість труб Матеріал	259,1 мм 249,6 мм 4320 мм 3530 мм 270 мм 425 мм 24 Вуглецева сталь, 10ХСНД
Обечайка кошика зберігання	Зовнішній діаметр Внутрішній діаметр Товщина Висота Матеріал	1715 мм 1664 мм 25,4 мм 4973 мм Вуглецева сталь, 10ХСНД
Силова кришка	Діаметр Товщина Матеріал	1651,0 мм 76,2 мм Сталь, ASME SA516, 10ХСНД
Захисна кришка	Діаметр Товщина кришки: - перший шар - другий шар Товщина нейтронного захисту Матеріал нейтронного захисту Матеріал шарів кришки	1657,4 мм 241,3 мм 127,0 мм 63,5 мм 50,8 мм RX-277 Сталь, ASME SA516, 10ХСНД

Направляючі труби виготовляються спеціальним чином у вигляді шестигранних труб з товщиною стінки 5 мм, 24 труби збираються в блок (стелаж). З’єднання труб в блок забезпечується за рахунок п’яти внутрішніх поясів, що забезпечують силову підтримку стелажа. Розташовуються пояси по

висоті труб. Між рядами шестигранних труб знаходяться прокладки товщиною 19 мм, необхідні для контролю реактивності ядерного палива.

БГК поміщається у вентильований бетонний контейнер (рис. 1.4), який є конструктивною опорою і бере участь в процесі охолодження кошика шляхом природної повітряної конвекції. А також захищає від радіаційного випромінювання палива і механічного впливу навколишнього середовища.

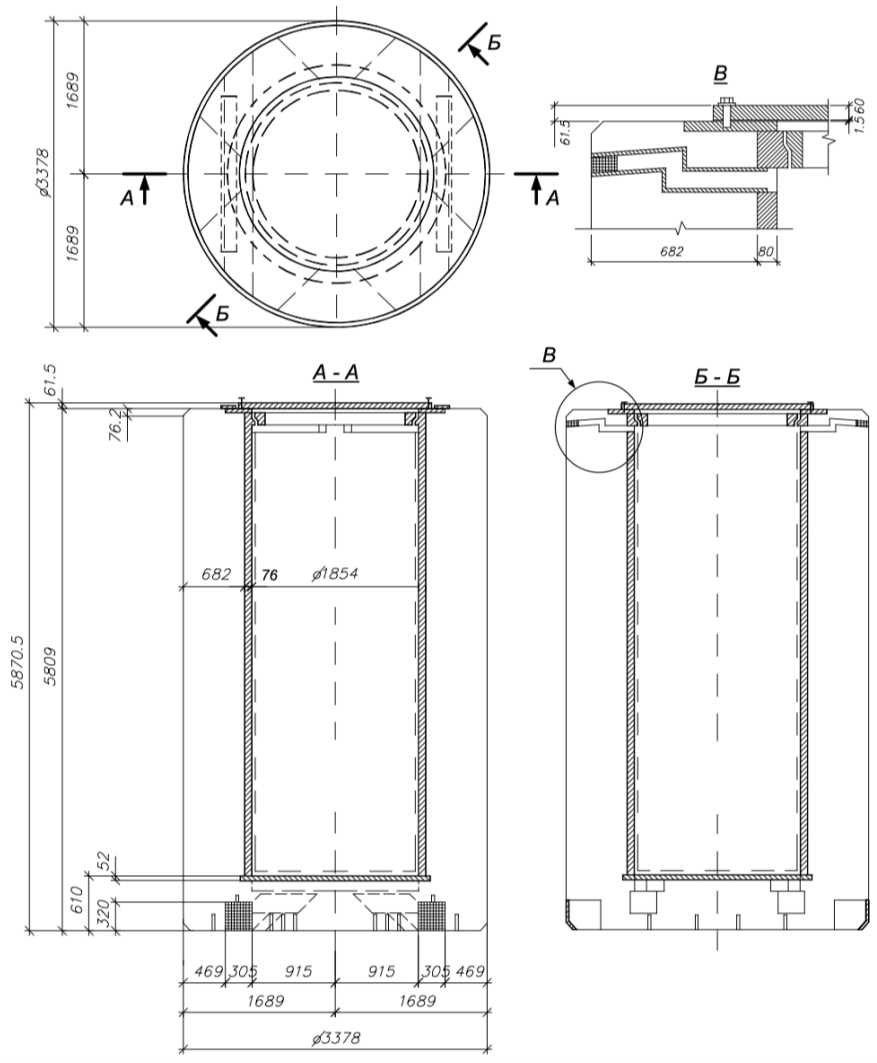


Рис. 1.4. Вентильований бетонний контейнер зберігання ВТВЗ

Тракт повітряного потоку утворюється каналами для входу повітря, повітрозабірниками, циліндричним зазором між оболонкою кошика і внутрішнім облицюванням бетонного контейнера, та каналами для виходу повітря. Вхідні і вихідні канали облицьовані сталлю і мають лабіринт подібну конструкцію, що забезпечує мінімізацію випромінювання, яке проходить через порожнини повітроводу.

Нижні секції використовуються при транспортуванні, вони формують канали для підйомних балок, а також використовуються для входу повітря в нижні вентиляційні канали.

Верхня кришка контейнера зберігання забезпечує захист від випромінювання в вертикальному напрямку, а також захист від впливу навколишнього середовища і ударів тіл, піднятих у повітря. Днище бетонного контейнера складається з сталевого листа товщиною 9 мм, це забезпечує додатковий захист бетону при падінні кошика і ударі об днище. Також контейнер має посилені армуванням закруглені краї у верху і днища для мінімізації пошкодження бетону при падінні.

Основні параметри вентильованого бетонного контейнера представлені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Основні конструкційні параметри ВБК [12]

Компонент	**Параметр**	**Значення**
Бетонна оболонка	Зовнішній діаметр Внутрішній діаметр Товщина	3378 мм
	Висота Матеріал	2007 мм 686 мм 5809 мм Бетон з портландцементу

Продовження таблиці 1.2

Компонент	Параметр	Значення
Облицювання	Зовнішній діаметр Внутрішній діаметр Висота Товщина Матеріал	2007 м 1854 мм 5200 мм 76 мм Сталь 20 (вуглецева сталь A36)
Кришка	Діаметр Товщина	2184,4 мм 57 мм
Вентиляційні канали	Вентиляційні канали з похилими поверхнями і, щонайменше, з двома різкими вигинами в різних площинах	

При тривалому зберіганні відпрацьованого ядерного палива найбільш небезпечним з теплової точки зору є період початку зберігання. У цей момент ТВЗ мають найбільшу потужність залишкового тепловиділення, для кожного контейнера вона дорівнює 24 кВт, це потужність при завантаженні палива до контейнера. З часом потужність тепловиділення зменшується (рис. 1.5).

