

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Теплоенергетичний факультет
Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Валерій ТУЗ
“ _____ ” _____ 2022 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою Атомні електричні станції

спеціальності 143 Атомна енергетика

на тему: "Реакторна установка ВВЕР-1000 потужністю 1000 МВт
зі збагаченням 3,64%"

Виконав : студент _____ 4 _____ курсу, групи ТЯ-82

Гришин Денис Ігорович

(прізвище ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник

асистент Остапенко Іван Анатолійович

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант:

з питань охорони праці
(назва розділу)

к.т.н., доц. Сергій Каштанов

(посада, вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент

_____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ - 2022 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Факультет (інститут) теплоенергетичний
Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 143 Атомна енергетика
Освітньо-професійна програма Атомні електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Валерій ТУЗ

(підпис)

“ ” 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Гришина Дениса Ігоровича

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Реакторна установка ВВЕР-1000 потужністю 1000 МВт
зі збагаченням 3,64%

керівник роботи асистент Остапенко Іван Анатолійович

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від " " 2022р. №

2. Термін подання студентом роботи „09” червня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Електрична потужність – $Q_{ел} = 1000$ МВт;

Тиск теплоносія на виході з реактора – $P_{вих} = 16$ МПа; температура на вході – $T_{вх}$
температура на виході – $T_{вих} = 322$ °С; кількість ТВЕЛів – $n_{тв} = 312$; крок ТВЕЛів –
 $= 1,2$ см; збагачення – $C_5 = 3,64\%$; матеріал оболонки – $Zr + 3\%Nb$

4. Зміст роботи

а) основна частина:

1. Теплогідравлічний розрахунок

2. Нейтронно-фізичний розрахунок

3. Спецпитання. «Впровадження системи зберігання інформації в умовах
проектних і запроектних аварій «чорний ящик»»

б) охорона праці та навколишнього середовища

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентації тощо)

1. ТВЗ – А. Вид загальний – 1 аркуш

2. Графічне представлення спеціального питання – 2 аркуші

3. Результати теплогідравлічного розрахунку – 1 аркуш

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
з питань охорони праці	к.т.н., доц. Кашианов С.Ф.		

7. Дата видачі завдання "13" квітня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача завдання на бакалаврську роботу	13.04.2022	
2	Розроблений теплогідравлічний розрахунок	20.04.2022	
3	Розроблено графічні представлення результатів теплогідравлічного розрахунку	27.04.2022	
4	Розроблений нейтронно-фізичний розрахунок	4.05.2022	
5	Розроблений розділ з загальних питань управління старінням елементів та обладнання АЕС	11.05.2022	
6	Розроблений розділ з управління старінням конкретного елементу АЕС	18.05.2022	
7	Розроблено графічні представлення спецпитання	28.05.2022	
12	Підпис у керівника	09.06.2022	
13	Нормоконтроль	10.06-13.06.2022	
14	Попередній захист	14.06-19.06.2022	
15	Захист ДРБ	20.06-30.06.2022	

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

Денис ГРИШИН

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Іван ОСТАПЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ДР: 109 с., 18 рис., 24 табл., 13 джерел.

Об'єкт дослідження – впровадження системи по забезпеченню збереження інформації в умовах проектних і запроектних аварій «чорний ящик».

Предмет дослідження – програмно-технічний комплекс та параметри, що впливають на рівень майданчика АЕС.

Мета роботи – дослідження впливу системи «Чорний Ящик» на рівень безпеки, та доцільність її впровадження.

Метод дослідження – аналіз літератури та наукових публікацій з даної тематики, аналіз розрахункових даних.

У роботі проаналізований програмно-технічний комплекс системи «Чорний Ящик», показано її вплив на рівень безпеки АЕС та його технічні елементи.

У роботі також представлено результати теплогідравлічного і нейтронно-фізичного розрахунків реактора ВВЕР-1000.

СИСТЕМИ «ЧОРНИЙ ЯЩИК», ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ
КОМПЛЕКС, ПРОЕКТНА АВАРІЯ, ЗБЕРЕЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ,
ЗАПРОЕКТНА АВАРІЯ.

ABSTRACT

DR : 109 p. 18 Fig. 24 Table, 13 sources.

Object of research - the implementation of the system to ensure the preservation of information in conditions of design and beyond design basis accidents "black box".

Subject of research - software and hardware complex and parameters that affect the level of NPP site.

Purpose - to study the impact of the "Black Box" system on the level of safety, and the feasibility of its implementation.

The method of research - analysis of literature and scientific publications on this topic, analysis of calculation data.

The paper analyzes the software and hardware complex of the "Black Box" system, shows their influence on the level of NPP safety and its technical elements.

The paper also presents the results of Thermal-hydraulic and neutronic calculations reactor WWER-1000.

BLACK BOX SYSTEMS, PROGRAMME TECHNICAL COMPLEX,
PROJECT EMERGENCY, INFORMATION SAVE, PROJECT EMERGENCY.

ЗМІСТ

Вступ.....	3
Терміни і визначення.....	4
Перелік скорочень і умовні позначення.....	5
1 Теплогідравлічний розрахунок Активної Зони реакторної установки ВВЕР-1000.....	6
1.1 Вхідні Дані.....	6
1.2 Розрахунок основних геометричних параметрів активної зони	7
1.2.1 Основні геометричні параметри активної зони	7
1.2.2 Визначення площі прохідних перерізів та еквівалентних перерізів ТВЗ.....	8
1.3 Розрахунок витрати та швидості теплоносія	11
1.4 Розрахунок розподілу тепловиділення по висоті тепловиділяючого елемента	12
1.5 Розрахунок втрат тиску по висоті тепловиділяючої збірки	14
1.6 Розрахунок розподілу температури теплоносія та коефіцієнту тепловіддачі по висоті ТВЗ.....	17
1.7 Розрахунок температур оболонки ТВЕЛа і паливного осердя.....	19
Температура зонішньої поверхні оболонки ТВЕЛа:	19
Температура внутрішньої поверхні оболонки твела:	19
1.8 Визначення критичних густин теплових потоків та запасу до кризи теплообміну	21
1.9 Висновки до розділу	23
2 Нейтронно-фізичний розрахунок елементарної паливної чарунки реактору.....	24
2.1 Вхідні дані	24
2.2 Розрахунок розмірів елементарної чарунки	25
2.3 Розрахунок ядерних концентрацій	29
2.3.1 Розрахунок ядерних концентрацій в зоні 0	29
2.3.2 Ядерні концентрації в зоні 2.	30
2.3.3 Ядерні концентрації в зоні 1:	31
2.4 Загальні відомості про розрахунок середніх по чарунці перерізів різних видів взаємодій, коефіцієнтів дифузії для кожної групи.....	32
2.5 Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для першої енергетичної групи нейтронів	35
2.6 Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для другої енергетичної групи нейтронів	39
2.7 Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для третьої енергетичної групи нейтронів	43

2.8	Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для четвертої енергетичної групи нейтронів	49
2.9	Фізичний розрахунок реактору типу ВВЕР-1000 в цілому	58
2.9.1	Розрахунок ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів	59
2.9.2	Розрахунок запасу реактивності і повного температурного ефекту реактивності А.З. реактору типу ВВЕР-1000	61
2.10	Висновки до нейтронно-фізичного розрахунку	63
3	Впровадження системи по забезпеченню збереження інформації в умовах проектних і запроектних аварій «Чорний ящик»	64
3.1	Опис системи.....	64
3.2	Склад системи «Чорний ящик».....	67
3.2.1	Опис обладнання	67
3.3	Режими експлуатації	71
3.4	Управління та контроль	71
3.5	Функціонування обладнання при відмові	72
3.6	Аналіз надійності обладнання.....	76
3.7	Оцінка проекту обладнання.....	77
3.8	Аналіз ефективності реалізованого заходу	78
4	Охорона праці	80
4.1	Технічні рішення та організаційні заходи з радіаційної безпеки на АЕС	80
4.1.1	Біологічний захист	81
4.1.2	Локалізуючі системи.....	82
4.1.3	Система герметичного огороження.....	82
4.1.4	Джерела радіаційної небезпеки та їх контроль	82
4.1.5	Радіаційний контроль.....	84
4.2	Електробезпека на АЕС	84
4.3	Пожежна безпека та профілактика	86
4.3.1	Дотримання вимоги пожежної безпеки на робочих місцях.....	88
	Під час виконання робіт:	88
4.3.2	Дотримання вимог пожежної безпеки в аварійній ситуації	89
4.3.3	Надання першої медичної допомоги:.....	90
	Висновки	91
	Перелік джерел посилань	92
	Додаток А. Результати теплогідравлічного розрахунку. Графічні уявлення розрахунків.....	94

ВСТУП

Головна мета даної роботи - відобразити важливість впровадження програмно-технічного комплексу системи «Чорний Ящик» на АЕС. На сьогоднішній день це важливо, адже за допомогою сукупностей систем і різних заходів підтримується достатній рівень безпеки обладнання на майданчику АЕС та не допускається її зниження.

Головний постулат культури безпеки - безпека понад усе! Над виробництвом, економікою, політикою.

ПТК ЧЯ відносно нова система, яка в Україні почала впроваджуватися в після аварії на АЕС Фукусіма.

Ця система необхідна для прогнозування і аналізу різних проблем, які можуть призвести до порушення нормальної експлуатації елементів та конструкцій протягом експлуатації АЕС та у подальшому до аварії.

Для підтримання рівня безпеки АЕС необхідно своєчасно звертати увагу на ефект старіння обладнання і конструкцій, визначати механізми деградації і розробляти коригуючі дії для того, щоб запобігати зниження рівня безпеки.

Протягом строку експлуатації енергоблок потребує системного аналізу всіх аварійних подій, який служить основою для координації всіх програм і заходів, які пов'язані з розумінням, контролем, управлінням ЯУ.

ТЕРМІНИ І ВИЗНАЧЕННЯ

1. Аварія - порушення експлуатації АС, за якого стався вихід радіоактивних речовин і/або іонізуючих випромінювань у кількості, що перевищує визначені проектом межі безпечної експлуатації. Аварія характеризується початковою подією, шляхами протікання і наслідками.
2. Елементи і конструкції - обладнання, прилади, трубопроводи, кабелі, будівельні конструкції та інші вироби, що забезпечують виконання заданих функцій самостійно або в складі систем.
3. Забезпечувальні системи (елементи) безпеки – технологічні системи (елементи), призначені для постачання систем безпеки енергією, робочим середовищем та створення умов для їх функціонування.
4. Запроектна аварія – аварія, викликана початковими подіями, що не враховуються для проектних аварій, або така, що супроводжується додатковими в порівнянні з проектними аваріями відмовами систем безпеки або помилками персоналу.
5. Захисні системи (елементи) безпеки – системи (елементи), призначені для запобігання або обмеження пошкоджень фізичних бар'єрів, обладнання і трубопроводів, які містять ядерні матеріали або ядерне паливо.
6. Керівні системи (елементи) безпеки – системи (елементи), призначені для ініціювання спрацьовування систем безпеки, здійснення контролю та управління ними в процесі виконання заданих функцій.
7. Планово-попереджувальний ремонт (ППР) - це щорічна планова процедура, що проводиться на енергоблоках з метою підтримки стабільного робочого стану обладнання.
8. Проектна аварія – аварія, для якої проектом визначені вихідні події і кінцеві стани та передбачені системи безпеки або інше технічні засоби, які забезпечують обмеження її наслідків установленними межами.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АЕС – Атомна Електрична Станція

АКНП - Апаратура контролю нейтронного потоку

АЗ - Аварійний захист

АРП - Автоматичний регулятор потужності

БЩУ - Блоковий щит управління

ВВЕР - Водо-водяний енергетичний реактор

ВП - Відокремлений підрозділ

ІВС - Інформаційно-обчислювальна система

КЦ – Кризовий центр

ПАМС - Післяаварійна моніторингова система

ПЗ - Проектний землетрус

ПТК ЧЯ - Програмно-технічний комплекс системи «Чорний Ящик»

РОП - Регулятор обмеження потужності

РЩУ - Резервний щит управління

СВРК - Система внутрішньореакторного контролю

СКРС - Субкомплекси робочих станцій

СКУ - Система контролю і управління

СППБ - Система представлення параметрів безпеки

УСБ - Управляюча система безпеки

ЯУ – Ядерна Установа.

1 ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК АКТИВНОЇ ЗОНИ РЕАКТОРНОЇ УСТАНОВКИ ВВЕР-1000

1.1 Вхідні Дані

Основні характеристики ВВЕР-1000, що є необхідними для даного розрахунку, наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вхідні дані, відповідно до варіанту №41

Величина	Значення
Збагачення	3,64
Оболонка	Zr+3%Nb
Тип ТВЗ	ТВЗА
Потужність, МВт	1000
Крок ТВЕЛ, мм	11
Діаметр ТВЕЛ, мм	8,8
Питоме об'ємне енерговиділення, МВт/м ³	75
Температура теплоносія на вході, °С	289,0
Середній тиск в активній зоні, МПа	16,0
Діаметр центральної трубки / товщина оболонки, мм	10,3/0,65
Діаметр направляючих каналів / товщина оболонки, мм	12,6/0,8
Діаметр центрального отвору, мм	1,2
Товщина газового зазору, см	0,2
Товщина оболонки ТВЕЛ, см	0,65

1.2 Розрахунок основних геометричних параметрів активної зони

Теплова потужність реакторної установки:

$$Q_{\text{теплова}} = \frac{Q_{\text{ел}}}{\eta} = \frac{1000}{0,333} = 3003,003 \text{ [МВт]}$$

де $Q_{\text{ел}}$ — електрична потужність реакторної установки, задана в початкових даних;

η — ККД реакторної установки, задане в початкових даних.

Для ВВЕР-1000 $\eta = 0,333$

1.2.1 Основні геометричні параметри активної зони

Об'єм активної зони:

$$V_{\text{аз}} = \frac{Q_{\text{теплова}}}{q_{\text{т}}} = \frac{3003,003}{85} = 35,3294 \text{ [м}^3\text{]}$$

де $q_{\text{т}}$ — питоме енерговиділення з одиниці об'єму активної зони

Діаметр АЗ:

$$D_{\text{аз}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_{\text{аз}}}{\beta \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 35,3294}{1,12 \cdot \pi}} = 3,57 \text{ [м]}$$

Висота активної зони:

$$H_{\text{аз}} = H_0 = \beta \cdot D_{\text{аз}} = 1,12 \cdot 3,57 = 3,998958 \text{ [м]}$$

1.2.2 Визначення площі прохідних перерізів та еквівалентних перерізів ТВЗ

Площа перетину однієї ТВЗ:

$$f_{\text{ТВЗ}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{S_1}{2}\right)^2 = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{0,2829}{2}\right)^2 = 0,03466 \text{ [м}^2\text{]}$$

де S_1 – розмір шестигранної ТВЗ "під ключ", визначається у вихідних даних, м;

$$S_1 = 21 \cdot t \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 21 \cdot 0,01 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,200052 \text{ [м]}$$

Площа перерізу чарунки:

$$f_{\text{чар}} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{S_1}{2} + \frac{\delta_{\text{заз}}}{2}\right)^2 = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{0,2}{2} + \frac{0,002}{2}\right)^2 = 0,035355 \text{ [м}^2\text{]}$$

Площа прохідного перетину ТВЗ:

$$\begin{aligned} S_{\text{ТВЗ}} &= f_{\text{ТВЗ}} - \frac{\pi}{4} [n_{\text{ТВ}} \cdot d_{\text{ТВ}}^{\text{зов.2}} + n_{\text{К}} \cdot d_{\text{Н.К.}}^{\text{зов.2}} + n_{\text{Ц}} \cdot d_{\text{Ц.Т.}}^{\text{зов.2}}] = \\ &= 0,03466 - \frac{\pi}{4} [312 \cdot (8,8 \cdot 10^{-3})^2 + 18 \cdot (12,6 \cdot 10^{-3})^2 + (10,3 \cdot 10^{-3})^2] = \\ &= 0,013355 \text{ [м}^2\text{]} \end{aligned}$$

де $d_{\text{ц.т.}}^{\text{зов.}}, d_{\text{ц.т.}}^{\text{вн.}}$ – зовнішній та внутрішній діаметри центральної трубки;

$n_p, d_p, n_{\text{д.е.}}$ – діаметр та число трубок для стержнів регулювання і детекторів вимірювання енерговиділення;

n_2, d_2 - відповідно діаметр і число ТВЕЛів в ТВЗ.

Площа прохідного перерізу чарунки:

$$S_{\text{чар}} = f_{\text{чар}} - f_{\text{ТВЗ}} + S_{\text{ТВЗ}} = 0,035355 - 0,03466 + 0,013355 = 0,014051 \text{ [м}^2\text{]}$$

де $f_{\text{чар}}$ – площа однієї чарунки, м^2 ;

$f_{\text{ТВЗ}}$ – площа перетину однієї ТВЗ, м^2 ;

$S_{\text{ТВЗ}}$ – прохідний перетин касети, м^2 .

Гідравлічний периметр ТВЗ :

$$\begin{aligned} \Pi_{\Gamma} &= \pi \cdot (n_{\text{ТВ}} \cdot d_{\text{ТВ}}^{\text{ЗОВ.}} + n_{\text{К}} \cdot d_{\text{Н.К.}}^{\text{ЗОВ.}} + n_{\text{Ц}} \cdot d_{\text{Ц.Т.}}^{\text{ЗОВ.}}) = \\ &= \pi \cdot ([312 \cdot 0,0088 + 18 \cdot (12,6 \cdot 10^{-3}) + (10,3 \cdot 10^{-3})]) = 9,370 \text{ [м]} \end{aligned}$$

Гідравлічний діаметр :

$$d_{\Gamma} = \frac{4 \cdot S_{\text{ТВЗ}}}{\Pi_{\Gamma}} = \frac{4 \cdot 0,013355}{9,370} = 0,0057 \text{ [м]}$$

Тепловий периметр :

$$\Pi_{\text{T}} = n_{\text{ТВ}} \cdot d_{\text{ТВ}}^{\text{ЗОВ.}} + \pi = 312 \cdot (8,8 \cdot 10^{-3}) + \pi = 8,6256 \text{ [м]}$$

Тепловий діаметр ТВЗ:

$$d_{\text{T}} = \frac{4 \cdot S_{\text{ТВЗ}}}{\Pi_{\text{T}}} = \frac{4 \cdot 0,013355}{8,6256} = 0,006193 \text{ [м]}$$

Кількість чарунок в АЗ реактора:

$$N_{\text{чарунок}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{аз}}^2}{4 \cdot f_{\text{чар}}} = \frac{\pi \cdot 3,570^2}{4 \cdot 0,035355} = 283 \text{ [чарунок]}$$

Основні геометричні параметри активної зони ВВЕР-1000 наведено у таблиці 1.2

Таблиця 1.2 - Основні геометричні параметри активної зони

Параметр	Умовне позначення	Значення
Розмір ТВЗ “під ключ”, м	S_1	0,200052
Площа перетину ТВЗ, м ²	$f_{ТВЗ}$	0,03466
Площа чарунки, м ²	$f_{чар}$	0,035355
Число чарунок	$N_{чарунок}$	283
Діаметр центральної трубки, мм	$d_{ц.т.}^{зоб.}$	10,3
Прохідний переріз касети, м ²	$S_{ТВЗ}$	0,013355
Прохідний переріз чарунки, м ²	$S_{чар}$	0,014051
Гідравлічний периметр, м	Π_{Γ}	9,370
Висота активної зони, м	$H_{аз}$	3,998958
Діаметр активної зони, м	$D_{аз}$	3,57
Гідравлічний діаметр, м	d_{Γ}	0,0057
Тепловий діаметр, м	d_T	0,006193
Тепловий периметр, м	Π_T	8,6256

1.3 Розрахунок витрати та швидості теплоносія

Визначення витрати теплоносія через активну зону:

$$G_{\text{тн}} = \frac{Q_{\text{теплова}}}{\Delta h} = \frac{Q_{\text{теплова}}}{C_p \cdot (t_{\text{вх\iд}} - t_{\text{вих\iд}})} = \frac{3003,003}{5583,6 \cdot (322 - 289)} = 16297,67 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

де $Q_{\text{тепл}}$ — теплова потужність реактора, Вт;

$\Delta h = |h_{\text{вх\iд}} - h_{\text{вих\iд}}|$ — різниця ентальпії теплоносія на вході $h_{\text{вх\iд}}$ і на виході з активної зони реактора $h_{\text{вих\iд}}$, кДж/кг .

Відповідну ентальпію визначають по вхідних і вихідних параметрах — тиск і температура теплоносія.

$C_p = f\left(p; \frac{t_{\text{вх\iд}} + t_{\text{вих\iд}}}{2}\right) = 5583,6, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ — ізобарна теплоємність теплоносія, визначена за середньою температурою теплоносія

Для ВВЕР-1000 температура на виході дорівнюватиме 322 градусам

Витрата через максимально навантажену чарунку:

$$G_{\text{тн max}} = \frac{G_{\text{тн}} \cdot k_r}{N_{\text{чарунок}}} = \frac{1627,667 \cdot 2,31}{283} = 133,03 \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right]$$

де $k_r=2,31$ - коефіцієнт нерівномірності енерговиділення по радіусу АЗ

Знаходження швидкості теплоносія в середньонавантаженій чарунки:

$$W = \frac{G_{\text{тн}}}{\rho \cdot S_{\text{чар}} \cdot N_{\text{чар}}} = \frac{16297,667}{715,89 \cdot 0,014051 \cdot 283} = 5,725 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

де $\rho = f\left(p; \frac{t_{\text{вх\iд}} + t_{\text{вих\iд}}}{2}\right)$ — густина теплоносія, кг/м^3 .

Швидкість теплоносія в максимально навантаженої чарунки:

$$W_{\max} = \frac{G_{\text{тнmax}}}{\rho \cdot S_{\text{чар}}} = \frac{133,03}{715,89 \cdot 0,014051} = 13,224652 \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

1.4 Розрахунок розподілу тепловиділення по висоті тепловиділяючого елемента

Визначення розподілу енерговиділення по висоті ТВЕЛів:

$$Q = Q_{\text{т}} \cdot \chi = 3003,003 \cdot 0,93 = 2792,793 \text{ [МВт]}$$

де χ - коефіцієнт ,який показує співвідношення між енерговиділенням ТВЕЛів та тепловою потужністю реактора.

Густина теплового потоку на поверхні ТВЕЛа:

$$\begin{aligned} q_s &= \frac{Q_{\text{теплова}} \cdot \chi}{F_{\text{ТВЗ}}} = \frac{Q}{N_{\text{чарунок}} \cdot n_{\text{ТВ}} \cdot \pi \cdot d_{\text{ТВ}}^{\text{зоб.}} \cdot H_{\text{аз}}} = \\ &= \frac{2792,793}{283 \cdot 312 \cdot 3,14 \cdot 0,0088 \cdot 3,9989} = 286,25 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right] \end{aligned}$$

де $F_{\text{ТВЗ}} = N_{\text{чарунок}} \cdot n_{\text{ТВ}} \cdot \pi d_{\text{ТВ}}^{\text{зоб.}} \cdot H_0$ — площа поверхні тепловиділяючих елементів в усіх ТВЗ, м^2 .