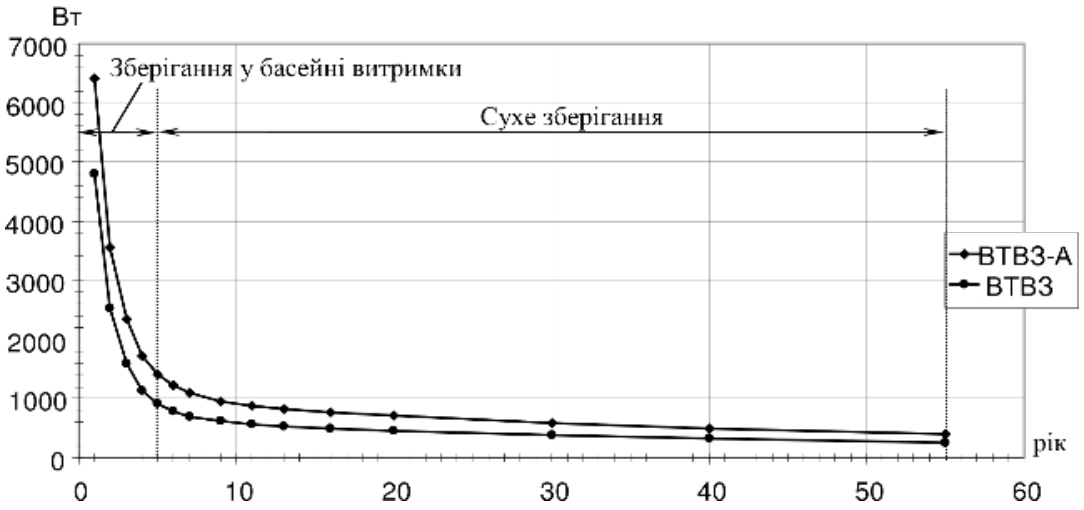


Рис. 1.5. Графік залежності потужності залишкового тепловиділення від часу

Модель системи ССВЯП, яка буде розглядатися, спрощена з метою зниження небхідних ресурсів для її розрахунку. Геометрія каналлів залишилася незмінною, але кошик зберігання розглядається як цілісне циліндричне тіло розділене на секції, що враховують різні частини кошика. Для одержаних секцій задаються еквівалентні теплофізичні параметри. Секції: 1 — кришка кошика, 2 — секція, що враховує гелій, який знаходиться в кошику, 3 — оголовок, 4 — зона тепловиділення збірки, 5 — хвостовик. Теплофізичні параметри представлені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Тепло фізичні параметри секцій

№ секції	**Щільність, кг/м^3**	**Питома теплоємність, Дж/(кг·К)**	**Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)**
1	7850	461	3.0587
2	5000	500	3.9
3	5000	500	3.9
4	5000	500	3.9
5	5000	500	3.9

Вентиляційний контейнер виготовлений з бетону щільністю 2260 кг/м^3, питомою теплоємністю 876 Дж/(кг·К) та коефіцієнтом теплопровідності 1.24 Вт/(м·К). Обейчайка, що знаходиться між бетонним контейнером і кошиком зберігання, виготовлена зі сталі щільністю 7850 кг/м^3, питомою теплоємністю 461 Дж/(кг·К) та коефіцієнтом теплопровідності 45 Вт/(м·К).

Дослідження теплового стану контейнера в аварійних умови відбувається при середній денній температурі влітку, рівній 24 °С, і при швидкості вітру 0

м/с (тобто у штильових умовах), що є рекомендацією МАГАТЕ при аналізі безпеки контейнерів зберігання.

1.2. Варіанти аварій, що розглядаються

У роботі розглядаються різні варіанти аварії, при якій відбувається падіння бетонного контейнера на майданчик зберігання зі зміщенням кошика зберігання у внутрішній порожнині контенера. Варіанти різняться лінією торкання бокової поверхні контенера з майданчиком. Лінія будується через одну з точок дотику і бічну поверхню. Були розглянуті чотири варіанти:

Варіант А. Дотик контенера в точці середини верхнього вентиляційного каналу. В даном випадку два верхніх вентиляційні канали розташовані вертикально, інші два горизонтально, нижні секції знаходяться під кутом 45°. Вентиляційний канал, з яким відбувається дотик, частково перекритий. При зміщенні кошика відбувається перекриття одного з впусних каналів всередині та мале перекриття двох сусідніх каналів (рис. 1.6).

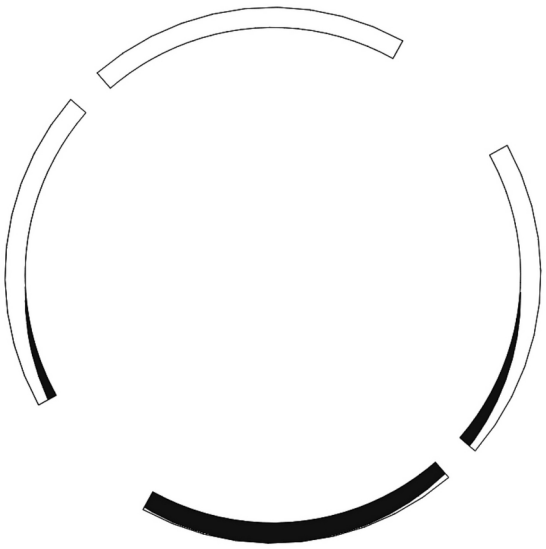


Рис. 1.6. Перекриття каналів (варіант А)

Варіат Б. Дотик контенера в точці середині відрізка між верхніми вентиляційним каналами. Верхні канали розташовані під кутом 45°, нижні секції в даному варіанті розташовані вертикально. Впускні і випускні канали не перекриті. Велика частина двох внутрішніх впускних каналів перекрита кошиком (рис. 1.7).

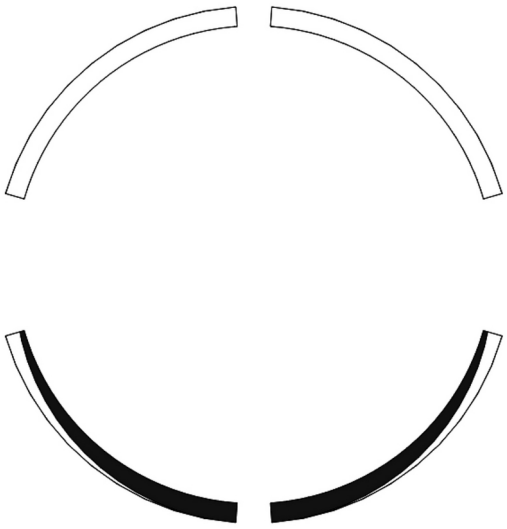


Рис. 1.7. Перекриття каналів (варіант Б)

Варіант В. Дотик відбувається так само як і у варіанті Б, відрізняється лише тим, що нижні секції розташовані горизонтально. Розташування каналів подібно. Площа перекриття двох впускних каналів менше ніж у варіанті Б (рис. 1.8).

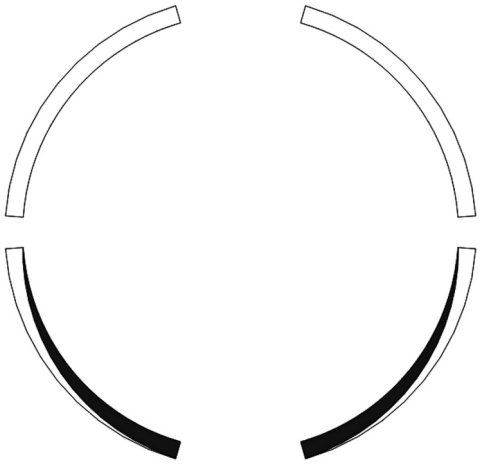


Рис. 1.8. Перекриття каналів (варіант В)

Варіант Г. Дотик відбувається в точці середині нижнього впускного каналу. Нижні секції розташовані під кутом. При зміщенні спостерігається повне перекриття одного впускного каналу і мале часткове перекриття двох сусідніх каналів, лівий сусідній канал менше перекритий, ніж правий (рис. 1.9).