Середній тепловий потік на одиницю довжини ТВЕЛу:

$$q_1(0) = \frac{Q \cdot K_z}{N_{\text{чарунок}} \cdot n_{\text{ТВ}} \cdot H_{\text{аз}}} = \frac{2792,793 \cdot 1,57}{283 \cdot 312 \cdot 3,9989} = 12,46 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right]$$

де K_z - коефіцієнт нерівномірності тепловиділення по висоті активної зони і дорівнює 1,57.

Густина теплового потоку для максимально навантаженої чарунки:

$$q_s^{\max} = q_s \cdot K_v = 286,25 \cdot 4,988 = 1426,874 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right]$$

де K_v — об'ємний коефіцієнт нерівномірності енерговиділення в активній зоні.

$$K_v = K_r \cdot K_z \cdot K_k \cdot K_{\text{мех}} \cdot K_{\text{пот}} = 2,31 \cdot 1,57 \cdot 1,15 \cdot 1,13 \cdot 1,04 = 4,988$$

де K_r -коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу між ТВЕЛом в ТВЗ, приймається рівним 1,15;

$K_{\text{мех}}$ - враховує запас на неточність інженерних розрахунків і технологічних допусків при виготовленню елементів ТВЕЛ, приймається рівним 1,13;

$K_{\text{пот}}$ - враховує запас на потужність, приймається рівним 1,04.

Лінійний тепловий потік у центральній площині ТВЗ з максимальним навантаженням:

$$q_l^{\max}(0) = \frac{Q \cdot K_v}{N_{\text{чарунок}} \cdot n_{\text{ТВ}} \cdot H_{\text{аз}}} = \frac{2792,793 \cdot 4,988}{283 \cdot 312 \cdot 3,998958} = 39,447 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right]$$

Визначення розподілу енерговиділення по висоті ТВЕЛу:

$$q_l(0) = q_l(0) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot Z}{H_{\text{еф}}}\right) = 12,46 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 0}{4,01656}\right) = 12,46 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right]$$

$$q_l^{\max}(0) = q_l^{\max}(0) \cos\left(\frac{\pi \cdot Z}{H_{\text{еф}}}\right) = 39,447 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 0}{4,01656}\right) = 39,447 \left[\frac{\text{кВт}}{\text{м}^2} \right]$$

де $H_{\text{еф}}$ - ефективний діаметр

$$H_{\text{еф}} = H_{\text{аз}} + 2\delta = 3,998 + 2 \cdot 0,08 = 4,01656 \text{ [м]}$$

Кінцеві результати розрахунків зведені в таблиці А.1. За результатами розрахунків можливо створити графічне уявлення процесу розподілу енерговиділення по висоті ТВЕЛ - рисунок А.1.

1.5 Розрахунок втрат тиску по висоті тепловиділяючої збірки

Сумарні втрати тиску на місцеві опори:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тертя}} + \Delta P_{\text{місцеві}} + \rho \cdot g \cdot H_0$$

де $\Delta P_{\text{тертя}}$ — втрати тиску на тертя,

Втрати тиску на тертя:

$$\Delta P_{\text{тертя}} = \xi_{\text{тертя}} \cdot \frac{H_0}{d_r} \cdot \frac{(W \cdot K_r)^2 \cdot \rho}{2}$$

де $\xi_{\text{тертя}}$ - коефіцієнт опору тертя, який знаходиться із емпіричного співвідношення:

$$\frac{\xi_{\text{тертя}}}{\xi_0} = 0,57 + 0,18 \cdot \left(\frac{t}{d_{\text{ТБ}}^{\text{зов.}}} - 1 \right) + 0,53 \cdot (1 - e^{-a})$$

де ξ_0 - коефіцієнт опору тертя круглої труби

$$\frac{t}{d_{\text{ТБ}}^{\text{зов.}}} = 1,25$$

a - параметр, який залежить від співвідношення між кроком ТВЕЛ та зовнішнім діаметром ТВЕЛ:

$$Re = \frac{W \cdot d_r \cdot K_r}{\nu} = \frac{5,725 \cdot 2,31 \cdot 0,0057}{1,2088} = 623654,139$$

$$Re_{\text{max}} = \frac{W_{\text{max}} \cdot d_r \cdot K_r}{\nu} = \frac{13,224652 \cdot 2,31 \cdot 0,0057}{1,2088} = 1,441 \cdot 10^6$$

$$\xi_0 = f(Re) = (1,82 \cdot \log Re - 1,64)^{-2} = 0,012605$$

$$\xi_{0\text{max}} = f(Re_{\text{max}}) = (1,82 \cdot \log Re_{\text{max}} - 1,64)^{-2} = 0,010922$$

Розрахуємо параметр а:

$$a = f\left(\frac{t}{d_{\text{ТВ}}^{\text{зоб.}}}\right) = 0,58 + 9,2 \cdot \left(\frac{0,011}{0,0088} - 1\right) = 2,88 \text{ при } \frac{t}{d_{\text{ТВ}}^{\text{зоб.}}} > 1,02$$

Тепер можна підрахувати $\xi_{\text{тертя}}$:

$$\xi_{\text{тертя}} = 0,012605(0,57 + 0,18 \cdot (1,25 - 1) + 0,53 \cdot (1 - e^{-2,88})) = 0,01406$$

$$\xi_{\text{тертя.мах}} = 0,010922(0,57 + 0,18 \cdot (1,25 - 1) + 0,53 \cdot (1 - e^{-2,88})) = 0,0122$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{тертя}} &= \xi_{\text{тертя}} \cdot \frac{H_0}{d_r} \cdot \frac{(W \cdot K_r)^2 \cdot \rho}{2} = 0,01406 \cdot \frac{3,9989}{0,0057} \cdot \frac{(5,725 \cdot 2,31)^2 \cdot 715,89}{2} = \\ &= 553,53 \text{ [кПа]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{тертя.мах}} &= \xi_{\text{тертя.мах}} \cdot \frac{H_0}{d_r} \cdot \frac{(W_{\text{мах}} \cdot K_r)^2 \cdot \rho}{2} = \\ &= 0,0122 \cdot \frac{3,9989}{0,0057} \cdot \frac{(13,224652 \cdot 2,31)^2 \cdot 715,89}{2} = 2854,2116 \text{ [кПа]} \end{aligned}$$

Перепад тиску внаслідок місцевих опорів визначається:

$$\Delta P_{\text{місц}} = \sum_{i=1}^m \xi_i \cdot \left[\frac{(\bar{W} \cdot K_r)^2 \cdot \rho}{2} \right]$$

де ξ_i — коефіцієнти місцевих опорів, які приймаються:

Вхід до ТВЗ: $\xi_{\text{входу}} = 1$;

Місцевий опір дистанціонуючих решіток:

$$\xi_{\text{д.р.}} = 0,55;$$

$$n_{\text{реш}} = \frac{H_0}{25 \cdot d_{\text{ТВ}}} = \frac{3,9989}{25 \cdot 0,0088} = 18$$

Місцевий опір на виході з ТВЗ:

$$\xi_{\text{виходу}} = 2,18;$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{місц}} &= (\xi_{\text{входу}} + n_{\text{реш}} \cdot \xi_{\text{д.р.}} + \xi_{\text{виходу}}) \left[\frac{(W \cdot K_r)^2 \cdot \rho}{2} \right] = \\ &= (1 + 18 \cdot 0,55 + 2,18) \left[\frac{(5,725 \cdot 2,31)^2 \cdot 715,89}{2} \right] \\ &= 818,824 \text{ [кПа]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{місц.мах}} &= (\xi_{\text{входу}} + n_{\text{реш}} \cdot \xi_{\text{д.р.}} + \xi_{\text{виходу}}) \left[\frac{(W_{\text{мах}} \cdot K_r)^2 \cdot \rho}{2} \right] = \\ &= (1 + 18 \cdot 0,55 + 2,18) \left[\frac{(13,225 \cdot 2,31)^2 \cdot 715,89}{2} \right] \\ &= 4369,329 \text{ [кПа]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta P &= \Delta P_{\text{тертя}} + \Delta P_{\text{місцеві}} + \rho \cdot g \cdot H_0 = 553,53 + 818,824 + 715,887 \cdot 9,8 \cdot 3,9989 \\ &= 1400,429 \text{ [кПа]}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{мах}} &= \Delta P_{\text{тертя.мах}} + \Delta P_{\text{місцеві.мах}} + \rho \cdot g \cdot H_0 \\ &= 2854,2116 + 4369,329 + 715,887 \cdot 9,8 \cdot 3,9989 = 7251,615 \text{ [кПа]}\end{aligned}$$

Визначення тиску на вході і на виході АЗ:

Приймається, що зміна тиску по висоті каналу АЗ є лінійною, тоді середній тиск буде дорівнювати середньому арифметичному між тиском на вході та на виході з каналу.

$$\bar{P} = \frac{P_{\text{вхід}} + P_{\text{вихід}}}{2} = \frac{P_{\text{вхід}} + P_{\text{вхід}} - \Delta P}{2} = P_{\text{вхід}} - \frac{\Delta P}{2}$$

Тоді:

$$\begin{aligned}P_{\text{вхід}} &= \bar{P} + \frac{\Delta P}{2}; & P_{\text{вихід}} &= \bar{P} - \frac{\Delta P}{2} \\ P_{\text{вхід}} &= \bar{P} + \frac{\Delta P}{2} = 16 + \frac{1,400429}{2} = 16,7 \text{ [МПа]} \\ P_{\text{вихід}} &= \bar{P} - \frac{\Delta P}{2} = 16 - \frac{1,400429}{2} = 15,3 \text{ [МПа]}\end{aligned}$$

$$P_{\text{вх.мах}} = \bar{P} + \frac{\Delta P_{\text{мах}}}{2} = 16 + \frac{7,251615}{2} = 19,626 \text{ [МПа]}$$

$$P_{\text{вихід.мах}} = \bar{P} - \frac{\Delta P_{\text{мах}}}{2} = 16 - \frac{7,251615}{2} = 12,374 \text{ [МПа]}$$

1.6 Розрахунок розподілу температури теплоносія та коефіцієнту тепловіддачі по висоті ТВЗ

Розподіл температури по висоті ТВЗ:

$$t_{\text{тн}}(Z) = t_{\text{вихід}} + \frac{n_{\text{ТВ}}}{S_{\text{ТВЗ}} \cdot C_p(Z) \cdot \bar{W}\rho} \cdot \left[\frac{H_{\text{еф}}}{\pi} \cdot \bar{q}_l(0) \cdot \left(\sin \frac{\pi \cdot H_0}{2H_{\text{еф}}} + \sin \frac{\pi \cdot Z}{H_{\text{еф}}} \right) \right]$$

де $C_p(Z) = f(P(Z); T_{\text{тн}}(Z))$ - ізобарна теплоємність теплоносія, яка залежить від тиску теплоносія та температури теплоносія, кДж/кг·К.

Визначимо розподіл тиску по висоті:

$$P(Z) = P_{\text{вихід}} - Z^* \cdot \frac{\Delta P}{H_0}$$

$$P\left(\frac{-H_0}{4}\right) = P_{\text{вихід}} - \frac{H_0}{4} \cdot \frac{\Delta P}{H_0} = 16,367 \text{ [МПа]}$$

$$P_{\text{мах}}\left(\frac{-H_0}{4}\right) = P_{\text{вихід.мах}} - \frac{H_0}{4} \cdot \frac{\Delta P}{H_0} = 17,818 \text{ [МПа]}$$

Кінцеві результати розрахунків зведені в таблиці А.2. За результатами розрахунків можливо створити графічне уявлення процесу розподілу тиску по висоті рисунок А.2 додатку А..

Для першого кроку ітерації задаємося

$$t_{\text{тн}}\left(\frac{-H_0}{2}\right) = 289 + \frac{0,962 \cdot 3,8 \cdot 312}{4,14 \cdot 0,028 \cdot 5521} \cdot \left(\sin \pi \frac{H_0}{2H_{\text{еф}}} + \sin \left(-\pi \frac{H_0}{2H_{\text{еф}}} \right) \right) = 289 \text{ [°C]}$$

В таблиці А.3 додатку А результати першого кроку ітерації.

Маємо похибку більшу за 5% тому проводимо наступні ітерації доки різниця температур між даним та попереднім кроком ітерації не буде меншою за 0.5 градуса. Результати подальших розрахунків для цієї і решти точок зведемо в таблицю А.4 та графічне зображення наведено на рисунку А.3 додатку А.

Приймаємо результати 4-ї ітерації, адже різниця температур між двома послідовними ітераціями не перевищує 0,5 °С.

Визначення коефіцієнту тепловіддачі:

$$Nu(z) = 0.023 \cdot Re(z)^{0.8} \cdot Pr(z)^{0.43}$$

$$Re(z) = \frac{w \cdot d_r}{v(z)}$$

$$v(z) = f(P(z); t(z))$$

$$Nu(0) = 0.023 \cdot 270055.169^{0.8} \cdot 0.878^{0.43} = 481.595$$

Проводимо розрахунки для наступних точок і результати заносимо в таблицю А.5 додатку А - визначення чисел подібності для визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності, які наведені в таблиці А.6 додатку А.

Визначення коефіцієнту тепловіддачі:

$$\alpha(z) = \frac{Nu(z) \cdot \lambda(z)}{d_r};$$

$$\lambda(z) = f(P(z); t(z))$$

$$\alpha(0) = \frac{481,595 \cdot 0,550}{0,0057} = 46,436$$

У додатку А приведені рисунки А.4-7 - Зміна значення коефіцієнту тепловіддачі та теплопровідності по висоті АЗ для середньо та максимально навантаженої ТВЗ.

1.7 Розрахунок температур оболонки ТВЕЛа і паливного осердя

Температура зонішньої поверхні оболонки ТВЕЛа:

$$t_{об}^{30B.}(z) = t_{TH}(z) + \frac{\chi \cdot \bar{q}_l(z) \cdot n_{TB}}{\Pi_T \cdot \alpha(z)}$$

$$t_{об\ max}^{30B.}(z) = t_{TH}(z) + \frac{\chi \cdot \bar{q}_{l\ max}(z) \cdot n_{TB}}{\Pi_T \cdot \alpha_{max}(z)}$$

Проводимо розрахунки для температури зонішньої поверхні оболонки ТВЕЛ і результати заносимо в таблицю А.7 та рисунок А.8 додатку А.

Температура внутрішньої поверхні оболонки твела:

$$t_{об}^{BH.}(z) = t_{об}^{30B.}(z) + \frac{\chi \cdot \bar{q}_l(z)}{2\pi \cdot \lambda_{об}(z)} \cdot \ln\left(\frac{r_{TB}}{r_1}\right)$$

де $t_{об}^{30B.}(z)$ – температура зовнішньої поверхні оболонки твела;

r_{TB}, r_1 – відповідно зовнішній і внутрішній діаметр оболонки твела, м;

$\lambda_{об}(z) = f(t_{об}^{30B.}(z))$ – коефіцієнт теплопровідності оболонки, який залежить від температури оболонки ТВЕЛ, Вт/м²К, визначається за середньою температурою оболонки.

Результати обчислення $\lambda_{об}(z)$ для наступних точок заносимо і в таблицю А.8 додатку А.

$\delta_{обол} = 0,7$ [мм] для ВВЕР-1000

$r_{TB} = 0,5d_{TB} = 0,5 \cdot 8,8 = 4,4$ [мм]

$r_1 = r_{TB} - \delta_{обол} = 4,4 - 0,7 = 3,7$ [мм]

$$t_{oc}^{BH.}(0) = t_{oc}^{3OB.}(0) + \frac{\chi \cdot \bar{q}_l(0)}{2\pi \cdot \lambda_{oc}(0)} \cdot \ln\left(\frac{r_{TB}}{r_1}\right) = 314,188 + \frac{0,93 \cdot 12,46}{2\pi \cdot 20,572} \cdot \ln\left(\frac{4,4}{3,7}\right) = 329,667$$

Кінцеві результати розрахунків зведені в таблицю А.9. За результатами розрахунків створив графічне уявлення процесу розподілу температури внутрішньої поверхні оболонки твела по висоті у рисунку А.9 додатку А..

Розрахунок зовнішньої температури паливного осердя:

$$t_{oc}^{3OB.}(z) = t_{oc}^{BH.}(z) + \frac{\chi \cdot \bar{q}_l(z)}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_3}$$

де $d_1 = 2 \cdot r_1 = 3,7 \cdot 2 = 7,4$ [мм]

$\delta_3 = 0,1$ [мм]

$\alpha_3 = f\left(\frac{\delta_3}{d_1}\right) = 0,2 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ - коефіцієнт тепловіддачі контактного шару, що залежить від відношення товщини початкового зазору:

$$t_{oc}^{3OB.}(0) = 329,667 + \frac{0,93 \cdot 12,416}{\pi \cdot 0,0074 \cdot 0,2 \cdot 10^4} = 578,008 [^\circ\text{C}]$$

Аналогічно проводимо розрахунки для наступних точок і результати заносимо в таблицю А.10 та графічно зображено на рис А.10 додатку А.

Температура внутрішньої частини паливного осердя:

$$t_{oc}^{BH.}(z) = t_{oc}^{3OB.}(z) + \frac{\chi \cdot \bar{q}_l(z)}{4\pi \cdot \lambda_{oc}(z)} \cdot \left[1 - \frac{r_{от}^2}{r_0^2 - r_{от}^2} \cdot \ln\left(\frac{r_{от}}{r_0}\right)\right]$$

де $\lambda_{oc}(z)$ - коефіцієнт теплопровідності паливного осердя:

$$\lambda_{oc}(z) = \frac{4 \cdot 10^3}{130} + t_{oc}^{BH.}(z) + 3,4 \cdot 10^{-14} \cdot (t_{oc}^{BH.}(z) + 273)$$

$$r_{от} = 0,7 \text{ [мм]} ; \quad r_0 = r_1 - \delta_3 = 3,7 - 0,1 = 3,6 \text{ [мм]}$$

Розрахуємо температуру внутрішньої частини паливного осердя:

$$t_{oc}^{BH}(0) = 578,008 + \frac{0,93 \cdot 12,46}{4\pi \cdot 1,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \left[1 - \frac{0,7^2}{3,6^2 - 0,7^2} \cdot \ln\left(\frac{0,7}{3,6}\right) \right] = 787,941[^\circ\text{C}]$$

Результати проведених ітерацій занесено у таблицю А.11 додатку А та графічно зображено на рис А.11.

Зміна всіх чотирьох температур поверхонь ТВЕЛ по висоті активної зони для середньо навантаженої ТВЗ зображена на рисунку А.12 додатку А.

А зміна всіх чотирьох температур поверхонь ТВЕЛ по висоті активної зони для максимально навантаженої ТВЗ - на рисунку А.13 додатку А.

1.8 Визначення критичних густин теплових потоків та запасу до кризи теплообміну

Розподіл масового паровмісту:

$$X(z) = \frac{h(z) - h'(z)}{r(z)}$$

де $h(z) = f(P(z); t(z)), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ – ентальпія теплоносія в точці з координатою(z);

$h'(z) = f(t(z)), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ – ентальпія води на лінії насичення,;

$r(z) = f(t(z)), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ – прихована теплота пароутворення.

Визначення критичних густин теплових потоків та запасу до кризи теплообміну зведено до таблиці А.12 додатку А

Знайдемо масовий паровміст:

$$X(0) = \frac{h(0) - h'(0)}{r(0)} = \frac{1368,4 - 1376,8}{1315,6} = -0,617$$

Розподіл масового паровмісту по висоті. наведено в таблиці А.13, додаток А.

Коефіцієнт запасу до кризи:

$$K(Z) = \frac{q_{\text{кр}}(Z)}{\chi \cdot \frac{\bar{q}_l(Z) \cdot n_{\text{ТВ}}}{\Pi_{\text{Т}}}}$$

де $q_{\text{кр}}(Z)$ – критичний тепловий потік у розрахунковому перетині ТВЗ:

$$q_{\text{кр}}(Z) = 0,795 \cdot (1 - \chi(Z))^{n(Z)} \cdot (W\rho)^{m(Z)} \cdot (1 - 0,0185 \cdot P(Z))$$

де $n(Z), m(Z)$ - параметри, які визначаються за формулами

$$n(Z) = 0,105 \cdot P(Z) - 0,5 = 1,18$$

$$n(0) = 0,105 \cdot P(0) - 0,5 = 1,18$$

$$m(Z) = 0,311 \cdot (1 - \chi(Z)) - 0,127 = 0,18208$$

$$m(0) = 0,311 \cdot (1 - \chi(0)) - 0,127 = 0,18208$$

Результати розподілу параметрів $n(Z), m(Z)$ по висоті зведені до таблиці А.14 додатку А.

$$q_{\text{кр}}(0) = 0,795 \cdot (1 - \chi(0))^{n(0)} \cdot (W\rho)^{m(0)} \cdot (1 - 0,0185 \cdot P(0)) = 2,526$$

$$K(0) = \frac{2,526}{\chi \cdot \frac{12,416 \cdot 312}{8,6256}} = 6,04877$$

Результати подальших розрахунків для цієї і решти точок зведемо в таблицю А.15 додатку А.

За результатами розрахунків створив графічне уявлення зміни критичної густини теплового потоку по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ рисунок А.14 додатку А.

Та рисунок А.15 - Зміна запасу до кризи теплообміну по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ.

1.9 Висновки до розділу

Теплогідравлічний розрахунок ТВЗ активної зони реакторної установки ВВЕР-1000 завершено.

Звернемо увагу на значення температури паливного осердя максимально навантаженої ТВЗ в центральному перерізі активної зони, що дорівнює близько 2176°C . Така температура не є допустимою при роботі реакторної установки. Температура плавлення матеріалу 2875°C . Нормальний режим роботи лежить у межах $1500\text{--}1600^{\circ}\text{C}$. У випадку заданому нашими даними, температурний режим роботи порушено в трьох перерізах АЗ з координатами від $-0,95\text{м}$ до $+0,95\text{м}$. Це може бути зумовлене недостатнім відводом теплоти від паливного осердя внаслідок низького коефіцієнту теплопровідності діоксиду урану, який залежить від температури. Чим вища температура, тим менший коефіцієнт теплопровідності. Однак проблема може бути у емпіричній залежності, за якою ми рахували коефіцієнт теплопровідності діоксиду урану. Також маємо проблему з тим, що у нас по всій висоті АЗ присутня ймовірність виникнення кризи теплообміну. Закипання теплоносія першого контуру в активній зоні реакторної установки є недопустим явищем. Коефіцієнт тепловідачі від стінки до пари на порядок нижчий ніж від стінки до води. Тому у випадку досягання теплоносієм температури насичення, коефіцієнт тепловідачі різко падає. Це призводить до значного зростання температури цирконієвої оболонки ТВЕЛ і порушення її допустимого температурного режиму. Як наслідок — порушення цілісності, деформація.

Отже реактор ВВЕР-1000 з запропонованими параметри не може бути узятий до експлуатації.