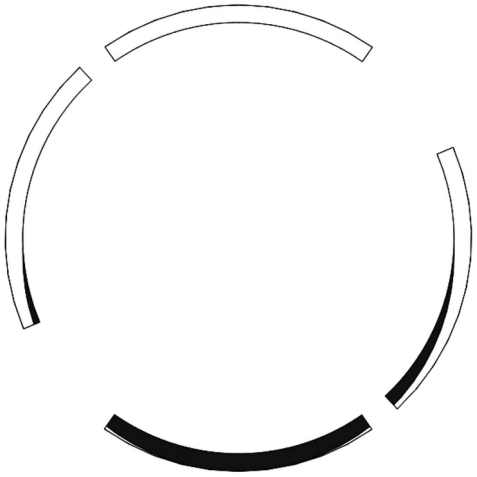


Рис. 1.9. Перекриття каналів (варіант Г)

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ КОНТЕНЕРІВ З ВЯП

Система, що включає в себе ВТВЗ, інертний газ, кошик зберігання, вентиляційне повітря, бетонний контейнер, навколишнє середовище, є досить складною з точки зору теплового дослідження. Це обумовлено тим, що в ній беруть участь три типи теплообміну (кондуктивний, конвективний і променистий), процеси відбуваються в об'єкті достатньо складної форми, а також через наявність великої кількості факторів (залишкова потужність тепловиділення ВТВЗ при завантаженні, зміна потужності тепловиділення з плином часу, різноманітний вплив погодних умов), що впливають на об'єкт дослідження. Для більш точного дослідження теплового стану ОЯТ в процесі зберігання та в аварійних умовах необхідно використовувати метод вирішення спряжених задач теплопереносу (СЗТ). Це такі задачі, в яких розглядаються не тільки поширення тепла у твердих тілах, а й теплоперенос у рідині або газі які омивають об'єкт дослідження. При цьому підході розглядається поле температур в твердому тілі і поля температур, тисків і швидкостей в потоці рідини або газу.

Пряма спряжена задача теплопереносу (ПСЗТ) розглядає систему диференціальних рівнянь виходячи з певних умов однозначності. Її рішення призводить до визначення температурного поля в твердому тілі і полів тиску, швидкостей і температур рідини або газу, що омиває це тіло.

Система диференціальних рівнянь, що визначають СЗТ, складається з [13] (величини вимірюються в системі СІ):

- рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \boldsymbol{v}) = 0, \qquad (2.1)$$

де ρ – щільність;

t – час;

v – вектор швидкостей;

- рівнянь руху Нав'є-Стокса (рух в'язкої рідини):

$$\rho \frac{d\,\boldsymbol{v}}{\partial t} = -\,grad\left(p \;+\; \frac{2}{3}\mu_{еф}\;\mathrm{div}\,\boldsymbol{v}\right) \;+\; 2\;\mathrm{div}\left(\mu_{еф}\dot{\boldsymbol{S}}\right) \;+\; \boldsymbol{F}_{\boldsymbol{V}}, \qquad (2.2)$$

де p – тиск;

$\mu_{еф}$ – ефективна (з урахуванням турбулентної складової μ_T) динамічна в'язкість;

$\dot{S}$ – тензор швидкостей деформації;

$\mathbf{F}_V$ – вектор об'ємних сил;

- рівняння енергії:

$$\rho \frac{dU}{dt} = -\,p\;\mathrm{div}\left(\boldsymbol{v}\right) + \mu_{еф}\Phi\left(\boldsymbol{v}\right) + q, \qquad (2.3)$$

де U – питома внутрішня енергія;

q – кількість теплоти, що підводиться до одиниці маси за одиницю часу;

Φ(**v**) – дисипативна функція, що характеризує частину механічної енергії, що перетвориться в теплоту в результаті подолання сил в'язкості при русі рухомого середовища.

Для врахування турбулентної течії використовуються також деякі фізичні величини (наприклад, турбулентна кінетична енергія та швидкість її дисипації), в систему рівнянь додають диференціальні рівняння, які описують закони

збереження цих величин, і співвідношення, які описують турбулентні складові в'язкості і теплопровідності.

У СЗТ умови однозначності включають в себе:

- геометричну інформацію;
- теплофізичні властивості;
- початкові умови (температура, тиск);
- граничні умови.

Так як між тілами з різною температурою є прозоре середовище, між ними буде відбувається передача тепла за допомогою променистого теплообміну. Якщо тіла, що беруть участь в променистого теплообміну, є сірими, тобто вони поглинають одну і ту ж частку випромінювання, то тепловий потік між тілами можна виразити як:

$$Q_{12}=\sigma_0 \varepsilon_{пр}\left(T_1^4-T_2^4\right)F_{12}, \tag{2.4}$$

де $\sigma_0 = 5{,}672\cdot 10^{-8}$ Вт/(м$^2\cdot$K^4) – постійна Стефана-Больцмана;

$\varepsilon_{пр}$ – приведена ступінь чорноти;

T_1 – температура поверхні більш нагрітого тіла;

T_2 – температура поверхні менш нагрітого тіла;

F_{12} – площа взаємної поверхні опромінення, яка може бути знайдена із виразу:

$$F_{12}=\int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos\left(\theta_1\right)\cos\left(\theta_2\right)}{\pi R_{12}^2} dF_2, \tag{2.5}$$

де F_1 і F_2 – площі поверхонь, що беруть участь в теплообміні;

θ_1 і θ_2 – кути між прямою, що з'єднує центри елементарних площ dF_1 і dF_2, і відповідними нормалями до цих майданчиків;

R_{12} – відстань між цими елементами.

Ступінь чорноти може бути визначена з наступного виразу [14, 15]:

$$\varepsilon = \left[1 + \left(1/\varepsilon_1 - 1\right)\varphi_{12} + \left(1/\varepsilon_2 - 1\right)\varphi_{21}\right]^{-1}, \qquad (2.6)$$

де ε_1 і ε_2 – ступінь чорноти поверхні 1 і поверхні 2 відповідно;

$\varphi_{12} = F_{12}/F_1$ і $\varphi_{21} = F_{12}/F_2$ – коефіцієнти опромінення або кутові коефіцієнти випромінювання, що показують, яка частина випромінювання одного тіла падає на інше.

Алгоритм розв'язання задачі тепломасообміну заснований на методі контрольного обсягу і методі кінцевих елементів, які реалізовані у вигляді багатофункціональних пакетів програм.

Для контейнера зберігання ВЯП об'ємної силою F_v є сила тяжіння, яка за рахунок архімедових сил викликає рух повітря у вентиляційних каналах, а також циркуляцію гелію в герметичному кошику. Таким чином рівняння 2.2 набуває вигляду

$$\rho \frac{d\boldsymbol{v}}{\partial t} = -\,grad\left(p + \frac{2}{3}\mu_{еф}\,\mathrm{div}\,\boldsymbol{v}\right) + 2\,\mathrm{div}\left(\mu_{еф}\,\dot{\boldsymbol{S}}\right) + \rho\,\boldsymbol{g}, \qquad (2.7)$$

де **g** – прискорення вільного падіння.

При відносно невеликих температурах гелій і повітря, які беруть участь в теплообміні в ССВЯП, можна розглядати як ідеальний газ, тоді ми можемо прийнятий таку залежність для питомої енергії

$$U = c_v T,$$

а в якості рівняння стану можна скористатися рівнянням Менделєєва-Клапейрона

$$\rho = \frac{p}{RT}, \tag{2.8}$$

де c_v – питома теплоємність при постійному обсязі;

T – температура газу;

R – універсальна газова стала.

Дисипативною функцією можна знехтувати через малі в'язкості і швидкості перетворення кінетичної енергії в теплову при русі газу. З огляду на те, що джерела тепла в повітрі і гелії відсутні, рівняння енергії можна переписати в наступному вигляді

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} - \frac{dp}{dt} = \operatorname{div}\left(\lambda_{еф}\, grad T\right), \tag{2.9}$$

де c_p – питома теплоємність при постійному тиску;

$\lambda_{еф}$ – ефективна теплопровідність.