2 НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТАРНОЇ ПАЛИВНОЇ ЧАРУНКИ РЕАКТОРУ

2.1 Вхідні дані

Вхідні дані, відповідно до варіанту №41 наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Вхідні дані, відповідно до варіанту №41

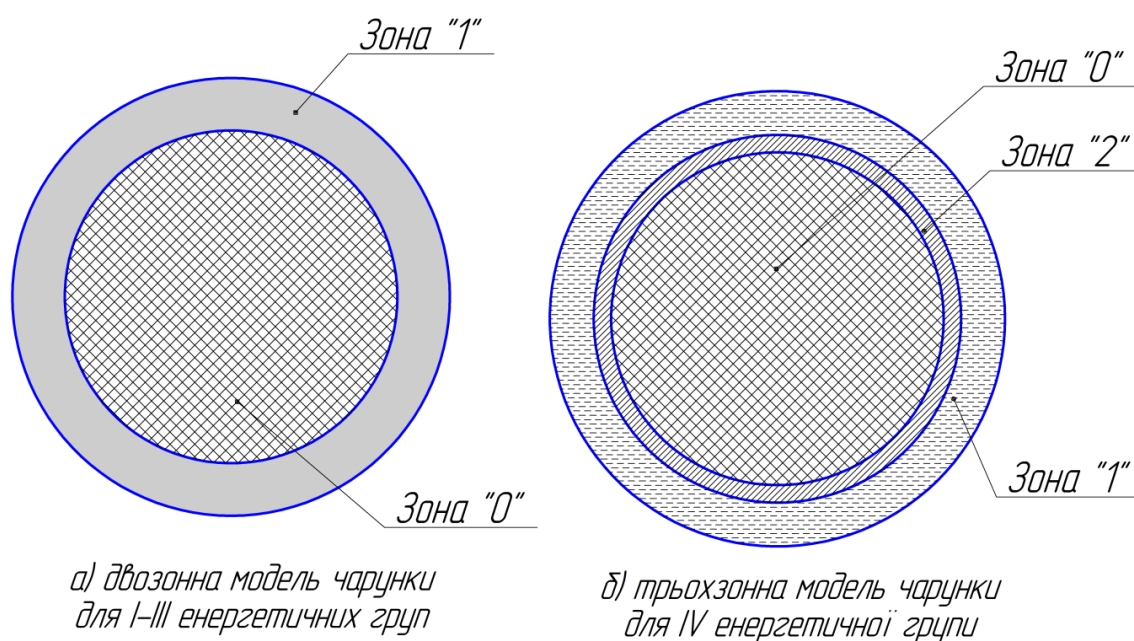
ВВЕР-1000		
Величина	Позначення	Значення
Висота активної зони, см	H	399
Діаметр активної зони, см	D	357
Число елементів в касеті, з них:	$n_{ел}$	331
– число центральних труб (ЦТ)	$n_{ЦТ}$	1
зовнішній діаметр ЦТ, см	$d_{ЦТ}$	1,03
товщина ЦТ, см	$\delta_{ЦТ}$	0,65
зовнішній діаметр НК, см	$d_{НК}$	1,26
– число направляючих каналів (НК)	$n_{НК}$	18
товщина НК, см	$\delta_{НК}$	0,08
– число ТВЕЛів	$n_{ТВ}$	312
діаметр ТВЕЛа, см	$d_{ТВ}$	0,88
діаметр паливної таблетки, см	d_0	0,76
товщина оболонки, см	$\delta_{об}$	0,065
товщина газового зазору, см	$\delta_{ГЗ}$	0,01
Число елементів в діагоналі касети	$n_{діаг}$	21
Товщина кожуха, см	$\delta_{кж}$	0
Зазор між касетами, см	$\delta_{заз}$	0,3
Початкова температура теплоносія, °C	T_0	20
Температура теплоносія на вході, °C	$T_{вх}$	289
Температура теплоносія на виході, °C	$T_{вих}$	322
Тиск теплоносія в активній зоні, МПа	P	16
Крок ТВЕЛ в ТВЗ, см	t	0,11

Продовження таблиці 2.1

Величина	Позначення	Значення
Температура палива, $^{\circ}\text{C}$	T	800
Збагачення палива по ^{235}U , %	C_5	3,64
Вміст Nb в ZrNb сплаві	C_{Nb}	3,00

2.2 Розрахунок розмірів елементарної чарунки

У перших трьох енергетичних групах розрахунковою моделлю може служити двозонна комірка, що складається з палива (індекс “0”) і гомогенної суміші матеріалів оболонки, сповільнювача й конструкційних матеріалів (індекс “1”), як показано на рисунку 1.1.



а) зона «0» – зона палива, зона «1» – гомогенна суміш матеріалу оболонки, сповільнювача й конструкційних матеріалів;

б) зона «0» – зона палива, зона «1» – оболонка, зона «3» – сповільнювач

Рисунок 1.1 – Розрахункова модель чарунки

В даному приближенні (для 1-3 груп) реальна чарунка замінюється двозонною моделлю. Така модель справедлива для нейтронів, що сповільнюються, оскільки потоки нейтронів в оболонці й сповільнювачі мало розрізняють між собою, і при розрахунку відношення цих потоків можна прийняти рівним одиниці. Для четвертої групи розраховується трьохзонна чарунка.

Розмір касети «під ключ»

$$S = n_{\text{діар}} \cdot t \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 21 \cdot 1,1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 20,01 [\text{см}]$$

Розмір касети «під ключ» із урахуванням міжкасетного простору

$$S_2 = S + \delta_{\text{заз}} = 20,01 + 0,3 = 20,31 [\text{см}]$$

Так як ми прийняли, що висота чарунки дорівнює 1 см, то об'єм касети з міжкасетним простором (МКП):

$$V_{\text{МКП}} = S_2^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 20,31^2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 357,1 [\text{см}^3]$$

Об'єм ТВЕЛ, що включає паливо, оболонку та газовий зазор:

$$V_{\text{ТВЕЛ}} = n_{\text{тв}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{тв}}^2}{4} = 312 \cdot \frac{\pi \cdot 0,91^2}{4} = 189,8 [\text{см}^3]$$

Об'єм центральної трубки

$$V_{\text{цт}} = \pi \cdot \delta_{\text{цт}} \cdot (d_{\text{цт}}^3 - \delta_{\text{цт}}) = \pi \cdot 0,1 \cdot (1,03 - 0,65) = 0,32 [\text{см}^3]$$

Об'єм направляючих каналів

$$V_{\text{HK}} = n_{\text{K}} \cdot \pi \cdot \delta_{\text{HK}} \cdot (d_{\text{HK}}^3 - \delta_{\text{HK}}) = 18 \cdot \pi \cdot 0,08 \cdot (1,26^3 - 0,08) = 5,338 [\text{см}^3]$$

Об'єм, що займає вода

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{МКП}} - V_{\text{ТВЕЛ}} - V_{\text{ЦТ}} - V_{\text{HK}} = 357,1 - 189,8 - 0,32 - 5,338 = 161,6 [\text{см}^3]$$

Об'єм палива

$$V_{\text{пал}} = n_{\text{ТВ}} \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = 312 \cdot \frac{\pi \cdot 0,76^2}{4} = 141,5 [\text{см}^3]$$

Об'єм оболонки

$$\begin{aligned} V_{\text{обол}} &= n_{\text{ТВ}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [d_{\text{ТВ}}^2 - (d_0 + 2 \cdot \delta_{\text{ГЗ}})^2] = \\ &= 312 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot [0,91^2 - (0,76 + 2 \cdot 0,01)^2] = 40,68 [\text{см}^3] \end{aligned}$$

Об'єм чарунки

$$V_{\text{чар}} = \frac{V_{\text{МКП}}}{n_{\text{ТВ}}} = \frac{357,1}{312} = 1,144 [\text{см}^3]$$

Діаметр чарунки

$$d_{\text{чар}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{чар}}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1,144}{\pi}} = 1,207 [\text{см}^3]$$

Об'єм зони «0»

$$V_0 = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,76^2}{4} = 0,4536 [\text{см}^3]$$

Об'єм зони «1»

$$V_1 = \frac{\pi \cdot (d_{\text{чар}}^2 - d_{\text{ТВ}}^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (1,207^2 - 0,91^2)}{4} = 0,5362 [\text{см}^3]$$

Об'єм зони «2»

$$V_2 = \frac{\pi \cdot (d_{\text{ТВ}}^2 - d_0^2)}{4} = \frac{\pi \cdot (0,91^2 - 0,76^2)}{4} = 0,1546 [\text{см}^3]$$

Об'єм зони «1'»

$$V_{1'} = V_1 + V_2 = 0,5362 + 0,1546 = 0,6908 [\text{см}^3]$$

Результати розрахунку розмірів елементарної чарунки наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Розрахунок розмірів елементарної чарунки

Параметр	Умовне позначення	Значення
1	2	3
Розмір касети «під ключ», см	S_1	20,01
Розмір касети «під ключ» з урахуванням міжкасетного зазору, см	S_2	20,31
Об'єм МКП, см^3	$V_{\text{МКП}}$	$3,571 \cdot 10^2$
Об'єм твелів, що включає паливо, оболонку та газовий зазор, см^3	$V_{\text{ТВ}}$	$1,898 \cdot 10^2$
Об'єм центральної трубки, см^3	$V_{\text{ЦТ}}$	0,32

Продовження таблиці 2.2

1	2	3
Об'єм кожуха, см^3	$V_{\text{кж}}$	0
Об'єм направляючих каналів, см^3	$V_{\text{нк}}$	5,338
Об'єм, що займає вода, см^3	$V_{\text{H}_2\text{O}}$	$1,616 \cdot 10^2$
Об'єм палива, см^3	$V_{\text{пал}}$	$1,415 \cdot 10^2$
Об'єм оболонки, см^3	$V_{\text{об}}$	$4,068 \cdot 10^1$
Об'єм елементарної чарунки, см^3	$V_{\text{чар}}$	1,144
Діаметр елементарної чарунки, см	$d_{\text{чар}}$	1,207
Об'єм зони "0", см^3	V_0	$4,536 \cdot 10^{-1}$
Об'єм зони "1" (для першої-третьої груп), см^3	V_1	$5,362 \cdot 10^{-1}$
Об'єм зони "2", см^3	V_2	$1,5456 \cdot 10^{-1}$

2.3 Розрахунок ядерних концентрацій

2.3.1 Розрахунок ядерних концентрацій в зоні 0

Знайдемо концентрації ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{16}O , для цього достатньо знайти концентрації атомів необхідних елементів, тому що ядерні концентрації чисельно дорівнюють атомним.

Концентрація молекул UO_2 :

$$N_{\text{UO}_2} = \frac{\gamma_{\text{UO}_2} \cdot N_A}{A_{\text{UO}_2}} = \frac{10,5 \cdot 0,6022 \cdot 10^{24}}{2,7} = 2,342836 \cdot 10^{22} [\text{см}^{-3}],$$

де $A_{UO_2} = A_5 \cdot C_5 + A_8 \cdot (1 - C_5) + 2A_{16} = 235 \cdot 0,0364 + 238(1 - 0,0364) + 2 \cdot 16 = 2,7$,

Число Авогадро $N_A = 0,6022 \cdot 10^{24} \text{ моль}^{-1}$.

$A_5 = 235 \text{ а.о.м.}$, $A_8 = 238 \text{ а.о.м.}$, $A_{16} = 16 \text{ а.о.м.}$ – масові числа ізоотопів у вуглецевих одиницях маси; C_5 – збагачення паливом по ^{235}U ;

щільність урану $\gamma_{UO_2} = 10,5 \text{ г/см}^3$, $10,2 \text{ г/см}^3$ для холодного і гарячого стану реактору відповідно.

Концентрація атомів ^{16}O :

$$N_{16} = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 2,342836 \cdot 10^{22} = 4,685673 \cdot 10^{22} [\text{см}^{-3}],$$

Концентрація атомів ^{235}U :

$$N_5 = C_5 \cdot N_{UO_2} = 0,0364 \cdot 2,3428 = 8,528 \cdot 10^{20} [\text{см}^{-3}],$$

Концентрація атомів ^{238}U :

$$N_8 = N_{UO_2} \cdot (1 - C_5) = 2,342836 \cdot 10^{22} \cdot (1 - 0,0364) = 2,257557 \cdot 10^{22} [\text{см}^{-3}].$$

2.3.2 Ядерні концентрації в зоні 2.

Розглянемо оболонку, що складається з Zr і 1 % Nb. Концентрація атомів цирконію та ніобію:

$$N_{Zr} = \frac{N_A \cdot C_{Zr} \cdot \gamma_{Zr}}{A_{Zr}} = \frac{6,4 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 0,97}{91} = 4,108195 \cdot 10^{21} [\text{см}^{-3}],$$

$$N_{Nb} = \frac{N_A \cdot C_{Nb} \cdot \gamma_{Nb}}{A_{Nb}} = \frac{6,4 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 0,03}{93} = 1,243252 \cdot 10^{20} [\text{см}^{-3}].$$

де $A_{Zr} = 91 \text{ а.о.м.}$, $A_{Nb} = 93 \text{ а.о.м.}$ – масові числа відповідно цирконію і ніобію;

C_{Zr} – масова частка цирконію в сплаві оболонки твелу, %;

C_{Nb} – масова частка ніобію в сплаві оболонки твелу, %.

2.3.3 Ядерні концентрації в зоні 1:

Концентрація атомів води:

$$N_{H_2O} = \frac{\gamma_{H_2O} \cdot N_A}{A_{H_2O}} = \frac{6,022 \cdot 0,6022 \cdot 10^{24}}{18} = 3,345556 \cdot 10^{22} [\text{см}^{-3}],$$

де $\gamma_{H_2O} = f(T = 293,15K) = 6,022 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – для холодного реактора

$\gamma_{H_2O} = f(T = 557,65K) = 7,15 \cdot 10^{-1} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – для гарячого реактора

$$A_{H_2O} = 18 \text{ а.о.м.},$$

Концентрація атомів кисню:

$$N_O = N_{H_2O} = 3,345556 \cdot 10^{22} [\text{см}^{-3}],$$

Концентрація атомів водню:

$$N_{H_2} = 2 \cdot N_{H_2O} = 2 \cdot 3,345556 \cdot 10^{22} = 6,69111 \cdot 10^{22} [\text{см}^{-3}].$$

Результати розрахунку ядерних концентрацій наведені в таблиці 2.3

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку ядерних концентрацій

Характеристики	Значення		Розмірність
	Холодний реактор	Гарячий реактор	
1	2	3	4
Молярна маса UO_2 , M_{UO_2}	270	270	г/моль
Концентрація атомів UO_2 , N_{UO_2}	$2,342836 \cdot 10^{22}$	$2,342836 \cdot 10^{22}$	см^{-3}
Концентрація ядер ^{235}U , N_5	$8,527925 \cdot 10^{20}$	$8,527925 \cdot 10^{20}$	см^{-3}
Концентрація ядер ^{238}U , N_8	$2,257557 \cdot 10^{22}$	$2,257557 \cdot 10^{22}$	см^{-3}

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4
Концентрація ядер ^{16}O , N_{16}	$4,685673 \cdot 10^{22}$	$4,685673 \cdot 10^{22}$	см^{-3}
Концентрація ядер Zr , N_{Zr}	$4,108195 \cdot 10^{21}$	$4,108195 \cdot 10^{21}$	см^{-3}
Концентрація ядер Nb , N_{Nb}	$1,243252 \cdot 10^{20}$	$1,243252 \cdot 10^{20}$	см^{-3}
Концентрація молекул води, $N_{\text{H}_2\text{O}}$	$3,345556 \cdot 10^{22}$	$2,392072 \cdot 10^{22}$	см^{-3}
Гомогенізована концентрація ядер ^{16}O , N_{O}	$3,345556 \cdot 10^{22}$	$3,345556 \cdot 10^{22}$	см^{-3}
Гомогенізована концентрація ядер ^1H , N_{H}	$6,6911 \cdot 10^{22}$	$6,6911 \cdot 10^{22}$	см^{-3}

2.4 Загальні відомості про розрахунок середніх по чарунці перерізів різних видів взаємодій, коефіцієнтів дифузії для кожної групи

Макроскопічний переріз взаємодії виду i в зоні j в енергетичній групі n :

$$\Sigma_{ij}^{(n)} = \frac{\sum_k \Sigma_i^{(n)k} \cdot V^k}{V_j},$$

де $\Sigma_i^{(n)k}$ —макроскопічний перетин виду i матеріалу k в енергетичній групі нейтронів n ;

V^k — об'єм матеріалу k в розглянутій зоні ij ;

V_j — об'єм зони j , сумування ведеться по всім матеріалам зони j .

Після знаходження перерізів по зонам, можна знайти середній по чарунці значення перерізу в кожній групі:

- для першої - третьої групи

$$\Sigma_i^{(n)} = \frac{\Sigma_{i0}^{(n)} + \Sigma_{i1'}^{(n)} \cdot \frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(n)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(n)}}}{1 + \frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(n)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(n)}}},$$

де $\bar{\Phi}_j^{(n)}$ – середній потік нейтронів групи n в зоні j , $1'$ – об'єднана 2 і 1 зона, відповідно об'єм зони $1' - V_{1'} = V_1 + V_2$

- для четвертої групи

$$\Sigma_i^{(4)} = \frac{\Sigma_{i0}^{(4)} + \Sigma_{i1}^{(4)} \cdot \frac{V_1 \cdot \bar{\Phi}_1^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}} + \Sigma_{i2}^{(4)} \cdot \frac{V_2 \cdot \bar{\Phi}_2^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}}}{1 + \frac{V_1 \cdot \bar{\Phi}_1^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}} + \frac{V_2 \cdot \bar{\Phi}_2^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}}}. \quad (2.1)$$

В уран-водних решітках виникають розходження, невеликі, у властивостях середовища в напрямках, паралельному і перпендикулярному паливним блокам.

У паралельному напрямку коефіцієнт дифузії:

- для першої - третьої групи:

$$D_p^{(n)} = \frac{D_0^{(n)} + D_{1'}^{(n)} \cdot \frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(n)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(n)}}}{1 + \frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(n)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(n)}}} \quad (2.2)$$

- для четвертої групи

$$D_p^{(4)} = \frac{D_0^{(4)} + D_1^{(4)} \cdot \frac{V_1 \cdot \bar{\Phi}_1^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}} + D_2^{(4)} \cdot \frac{V_2 \cdot \bar{\Phi}_2^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}}}{1 + \frac{V_1 \cdot \bar{\Phi}_1^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}} + \frac{V_2 \cdot \bar{\Phi}_2^{(4)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(4)}}}$$

де $D_j^{(n)} = \frac{1}{3\Sigma_{trj}^{(n)}}$ – коефіцієнт дифузії зони j

У перпендикулярному напрямку коефіцієнт дифузії визначається через транспортні перетини:

$$D_{\perp}^{(n)} = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{(n)}} = \frac{1}{3 \cdot 0,1829} = 1,8225,$$

де $\Sigma_{tr}^{(n)}$ – транспортний переріз чарунки для енергетичної групи нейтронів n, розраховується по формулі 2.1 та 2.2.

Повний коефіцієнт дифузії для енергетичної групи нейтронів визначається наступним чином:

$$D^{(n)} = \frac{1}{3} \cdot D_{II}^{(n)} + \frac{2}{3} \cdot D_{\perp}^{(n)} = \frac{1}{3} \cdot 1,8466 + \frac{2}{3} \cdot 1,8225 = 1,8305$$

Отже, розрахунок ефективних (гомогенізованих) констант зводиться до визначення відношення середніх потоків у розрахункових зонах.

2.5 Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для першої енергетичної групи нейтронів

Відношення потоків нейтронів в першій групі:

$$\frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(1)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(1)}} = \frac{\Sigma_{x0}^{(1)}}{\Sigma_{x1'}^{(1)}} \cdot \frac{1 - \tilde{Q}_{00}^{(1)}}{\tilde{Q}_{00}^{(1)}} = \frac{0,0523}{0,0918} \cdot \frac{1 - 0,3797}{0,3797} = 6,112083 \cdot 10^{-1}$$

де $\tilde{Q}_{00}^{(1)}$ – ймовірність зіткнення нейтронів з ядрами в паливному блоці, обчислюється через “діючий” перетин:

$$\tilde{Q}_{00}^{(n)} = \frac{\bar{l}_0 \cdot \Sigma_{x0}^{(n)}}{\bar{l}_0 \cdot \Sigma_{x0}^{(n)} + a\gamma_p^{(n)}} = \frac{0,76 \cdot 0,0523}{0,76 \cdot 0,0523 + 1,5 \cdot 0,0433} = 0,3797$$

де $\bar{l}_0$ – середня хорда в паливному блоці, $\bar{l}_0 = d_0$;

$\Sigma_{x0}^{(n)}$ – “діючий” перетин у нульовій зоні в n-й групі енергії нейтронів:

$$\Sigma_{x0}^{(n)} = \Sigma_{a0}^{(n)} + \Sigma_{R0}^{(n)} - (\chi^{(n)} \cdot v_{f0}^{(n)} \cdot \Sigma_{f0}^{(n)}) = 0,0127 + 0,0596 - (0,752 \cdot 2,728 \cdot 0,00976) = 0,00523$$

де $\Sigma_{R0}^{(n)}$ – макроскопічний переріз відводу в зоні 0 (розраховується по формулі 1);

$\Sigma_{a0}^{(n)}$ – макроскопічний переріз поглинання в зоні 0 (розраховується по формулі 1);

$\Sigma_{f0}^{(n)}$ – макроскопічний переріз ділення зони 0 (розраховується по формулі 1);

$\chi^{(n)}$ – доля нейтронів ділення які потрапляють в n-у групу;

$v_{f0}^{(n)}$ – середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу палива зони 0:

$$v_{f0}^{(n)} = \frac{v_{f5}^{(n)} \cdot \Sigma_{f5}^{(n)} + v_{f8}^{(n)} \cdot \Sigma_{f8}^{(n)}}{\Sigma_{f0}^{(n)}} = \frac{2,711 \cdot 0,00099 + 2,73 \cdot 0,00876}{0,00976} = 2,728,$$

де $\Sigma_{f5}^{(n)}$ – макроскопічний переріз ділення ^{235}U , $\Sigma_{f8}^{(n)}$ – макроскопічний переріз ділення ^{238}U ;

$v_{f5}^{(n)}$ – середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{235}U ;

$v_{f8}^{(n)}$ – середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{238}U .

Коефіцієнт затінення в решітці твелів:

$$\gamma_p^{(n)} = \frac{C^{(n)}}{1 + (a - 1)(1 - C^{(n)})} = \frac{6,355358 \cdot 10^{-2}}{1 + (1,5 - 1)(1 - 6,355358 \cdot 10^{-2})} = 4,328605 \cdot 10^{-2}.$$

де a - параметр Белла і дорівнює 1,5.

Коефіцієнт Данкова-Гінзбурга в приближенні Зауера:

$$\begin{aligned} C^{(n)} &= 1 - \frac{\exp(-t_p \cdot \bar{l}_{1'} \cdot \Sigma_{X1'}^{(n)})}{1 + \left(1 + \delta t^{(n)} - t_p\right) \cdot \bar{l}_{1'} \cdot \Sigma_{X1'}^{(n)}} = \\ &= 1 - \frac{\exp(-4,6674 \cdot 10^{-1} \cdot 7,2846 \cdot 10^{-1} \cdot 9,178 \cdot 10^{-2})}{1 + \left(1 + 9,062 \cdot 10^{-3} - 4,6674 \cdot 10^{-1}\right) \cdot 7,2846 \cdot 10^{-1} \cdot 9,178 \cdot 10^{-2}} = 6,355358 \cdot 10^{-2}, \end{aligned}$$

де $\bar{l}_{1'}$ - середня хорда в області поза паливом (двухзонна комірка):

$$\bar{l}_{1'} = \frac{d_1^2 - d_0^2}{d_1} = \frac{1,207^2 - 0,76^2}{1,207} = 7,284582 \cdot 10^{-1}$$

Відносний шаг решітки:

$$t_p = \frac{(t - d_0)}{\bar{l}_{1'}} = \frac{(1,1 - 0,76)}{7,284582 \cdot 10^{-1}} = 4,667392 \cdot 10^{-1}.$$

Поправка Боналумі на форму чарунки:

$$\delta t^{(n)} = \frac{\bar{l}_{1'} \cdot \Sigma_{X1'}^{(n)}}{7 + \frac{17}{3} \cdot \bar{l}_{1'} \cdot \Sigma_{X1'}^{(n)}} = \frac{7,284582 \cdot 10^{-1} \cdot 9,179569 \cdot 10^{-2}}{7 + \frac{17}{3} \cdot 7,284582 \cdot 10^{-1} \cdot 9,179569 \cdot 10^{-2}} = 9,062202 \cdot 10^{-3},$$

де $\Sigma_{X1'}^{(n)}$ - діючий переріз в першій зоні:

$$\Sigma_{X1'}^{(n)} = \Sigma_{a1'}^{(n)} + \Sigma_{R1'}^{(n)} = 1,698576 \cdot 10^{-3} + 9,009711 \cdot 10^{-2} = 9,179569 \cdot 10^{-2}.$$

Описані вище формули, окрім відношення потоків нейтронів в першій групі, використовуються також для 2-ї і 3-ї енергетичної групи нейтронів, тому замість одиниці скрізь, окрім формули “діючого” перетину, проставлено п.

Результати розрахунку НФХ чарунки для першої енергетичної групи нейтронів наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати розрахунку НФХ чарунки для першої енергетичної групи нейтронів

Характеристики	Значення		Розмірність
	Холодний реактор	Гарячий реактор	
1	2	3	4
Переріз поглинання зони 0, $\Sigma_{a0}^{(1)}$	$1,274633 \cdot 10^{-2}$	$1,274633 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Переріз ділення зони 0, $\Sigma_{f0}^{(1)}$	$9,762838 \cdot 10^{-3}$	$9,762838 \cdot 10^{-3}$	см ⁻¹
Переріз відводу зони 0, $\Sigma_{R0}^{(1)}$	$5,958189 \cdot 10^{-2}$	$5,958189 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Транспортний переріз зони 0, $\Sigma_{tr0}^{(1)}$	$1,902479 \cdot 10^{-1}$	$1,902479 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії зони 0, $D_0^{(1)}$	1,642083	1,642083	см
Переріз поглинання зони 1, $\Sigma_{a1}^{(1)}$	$1,438589 \cdot 10^{-3}$	$1,028591 \cdot 10^{-3}$	см ⁻¹
Переріз відводу зони 1, $\Sigma_{R1}^{(1)}$	$1,076667 \cdot 10^{-1}$	$7,698167 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Транспортний переріз зони 1, $\Sigma_{tr1}^{(1)}$	$1,606469 \cdot 10^{-1}$	$1,148625 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії зони 1, $D_1^{(1)}$	2,056528	2,738386	см
Переріз поглинання зони 2, $\Sigma_{a2}^{(1)}$	$2,600488 \cdot 10^{-3}$	$2,600488 \cdot 10^{-3}$	см ⁻¹
Переріз відводу зони 2, $\Sigma_{R2}^{(1)}$	$2,914726 \cdot 10^{-2}$	$2,914726 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Транспортний переріз зони 2, $\Sigma_{tr2}^{(1)}$	$1,560257 \cdot 10^{-1}$	$1,560257 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії зони 2, $D_2^{(1)}$	0,8245271	0,8245271	см
Об'єм зони 1', $V_{1'}$	$6,907664 \cdot 10^{-1}$	$6,907664 \cdot 10^{-1}$	см ³
Переріз поглинання зони 1', $\Sigma_{a1'}^{(1)}$	$1,698576 \cdot 10^{-3}$	$1,38032 \cdot 10^{-3}$	см ⁻¹
Переріз відводу зони 1', $\Sigma_{R1'}^{(1)}$	$9,009711 \cdot 10^{-2}$	$6,627821 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Транспортний переріз зони 1', $\Sigma_{tr1'}^{(1)}$	$1,596129 \cdot 10^{-1}$	$1,240732 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії зони 1', $D_{1'}^{(1)}$	2,066396	2,657026	см
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{235}U , $\nu_{f5}^{(1)}$	2,711	2,711	-

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{238}U , $\nu_{f8}^{(1)}$	2,73	2,73	-
Доля нейтронів ділення які потрапляють в 1-у групу, $\chi^{(1)}$	$7,52 \cdot 10^{-1}$	$7,52 \cdot 10^{-1}$	-
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу палива, $\nu_{f0}^{(1)}$	2,72806	2,72806	-
Діючий переріз в зоні 0, $\Sigma_{x0}^{(1)}$	$5,229974 \cdot 10^{-2}$	$5,229974 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Діючий переріз в зоні 1', $\Sigma_{x1'}^{(1)}$	$9,179569 \cdot 10^{-2}$	$9,179569 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Середня хорда в паливному блоці, $\bar{I}_0$	$7,6 \cdot 10^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-1}$	см
Середня хорда в області поза паливом, $\bar{I}_{1'}$	$7,284582 \cdot 10^{-1}$	$7,284582 \cdot 10^{-1}$	см
Відносний шаг решітки, t_p	$4,667392 \cdot 10^{-1}$	$4,667392 \cdot 10^{-1}$	-
Поправка Боналумі на форму чарунки, $\delta t^{(1)}$	$9,062202 \cdot 10^{-3}$	$6,770771 \cdot 10^{-3}$	-
Параметр Белла, a	1,5	1,5	-
Коефіцієнт Данкова-Гінзбурга в приближенні Зауера, $C^{(1)}$	$6,355358 \cdot 10^{-2}$	$4,745863 \cdot 10^{-2}$	-
Коефіцієнт затінення в решітці твелів, $\gamma_p^{(1)}$	$4,328605 \cdot 10^{-2}$	$3,214765 \cdot 10^{-2}$	-
Ймовірність зіткнення нейтронів з ядрами в паливному блоці, $\tilde{Q}_{00}^{(1)}$	$3,79719 \cdot 10^{-1}$	$4,518373 \cdot 10^{-1}$	-
Відношення потоків нейтронів в першій групі, $\frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(1)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(1)}}$	$9,306863 \cdot 10^{-1}$	$9,377873 \cdot 10^{-1}$	-
Відношення потоків нейтронів в першій групі, $\frac{\bar{\Phi}_{1'}^{(1)}}{\bar{\Phi}_0^{(1)}}$	$6,112083 \cdot 10^{-1}$	$6,158717 \cdot 10^{-1}$	-
Середній по чарунці переріз поглинання, $\Sigma_a^{(1)}$	$7,420764 \cdot 10^{-3}$	$7,245775 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Середній по чарунці переріз ділення, $\Sigma_f^{(1)}$	$5,056667 \cdot 10^{-3}$	$5,038137 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}

Продовження таблиці 2.5

1	2	3	4
Середній по чарунці переріз відводу, $\Sigma_R^{(1)}$	$7,429174 \cdot 10^{-2}$	$6,282256 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Середній по чарунці транспортний переріз, $\Sigma_{tr}^{(1)}$	$1,82901 \cdot 10^{-1}$	$1,654686 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії в паралельному напрямку до осі чарунки, $D_p^{(1)}$	1,846623	2,133262	см
Коефіцієнт дифузії в перпендикулярному напрямку до осі чарунки, $D_{\perp}^{(1)}$	1,822479	2,014481	см
Коефіцієнт дифузії чарунки, $D^{(1)}$	1,830527	2,054075	см
Середній по чарунці добуток числа виходу вторинних нейтронів за одне ділення на переріз ділення, $\nu_{f0}^{(1)} \cdot \Sigma_f^{(1)}$	$1,379489 \cdot 10^{-2}$	$1,374434 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹

2.6 Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для другої енергетичної групи нейтронів

На відміну від першої енергетичної групи нейтронів, де всі перерізи вважаються універсальними, у другій групі деякі мікроскопічні перетини залежать від спектра нейтронів, а він, у свою чергу, визначається вмістом і формою чарунки. Тому для кожного конкретного випадку перетину треба обчислювати заново. Однак, можна обмежитися перерахуванням лише перетину поглинання ^{238}U по наступній емпіричній формулі:

$$\begin{aligned}
 (\sigma_a^8)^{(2)} &= {}^0(\sigma_a^8)^{(2)} \cdot \left[A - B \cdot (d_0 \cdot \Sigma_{a05}^{(2)}) \cdot (d_0 \cdot \Sigma_{a08}^{(2)}) \right] = \\
 &= 0,4282 \cdot 10^{-24} \cdot \left[2,4 - 136900 \cdot (0,76 \cdot 0,00178) \cdot (0,76 \cdot 0,00608) \right] = 6,604 \cdot 10^{-25},
 \end{aligned}$$

де індекс «0» над мікроскопічним перерізом поглинання ^{238}U значить, що він береться по для другої енергетичної групи нейтронів;

коефіцієнти для UO_2 – $A=2,4$, $B=136900$.

Відношення потоків нейтронів в другій групі:

$$\frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(2)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(2)}} = \frac{\Sigma_{X0}^{(2)}}{\Sigma_{X1'}^{(2)}} \cdot \left\{ \frac{1}{\tilde{Q}_{00}^{(2)}} \cdot \frac{\Sigma_{q0}^{(1)}}{\Sigma_{q01}^{(1)}} \cdot \left[1 + \frac{\Sigma_{R1'}^{(1)}}{\Sigma_{q0}^{(1)}} \cdot \frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(1)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(1)}} \right] - 1 \right\} =$$

$$= \frac{\Sigma_{X0}^{(2)}}{\Sigma_{X1'}^{(2)}} \cdot \left\{ \frac{1}{0,1392} \cdot \frac{\Sigma_{q0}^{(1)}}{\Sigma_{q01}^{(1)}} \cdot \left[1 + \frac{\Sigma_{R1'}^{(1)}}{\Sigma_{q0}^{(1)}} \cdot 9,306863 \cdot 10^{-1} \right] - 1 \right\} = 1,141721,$$

де $\Sigma_{q0}^{(1)}, \Sigma_{q01}^{(1)}$ – ефективні перерізи, які визначають число нейтронів, які потрапляють у другу групу за рахунок ділення і відводу з другої групи:

$$\Sigma_{q0}^{(1)} = \frac{\chi^{(2)}}{1 - \chi^{(2)}} \cdot \left[\frac{\Sigma_{X0}^{(1)} + \Sigma_{f08}^{(1)} \cdot v_{f8}^{(1)} \cdot (1 - \chi^{(2)}) \cdot \tilde{Q}_{00}^{(1)}}{\tilde{Q}_{00}^{(1)}} \right] + \Sigma_{R0}^{(1)} =$$

$$= \frac{0,0248}{1 - 0,0248} \cdot \left[\frac{0,0523 + 0,0087 \cdot 2,73 \cdot (1 - 0,0248) \cdot 0,37972}{0,37972} \right] + 0,0596 = 1,1094 \cdot 10^{-1},$$

$$\Sigma_{q01}^{(1)} = \Sigma_{q0}^{(1)} + \frac{\bar{\Phi}_{1'}^{(1)}}{\bar{\Phi}_0^{(1)}} \cdot \Sigma_{R1'}^{(1)} \cdot \frac{\Sigma_{X0}^{(2)}}{\Sigma_{X1'}^{(2)}} \cdot \frac{1 - \tilde{Q}_{00}^{(2)}}{Q_{00}^{(2)}} =$$

$$= 0,11094 + 6,1121 \cdot 10^{-1} \cdot 0,0901 \cdot \frac{0,01778}{0,1192} \cdot \frac{1 - 1,392 \cdot 10^{-1}}{1,392 \cdot 10^{-1}} = 1,6176 \cdot 10^{-1}.$$

$$\text{де } \chi^{(1)} = 1 - \chi^{(2)}$$

Результати розрахунку НФХ чарунки для другої енергетичної групи нейтронів наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати розрахунку НФХ чарунки для другої енергетичної групи нейтронів

Характеристики	Значення		Розмірність
	Холодний реактор	Гарячий реактор	
1	2	3	4
Мікроскопічний переріз поглинання ^{238}U , $(\sigma_a^8)^{(2)}$	$6,604202 \cdot 10^{-25}$	$6,604202 \cdot 10^{-25}$	см^2
Переріз поглинання зони 0, $\Sigma_{a0}^{(2)}$	$7,865304 \cdot 10^{-3}$	$7,865304 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Переріз ділення зони 0, $\Sigma_{f0}^{(2)}$	$1,42314 \cdot 10^{-3}$	$1,42314 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4
Переріз відводу зони 0, $\Sigma_{R0}^{(2)}$	$1,950645 \cdot 10^{-3}$	$1,950645 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони 0, $\Sigma_{tr0}^{(2)}$	$3,86388 \cdot 10^{-1}$	$3,86388 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 0, $D_0^{(2)}$	$8,460039 \cdot 10^{-1}$	$8,487043 \cdot 10^{-1}$	см
Переріз поглинання зони 1, $\Sigma_{a1}^{(2)}$	$1,338222 \cdot 10^{-5}$	$9,568289 \cdot 10^{-6}$	см^{-1}
Переріз відводу зони 1, $\Sigma_{R1}^{(2)}$	$1,492787 \cdot 10^{-1}$	$1,067343 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони 1, $\Sigma_{tr1}^{(2)}$	$3,142681 \cdot 10^{-1}$	$2,247017 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 1, $D_1^{(2)}$	1,06062	1,412277	см
Переріз поглинання зони 2, $\Sigma_{a2}^{(2)}$	$8,791538 \cdot 10^{-4}$	$8,791538 \cdot 10^{-4}$	см^{-1}
Переріз відводу зони 2, $\Sigma_{R2}^{(2)}$	$1,40074 \cdot 10^{-2}$	$1,40074 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони 2, $\Sigma_{tr2}^{(2)}$	$3,275666 \cdot 10^{-1}$	$3,275666 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 2, $D_2^{(2)}$	1,013517	1,013517	см
Об'єм зони 1', $V_{1'}$	$6,907664 \cdot 10^{-1}$	$6,907664 \cdot 10^{-1}$	см^3
Переріз поглинання зони 1', $\Sigma_{a1'}^{(2)}$	$2,071079 \cdot 10^{-4}$	$2,041473 \cdot 10^{-4}$	см^{-1}
Переріз відводу зони 1', $\Sigma_{R1'}^{(2)}$	$1,190103 \cdot 10^{-1}$	$8,598564 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони 1', $\Sigma_{tr1'}^{(2)}$	$3,172438 \cdot 10^{-1}$	$2,477188 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 1', $D_{1'}^{(2)}$	1,049092	1,292075	см
Переріз ділення ізоотопу ^{235}U в зоні 0, $\Sigma_{f05}^{(2)}$	$1,42314 \cdot 10^{-3}$	$1,42314 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Переріз ділення ізоотопу ^{238}U в зоні 0, $\Sigma_{f08}^{(2)}$	0	0	см^{-1}
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{235}U , $\nu_{f5}^{(2)}$	2,433	2,433	-
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{238}U , $\nu_{f8}^{(2)}$	0	0	-
Доля нейтронів ділення які потрапляють в 2-у групу, $\chi^{(2)}$	$2,48 \cdot 10^{-1}$	$2,48 \cdot 10^{-1}$	-
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу палива, $\nu_{f0}^{(2)}$	2,433	2,433	-

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4
Діючий переріз в зоні 0, $\Sigma_{x0}^{(2)}$	$1,778475 \cdot 10^{-2}$	$1,778475 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Діючий переріз в зоні 1', $\Sigma_{x1'}^{(2)}$	$1,192174 \cdot 10^{-1}$	$8,618978 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Поправка Боналумі на форму чарунки, $\delta t^{(2)}$	$1,15915 \cdot 10^{-2}$	$8,535547 \cdot 10^{-3}$	-
Параметр Белла, а	1,5	1,5	-
Коефіцієнт Данкова-Гінзбурга в приближенні Зауера, $C^{(2)}$	$8,134255 \cdot 10^{-2}$	$5,985267 \cdot 10^{-2}$	-
Коефіцієнт затінення в решітці твелів, $\gamma_p^{(2)}$	$5,57397 \cdot 10^{-2}$	$4,071406 \cdot 10^{-2}$	-
Ймовірність зіткнення нейтронів з ядрами в паливному блоці, $\tilde{Q}_{00}^{(2)}$	$1,391637 \cdot 10^{-1}$	$1,812155 \cdot 10^{-1}$	-
Ефективний переріз, $\Sigma_{q0}^{(1)}$	$1,109394 \cdot 10^{-1}$	$1,036894 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Ефективний переріз, $\Sigma_{q01}^{(1)}$	$1,617557 \cdot 10^{-1}$	$1,417458 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Відношення потоків нейтронів в другій групі, $\frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(2)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(2)}}$	1,141721	1,12591	-
Відношення потоків нейтронів в другій групі, $\frac{\bar{\Phi}_{1'}^{(2)}}{\bar{\Phi}_0^{(2)}}$	$6,112083 \cdot 10^{-1}$	$6,158717 \cdot 10^{-1}$	-
Середній по чарунці переріз поглинання, $\Sigma_a^{(2)}$	$7,904516 \cdot 10^{-3}$	$7,960197 \cdot 10^{-3}$	см ⁻¹
Середній по чарунці переріз ділення, $\Sigma_f^{(2)}$	$6,644843 \cdot 10^{-4}$	$6,694263 \cdot 10^{-4}$	см ⁻¹
Середній по чарунці переріз відводу, $\Sigma_R^{(2)}$	$6,435348 \cdot 10^{-2}$	$4,645668 \cdot 10^{-2}$	см ⁻¹
Середній по чарунці транспортний переріз, $\Sigma_{tr}^{(2)}$	$3,574327 \cdot 10^{-1}$	$3,209072 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії в паралельному напрямку до осі чарунки, $D_p^{(2)}$	$9,458779 \cdot 10^{-1}$	1,10106	см
Коефіцієнт дифузії в перпендикулярному напрямку до осі чарунки, $D_{\perp}^{(2)}$	$9,325764 \cdot 10^{-1}$	1,038722	см
Коефіцієнт дифузії чарунки, $D^{(2)}$	$9,370103 \cdot 10^{-1}$	1,059501	см
Середній по чарунці добуток числа виходу вторинних нейтронів за одне ділення на переріз ділення, $v_{f0}^{(2)} \cdot \Sigma_f^{(2)}$	$1,801417 \cdot 10^{-3}$	$1,814815 \cdot 10^{-3}$	см

2.7 Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для третьої енергетичної групи нейтронів

У третій групі, також як і в другій, тільки більшою мірою, перерізи взаємодій залежать від форми і складу чарунки й у першу чергу від палива. Це пояснюється резонансним поглинанням, що впливає на спектр нейтронів, а отже, і на перерізи. Тому тут повинні вважатися не універсальними перерізи радіаційного захоплення й ділення всіх резонансно поглинаючих нуклідів, а також середній по чарунці переріз відводу у теплову групу ($n=4$) $\Sigma_R^{(3)}$.

У зв'язку із цим прийнята наступна схема розрахунку. Спочатку визначаються перерізи поглинання, ділення й відведення (нульове наближення) для всіх нуклідів, що є присутнім у паливі. Мікроскопічний переріз поглинання відтворюючого нукліда (^{238}U) обчислюється через ефективний резонансний інтеграл, а перерізи поглинання й ділення нуклідів, що діляться ^{235}U рахуються через резонансні інтеграли для гомогенного середовища $\Phi_0^{(3)} = \Phi_{1'}^{(3)}$.

Мікроскопічний переріз поглинання відтворюючого нукліда (^{238}U):

$$(\sigma_a^8)^{(3)} = \frac{I_{\text{ЕФ}}^8}{9,0884} = \frac{6,932}{9,0884} = 7,6273,$$

де $I_{\text{ЕФ}}^8$ – ефективний резонансний інтеграл:

$$I_{\text{ЕФ}}^8 = I_0^8 \cdot \left[1 - \beta \cdot \left(\sqrt{\bar{T}} - \sqrt{293,15} \right) \right] = 6,932 \cdot \left[1 - 0,0081 \cdot \left(\sqrt{293,15} - \sqrt{293,15} \right) \right] = 6,932,$$

де $\bar{T}$ – середня температура палива у Кельвінах.