Для твердих тіл окремим випадком рівняння енергії є рівняння теплопровідності

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} = \operatorname{div}\left(\lambda\, grad T\right) + q_V, \tag{2.10}$$

В якості моделі турбулентності можна використовувати k-ε-модель [16]. Модель складається з двох диференціальних рівнянь переносу:

- для турбулентної кінетичної енергії k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \operatorname{div}\left(\rho k \boldsymbol{v}\right) = \operatorname{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) grad\, k\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon, \tag{2.11}$$

- для швидкості дисипації кінетичної енергій ε

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\varepsilon \boldsymbol{v}) = \operatorname{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) grad\, \varepsilon\right) + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k + G_{3\varepsilon} G_b\right) - C_{3\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{2.12}$$

де G_k – член, що описує генерацію турбулентної кінетичної енергії, спричиненої наявністю градієнту швидкості (відповідно до гіпотези Буссінеска $G_k = \mu_t S^2$);

G_b – член, що описує генерацію турбулентної кінетичної енергії, спричиненої дією архімедових сил, для ідеального газу він набуває вигляду:

$$G_b = -\frac{\mu_T}{\rho Pr_t}\left(g_x\frac{\partial p}{\partial x} + g_y\frac{\partial p}{\partial y} + g_z\frac{\partial p}{\partial z}\right),$$

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – константи моделі, відповідно рівні 1,44, 1,92, 0,09;

$\sigma_k = 1{,}0$ – турбулентне число Прандтля для k;

$\sigma_\varepsilon = 1{,}3$ – турбулентне число Прандтля для ε.

Турбулентна складова динамічної в'язкості і турбулентна складова теплопровідності рухомого середовища визначається наступним виразами відповідно

$$\mu_t = 0{,}09\,\rho\frac{k^2}{\varepsilon}, \tag{2.13}$$

$$\lambda_t = \frac{c_p \mu_T}{Pr_T}, \tag{2.14}$$

де $Pr_T = 0{,}85$ – турбулентне число Прандтля.

Вище представлені рівняння записані для нестаціонарного випадку. Потужність залишкового тепловиділення ВТВЗ змінюється дуже повільно в порівнянні з поширенням тепла в твердих тілах і рухомому середовищі. Через неможливість передбачення зміни погодних умов більш раціонально розглядати усереднені в часі погодні умови. При таких умовах зміна зовнішніх впливів на систему зберігання ВЯП досить повільно в порівнянні з процесами поширення тепла. Виходячи з перерахованого вище теплові процеси, що протікають в ССВЯП, можна розглянути, як квазістаціонарні та при моделюванні з диференціальних рівнянь можна виключити часткові похідні по часу. В результаті чого рівняння вище приймуть такий вигляд

$$\operatorname{div}(\rho \boldsymbol{v}) = 0, \tag{2.15}$$

$$\rho(\boldsymbol{v} \times grad\, \boldsymbol{v}) = -grad\left(p + \frac{2}{3}\mu_{еф}\ \operatorname{div}\boldsymbol{v}\right) + 2\ \operatorname{div}(\mu_{еф}\dot{\boldsymbol{S}}) + \rho g, \tag{2.16}$$

$$c_p \rho(\boldsymbol{v} \times gradT) - \boldsymbol{v} \times grad\, p = \operatorname{div}(\lambda_{еф}\, gradT), \tag{2.17}$$

$$\operatorname{div}(\lambda gradT) + q_V = 0, \tag{2.18}$$

$$\operatorname{div}(\rho k \boldsymbol{v}) = \operatorname{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) gradk\right) + G_k + G_b - \rho\varepsilon, \tag{2.19}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho\varepsilon \boldsymbol{v}) = {} & \operatorname{div}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) grad\varepsilon\right) + \\ & + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{3\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \tag{2.20}$$

Будемо використовувати декартову систему координат при моделюванні процесів через достатньо складну геометрію системи і відсутність явного напрямку течії середовища. Ось Oz направимо вгору, таким чином вектор прискорення вільного падіння набуде вигляду **g** = (0, 0, -g). Позначивши компоненти швидкості в декартовій системі координат як **v** = (u, v, w), можна переписати рівняння у вигляді

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)=0, \tag{2.21}$$

$$\begin{gathered}
\rho u\frac{\partial u}{\partial x}+\rho v\frac{\partial u}{\partial x}+\rho w\frac{\partial u}{\partial x}= \\
=-\frac{\partial \rho}{\partial x}+2\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{ефф}\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)+ \\
+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right)-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right), \\
\rho u\frac{\partial v}{\partial x}+\rho v\frac{\partial v}{\partial x}+\rho w\frac{\partial v}{\partial x}= \\
=-\frac{\partial \rho}{\partial y}+2\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{ефф}\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right)+ \\
+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right)-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right), \\
\rho u\frac{\partial w}{\partial x}+\rho v\frac{\partial w}{\partial x}+\rho w\frac{\partial w}{\partial x}= \\
=-\rho g-\frac{\partial \rho}{\partial z}+2\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{ефф}\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right)+ \\
+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)\right)-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_{ефф}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)\right),
\end{gathered} \tag{2.22}$$

$$c_p\rho\left(u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial x}+w\frac{\partial T}{\partial x}\right)-\left(u\frac{\partial p}{\partial x}+v\frac{\partial p}{\partial x}+w\frac{\partial p}{\partial x}\right)= \\ =\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{ефф}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{ефф}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{ефф}\frac{\partial T}{\partial z}\right), \tag{2.23}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q_v=0, \tag{2.24}$$

$$\frac{\partial(\rho k u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho k u)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho k u)}{\partial z}= \\ =\frac{\partial}{\partial x}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial z}\right)+ \\ +G_k+G_b-\rho\varepsilon, \tag{2.25}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial z}= \\ =\frac{\partial}{\partial x}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right)+ \\ +C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{3\varepsilon}G_b\right)-C_{3\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{2.26}$$

Таким чином для вирішення прямої спряженої задачі теплопереносу при моделюванні теплових процесів в сховищі необхідно розглядати систему диференціальних рівнянь в часткових похідних (2.21 — 2.26), що замикаються співвідношеннями (2.8, 2.13, 2.14) та набору алгебраїчних рівнянь виду (2.4), що враховують променистий теплообмін, з відповідними умовами однозначності. З даної математичної моделі можна отримати скалярні поля тиску, температури і щільності, а також векторне поле швидкостей.

Дослідження теплового стану одного контейнера з ВЯП проводились із застосуванням розрахункової області, форма якої наведена на рис. 2.1 та рис. 2.2.