I_0^8 – резонансний інтеграл:

$$I_0^8 = 1,63 + 25,8 \sqrt{\frac{F_0}{M_U}} \gamma_p^{(3)} = 1,63 + 25,8 \sqrt{0,590078 \cdot 0,07157} = 6,931989.$$

F_0/M_U – відношення площі поверхні паливного блоку до маси урану в блоці:

- для реактору в холодному стані

$$\frac{F_0}{M_U} = \frac{0,5686}{C_8} = \frac{0,5686}{0,9636} = 5,900789 \cdot 10^{-1},$$

- для реактору в гарячому стані на потужності

$$\frac{F_0}{M_U} = \frac{0,5854}{C_8} = 6,075135 \cdot 10^{-1},$$

коефіцієнт β :

$$\beta = \left(0,535 + 0,47 \cdot \frac{F_0}{M_U} \right) \cdot 10^{-2} = (0,535 + 0,47 \cdot 0,590078) \cdot 10^{-2} = 0,008205.$$

Мікроскопічний переріз поглинання для ^{235}U :

$$\left(\sigma_a^5 \right)^{(3)} = 21,1 + 18,9 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\text{P.EФ}}^5}{\sigma_{\text{P.EФ}}^5 + 1482}} = 21,1 + 18,9 \cdot \sqrt{\frac{3,4077 \cdot 10^{-22}}{3,4077 \cdot 10^{-22} + 1482}} = 2,927 \cdot 10^{-23}.$$

Мікроскопічний переріз ділення для ^{235}U :

$$(\sigma_f^5)^{(3)} = 37,3 + 26,8 \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{\text{P.EФ}}^5}{\sigma_{\text{P.EФ}}^5 + 1482}} = 37,3 + 26,8 \cdot \sqrt{\frac{3,4077 \cdot 10^{-22}}{3,4077 \cdot 10^{-22} + 1482}} = 1,803 \cdot 10^{-23},$$

де $\sigma_{\text{P.EФ}}^5$ – ефективний переріз, потенційного розсіювання суміші, віднесене до одного атома поглинач (вважається, що концентрація ядер ^{235}U значно менше концентрації ядер основного поглинач – ^{238}U):

$$\sigma_{\text{P.EФ}}^5 = \frac{N_8}{N_5} \cdot \left(8,7 + 98,8 \cdot \frac{F_0}{M_U} \cdot \gamma_p^{(3)} \right) = \frac{2,2575 \cdot 10^{22}}{8,528 \cdot 10^{20}} \cdot (8,7 + 98,8 \cdot 0,5901 \cdot 0,0521) = 3,4077 \cdot 10^{-22}.$$

Універсальні значення середніх по чарунці мікроскопічних перетинів поглинання і відведення визначаються, відповідно, наступним чином:

$${}^0\Sigma_a^{(3)} = \frac{\Sigma_{a0}^{(3)} + \Sigma_{a1'}^{(3)} \frac{V_{1'}}{V_0}}{1 + \frac{V_{1'}}{V_0}} = \frac{4,419678 \cdot 10^{-2} + 1,918632 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5227}{1 + 1,5227} = 1,8677 \cdot 10^{-2},$$

$${}^0\Sigma_R^{(3)} = \frac{\Sigma_{R0}^{(3)} + \Sigma_{R1'}^{(3)} \frac{V_{1'}}{V_0}}{1 + \frac{V_{1'}}{V_0}} = \frac{2,409926 \cdot 10^{-3} + 0,118454 \cdot 1,5227}{1 + 1,5227} = 7,2454 \cdot 10^{-2}.$$

Отримані значення всіх перерізів залежать від частки резонансного поглинання, тобто від ϕ (ймовірність уникнення резонансного захвату). Однак відмінність дійсних значень $\Sigma_a^{(3)}$ і $v_{f0}^{(3)} \cdot \Sigma_f^{(3)}$ від універсальних становить, для реальних тепловиділяючих касет, не більше 1%. Тому будемо вважати не універсальним (залежним від ϕ) тільки переріз відводу.

Ймовірність уникнення резонансного захоплення можна розрахувати по апроксимаційним формулам:

- при $x < 1/3$

$$\varphi' = 1 - 0,9 \cdot x = 1 - 0,9 \cdot 2,577872 \cdot 10^{-1} = 7,679915 \cdot 10^{-1},$$

Коефіцієнт x визначається по залежності:

$$x = \gamma_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\Sigma_a^{(3)}}{{}^0\Sigma_R^{(3)}} = 1 \cdot \frac{1,8677 \cdot 10^{-2}}{7,2454 \cdot 10^{-2}} = 2,577872 \cdot 10^{-1}$$

Дійсне значення усередненого по чарунці перерізу відводу:

$$\Sigma_R^{(3)} = f(\varphi') {}^0\Sigma_R^{(3)} = 8,533239 \cdot 10^{-1} \cdot 7,2454 \cdot 10^{-2} = 6,182675 \cdot 10^{-2}$$

де

$$f(\varphi') = \frac{\varphi'}{1 - \varphi'} \sqrt{\gamma_{\text{H}_2\text{O}}} \frac{\Sigma_a^{(3)}}{{}^0\Sigma_R^{(3)}} = \frac{0,76799}{1 - 0,76799} \sqrt{1} \frac{1,8677 \cdot 10^{-2}}{7,2454 \cdot 10^{-2}} = 8,533239 \cdot 10^{-1}.$$

Уточнене значення ймовірності уникнення резонансного захоплення визначається:

$$\varphi = \frac{\Sigma_R^{(3)}}{\Sigma_R^{(3)} + {}^0\Sigma_a^{(3)}} = \frac{6,182675 \cdot 10^{-2}}{6,182675 \cdot 10^{-2} + 1,8677 \cdot 10^{-2}} = 7,679915 \cdot 10^{-1}.$$

Результати розрахунку НФХ чарунки для третьої енергетичної групи нейтронів наведено в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Результати розрахунку НФХ чарунки для третьої енергетичної групи нейтронів

Характеристики	Значення		Розмірність
	Холодний реактор	Гарячий реактор	
1	2	3	4
Мікроскопічний переріз поглинання ^{238}U , $(\sigma_a^8)^{(3)}$	$7,627293 \cdot 10^{-25}$	$5,965051 \cdot 10^{-25}$	см^2
Відношення площі поверхні паливного блоку до маси урану в блоці, $\frac{F_0}{M_U}$	$5,900789 \cdot 10^{-1}$	$6,075135 \cdot 10^{-1}$	$\text{см}^2/\text{г}$
Коефіцієнт, β	$8,123371 \cdot 10^{-3}$	$8,205313 \cdot 10^{-3}$	-
Резонансний інтеграл для ізотопу ^{238}U , I_0^8	6,931989	6,219133	см^2
Ефективний резонансний інтеграл для ізотопу ^{238}U , $I_{\text{ЕФ}}^8$	6,931989	5,421277	см^2
Мікроскопічний переріз поглинання ^{235}U , $(\sigma_a^5)^{(3)}$	$2,927194 \cdot 10^{-23}$	$2,964307 \cdot 10^{-23}$	см^2
Мікроскопічний переріз ділення ^{235}U , $(\sigma_f^5)^{(3)}$	$1,80331 \cdot 10^{-23}$	$1,7887 \cdot 10^{-23}$	см^2
Ефективний переріз, потенційного розсіювання суміші, віднесене до одного атома поглинача, $\sigma_{\text{Р.ЕФ}}^5$	$3,407673 \cdot 10^{-22}$	$3,805501 \cdot 10^{-22}$	см^2
Переріз поглинання зони 0, $\Sigma_{a0}^{(3)}$	$4,419678 \cdot 10^{-2}$	$4,020622 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Переріз ділення зони 0, $\Sigma_{f0}^{(3)}$	$1,537849 \cdot 10^{-2}$	$1,525403 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Переріз відводу зони 0, $\Sigma_{R0}^{(3)}$	$2,409926 \cdot 10^{-3}$	$2,409926 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони 0, $\Sigma_{tr0}^{(3)}$	$3,724343 \cdot 10^{-1}$	$3,724343 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 0, $D_0^{(3)}$	$8,000684 \cdot 10^{-1}$	$8,078057 \cdot 10^{-1}$	см
Переріз поглинання зони 1, $\Sigma_{a1}^{(3)}$	$1,68616 \cdot 10^{-3}$	$1,205604 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Переріз відводу зони 1, $\Sigma_{R1}^{(3)}$	$1,524168 \cdot 10^{-1}$	$1,08978 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони 1, $\Sigma_{tr1}^{(3)}$	$5,59136 \cdot 10^{-1}$	$3,997822 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 1, $D_1^{(3)}$	$5,943655 \cdot 10^{-1}$	$7,914321 \cdot 10^{-1}$	см
Переріз поглинання зони 2, $\Sigma_{a2}^{(3)}$	$2,72509 \cdot 10^{-3}$	$2,72509 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Переріз відводу зони 2, $\Sigma_{R2}^{(3)}$	$6,348726 \cdot 10^{-1}$	$6,348726 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони 2, $\Sigma_{tr2}^{(3)}$	$2,936299 \cdot 10^{-1}$	$2,936299 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 2, $D_2^{(3)}$	1,124777	1,124777	см

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4
Переріз поглинання зони $1'$, $\Sigma_{a1'}^{(3)}$	$1,918632 \cdot 10^{-3}$	$1,545606 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Переріз відводу зони $1'$, $\Sigma_{R1'}^{(3)}$	$1,18454 \cdot 10^{-1}$	$8,473509 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Транспортний переріз зони $1'$, $\Sigma_{tr1'}^{(3)}$	$4,997262 \cdot 10^{-1}$	$3,760295 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони $1'$, $D_{1'}^{(3)}$	$6,644808 \cdot 10^{-1}$	$8,828265 \cdot 10^{-1}$	см
Переріз ділення ізоотопу ^{235}U в зоні 0, $\Sigma_{f05}^{(3)}$	$1,537849 \cdot 10^{-2}$	$1,525403 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Переріз ділення ізоотопу ^{238}U в зоні 0, $\Sigma_{f08}^{(3)}$	0	0	см^{-1}
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{235}U , $\nu_{f5}^{(3)}$	2,426	2,426	-
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу ^{238}U , $\nu_{f8}^{(3)}$	0	0	-
Доля нейтронів ділення які потрапляють в 3-у групу, $\chi^{(3)}$	0	0	-
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу палива, $\nu_{f0}^{(3)}$	2,426	2,426	-
Діючий переріз в зоні 0, $\Sigma_{x0}^{(3)}$	$4,66067 \cdot 10^{-2}$	$4,261615 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Діючий переріз в зоні $1'$, $\Sigma_{x1'}^{(3)}$	$1,203726 \cdot 10^{-1}$	$8,628069 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Поправка Боналумі на форму чарунки, $\delta t^{(3)}$	$1,169637 \cdot 10^{-2}$	$8,544114 \cdot 10^{-3}$	-
Параметр Белла, a	1,16	1,16	-
Коефіцієнт Данкова-Гінзбурга в приближенні Зауера, $C^{(3)}$	$8,208073 \cdot 10^{-2}$	$5,991286 \cdot 10^{-2}$	-
Коефіцієнт затінення в решітці твелів, $\gamma_p^{(3)}$	$7,156952 \cdot 10^{-2}$	$5,20794 \cdot 10^{-2}$	-
Ймовірність зіткнення нейтронів з ядрами в паливному блоці, $\tilde{Q}_{00}^{(3)}$	$2,480897 \cdot 10^{-1}$	$2,93087 \cdot 10^{-1}$	-
Відношення потоків нейтронів в третій групі, $\frac{V_{1'} \cdot \bar{\Phi}_{1'}^{(3)}}{V_0 \cdot \bar{\Phi}_0^{(3)}}$	1,522699	1,522699	-
Відношення потоків нейтронів в третій групі, $\frac{\bar{\Phi}_{1'}^{(3)}}{\bar{\Phi}_0^{(3)}}$	1	1	-
Середній по чарунці переріз	$1,867772 \cdot 10^{-2}$	$1,687071 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}

поглинання, $\Sigma_a^{(3)}$			
------------------------------	--	--	--

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4
Середній по чарунці переріз ділення, $\Sigma_f^{(3)}$	$6,096045 \cdot 10^{-3}$	$6,046709 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Середній по чарунці переріз відводу, ${}^0\Sigma_R^{(3)}$	$7,245403 \cdot 10^{-2}$	$5,210133 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Середній по чарунці транспортний переріз, $\Sigma_{tr}^{(3)}$	$4,679453 \cdot 10^{-1}$	$3,914751 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії в паралельному напрямку до осі чарунки, $D_p^{(3)}$	$7,182278 \cdot 10^{-1}$	$8,530882 \cdot 10^{-1}$	см
Коефіцієнт дифузії в перпендикулярному напрямку до осі чарунки, $D_{\perp}^{(3)}$	$7,12334 \cdot 10^{-1}$	$8,514804 \cdot 10^{-1}$	см
Коефіцієнт дифузії чарунки, $D^{(3)}$	$7,142986 \cdot 10^{-1}$	$8,520163 \cdot 10^{-1}$	см
Коефіцієнт, χ	$2,577872 \cdot 10^{-1}$	$2,315211 \cdot 10^{-1}$	-
Коефіцієнт, $f(\phi')$	$8,533239 \cdot 10^{-1}$	1,040225	-
Ймовірність уникнення резонансного захоплення, ϕ'	$7,679915 \cdot 10^{-1}$	$7,91631 \cdot 10^{-1}$	-
Дійсне значення усередненого по чарунці перерізу відводу, $\Sigma_R^{(3)}$	$6,182675 \cdot 10^{-2}$	$5,41971 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Уточнене значення ймовірності уникнення резонансного захоплення, ϕ	$7,679915 \cdot 10^{-1}$	$7,626111 \cdot 10^{-1}$	-
Середній по чарунці добуток числа виходу вторинних нейтронів за одне ділення на переріз ділення, $\nu_{f0}^{(3)} \cdot \Sigma_f^{(3)}$	$1,652638 \cdot 10^{-2}$	$1,639263 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}

2.8 Нейтронно-фізичні характеристики розрахункової чарунки для четвертої енергетичної групи нейтронів

У водо-водяних енергетичних реакторах основна частка ділення ядер (~85...90%) відбувається під дією нейтронів четвертої групи. Тому НФХ цієї групи повинні бути визначені точно.

Точність розрахунку в основному визначається способом усереднення макроскопічних перерізів. При усередненні перерізів, що враховує ефект гетерогенних ґраток, температура нейтронного газу визначається для кожної зони окремо. В даному розрахунку застосовується метод Хонека для усереднення макроскопічних перетинів, а відносини середніх по зонах потоків знаходять методом АБГ (Амуаля-Бенуа-Горовиця).

Температура нейтронного газу в зоні сповільнювача:

$$\begin{aligned}\bar{T}_{H.G_1} &= T_{\text{теп}} \left[1 + \frac{3\gamma_{H_2O}(t_{a.z.})}{\gamma_{H_2O}(t_{\text{теп}})} \left(\overline{\Sigma_{a1}^{(4)}} + \overline{\Sigma_{a2}^{(4)}} \frac{V_2 \bar{\Phi}_2}{V_1 \bar{\Phi}_1} + \overline{\Sigma_{a0}^{(4)}} \frac{V_0 \bar{\Phi}_0}{V_1 \bar{\Phi}_1} \right) \right] = \\ &= 293,15 \left[1 + \frac{3}{1} \left(1,438139 \cdot 10^{-2} + 5,711822 \cdot 10^{-3} \frac{0,1545 \cdot 1,0459}{0,5362 \cdot 1,144} + 3,737251 \cdot 10^{-1} \frac{0,4536}{0,5362 \cdot 1,144} \right) \right] = \\ &= 5,501664 \cdot 10^2 [\text{K}]\end{aligned}$$

де: $T_{\text{теп}}$, $t_{\text{теп}}$ – середня температура теплоносія (сповільнювача) у Кельвінах і градусах Цельсія відповідно; $\overline{\Sigma_{ai}^{(4)}}$ – макроскопічний переріз поглинання в і-й зоні чарунки.

Макроскопічний переріз взаємодії виду j в і-й зоні чарунки:

$$\overline{\Sigma_{ji}^{(4)}} = \Sigma_{ji}^{(4)}(2200) \frac{g_i}{\tilde{v}_{H.G_i}} \quad (2.8.1)$$

де $\Sigma_{ji}^{(4)}(2200)$ – переріз взаємодії виду j в і-й зоні чарунки при швидкості нейтронів 2200 м/с (у зоні 0 з урахуванням відхилення від закону $1/v$ цей переріз визначається за допомогою g-фактору, для інших зон g-фактор дорівнює одиниці); $\tilde{v}_{H.G_i}$ – середня безрозмірна швидкість газу в і-й зоні чарунки (віднесена до швидкості $v=2200$ м/с).

Середні безрозмірні швидкості нейтронів в окремих зонах розраховують наступним чином:

- у сповільнювачі:

$$\tilde{v}_{H.\Gamma_1} = 1,128 \sqrt{\frac{\bar{T}_{H.\Gamma_1}}{293,15}} = 1,128 \sqrt{\frac{5,501664 \cdot 10^2}{293,15}} = 1,545; \quad (2.8.2)$$

- у паливі:

$$\tilde{v}_{H.\Gamma_0} = \tilde{v}_{H.\Gamma_1} + 0,3\beta = 1,545 + 0,3 \cdot 0,23745 = 1,6165; \quad (2.8.3)$$

- в зоні оболонки:

$$\tilde{v}_{H.\Gamma_2} = \frac{1}{2}(\tilde{v}_{H.\Gamma_0} + \tilde{v}_{H.\Gamma_1}) = \frac{1}{2}(1,6165 + 1,545) = 1,5809, \quad (2.8.4)$$

де β – коефіцієнт, що враховує спектр у паливі:

$$\beta = \frac{0,76 \cdot 0,373725 \cdot (1 - 0,24384)}{1 - \frac{2,405597 \cdot 10^{-1}}{6,142849 \cdot 10^{-1}} \cdot 2,438421 \cdot 10^{-1}} = 2,3745 \cdot 10^{-1}. \quad (2.8.5)$$

Повний переріз взаємодії у зоні j:

$$\overline{\Sigma_{tj}^{(4)}} = \overline{\Sigma_{aj}^{(4)}} + \overline{\Sigma_{sj}^{(4)}} \approx \overline{\Sigma_{trj}^{(4)}}.$$

Ймовірність того, що нейтрон, що народився в паливі, матиме в паливі своє перше зіткнення

$$P_{00} = \frac{2d_0 \overline{\Sigma_{t0}^{(4)}}}{2 + d_0 \overline{\Sigma_{t0}^{(4)}}} - \frac{d_0 \overline{\Sigma_{t0}^{(4)}}}{3 + d_0 \overline{\Sigma_{t0}^{(4)}}} = \frac{2 \cdot 0,76 \cdot 0,6142849}{2 + 0,76 \cdot 0,6142849} - \frac{0,76 \cdot 0,6142849}{3 + 0,76 \cdot 0,6142849} = 2,438421 \cdot 10^{-1}$$

Не відомі заздалегідь потоки і їхні відношення (див. формулу 2.8.1) в зонах комірки і температура нейтронного газу визначаються методом ітерацій.

У першому наближенні розраховують середні безрозмірні швидкості нейтронів по формулам 2.8.2-2.8.4 і по формулі 2.8.5 корегують значення перерізів взаємодій, а також приймається: $\frac{\bar{\Phi}_0^{(4)}}{\bar{\Phi}_1^{(4)}} = \frac{\bar{\Phi}_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_1^{(4)}} = 1$

Відхилення поведінки перерізів поглинання й ділення для ^{235}U (основний поглинач нейтронів 4-ї енергетичної групи) від закону $1/v$ враховуються g-факторами відповідно:

$$g_a^5 = 0,9628 - 0,0632 \left(\frac{\tilde{v}_{\text{H.}\Gamma_0}}{1,128} - 1 \right) = 0,9628 - 0,0632 \left(\frac{1,6165}{1,128} - 1 \right) = 0,935428,$$

$$g_f^5 = 0,9698 - 0,076 \left(\frac{\tilde{v}_{\text{H.}\Gamma_0}}{1,128} - 1 \right) = 0,9698 - 0,076 \left(\frac{1,6165}{1,128} - 1 \right) = 0,9361.$$

У наступних наближеннях відношення середніх потоків визначають за допомогою модифікованого інтегрально-транспортного методу АБГ, у якому для сповільнювача використовується дифузійне наближення, в області палива - ітераційний метод, потік нейтронів в оболонці (зона 2) залежить від r лінійно (це справедливо, тому що оболонка твелу тонка і виготовляється з слабо поглинаючого нейтрони матеріалу).

Відношення середніх потоків в оболонці й паливі в припущенні про лінійність потоку нейтронів:

$$\frac{\bar{\Phi}_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}} = \frac{\bar{\Phi}_0^{(4)}(r_0)}{\bar{\Phi}_0^{(4)}} + \frac{1}{2} \frac{\delta \Phi_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$$

де $\frac{\bar{\Phi}_0^{(4)}(r_0)}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$ – відношення потоку на поверхні паливного блоку до середнього

потоку в паливі;

$\frac{\delta\Phi_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$ – відношення перепаду потоку нейтронів на оболонці до

середнього потоку в паливі.

Відношення потоку на поверхні паливного блоку до середнього потоку в паливі:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\Phi}_0^{(4)}(r_0)}{\bar{\Phi}_0^{(4)}} &= 1 + \frac{\bar{\Sigma}_{a0}^{(4)}}{\bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}} A \left[1 + \alpha \left(\frac{\bar{\Sigma}_{s0}^{(4)}}{\bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}} \right) + \beta' \left(\frac{\bar{\Sigma}_{s0}^{(4)}}{\bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}} \right)^2 \right] = 1 + \frac{0,3737251}{0,614285} \cdot 0,07297521 \times \\ &\times \left[1 + 1,543808 \cdot 10^{-2} \left(\frac{0,2405597}{0,614285} \right) + 9,647925 \cdot 10^{-3} \left(\frac{0,2405597}{0,614285} \right)^2 \right] = 1,044732 \\ \text{де} \quad A &= 0,2707 \left(\frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \right) + 0,1796 \left(\frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \right)^2 = \\ &= 0,2707 \left(\frac{0,76 \cdot 0,614285}{2} \right) + 0,1796 \left(\frac{0,76 \cdot 0,614285}{2} \right)^2 = 7,297521 \cdot 10^{-2} \\ \alpha &= 0,067 \left(\frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \right) - 0,0037 \left(\frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \right)^2 = \\ &= 0,067 \left(\frac{0,76 \cdot 0,614285}{2} \right) - 0,0037 \left(\frac{0,76 \cdot 0,614285}{2} \right)^2 = 1,54381 \cdot 10^{-2} \quad \text{при } 0 \leq \frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \leq 20, \\ \beta' &= 0,046 \left(\frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \right) - 0,02 \left(\frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \right)^2 = \\ &= 0,046 \left(\frac{0,76 \cdot 0,614285}{2} \right) - 0,02 \left(\frac{0,76 \cdot 0,614285}{2} \right)^2 = 9,6479 \cdot 10^{-3} \quad \text{при } 0 \leq \frac{d_0 \bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}}{2} \leq 1, \end{aligned}$$

Відношення перепаду потоку нейтронів на оболонці до середнього потоку в паливі:

$$\frac{\delta\Phi_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}} = \aleph_2^2 \frac{\overline{\Sigma_{a0}^{(4)}}}{\overline{\Sigma_{a2}^{(4)}}} \frac{\delta_{o6} d_0}{4} = 3,01508 \cdot 10^{-3} \frac{3,737251 \cdot 10^{-1}}{5,711822 \cdot 10^{-3}} \frac{0,065 \cdot 0,76}{4} = 2,436371 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{де } \aleph_2^2 = 3 \overline{\Sigma_{a2}^{(4)}} \overline{\Sigma_{t2}^{(4)}} = 3 \cdot 5,711822 \cdot 10^{-3} \cdot 1,759556 \cdot 10^{-1} = 3,01508 \cdot 10^{-3}.$$

Відношення середніх потоків нейтронів у зоні сповільнювача й в паливі:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{\Phi}_1^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}} &= \frac{\bar{\Phi}_0^{(4)}(r_0)}{\bar{\Phi}_0^{(4)}} + \frac{\delta\Phi_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}} + (q_1^\partial + \delta) \left(1 + \frac{\overline{\Sigma_{a2}^{(4)}} V_2 \bar{\Phi}_2^{(4)}}{\overline{\Sigma_{a0}^{(4)}} V_0 \bar{\Phi}_0^{(4)}} \right) \frac{V_0 \overline{\Sigma_{a0}^{(4)}}}{V_1 \overline{\Sigma_{a1}^{(4)}}} = \\ &= 1,044732 + 2,436371 \cdot 10^{-3} + (4,415962 \cdot 10^{-4} + 3,943772 \cdot 10^{-3}) \times \\ &\times \left(1 + \frac{5,711822 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15456}{0,373725 \cdot 0,4536} 1,04595 \right) \frac{0,4536 \cdot 0,373725}{0,5362 \cdot 1,438139 \cdot 10^{-2}} = 1,1441087, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} q_1^\partial &= \frac{\aleph_1^2 d_1^2}{8} \left[\frac{\psi^2}{\psi^2 - 1} \ln \psi - \frac{3}{4} + \frac{1}{4\psi^2} \right] = \\ &= \frac{4,224254 \cdot 10^{-2} \cdot 1,207^2}{8} \left[\frac{1,371591^2}{1,371591^2 - 1} \ln 1,371591 - \frac{3}{4} + \frac{1}{4 \cdot 1,371591^2} \right] = 4,415962 \cdot 10^{-4}, \end{aligned}$$

$$\aleph_1^2 = 3 \overline{\Sigma_{a1}^{(4)}} \overline{\Sigma_{tr1}^{(4)}} = 3 \cdot 1,438139 \cdot 10^{-2} \cdot 0,979102 = 4,224254 \cdot 10^{-2},$$

$$\psi = \frac{d_1}{d_{TB}} = \frac{1,207}{0,88} = 1,371591,$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\aleph_1^2 (d_1^2 - d_{TB}^2)}{4} \cdot \frac{1}{d_{TB} \overline{\Sigma_{t1}^{(4)}}} \left(\xi - \frac{2}{3} \right) = \\ &= \frac{4,224254 \cdot 10^{-2} (1,207^2 - 0,88^2)}{4} \cdot \frac{1}{0,88 \cdot 0,979102} \left(1,138145 - \frac{2}{3} \right) = 3,943772 \cdot 10^{-3}, \end{aligned}$$

$$\xi = \frac{\left(0,7223 - \frac{0,033}{\psi} + \frac{0,314}{\psi^2}\right) \frac{\overline{\Sigma_{t1}^{(4)} d_{TB}}}{2} + 0,097 + \frac{2,646}{\psi}}{\frac{\overline{\Sigma_{t1}^{(4)} d_{TB}}}{2} + \frac{2,3}{\psi}} =$$

$$= \frac{\left(0,7223 - \frac{0,033}{1,371591} + \frac{0,314}{1,371591^2}\right) \frac{0,979102 \cdot 0,88}{2} + 0,097 + \frac{2,646}{1,371591}}{\frac{0,979102 \cdot 0,88}{2} + \frac{2,3}{1,371591}} = 1,138145.$$

Розрахунок повторюють доти, поки $m+1$ -ше наближення для $\bar{T}_{H.G_1}$, $\frac{\bar{\Phi}_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$,

$\frac{\bar{\Phi}_1^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$ не буде досить мало відрізнятися від попереднього m -го наближення.

Було проведено 10 ітерацій

Таблиця 2.8.1 – Значення проміжних ітерацій

Номер ітерації	Температура нейтронного газу в зоні сповільнювача, $\bar{T}_{H.G_1}$	Відношення середніх потоків нейтронів у зоні сповільнювача й в паливі, $\frac{\bar{\Phi}_i^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$
1	683,2704	0,611208
2	523,6081	1,126426
3	550,168403	1,148823
4	550,160183	1,142952
5	550,193128	1,144399
6	550,061105	1,144037
7	550,590446	1,144127
8	548,472412	1,144105
9	557,015826	1,14411

Наведені дані 10-ої ітерації

Після цього визначають середні по чарунці НФХ для четвертої енергетичної групи нейтронів.

Результати розрахунку НФХ чарунки для четвертої енергетичної групи нейтронів наведено в таблиці 2.8.2.

Таблиця 2.8.2 – Результати розрахунку НФХ чарунки для четвертої енергетичної групи нейтронів

Характеристики	Значення		Розмірність
	Холодний реактор	Гарячий реактор	
1	2	3	4
Ймовірність того, що нейтрон, що народився в паливі, матиме в паливі своє перше зіткнення, P_{00}	$2,438421 \cdot 10^{-1}$	$1,851203 \cdot 10^{-1}$	-
Коефіцієнт, β	$2,374485 \cdot 10^{-1}$	$1,75436 \cdot 10^{-1}$	-
Середня безрозмірна швидкість нейтронів зони 0, $\bar{v}_{H.G_0}$	1,616532	2,227317	-
Фактор, g_a^5	$9,354284 \cdot 10^{-1}$	$9,012071 \cdot 10^{-1}$	-
Фактор, g_f^5	$9,361068 \cdot 10^{-1}$	$8,946607 \cdot 10^{-1}$	-
Переріз поглинання зони 0, $\bar{\Sigma}_{a0}^{(4)}$	$3,737251 \cdot 10^{-1}$	$2,623189 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Переріз ділення зони 0, $\bar{\Sigma}_{f0}^{(4)}$	$2,881545 \cdot 10^{-1}$	$1,99876 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Переріз розсіювання зони 0, $\bar{\Sigma}_{s0}^{(4)}$	$2,405597 \cdot 10^{-1}$	$1,745923 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Повний переріз зони 0, $\bar{\Sigma}_{t0}^{(4)}$	$6,142849 \cdot 10^{-1}$	$4,369113 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії зони 0, $D_0^{(4)}$	$5,426352 \cdot 10^{-1}$	$7,629294 \cdot 10^{-1}$	см
Середня безрозмірна швидкість нейтронів зони 1, $\bar{v}_{H.G_1}$	1,545297	2,174686	-
Переріз поглинання зони 1, $\bar{\Sigma}_{a1}^{(4)}$	$1,438139 \cdot 10^{-2}$	$7,306719 \cdot 10^{-3}$	см ⁻¹
Переріз розсіювання зони 1, $\bar{\Sigma}_{s1}^{(4)}$	$9,647204 \cdot 10^{-1}$	$4,901431 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Повний переріз зони 1, $\bar{\Sigma}_{t1}^{(4)}$	$9,791018 \cdot 10^{-1}$	$4,974499 \cdot 10^{-1}$	см ⁻¹
Коефіцієнт дифузії зони 1, $D_1^{(4)}$	$3,404475 \cdot 10^{-1}$	$6,700828 \cdot 10^{-1}$	см

Продовження таблиці 2.8.2

1	2	3	4
Середня безрозмірна швидкість нейтронів зони 2, $\bar{v}_{H,\Gamma_2}$	1,580914	2,201001	-
Переріз поглинання зони 2, $\bar{\Sigma}_{a2}^{(4)}$	$5,711822 \cdot 10^{-3}$	$4,102633 \cdot 10^{-3}$	см^{-1}
Переріз розсіювання зони 2, $\bar{\Sigma}_{s2}^{(4)}$	$1,702437 \cdot 10^{-1}$	$1,222811 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Повний переріз зони 2, $\bar{\Sigma}_{t2}^{(4)}$	$1,759556 \cdot 10^{-1}$	$1,263837 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії зони 2, $D_2^{(4)}$	1,894414	2,637465	см
Доля нейтронів ділення які потрапляють в 4-у групу, $\chi^{(4)}$	0	0	-
Середнє число вторинних нейтронів на 1 акт поділу палива, $\nu_{f0}^{(4)}$	2,416	2,416	-
Параметр, κ_2^2	$3,01508 \cdot 10^{-3}$	$1,555518 \cdot 10^{-3}$	-
Відношення перепаду потоку нейтронів на оболонці до середнього потоку в паливі, $\frac{\delta\Phi_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$	$2,436371 \cdot 10^{-3}$	$1,228312 \cdot 10^{-3}$	-
Коефіцієнт, β'	$9,647925 \cdot 10^{-3}$	$7,085915 \cdot 10^{-3}$	-
Коефіцієнт, α	$1,543808 \cdot 10^{-2}$	$1,102177 \cdot 10^{-2}$	-
Коефіцієнт, A	$7,297521 \cdot 10^{-2}$	$4,989394 \cdot 10^{-2}$	-
Відношення потоку нейтронів на поверхні паливного блоку до середнього потоку в паливі, $\frac{\bar{\Phi}_0^{(4)}(r_0)}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$	1,044732	1,030122	-
Відношення середніх потоків в оболонці й паливі в припущенні про лінійність потоку нейтронів, $\frac{\bar{\Phi}_2^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$	1,04595	1,030736	-
Параметр, κ_1^2	$4,224254 \cdot 10^{-2}$	$1,090418 \cdot 10^{-2}$	-
Коефіцієнт, ψ	1,371591	1,371591	-
Коефіцієнт, ξ	1,138145	1,168664	-
Коефіцієнт, δ	$3,943772 \cdot 10^{-3}$	$2,133399 \cdot 10^{-3}$	-
Коефіцієнт, q_1^{δ}	$4,415962 \cdot 10^{-4}$	$1,139904 \cdot 10^{-4}$	-
Відношення середніх потоків нейтронів у зоні сповільнювача й в паливі, $\frac{\bar{\Phi}_1^{(4)}}{\bar{\Phi}_0^{(4)}}$	1,1441087	1,0999866	-
Температура нейтронного газу в зоні сповільнювача, $\bar{T}_{H,\Gamma_1}$	$5,501664 \cdot 10^2$	$1,089589 \cdot 10^3$	К

Продовження таблиці 2.8.2

1	2	3	4
Середній по чарунці переріз поглинання, $\overline{\Sigma_a^{(4)}}$	$1,459045 \cdot 10^{-1}$	$1,030645 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Середній по чарунці переріз ділення, $\overline{\Sigma_f^{(4)}}$	$1,064702 \cdot 10^{-1}$	$7,53866 \cdot 10^{-2}$	см^{-1}
Середній по чарунці переріз розсіювання, $\overline{\Sigma_s^{(4)}}$	$5,928467 \cdot 10^{-1}$	$3,224027 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Середній по чарунці повний переріз, $\overline{\Sigma_t^{(4)}}$	$7,387511 \cdot 10^{-1}$	$4,254672 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}
Коефіцієнт дифузії в паралельному напрямку до осі чарунки, $D_p^{(4)}$	$6,195436 \cdot 10^{-1}$	$9,656966 \cdot 10^{-1}$	см
Коефіцієнт дифузії в перпендикулярному напрямку до осі чарунки, $D_{\perp}^{(4)}$	$4,51212 \cdot 10^{-1}$	$7,834526 \cdot 10^{-1}$	см
Коефіцієнт дифузії чарунки, $D^{(4)}$	$5,073225 \cdot 10^{-1}$	$8,442006 \cdot 10^{-1}$	см
Середній по чарунці добуток числа виходу вторинних нейтронів за одне ділення на переріз ділення, $\nu_{f0}^{(4)} \cdot \overline{\Sigma_f^{(4)}}$	$2,57232 \cdot 10^{-1}$	$1,82134 \cdot 10^{-1}$	см^{-1}

2.9 Фізичний розрахунок реактору типу ВВЕР-1000 в цілому

Система рівнянь дифузії для гомогенізованої активної зони:

$$\begin{cases} D^{(1)}\Delta\Phi^{(1)} - (\Sigma_a^{(1)} + \Sigma_R^{(1)})\Phi^{(1)} + \frac{S}{K_{\text{эф}}} \chi^{(1)} = 0; \\ D^{(2)}\Delta\Phi^{(2)} - (\Sigma_a^{(2)} + \Sigma_R^{(2)})\Phi^{(2)} + \Sigma_R^{(1)}\Phi^{(1)} + \frac{S}{K_{\text{эф}}} \chi^{(2)} = 0, \\ D^{(3)}\Delta\Phi^{(3)} - (\Sigma_a^{(3)} + \Sigma_R^{(3)})\Phi^{(3)} + \Sigma_R^{(2)}\Phi^{(2)} = 0; \\ D^{(4)}\Delta\Phi^{(4)} - \Sigma_a^{(4)}\Phi^{(4)} + \Sigma_R^{(3)}\Phi^{(3)} = 0, \end{cases}$$

де S — об'ємна швидкість генерації нейтронів ділення:

$$S = \sum_{n=1}^4 \nu_f^{(n)} \Sigma_f^{(n)} \Phi^{(n)}, \quad (2.3)$$

де $\Phi^{(n)}$ – групові потоки нейтронів у гомогенізованій А.З. реактора.

2.9.1 Розрахунок ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів

Розрахунок ефективного коефіцієнта розмноження ведеться в даному розрахунку за допомогою одnogрупових констант. При розрахунку реактора в одnogруповому наближенні з отриманих значень НФХ для чотирьох енергетичних груп робиться усереднення і отримується одnogрупові НФХ по яким далі буде розраховано ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів. Для достатньо великої однорідної області усі потоки нейтронів задовольняють хвильовому рівнянню:

$$\Delta\Phi^{(n)} + B^2\Phi^{(n)} = 0$$

Виходячи з того, що розміри активних зон як правило, великі то вплив витоку нейтронів на спектр відносно мало і у першому наближенні його можна не враховувати і покласти, що $B^2=0$ (безкінечне середовище). В цьому випадку $K_{\text{ef}} = K_{\infty}$.

З урахуванням 2.3 і нормуючої вимоги:

$$\sum_{n=1}^4 v_f^{(n)} \Sigma_f^{(n)} \Phi^{(n)} = 1, \quad (2.4)$$

можна вирішити вираз 2.4, і отримати наступне значення суми коренів:

$$\sum_{n=1}^4 \Phi^{(n)} = \frac{\sum_{n=1}^4 \Gamma^{(n)}}{K_{\infty}},$$

де

$$\Gamma^{(n)} = \frac{\chi^{(n)} + \Sigma_R^{(n-1)} \Gamma^{(n-1)}}{\Sigma_a^{(n)} + \Sigma_R^{(n)}}. \quad (2.5)$$

$$\text{для } \Gamma^{(2)}: \Gamma^{(2)} = \frac{\chi^{(2)} + \Sigma_R^{(1)} \Gamma^{(1)}}{\Sigma_a^{(2)} + \Sigma_R^{(2)}} = \frac{0,248 + 0,074292 \cdot 9,202998}{0,0079 + 0,06435} = 4,521574 [\text{см}^{-2}].$$

Підставивши 2.4 до 2.5 отримаємо:

$$K_{\infty} = \sum_{n=1}^4 v_f^{(n)} \Sigma_f^{(n)} \Gamma^{(n)}.$$

Коефіцієнт дифузії в А.З.:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{n=1}^4 D^{(n)} \Phi^{(n)}}{\sum_{n=1}^4 \Phi^{(n)}}.$$

Переріз поглинання А.З.:

$$\bar{\Sigma}_a = \frac{\sum_{n=1}^4 \Sigma_a^{(n)} \Phi^{(n)}}{\sum_{n=1}^4 \Phi^{(n)}}.$$

Площа міграції нейтронів в А.З.:

$$\bar{M}^2 = \frac{\bar{D}}{\Sigma_a} = \frac{1,05604}{0,02799} = 37,72613 [\text{см}^2].$$

Геометричний параметр А.З.:

$$B^2 = \left(\frac{2,405}{\frac{D_{\text{а.з.}}}{2}} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H_{\text{а.з.}}} \right)^2 = \left(\frac{2,405}{\frac{319}{2}} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{355} \right)^2 = 3,0567 \cdot 10^{-4} [\text{см}^{-2}].$$

Ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів в А.З.:

$$K_{\text{еф}} = \frac{K_{\infty}}{1 + \bar{M}^2 B^2} = \frac{1,463754}{1 + 37,72613 \cdot 3,0567 \cdot 10^{-4}} = 1,447067$$

2.9.2 Розрахунок запасу реактивності і повного температурного ефекту реактивності А.З. реактору типу ВВЕР-1000

Запас реактивності А.З. реактору:

$$\rho = \frac{K_{\text{еф}} - 1}{K_{\text{еф}}} = \frac{1,447067 - 1}{1,447067} = 0,308947.$$

Повний температурний ефект реактивності:

$$\Delta\rho = \rho_{\text{г}} - \rho_{\text{х}} = 0,282211 - 0,308947 = -2,6736 \cdot 10^{-2}.$$

де $\rho_{\text{г}}$ – запас реактивності А.З. реактору у гарячому стані на потужності;
 $\rho_{\text{х}}$ – запас реактивності А.З. реактору у холодному стані.

Результати розрахунку реактору типу ВВЕР-1000 в цілому наведено в таблиці 2.9

Таблиця 2.9 – Результати розрахунку реактору типу ВВЕР-1000 в цілому

Характеристики	Значення		Розмірність
	Холодний реактор	Гарячий реактор	
Параметр, Γ^0	0	0	см^{-2}
Параметр, Γ^1	9,202998	$1,073238 \cdot 10^1$	см^{-2}
Параметр, Γ^2	$1,289417 \cdot 10^1$	$1,69476 \cdot 10^1$	см^{-2}
Параметр, Γ^3	9,105329	$1,14152 \cdot 10^1$	см^{-2}
Параметр, Γ^4	4,521574	5,770629	см^{-2}
Коефіцієнт розмноження нейтронів нескінченної середи, K_∞	1,463754	1,416419	-
Коефіцієнт дифузії А.З., $\bar{D}$	1,056042	1,216932	см
Переріз поглинання А.З., $\bar{\Sigma}_a$	$2,799233 \cdot 10^{-2}$	$2,228869 \cdot 10^{-2}$	см^{-2}
Площа міграції нейтронів в А.З., $\bar{M}^2$	$3,772613 \cdot 10^1$	$5,459862 \cdot 10^1$	см^2
Геометричний параметр А.З., B^2	$3,056719 \cdot 10^{-4}$	$3,056719 \cdot 10^{-4}$	см^{-2}
Ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів в А.З., $K_{\text{эф}}$	1,447067	1,393168	-
Запас реактивності А.З. реактору, ρ	0,308947	0,282211	-
Повний температурний ефект реактивності, $\Delta\rho$	$-2,6736 \cdot 10^{-2}$		-

2.10 Висновки до нейтронно-фізичного розрахунку

У даній главі був проведений нейтронно-фізичний розрахунок елементарної чарунки реактора ВВЕР-1000 у дифузійному наближенні методом імовірності перших зіткнень для чотирьох енергетичних груп нейтронів. Такий вибір виправданий тим, що подібна розбивка на групи дозволяє врахувати усі найбільш важливі процеси.

У результаті розрахунку були отримані нейтронно-фізичні константи (коефіцієнти дифузії D , перетини поглинання Σ_a й $\nu\Sigma_f$) ефективний коефіцієнт розмноження для холодного стану. Оскільки отриманий ефективний коефіцієнт розмноження K_{ef} для холодного стану реактору був більший ніж K_{ef} у гарячому стані, то в даному реакторі від'ємний температурний коефіцієнт реактивності це підтверджує правильність розрахунку. Також були отриманні потоки нейтронів для різних енергетичних груп і найбільшим був потік другої енергетичної групи. Отриманий коефіцієнт розмноження нейтронів цілком відповідає дійсності для реакторів типу ВВЕР.

Отримані для найпростішої моделі, результати, цілком відповідають реальним фізичним процесам, що відбуваються в елементарній чарунці.

3 ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПО ЗАБЕЗПЕЧЕННЮ ЗБЕРЕЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В УМОВАХ ПРОЕКТНИХ І ЗАПРОЕКТНИХ АВАРІЙ «ЧОРНИЙ ЯЩИК»

3.1 Опис системи

Згідно до вимоги про безпеку на майданчику АЕС треба забезпечити надійний захист та цілісність від впливу екстремальних умов зовнішнього середовища систему для аналізу протікання аварії, моніторингу стану систем на енергоблоці АЕС та дій персоналу на надійних носіях.

Система «Чорний ящик» призначена для зберігання та подання персоналу інформації про параметри енергоблоків АЕС в аварійних та післяаварійних умовах проектних та запроектних аварій.

Програмно-технічний комплекс системи «Чорний Ящик» (далі за текстом ПТК ЧЯ) є ключовим елементом системи реєстрації та збереження інформації ("чорний ящик"), яка впроваджується з метою вдосконалення СКУ енергоблока №1 ВП ПАЕС, спрямованої на модернізацію її функцій та можливостей за рахунок оснащення технічними засобами збереження інформації в умовах запроектної аварії.

ПТК ЧЯ та засоби, що виконують функції збору та архівування інформації від систем енергоблоку в основному та аварійному архівах, відносяться до класу безпеки 3 та мають класифікаційне позначення ЗН, тобто є елементами систем нормальної експлуатації, важливими для безпеки, що виконують функції захисту персоналу.

Має маркування С, що означає шафи (прилади автоматики та захисту)

Експлуатаційно-автономні складові ПТК ЧЯ відносяться до категорії сейсмостійкості І.

Використання на енергоблоці № 1 ПАЕС ПТК ЧЯ забезпечує:

- а) підвищення безпеки та ефективності роботи енергоблоків за рахунок:
 - 1) надання персоналу достовірної та повної інформації про причини та параметри перебігу аварійних ситуацій;
 - 2) встановлення фактичного алгоритму роботи систем безпеки та систем, важливих для безпеки, включаючи системи контролю та управління;
 - 3) виявлення відхилень від штатних алгоритмів роботи систем, контролю та реєстрації дій персоналу;
 - 4) створення автоматизованого багаторічного архіву даних з експлуатації енергоблоків АЕС в умовах розвитку аварійних ситуацій та післяаварійної роботи;
- б) можливість подальшого розширення функцій з комплексного аналізу експлуатації енергоблоків ПАЕС;
- в) виконання вимог чинних в Україні норм та правил щодо ядерної та радіаційної безпеки.

ПТК ЧЯ функціонує в реальному масштабі часу та передбачає реалізацію наступних основних функцій:

- а) прийом та збереження даних штатних систем енергоблоків, включаючи УСБ, ІОС/СППБ, СВРК, АКНП, СДІУ, АЗ-ПЗ, АРП-РОП-УПЗ, ПАМС та ін;
- б) прийом та збереження аудіоданих від пристроїв реєстрації переговорів по телефону та системі оперативного зв'язку;
- в) прийом та збереження відеоданих та аудіоданих від пристроїв відеоспостереження, розташованих у приміщеннях БЦУ та РЦУ.

Реєстрація параметрів здійснюється у хронологічному порядку із зазначенням:

- а) технологічний ідентифікатор;
- б) назви параметра;
- в) значення параметра;
- г) часу реєстрації.

Час синхронізований із системою єдиного часу енергоблоку.

Місткість аварійної реєстрації становить не менше 30 діб для дискретних і аналогових сигналів і не менше 3 діб для аудіо та відеоінформації.



Рисунок 3.1 - Загальний вигляд ПТК ЧЯ

3.2 Склад системи «Чорний ящик»

- а) комплекс реєстрації та подання даних, що приймаються від підсистеми концентрації даних (КРПД), у складі:
 - 1) дубльовані сервери даних;
 - 2) сервер довгострокового архіву;
 - 3) робоче місце технолога;
 - 4) інженерна станція;
 - 5) технічні засоби, що утворюють радіоканал передачі даних;
- б) комплекс концентрації даних, що приймаються від підсистеми введення даних (КПД), у складі:
 - 1) дубльовані сервери збору даних;
 - 2) технічні засоби, що утворюють радіоканал передачі до КРПД;
- в) комплекс введення даних від систем-джерел даних енергоблоків у складі:
 - 1) дубльовані шлюзи оптичного розгалуження та зв'язку, що складаються зі шлюзу зв'язку з системами-джерелами та шафи оптичного розгалуження, що забезпечує прийом даних від зовнішніх систем та передачу сигналів в ІТТ та СРВПЕ (розгалуження);
 - 2) технічні засоби, що утворюють радіоканал передачі до КПД.