Рис. 2.1. Геометрична форма розрахункової області (вид збоку)

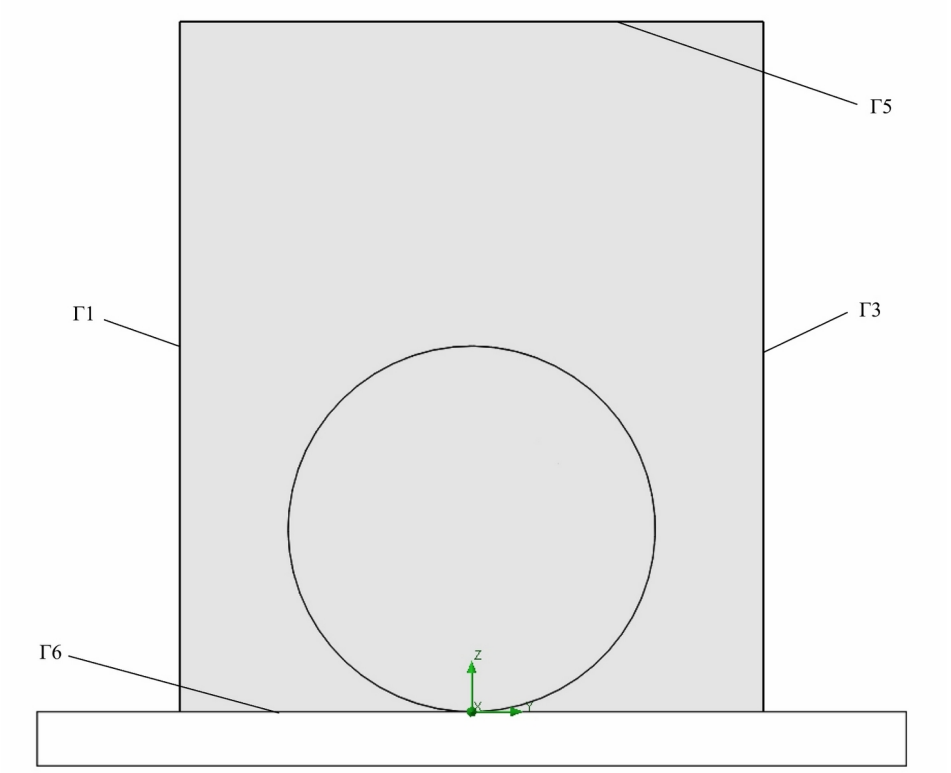


Рис. 2.2. Геометрична форма розрахункової області (вид спереду)

При побудові розрахункової області були прийняті такі припущення:

1. Кошик зберігання розглядалась як група однорідних тіл (зона тепловиділення, оголовок та хвостовик збірок, кришка кошика) з еквівалентною теплопровідністю.

2. Оточуюче середовище було обмежене площинами, що проходили на відстані від центру контейнера, яка дорівнювала половині відстані між двома сусідніми контейнерами.

Для розрахункових досліджень задавались такі граничні умови:

– на гранях Γ_1 – Γ_5 температура атмосферного повітря та атмосферний тиск

$$p|_{\Gamma i} = p_{\text{a}};$$
$$T|_{\Gamma i} = T_{\text{a}};$$

– на грані Γ_6 (поверхня бетонного підмурка майданчика зберігання) відсутність теплового потоку, оскільки доля тепла, що відводиться крізь бетонні плити в ґрунт, незначна порівняно з теплом, яке відводиться в атмосферу повітрям, що проходить крізь систему вентиляції ВКЗ-ВВЕР.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ТЕПЛОВОГО СТАНУ

Розрахунки були проведені як для нормального стану контейнера, так і для чотирьох різних випадків падіння контейнера зберігання ВЯП, що розглядають різні варіанти лінії торкання бокової поверхні контейнера і майданчика.

При падінні контейнера і подальшому зміщенні кошика створюються додаткові труднощі для подачі і виведення вентільованого повітря. Відбувається підвищення гідравлічного опору і порушення рівномірності тепловідведення, що є причиною подальшого підвищення температури.

Варіант А. Основна маса вентиляційного повітря надходить через два горизонтально розташованих верхніх каналів та два нижні канали. Пройшовши крізь канали повітря надходить у внутрішню порожнину контейнера утворюючи завихрення в середині. Вихід основної маси нагрітого повітря відбувається через один вертикальний верхній канал та інші нижні канали (рис. 3.1).

Варіант Б. Основна подача вентиляційного повітря відбуватися через два ближніх до майданчика верхні вентиляційні канали та два нижні канали. Повітря у внутрішній порожнині контейнера нагріваючись піднімається вгору і виходить через інші два верхніх і два нижніх канали (рис. 3.2).

Варіант В. Подача і вихід вентиляційного повітря відбувається подібним чином як і у варіанті Б (рис. 3.3).

Варіант Г. Подача вентиляційного повітря відбувається через два верхніх вентиляційні канали та два нижні канали. Через ближній до майданчика верхній канал подача повітря мала. Нагріте вентильоване повітря відводиться через один верхній канал і двоє інших нижніх каналів (рис. 3.4).

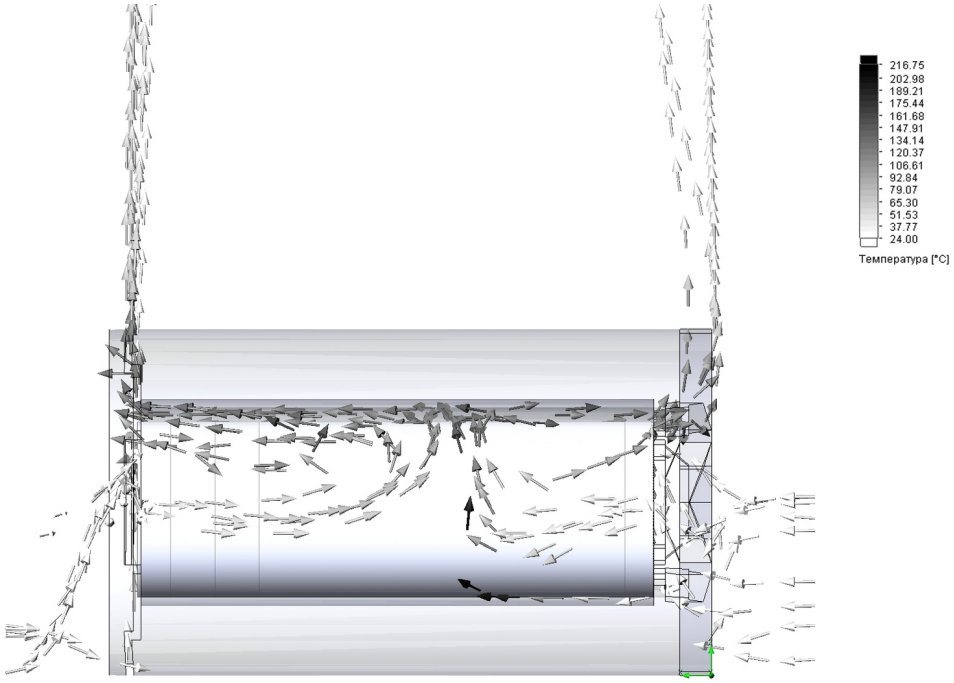


Рис. 3.1. Траєкторія течії повітря в порожнині контейнера (варіант А)

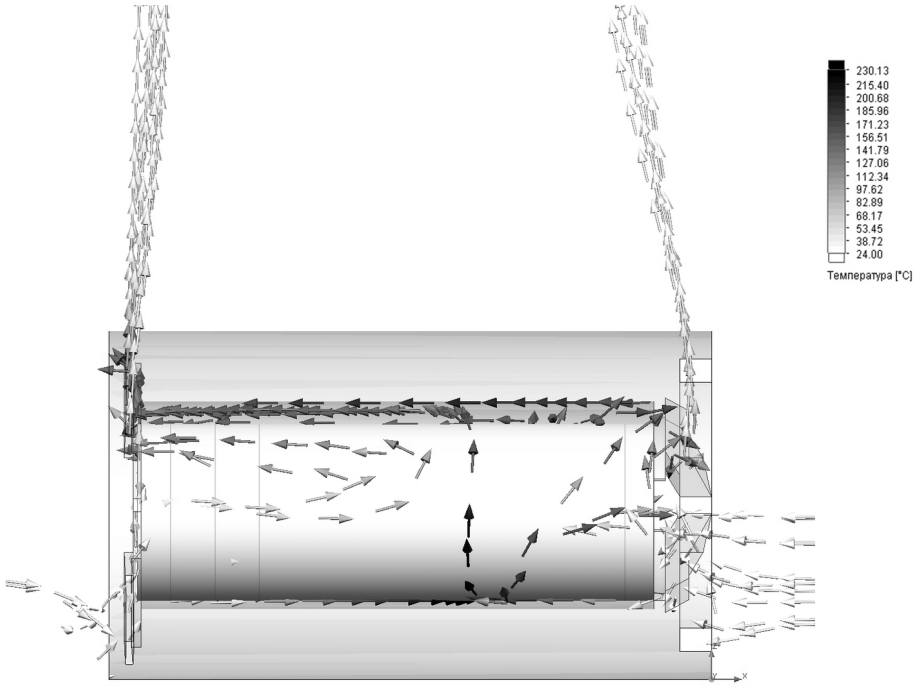


Рис. 3.2. Траєкторія течії повітря в порожнині контейнера (варіант Б)

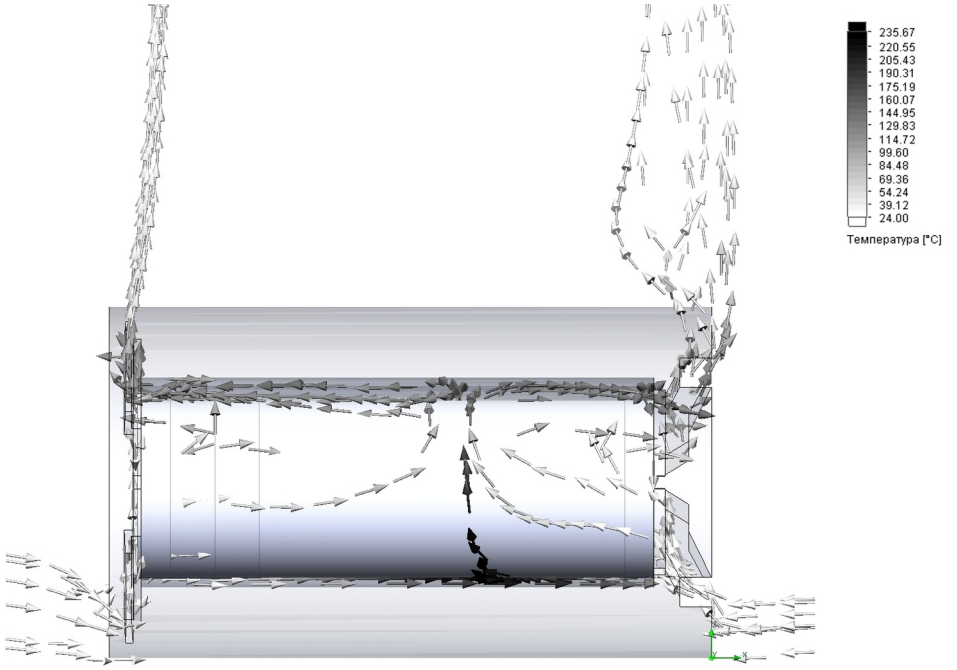


Рис. 3.3. Траєкторія течії повітря в порожнині контейнера (варіант В)

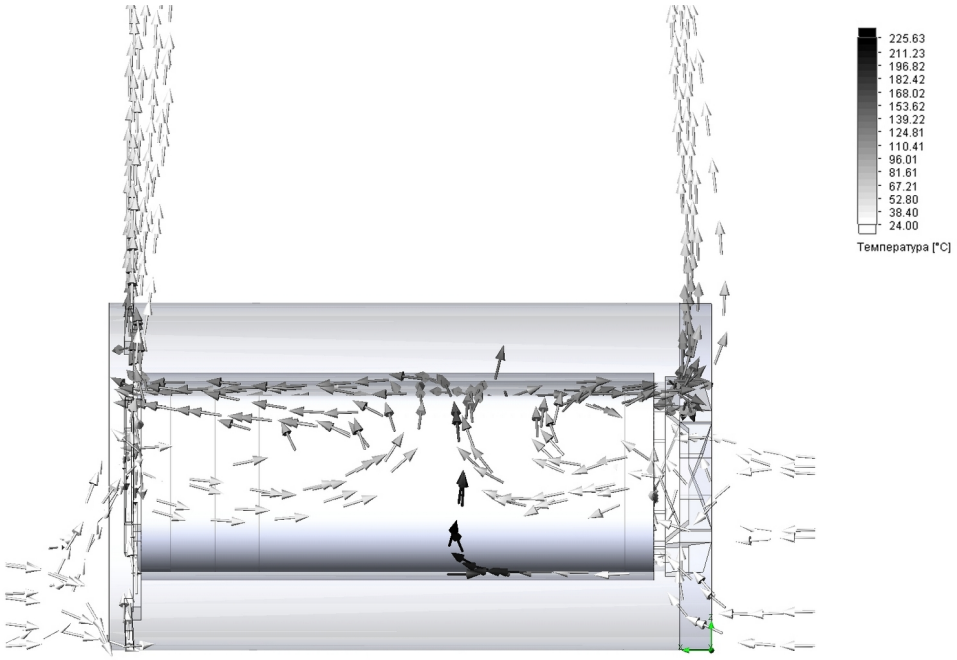


Рис. 3.4. Траєкторія течії повітря в порожнині контейнера (варіант Г)

Максимальна температура, яка досягається в середені контенера, при падінні зростає відносто максимальной температури при нормальних умовах. В залежності від варіанту спостерігається різний розподіл температури всередині кошика і різна максимально досяжна температура (рис 3.5).