3.2.1 Опис обладнання

Структурно ПТК ЧЯ являє собою розподілену обчислювальну систему, що складається з двох незалежних взаєморезервуючих комплексів обладнання, один з яких розміщується в приміщенні внутрішнього Кризового центру, другий - у приміщенні зовнішнього кризового центру, та комплектів обладнання, що розміщуються у приміщеннях БЩУ та РЩУ.

ПТК ЧЯ включає наступні рівні :

- а) рівень енергоблоку — обладнання, що виконує прийом даних від шлюзової системи ІТТ, мовних реєстраторів та пристроїв відеоспостереження, розміщених на енергоблоці № 1 та передачу їх по оптоволоконному каналу зв'язку до кризових центрів, обладнання бездротового каналу зв'язку, що забезпечує аварійне резервування оптоволоконних ліній зв'язку;
- б) рівень кризових центрів (КЦ) здійснює прийом, реєстрацію та зберігання на надійних носіях, захищених від впливу екстремальних умов зовнішнього середовища, аналогової та дискретної технологічної інформації про стан енергоблока АЕС від систем, що зберегли працездатність (таких як ПАМС, УСБ), а також інформації про дії оперативного персоналу

До складу обладнання рівня енергоблоку ПТК ЧЯ входить:

- а) мережеві комутатори, що забезпечують збирання даних від шлюзів систем енергоблоку та аудіо/відео реєструючих пристроїв БЦУ та РЦУ;
- б) пристрої реєстрації переговорів по 4 телефонних лініях та по 4 каналах системи оперативного зв'язку для БЦУ та аналогічно для РЦУ;
- в) пристрій відеоспостереження (4 ІР-відеокамери БЦУ і РЦУ - по 2 на кожній);
- г) обладнання бездротового каналу зв'язку (пристрою радіоінтерфейсу).

До складу обладнання рівня КЦ ПТК ЧЯ входить:

- а) сервер архівування («чорний ящик») у резервованій конфігурації;
- б) обладнання, що забезпечує введення інформації від систем енергоблоку № 1 (сервер зв'язку/обчислювальний сервер у конфігурації);
- в) сервер архівування медіа (аудіо та відео) даних;
- г) мережеве обладнання для забезпечення інформаційного обміну між вузлами ПТК ЧЯ, що розміщується у приміщеннях БЦУ, РЦУ, КЦ;
- д) обладнання бездротового каналу зв'язку (пристрою радіоінтерфейсу).

Структурна схема ПТК ЧЯ енергоблока наведена на рис. 2.

Між усіма вузлами ПТК ЧЯ організований обмін даними лініями зв'язку, таким чином, що кожному з комплектів доступний повний набір сигналів, що є в системі, для спільної обробки та контролю достовірності даних кожного з каналів. З метою забезпечення надійного інформаційного обміну між вузлами ПТК ЧЯ лінії зв'язку виконані дубльованими.

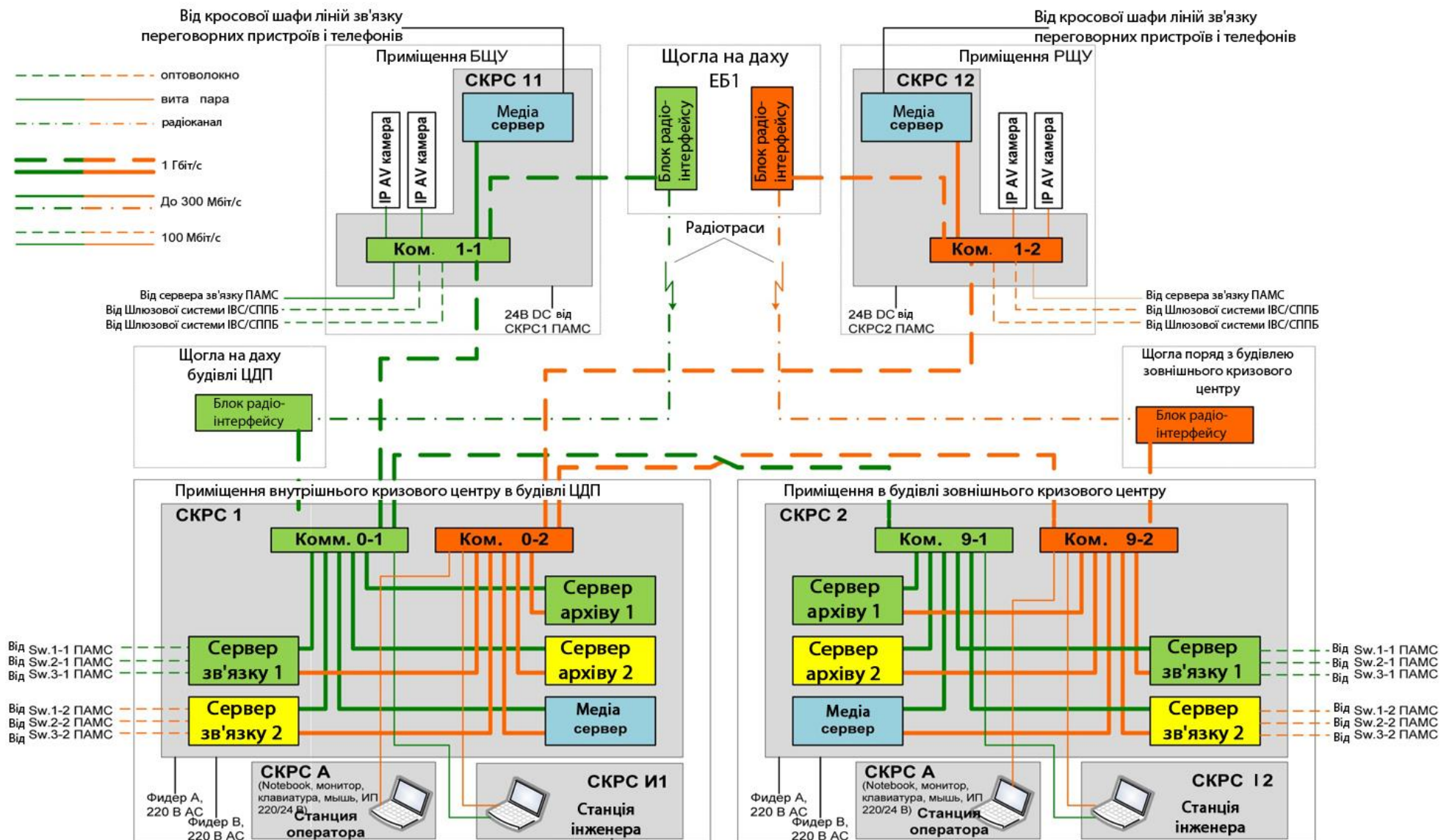


Рисунок 3.2 - Структурна схема ПТК ЧЯ енергоблока

3.3 Режими експлуатації

Режим нормальної реєстрації ПТК ЧЯ призначений для реєстрації та збереження інформації у процесі нормальної експлуатації енергоблоку. Основне призначення режиму нормальної реєстрації - накопичення передісторії в кільцевому архіві.

У режимі нормальної експлуатації ПТК ЧЯ виконує безперервну реєстрацію та збереження аналогових та дискретних параметрів, а також аудіо- та відеоданих таким чином, щоб у будь-який момент часу зберігалися дані про роботу енергоблоку протягом принаймні останніх 8 годин роботи. При цьому ПТК ЧЯ забезпечує моніторинг ініціативних параметрів, при надходженні яких ПТК ЧЯ переходить у режим аварійної реєстрації.

У режимі аварійної реєстрації вся наявна на момент переходу в режим аварійної реєстрації передісторія за період не менше 8 год зберігається для подальшого аналізу. Аварійний режим реєстрації виконується протягом аварії і після аварії 12 год, або до отримання команди оперативного персоналу за умови відсутності ініціативних сигналів.

(Восьмигодинний період реєстрації аналогових сигналів дозволяє охопити будь-які динамічні зміни параметрів, коли фіксується значення параметра при відхиленні від попереднього на задану величину).

3.4 Управління та контроль

ПТК ЧЯ не містить у своєму складі стаціонарних засобів візуалізації та введення інформації у процесі виконання основних функцій. Для виконання сервісних функцій, таких як управління програмним забезпеченням та його завантаження, діагностика стану обладнання, оперативний перегляд вмісту інформаційних архівів, до складу ПТК ЧЯ включені інженерна та операторська станції у переносному виконанні (ноутбук).

Інформація, що відображається систематизована у вигляді екранних форм, які виводяться на екран монітора на вибір оператора. На екрані можуть одночасно відображатися одна або кілька форм.

Технічне діагностування ПТК ЧЯ передбачає контроль технічного стану обладнання та сполучних ліній, виявлення несправностей (відмов), встановлення місця виникнення та характеру несправностей, архівування та відображення діагностичної інформації.

Технічне стан ПТК ЧЯ перевіряється:

- а) безпосередньо після включення первинного електроживлення;
- б) безперервно у процесі роботи;
- в) періодично під час виконання регламентних робіт.

Виявлення несправностей після включення електроживлення та у процесі роботи здійснюється з точністю до 1-2 знімних частин СКРС. Обсяг автоматичних перевірок, що проводяться безпосередньо після включення первинного електроживлення та безперервно у процесі роботи СКРС, а також вимоги до формування та відображення діагностичних повідомлень встановлені в АУЩ.460600.001 ТУ.

Виконання автоматичного контролю технічного стану, а також відмови вбудованих засобів технічного діагностування не впливають на виконання основних інформаційних функцій та не призводять до погіршення характеристик ПТК ЧЯ, встановлених у ТЗ.

Результати діагностування передаються в ІТТ/СППБ в узагальненому вигляді для відображення на робочому місці системного інженера.

3.5 Функціонування обладнання при відмові

При виникненні аварійних ситуацій в ВП ПАЕС, що характеризуються порушенням меж або умов безпечної експлуатації ПТК, які призвели до відключення окремих СКРС, вживання спеціальних заходів не потрібно. Непрацюючі СКРС необхідно перевантажити штатними засобами ПТК «Чорний

ящик» призначений для збору інформації в умовах аварій, тому забезпечується його функціонування в умовах ЗПА.

За відсутності напруги живлення від системи надійного електропостачання ПТК здатний виконувати задані функції протягом щонайменше 30 хв від загроєних джерел безперебійного живлення, які забезпечують його автономне питание.

За рахунок наявності послідовних бар'єрів на шляху розповсюдження радіоактивного забруднення будівельних перекриттів, численних дверей і відсутність прямих отворів і вікон, застосуванням спеціального захищеного виконання шаф ПТК (IP54 по "Ступіні захисту, що забезпечуються оболонками (Код IP)") забезпечується потужності поглиненої дози П у разі ЗПА (при найгіршому сценарії – виході РАВ за межі ГО).

Установка обладнання системи в приміщеннях облаштування РО забезпечує захист від механічних впливів, що підтверджується сейсмостійкістю будівель та споруд.

При відмови у суміжному устаткуванні ПТК зберігає можливість функціонування, оскільки пряма залежність існує лише з роботи що забезпечує системи електроживлення.

У ПТК ЧЯ реалізовані наступні заходи щодо збереження його працездатності за відмов:

а) впроваджено технічні та програмні заходи щодо запобігання помилкам персоналу при експлуатації, технічному обслуговуванні та відновленні;

б) забезпечена стійкість та несприйнятливність обладнання ПТК ЧЯ до відхилень від робочих умов експлуатації;

в) впроваджено заходи, виключають можливість відмов, викликаних несправності системи електроживлення;

г) забезпечено несприйнятливність до електромагнітним перешкод від зовнішніх джерел та від сполученого обладнання.

Відповідно до ТУ з прив'язки обладнання на ПТК, установка СКРС передбачена у приміщеннях БЦУ та РЦУ. Для зазначених приміщень встановлено групу умов експлуатації 2.2 та відповідно до неї визначено значення зовнішніх факторів, що впливають на навколишнє середовище (див. таблицю 3.1).

Таблиця 3.1- Узагальнені робочі та граничні значення зовнішніх факторів, що впливають на навколишнє середовище

Найменування	Одиниця виміру	Значення зовнішніх факторів	
		робочі	граничні
Температура: - Нижнє значення - Верхнє значення	°C	15 40	50
Швидкість зміни температури Верхнє значення	°C/год	-	5
Вологість: - нижнє значення - верхнє значення	%	10 (при 15°C) 75 (при 40°C)	100 (при 50 °C)*

Продовження таблиці 3.1

Найменування	Одиниця виміру	Значення зовнішніх факторів	
		робочі	граничні
Барометричний тиск: - нижнє значення - верхнє значення	кПа	86 108	- -
Потужність поглиненої дози іонізуючого випромінювання (верхнє значення)	Гр/год	$0,4 \times 10^{-5}$	-
Масова концентрація пилу верхнє значення	кг/ м ³	1	-
Тривалість дії зовнішніх факторів	год	Необмежена	2
* Без конденсації вологи. Допускається випробувальне значення вологості 98 % + 2%			

Наведені у таблиці 2.1 значення зовнішніх факторів забезпечуються низкою технічних заходів. Так, підтримання температури забезпечується системами кондиціонування приміщень СУЗ. Критерієм виконання покладених на системи функцій є забезпечення підтримки нормованої температури повітря в приміщеннях $+20^{\circ}\div 5^{\circ}\text{C}$ та вологості $30\div 65\%$.

Обладнання ПТК ЧЯ пройшло випробування на більш жорсткі умови навколишнього середовища і забезпечує працездатність при температурі повітря в приміщеннях від $+15^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$ та вологості $10\div 75\%$ необмежений час.

Протягом 2 годин (за граничних умов) забезпечує працездатність при температурі повітря у приміщеннях до $+50^{\circ}\text{C}$ та вологості до 100%.

3.6 Аналіз надійності обладнання

ПТК ЧЯ відноситься до виробів, що відновлюються і обслуговуються. Надійність характеризується показниками безвідмовності та

ремонтотпридатності функцій, довговічністю ПТК ЧЯ. Вимоги до надійності встановлюються до функцій, які виконує обладнання класу ЗІ. Поодинокі відмови такого обладнання не призводять до відмови функцій і ПТК ЧЯ в цілому.

Для функції встановлюються такі показники надійності:

- а) T_o - середнє напрацювання на відмову;
- б) T_v – середній час на відновлення.

Кількісні показники надійності наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Значення показників надійності функцій ПТК ЧЯ

Найменування функції	Середнє напрацювання на відмову, T_o , год	Середній час відновлення T_v , год
Введення і архівування технологічної інформації	$2 \cdot 10^4$	1

Критерієм відмови функцій є неможливість введення та збереження інформації засобами ПТК ЧЯ.

Оцінка відповідності встановленим вимогам безвідмовності проводилася при прийманні ПТК ЧЯ. Основою для зазначеної оцінки є результати розрахунків безвідмовності функцій, отримані за даними про надійність елементів, що у їх реалізації, та досвід експлуатації цих елементів.

Розрахунки показників безвідмовності можуть бути уточнені на підставі даних, отриманих під час дослідно-промислової експлуатації ПТК ЧЯ, до приймання у промислову експлуатацію.

Показники надійності програмного забезпечення за розрахунками не враховують.

Безвідмовність програмного забезпечення (ПЗ) Забезпечується:

а) розробкою та верифікацією базового та прикладного ПЗ відповідно до вимог ТЗ;

б) функціональними випробуваннями ПТК ЧЯ після інтеграції апаратних та програмних засобів відповідно до вимог ТЗ;

в) перевіркою функціонування поставного комплекту ПТК ЧЯ у процесі заводського приймального контролю та передпускових випробувань на місці експлуатації;

г) перевіркою функціонування у процесі попередніх випробувань, дослідної експлуатації та приймальних випробувань ПТК ЧЯ;

д) авторським супроводом програмного забезпечення протягом гарантійного терміну експлуатації постачального комплекту.

Роботи з технічного обслуговування ПТК проводяться персоналом цеху ТАІ

3.7 Оцінка проекту обладнання

Проект реконструкції відповідає вимогам нормативних документів щодо безпеки АЕС, які діють в Україні.

ПТК «Вулкан-М-ЧЯ-ЮУ1» відповідає всім критеріям, покладеним в основу проекту, та виконує покладені на нього функції в умовах нормальної експлуатації, при їх порушенні, в аварійних ситуаціях та аваріях. Результати випробувань обладнання на підприємстві-виробнику підтверджують, що ПТК «Вулкан-М-ЧЯ—ЮУ» здатний виконувати покладені на нього функції у складі СКУ енергоблока № 1 ВП ПАЕС.

Аналіз безпеки роботи ПТК «Вулкан-М-ЮУ1» при нормальній експлуатації, відмовив поєднаного обладнання, відмових власних елементів, а також при порушеннях нормальних умов, аваріях та відмових за загальною причиною показав, що при всіх цих режимах роботи ПТК ЧЯ безпека АЕС загалом не знімається.

Обладнання, що розміщується на БЩУ, РЩУ та в кризових центрах, об'єднане в субкомплекси робочих станцій (СКРС) у конструктивному виконанні «шафа» - по одному в кожному приміщенні.

Шафи СКРС, що розміщуються у КЦ одностороннього обслуговування.

Шафи СКРС, що розміщуються на БЩУ, РЩУ – двостороннього обслуговування.

Ступінь захисту шаф становить IP 54

3.8 Аналіз ефективності реалізованого заходу

- 1) застосування високонадійного апробованого радіоканалу передачі даних;
- 2) реалізація обміну даними між компонентами по резервованих оптоволоконних лініях зв'язку;
- 3) висока стійкість до відмови завдяки застосуванню резервованих технічних засобів.
- 4) Здатність зберігати великі об'єми інформації.

Захід виконується на всіх енергоблоках України

Орієнтовна ціна ПТК разом з монтажем: 500 000 грн.

Система “чорний ящик” виготовлена на науково-виробничому об'єднанні “Імпульс” (Сєвєродонецьк, Луганська обл.). У її розробці брали участь харківські вчені з ТОВ «Вестрон» та спеціалісти українських АЕС.

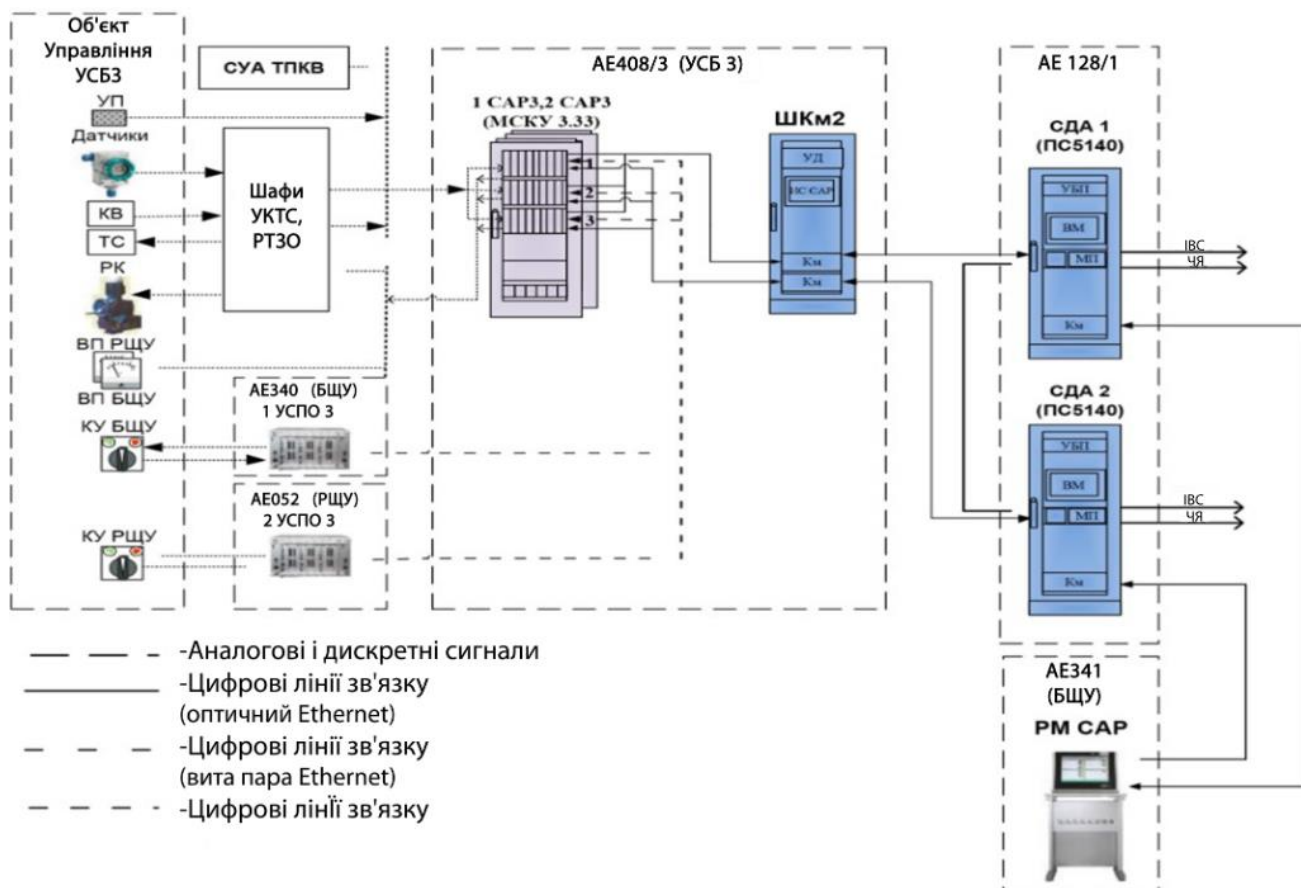


Рисунок 3.3 – Зв'язок між системами безпеки на станції

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

АЕС представляє собою об'єкт підвищеної небезпеки, що потребує запровадження високоефективної системи управління в сфері охорони та безпеки праці з метою створення комфортних та безпечних для життя та здоров'я працюючих умов праці. Така система управління в сфері охорони праці (СУОП) дозволяє забезпечити контроль за дотриманням існуючих нормативно-правових актів у цій сфері, а також забезпечити необхідні організаційно-технічні, соціально-економічні, лікувально-профілактичні та санітарно-гігієнічні заходи щодо створення комфортних та безпечних для життя та здоров'я працівників АЕС умов праці.

На майданчику АЕС присутня значна кількість джерел потенційної небезпеки, що можуть негативно впливати на здоров'я або життя людини. В першу чергу, до них можна віднести радіоактивні та вибухо- та пожежонебезпечні речовини, високовольтне електрообладнання тощо.