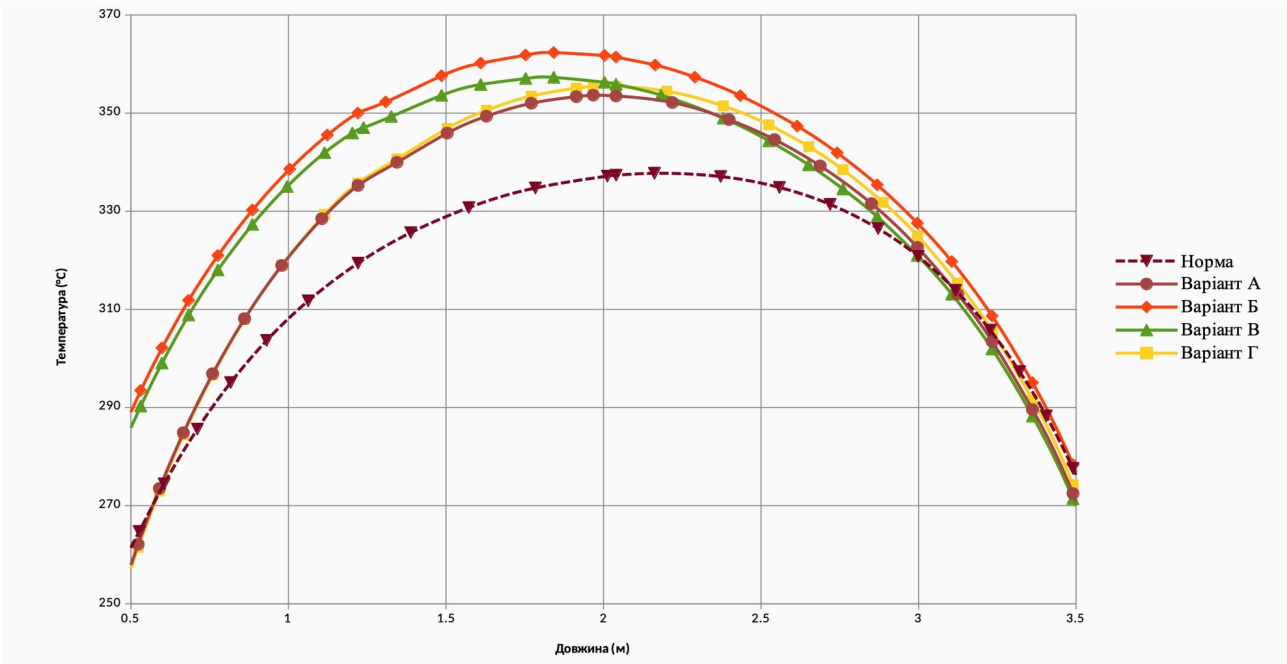


Рис. 3.5. Графік залежності температури в середині кошика від висоти кошика

Значення максимальної температури в центрі кошика і висоти, в якиї вона досягається представлені в таблиці 3.1. З таблиці видно, що точки в яких досягаються максимальні температури збігаються для деяких випадків. У варіантах А і Г максимальна температура досягається на висоті 1,97 м і становить 353,64 °С і 355,46 °С відповідно. Для варіантів Б і В на висоті 1,84 м і дорівнює 362,33 °С і 357,28 °С відповідно. Через побудову розрахункової сітки є похибка визначення висоти, средня похибка 0,06 м (6 см). Зміна температури ΔT відносно нормальних умов лежить в проміжку від 15,9 °С до 24,6 °С.

Таблиця 3.1

Максимальна температура в центрі кошика і висота, на якій вона досягається

Варіант	**Макс. T, °C**	**Висота h, м**
Нормальні умови	337,73	2,16
А	353,64	1,97
Б	362,33	1,84
В	357,28	1.84
Г	355,46	1,97

Підвищення гідравлічного опору та утворення нерівномірного потоку охолодження є основними факторами підвищення максимальної позначки температури всередині кошика.

З поздовжніх перетинів через центр контейнера для різних варіантів видно, що градієнт температури нерівномірний. При падінні нижня частина, яка торкається майданчика, нагрівається силніше, ніж при нормальних умовах. А також максимум температур в середині зміщений у сторону зменьшення довжини (рис. 3.6 – 3.10).

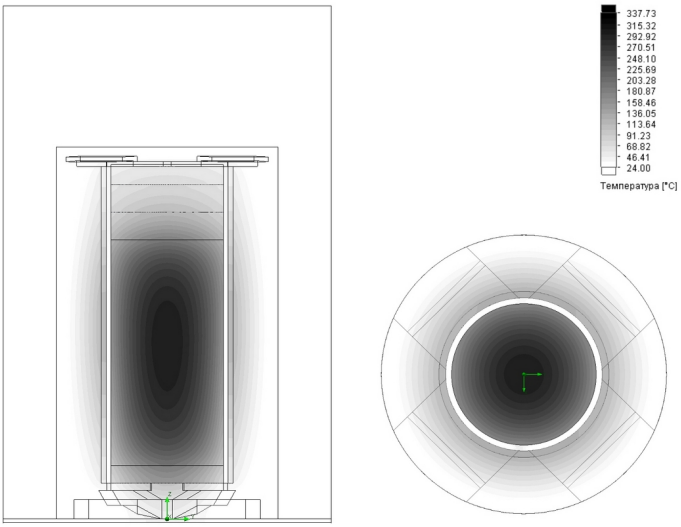


Рис 3.6. Поздовжнє і поперечне перетину системи зберігання ВЯП (нормальні умови)

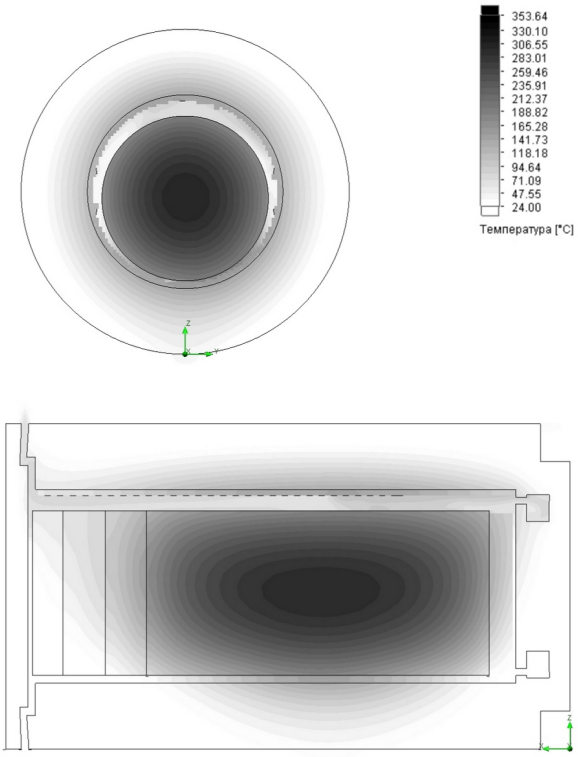


Рис 3.7. Поздовжнє і поперечне перетину системи зберігання ВЯП (варіант А)

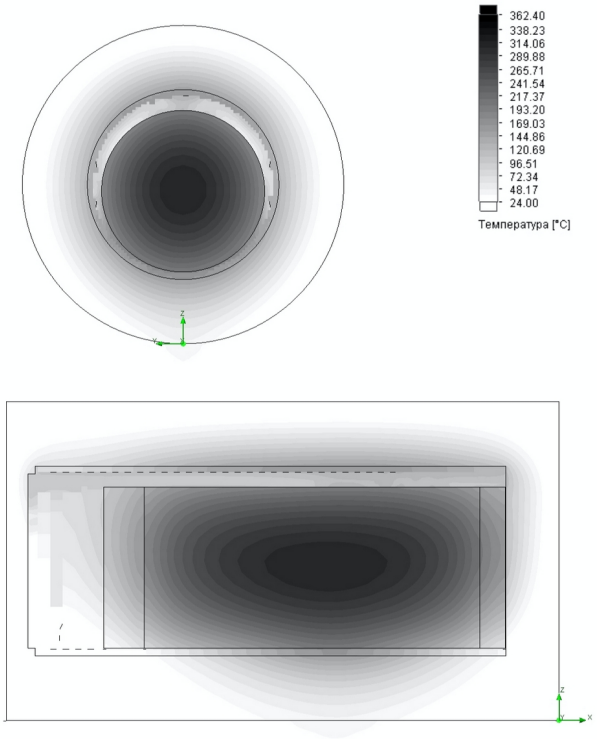


Рис 3.8. Поздовжнє і поперечне перетину системи зберігання ВЯП (варіант Б)

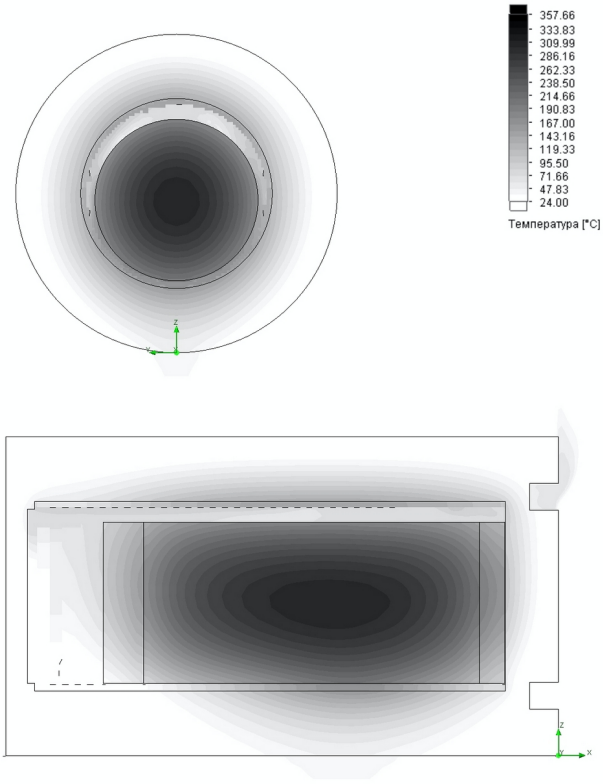


Рис 3.9. Поздовжнє і поперечне перетину системи зберігання ВЯП (варіант В)

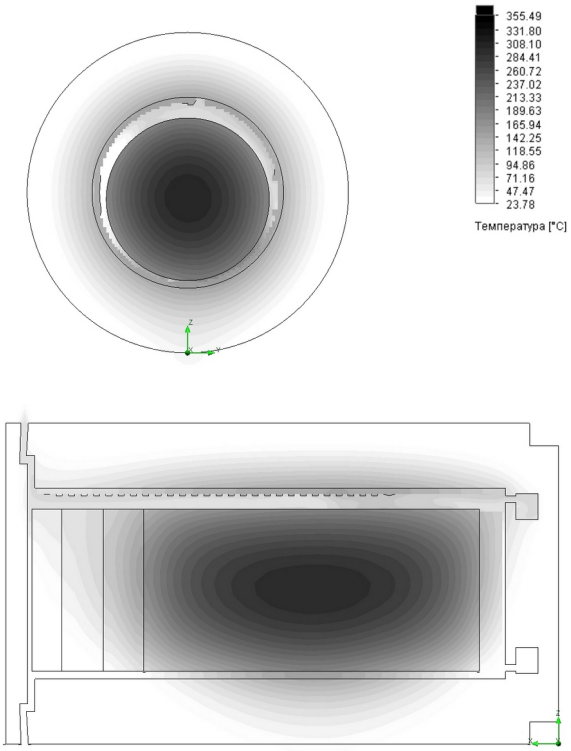


Рис 3.10. Поздовжнє і поперечне перетину системи зберігання ВЯП (варіант Г)

У всіх випадках перевищено температурний критерій зберігання ВЯП, що дорівнює 350 °С. При тривалому знаходженні відпрацьованого палива при температурі більш ніж 350 °С можуть виникнути структурні зміни в матеріалі оболонки палива, тобто оболонка стає менш міцною, знижуються захисні властивості, і при тривалому знаходженні в такому температурному режимі вона може руйнуватися.

Найбільш небезпечним з варіантів аварій є падіння контейнера з дотиком в точці середини відрізка між двома верхніми вентиляційними каналами та горизонтально розташованими нижніми секціями. Температура відпрацьованих збірок підвищується на ΔT = 24,6 °С в порівнянні з нормальним станом та досягае 362 °С. У цьому варіанті создаються більш серйозні труднощі для

охолодження. Це відбувається через те, що більша частина площі внутрішніх впускних каналів перекрита, тому охолодження відбувається менш ефективно.

ВИСНОВКИ

Розглядаючи тепловий стан системи тимчасового зберігання відпрацьованого ядерного палива у вентильованому контейнері при аварійних умовах, пов'язаних з падінням контенера на майданчик зберігання, визначили, що у всіх випадках дотика кошика з ВЯП відбувається підвищення максимально допустимої температури, що перевищує критерій теплової безпеки нормальних умов.

Основним фактором підвищення температури є перекриття внутрішніх впускних каналів, пов'язане зі зміщенням багатомісного кошика зберігання ВТЗ у внутрішній порожнині бетонного контейнера. Залежно від варіанту відбувається різне за ступенем перекриття, що впливає на процес вентиляції і відведення залишкового тепла.

Максимальні температури всередині кошика для різних конфігурацій лежать в проміжку від 353,64 °С до 362,33 °С. Тривале знаходження при температурі вище теплового критерія безпеки може привести до структурних змін в матеріалі оболонки відпрацьованого палива, знижуються міцність і захисні властивості оболонки, що може викликати її руйнування або негативний вплив на персонал станції та навколишнє середовище.

Всі розглянуті варіанти можна класифікувати за рівнем небезпеки, пов'язаного з тепловим станом: варіант А - 353,64 °С, варіант Г - 355,46 °С, варіант В - 357,28 °С, варіант Б - 362,33 °С, отже, усунення результатів аварій необхідно починати з тих контейнерів, варіант падіння яких може привести до максимальних температур палива.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bunn. Interim Storage of Spent Nuclear Fuel: A Safe, Flexible, and Cost-Effective Approach to Spent Fuel Management, 2001, p. 7
2. Ситуация на АЭС «Фукусима I» [Електронний ресурс]: http://nuclphys.sinp.msu.ru/ecology/fukushima/index.html
3. Poskas P. Thermal analysis of casks for interim storage of spent nuclear fuel / P. Poskas, V. Simonis, R. Makarevicius – MECHANICS, No. 2 (17), 1999, p. 47-51
4. Kühne B. Die nächste CASTOR – Generation zur Entsorgunng der deutschen Kernkraftwerke / Kühne B., Gartz R., Voβnacke A. // Jahrestagung Kerntechnik, 2003: Tagungsbericht, Berlin, 20-22 Mai, 2003. Dtsch. Atomforum, Kerntechn. Ges. Berlin: INFORUM, 2003 – p. 221 – 224
5. Wataru M. Heat removal verification tests of full-scale concrete casks under accident conditions / M. Wataru, H. Takeda, K. Shirai, T. Saegusa. – Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, No. 5, 2008. P. 1206-1212
6. Ray Ashley. Use of Best-Estimate Methods for Licensing Purposes in Belgium
7. Wataru M . Heat removal verification tests of full-scale concrete casks under accident conditions / Wataru M., Takeda H., Shirai K., Saegusa T. – Nuclear Engineering and Design, 2008. No. 238. p. 1206-1212
8. Accident safety evaluation method for spent fuel dry storage facilities / Zhang Y., Ouyang Y., Zhou Y., Liu J. // International Conference on Nuclear Engineering. Proceedings. 2017. Vol. 7, P. 17–20.
9. Experimental studies on safety of dry cask storage technology of spent fuel allowable temperature of cladding and integrity of cask under accidents / Saegusa T., Mayuzumi M., Ito C., Shirai K. // Journal of Nuclear Science and Technology. 1996. Vol. 33. Iss. 3. P. 250 – 258.
10. Testing of Metal Cask and Concrete Cask/ Shirai K., Wataru M., Takeda H., Tani J., Arai T., Saegusa T.// International Conference Management of Spent Fuel from

Nuclear Power Reactors: proceedings (Vienna, 5 – 19 June 2015). Vienna, 2015. P. 102–105.

11. Safety Analysis report for Dry Spent Nuclear Fuel Storage Facility of Zaporizhska NPP. Version 3.01.1 // SE «Zaporizhska NPP». Energodar, 2008. Inv. No. 1526(3). 624 p.
12. Бейнер К. С. Анализ безопасности ВКХ-ВВЭР 1000 // Symposium within XV international youth nuclear festival “DYSNAI” – Visaginas, 2002 – С. 22 – 34
13. Алехина С. В., Голощапов В. Н., Костиков А. О., Мацевитый Ю. М. Решение сопряжённой задачи тепломассообмена при исследовании теплового состояния вентилируемого бетонного контейнера с отработавшим ядерным топливом – Проблемы машиностроения – Харьков, 2005, т. 8, № 4 – С. 12 – 20.
14. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
15. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общей редакцией В. А. Григорьева и В. М. Зорина / М.: Энергоиздат, 1982 г. – 512 стр.
16. Launder B. E. The Numerical Computation of Turbulent Flow / B. E. Launder, D. B. Spalding // Comp. Meth. Appl. Eng. – 1974. – № 3. – P. 269–289.