В даному розділі запропоновані технічні рішення та організаційні заходи щодо забезпечення радіаційної безпеки на АЕС, а також визначені необхідні заходи з електробезпеки і пожежної безпеки та профілактики.

4.1 Технічні рішення та організаційні заходи з радіаційної безпеки на АЕС

Радіаційна безпека на АЕС регламентується документами ДНАОП 0.04-1.01-74 (ПБЯ 04-74) “Правила ядерної безпеки АЕС”, СП-АС-88, ПБЯ АС 99 “Правила радіаційної безпеки при експлуатації АЕС”, «Правила ядерної безпеки реакторних установок атомних станцій з реакторами з водою під тиском» НП 306.2.145-2008 та ін..

4.1.1 Біологічний захист

Захист від випромінювання реактора, основного технологічного контуру та інших джерел випромінювання на АЕС необхідний для зниження щільності потоку нейтронів і випромінювання до значень регламентованих санітарними правилами проектування і експлуатації АЕС СП АС 88/93. До таких відносяться приміщення постійного перебування персоналу протягом усього робочого дня, де потужність еквівалентної дози не перевищує $5,6 \times 10^{-6}$ Зв/год;

Компонування АЕС виконане за такими принципами:

1) під герметичною оболонкою, яке представляє собою циліндр внутрішнього діаметру 45м та куполоподібним верхом, розміщено системи, устаткування і трубопроводи з високоенергетичними радіоактивним теплоносієм (робочий тиск до 16 МПа і робоча температура до 350 °С) I-го контуру (РУ в складі: реактор, ПГ, ГЦН, КТ, гідроємності, трубопроводи, система організованих протічок I-го контуру та інше);

2) компонування цих систем і трубопроводів виконане за принципом розміщення у боксах. Будівельні конструкції боксів забезпечують біологічний захист обслуговуючого персоналу при проведенні операцій щодо перевантаження ядерного палива та під час проведення ремонтних робіт елементів, які розташовані за межами боксів та не взаємодіє з радіоактивним середовищем;

3) обладнання, якому необхідний ремонт, розташоване таким чином, щоб до нього було забезпечено відповідний доступ;

4) пульти керування обладнанням винесені за межі герметичної оболонки і знаходяться в приміщенні БЩУ.

4.1.2 Локалізуючі системи

Локалізуючі системи (елементи) безпеки – технологічні системи (елементи), які призначені для запобігання або обмеження поширення радіоактивних речовин і іонізуючого випромінювання за передбачені проектом межі.

В її склад входять:

- система герметичного огороження
- спрінклерна система
- система аварійного видалення водню
- система примусового скидання тиску з СГО

4.1.3 Система герметичного огороження

Основні задачі системи герметичного огороження:

- утримання в межах зони локалізації аварії радіоактивних речовин, що виділяються;
- ізоляції навколишнього середовища тих систем і елементів, відмова яких може призвести до несприятливого викиду радіоактивних речовин;
- захист персоналу і населення від іонізуючого випромінювання.

4.1.4 Джерела радіаційної небезпеки та їх контроль

По ОПБ-88 питома активність водного теплоносія реакторного контуру не повинна перевищувати $3,7 \times 10^6$ Бк/кг, активність води парогенераторного контуру - 3,7 Бк/кг. Ріст активності теплоносія в процесі експлуатації АЕС погіршує радіаційну обстановку на станції.

З метою зменшення радіаційної небезпеки на АЕС по даному чиннику в проектних рішеннях приділяється увага забезпеченню якості початкової і живильної води очищенню теплоносія реакторного контуру, вибору раціонального водного режиму з точки зору запобігання радіолізу води і її корозійної дії на конструкційні матеріали реакторного контуру. Для вирішення цієї проблеми використовуються наступні системи СВО – 1 (система байпасного очищення теплоносія), СВО-2 (система підживлення-продування, а також деякі інші системи). Для запобігання попадання в теплоносій продуктів ділення, а також подальшого їх поширення по контуру циркуляції АЕС згідно з ПБЯ РУ АС-89 проводиться контроль пошкодження ТВЕЛ:

1. Експлуатаційна межа ушкодження твелів за рахунок утворення мікротріщин з дефектами типу газової нещільності оболонки не повинна перевищувати 0.2% твелів і 0.02% твелів при прямому контакті ядерного палива з теплоносієм;

2. Межа безпечної експлуатації по кількості і величині дефектів типу газової нещільності оболонки не повинна перевищувати 1% твелів і 0.1% твелів при прямому контакті ядерного палива з теплоносієм;

3. Температура оболонки твелів не більше 1200 °С;

4. Локальна глибина окислення оболонок твелів не більше 18% від початкової товщини стінки.

Теплоносій першого контуру являється корозійно неактивним завдяки наявності системи реагентів за допомогою якої корегують рН і кількість кисню в контурі.

4.1.5 Радіаційний контроль

Система радіаційного контролю оточуючого середовища (РКОС) забезпечує отримання необхідної інформації про потужність дози γ -опромінення на місцевості; річної дози на місцевості; густини радіонуклідів в об'єктах оточуючого середовища; величини активності і нуклідного складу в викидах в технічні водойми; забруднення персоналу на виході зі станції і метеорологічних параметрах атмосфери; забруднення всіх видів транспортних засобів і вантажів, що транспортуються, покидають границі площадки станції.

Для реалізації поставлених завдань використовується централізована інформаційно-вимірювальна система радіаційного контролю (ЦІВСПК) на базі комплекту апаратури АКРБ-03.

Основним завданням індивідуального дозиметричного контролю персоналу є визначення сумарного впливу на персонал всіх факторів радіаційного впливу з метою недопущення опромінення персоналу дозами понад встановлених гранично допустимих доз. Цей вид контролю проводиться з використанням індивідуальних дозиметрів: оперативних, кварталних, аварійних (РК-02, ДРГЗ-03, ДН-А-1).

4.2 Електробезпека на АЕС

Вимоги щодо дотримання діючих правил з електробезпеки на АЕС регламентуються наступними нормативними документами: ПУЕ-2017, НПАОП 40.1-1.21-98, НПАОП 40.1-1.01-97, НПАОП-40.1-1.32-01, ДСТУ 7237:2011, ГKD 34.20.507-2003 «Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила».

Для забезпечення електробезпеки людей у виробничих умовах застосовуються такі технічні засоби і способи: захисне заземлення, вирівнювання потенціалів, електричне розділення мереж, захисне відключення, електрична ізоляція струмоведучих частин, компенсація струмів замикання на

землю. До технічних способів і засобів також відносяться огорожувальні пристрої, попереджувальна сигналізація, блокування, знаки безпеки, засоби індивідуального та колективного захисту та запобіжні пристосування.

На АЕС з ВВЕР-1000 передбачені наступні мережі електропостачання споживачів власних потреб:

- мережа 380/220В, 50Гц з заземленою нейтраллю для надійного живлення споживачів першої групи, можлива перерва в живленні на час не більше ніж долі секунди;
- мережі 220, 110, 48, 24В постійного струму для живлення першої групи споживачів;
- мережі 6кВ з ізолюованою нейтраллю і 380/220В, 50Гц з заземленою нейтраллю для надійного живлення другої групи споживачів, можлива перерва в живленні на час від 15с до декількох хвилин;
- мережі 6кВ з ізолюованою нейтраллю і 380/220В, 50Гц з ізолюованою нейтраллю для живлення третьої групи споживачів, які не пред'являють особливих вимог.

Більшість приміщень реакторного відділення і машинного залу відносяться до "особливо небезпечних". Небезпека ураження електричним струмом пов'язана з низкою факторів:

- підвищене тепловиділення обладнання;
- підвищена вологість;
- можливість одночасного дотику людини до трубопроводів, повітропроводів, іншого металевого обладнання, що має контакт із землею, і до металевих корпусів електрообладнання.

Згідно ДСТУ 7237:2011 для забезпечення захисту від випадкового дотику людини до струмовідних частин ЕУ застосовують такі види захисту:

- основне (робоче) ізолювання струмовідних частин (захисне ізолювання);
- додаткове, посилене, подвійне ізолювання струмовідних частин;
- захисні оболонки;

- захисні огорожі (тимчасові або стаціонарні);
- безпечне розташування струмовідних частин;
- ізолювання робочого місця;
- мала напруга; захисне вимкнення;
- попереджувальна сигналізація (звукова, світлова тощо);
- блокування;
- встановлення знаків безпеки;
- електрозахисні засоби; засоби індивідуального захисту.

Для запобігання ураженню електричним струмом під час дотику до металевих неструмовідних частин, які можуть бути під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, застосовують окремо або в поєднанні такі види захисту:

- захисне заземлення (типи: IT; TT; TN);
- автоматичне вимкнення живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- обладнання відповідного класу за електрозахистом;
- захисний електричний поділ кіл;
- ізолювальні (непровідні) приміщення, зони, майданчики;
- системи наднизької напруги (безпечної, захисної).

4.3 Пожежна безпека та профілактика

Пожежна безпека на АЕС регламентується ВБН В.1.1-034-2003, НАПБ 03.005-2002, ГНД 34.03.307-2004 «Протипожежні норми проектування атомних електростанцій із водо-водяними енергетичними реакторами», а також ППБ АС-95 «Правила пожежної безпеки при експлуатації атомних станцій».

У науково – дослідній лабораторії, де виконуються роботи, ізолюючі матеріали проводки електромережі, покриття підлоги, столи, стільці, відносяться до групи горючих і легкозаймистих речовин і матеріалів. Згідно з ДСТУ Б.В.1.1-36:2016 робоче приміщення лабораторії відноситься до категорії В – це

приміщення, в яких знаходяться горючі і легкозаймисті речовини і матеріали (зокрема пил і волокна), а також речовини і матеріали, здатні при взаємодії з водою, киснем повітря або один з одним горіти. За пожежною небезпекою робочі зони приміщення відносяться згідно з ПУЕ-2017 до класу приміщень – П-ІІ а (зони, розташовані в приміщеннях, де знаходяться тверді горючі речовини).

Можливими причинами пожежі в приміщенні є несправності електроустаткування, коротке замикання в системі електроживлення, а також порушення протипожежного режиму (використання побутових нагрівальних приладів, паління).

Електричні кабелі електроустаткування вибираються за струмовим навантаженням та за умови використання важкозаймистої ізоляції.

Електропроводка має бути прокладена в захисних коробах з матеріалів, що не згорають.

У електричних схемах ЕУ передбачений захист від короткого замикання (автомати струмового захисту). У приміщенні підтримується температура набагато нижче за температуру самозаймання речовин, що знаходяться в даному приміщенні.

Технічні рішення системи протипожежного захисту спрямовані на обмеження поширення пожежі, захист людей (у першу чергу) і матеріальних цінностей.

Приміщення має бути обладнане первинними засобами пожежогасіння. При пожежі в електроустановках, що знаходяться під напругою (клас пожежі «Е»), рекомендується застосовувати порошкові вогнегасники (тип ВП, в яких застосовані порошки типу СІ, що являють собою зерна силікагелю, насичені галоїдвуглецевими рідинами). Також згідно з ДСТУ 3675-98 рекомендовано використання і вуглекислотні вогнегасники типу ВВ-8, що також призначені для гасіння пожежі, що виникла в електроустановках, що знаходяться під напругою (тривалість випуску заряду близько 15 с, довжина струменя 4 м, дозволяють

вести гасіння без відключення установки). Кількість, розміщення та умови зберігання вогнегасників мають відповідати нормативним вимогам.

Має бути працездатний пожежний зв'язок і автоматична пожежна сигналізація яка, відповідно до вимог ДБН В25-56-2004, має сповіщати про виникнення пожежі і забезпечувати оперативне керування пожежними командами під час пожежі. Автоматична пожежна сигналізація спрацьовує від сповіщувачів (теплових, димових), встановлених у приміщенні і підключених до прийомної станції з живленням від мережі змінного струму 220 В та від резервного блоку живлення.

Передбачений також протипожежний водопровід. Згідно ДБН В.1.1-7-2016 межа вогнестійкості будинку має складати 0,5 години. Евакуаційним виходом із приміщення є дверний проріз, що веде в коридор, з якого є два виходи з будівлі. В цьому ж коридорі знаходиться пожежний щит, у якому мають бути лопата, сокира, відро, багор.

В архітектурно-планувальних рішеннях будівлі мають передбачаються евакуаційні виходи, в тому числі аварійні, згідно з вимогами ДБН В.1.1-7-2016. Двері приміщення повинні відкриватися назовні, ширина дверей не менше 0,8 м, висота не менше 2 м, ширина коридору – 2 м.

4.3.1 Дотримання вимоги пожежної безпеки на робочих місцях

Перед початком роботи на електрообладнанні перевірте наявність і надійність кріплення захисних засобів і з'єднання захисного заземлення.

Під час виконання робіт:

Виконуйте тільки ту роботу, з якої пройшли інструктаж, не передоручайте свою роботу іншим особам.

Забороняється використовувати пожежний інвентар та обладнання для господарських та інших потреб, не пов'язаних з пожежогасінням.

Під час експлуатації електроустановок не дозволяється:

використовувати кабелі і проводи із пошкодженою ізоляцією або такою ізоляцією, що втратила захисні властивості;

залишати під напругою електричні проводи і кабелі з ізольованими кінцями;

переносити ввімкнені прилади та ремонтувати їх, які перебувають під напругою;

залишати без догляду ввімкнені в електромережу нагрівальні прилади, обладнання;

користуватися пошкодженими (несправними) розетками;

зв'язувати і скручувати електропроводи;

застосовувати саморобні подовжувачі, які не відповідають вимогам ПУЕ щодо переносних (пересувних) електропроводів;

використовувати побутові електронагрівальні прилади (чайники, кип'ятильники тощо) без негорючих підставок та у приміщеннях, де їх застосування не передбачене.

Забороняється самотійно усувати несправності електромережі і електрообладнання.

Після закінчення роботи:

Щоденно після закінчення роботи оглянути приміщення, що закриваються, вимикати електроприлади, освітлення, тощо.

4.3.2 Дотримання вимог пожежної безпеки в аварійній ситуації

- а) При можливості не створювати паніки, приступити до ліквідації створеної ситуації.
- б) Не допускати в небезпечну зону сторонніх осіб.
- в) Попередити про те що сталося безпосереднього керівника.
- г) Якщо є потерпілі подавати їм першу медичну допомогу; при необхідності викликати «швидку допомогу».

4.3.3 Надання першої медичної допомоги:

порядок подання першої долікарської медичної допомоги у випадку травмування (отруєння);

послідовність подання першої допомоги:

- усунути вплив на організм небезпечних та шкідливих чинників, які огорожують здоров'ю та життю постраждалого (звільнити від дії електричного струму, винести з зараженої атмосфери, погасити одяг, що горить тощо);

- визначити характер і тяжкість травми, найбільшу загрозу для життя постраждалого послідовність заходів щодо його врятування;

- виконати необхідні заходи щодо врятування постраждалого в порядку терміновості (відновити прохідність дихальних шляхів, провести штучне дихання, зовнішній масаж серця, зупинити кровотечу, іммобілізувати місце перелому, накласти пов'язку тощо);

- підтримати основні життєві функції постраждалого до прибуття медичного робітника;

- викликати швидку медичну допомогу або лікаря, або прийняти заходи для транспортування постраждалого в найближчу лікувальну установу,

Допомога потерпілому, що надається не медичними робітниками повинна надаватись лише до прибуття лікаря.

Конкретні дії щодо надання першої допомоги постраждалому при різноманітних ураженнях описані в інструкції з надання першої (долікарської) медичної допомоги, що вивчається персоналом при проходженні первинного і послідовних інструктажів з пожежної безпеки.

ВИСНОВКИ

В першому розділі представлені результати теплогідравлічного розрахунку реакторної установки типу ВВЕР-1000 зі збагаченням 3,64%, отримані певні значення фізичних параметрів, які представлені в додатку А і по яким можна зробити висновок, що реакторна установка з такими вихідними даними не може допускатися до роботи.

В другому розділі виконано нейтронно-фізичний розрахунок, отримали значення ефективного коефіцієнту розмноження для «холодного» і «гарячого» стану реактора рівним 1,447 та 1,393 відповідно, що свідчить про від'ємний температурний коефіцієнт реактивності. Для експлуатації реактору це зручно, оскільки при випадковому збільшенні його потужності зменшується реактивність, що сприяє поверненню потужності на вихідний рівень.

В третьому розділі я ознайомився з програмно-технічним комплексом системи «чорний ящик», яка призначена для зберігання та подання персоналу інформації про параметри енергоблоків АЕС в аварійних та післяаварійних умовах проектних та запроектних аварій. Розглянув служби забезпечення збереження інформації на АЕС. Функції системи спрямовані на підвищення безпеки за рахунок аналізу нештатних ситуацій та подальшої розробки заходів, що сприяють усуненню виявлених зауважень. Та показана важливість даних заходів для безпеки на майданчику атомної станції в цілому. Впровадження даної системи є досить доцільною, так як вона підвищує рівень безпеки на майданчику АЕС.

Також в роботі розглянуті питання забезпечення охорони праці на АЕС України.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Техническое обоснование безопасности. Блок №1 Южно-Украинская АЭС. Книга 10
2. Широков С.В. Ядерные энергетические реакторы: Учебное пособие. – К.: НТУУ «КПИ», 1997.-280с.
3. SSG-48. Ageing Management And Development of a Programme for Long Term Operation of Nuclear Power Plants.
4. IAEA RER/9/005 2/93. Working material – Defining Initiating events for PSA's for WWER reactors.
5. Норми радіаційної безпеки України; доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (НРБУ-97/Д-2000) затверджені Міністерством охорони здоров'я України від 12.07.2000 № 116 (ДГН 6.6.1. - 6.5.061-2000).
6. Загальні положення безпеки атомних станцій (НП 306.2.141-2008), затверджені наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 № 162 (zareestrovani Min'yustom 25.01.2008 za № 56/14747) / Міністерство юстиції України, 2008.
7. ДСТУ 3675-98 Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань / Український науково-дослідницький інститут пожежної безпеки МНС України, 1999. URL: <https://dnaop.com>.
8. ISO 3941:2007. Classification of fires.
9. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. Державний нормативний акт про охорону праці ДНАОП 0.00 -I 1.32-01 К: Укрбудинформ, 2001.-117с.
10. Правилами пожежної безпеки при експлуатації атомних станцій, затверджені наказом Міністерства палива та енергетики України від 30.05.2007 № 256 (zareestrovani Min'yustom 06.09.2007 za № 1039/14306) / Міністерство юстиції України, 2007.

11. Протипожежні норми проектування атомних електростанцій із водо - водяними енергетичними реакторами, затведжені Міністерства палива та енергетики України від 05.04.2002 № 208 (НАПБ 03.005-2002, ГНД 34.03.307 - 2004, ВБН В.1.1 034-03.307-2003).
12. ГОСТ 12.1.004 - 85 Пожарная безопасность. Общие требования
13. СНиП 2.01.02 - 85 Противопожарные нормы з питань охорони праці.

ДОДАТОК А

Результати теплогідравлічного розрахунку. Графічні уявлення розрахунків

Таблиця А.1- розподіл енерговиділення по висоті ТВЕЛУ до рисунку А.1

Z	$q_l(Z)$	$q_l^{\max}(Z)$
$\frac{-H_{аз}}{2}$	0,085	0,271
$\frac{-H_{аз}}{4}$	8,810	27,989
0	12,416	39,447
$\frac{H_{аз}}{4}$	8,810	27,989
$\frac{H_{аз}}{2}$	0,085	0,271

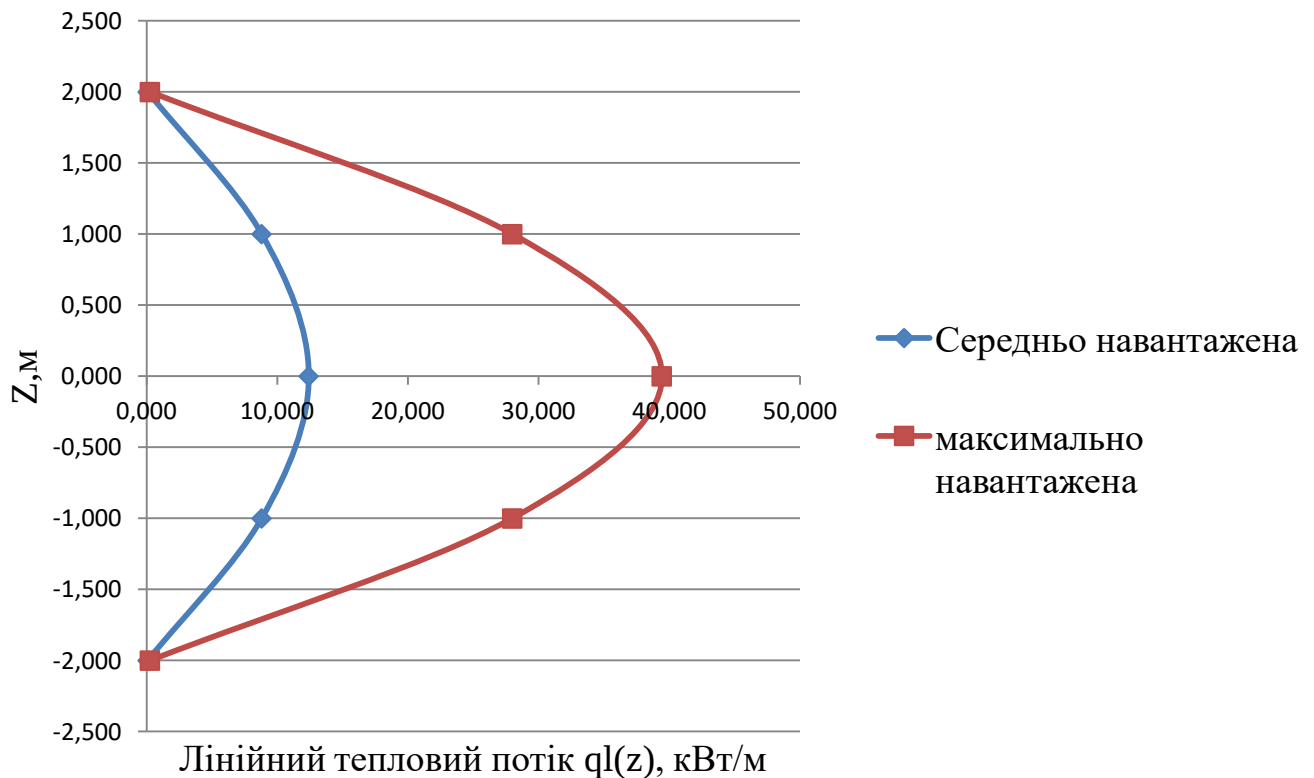


Рисунок А.1 - Зміна теплового потоку по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.2 - розподіл тиску по висоті

z	$P(z)$	$P_{\max}(z)$
$-\frac{H_0}{2}$	16,734	19,626
$-\frac{H_0}{4}$	16,367	17,818
0	16,000	16,000
$\frac{H_0}{4}$	15,633	14,182
$\frac{H_0}{2}$	15,266	12,364

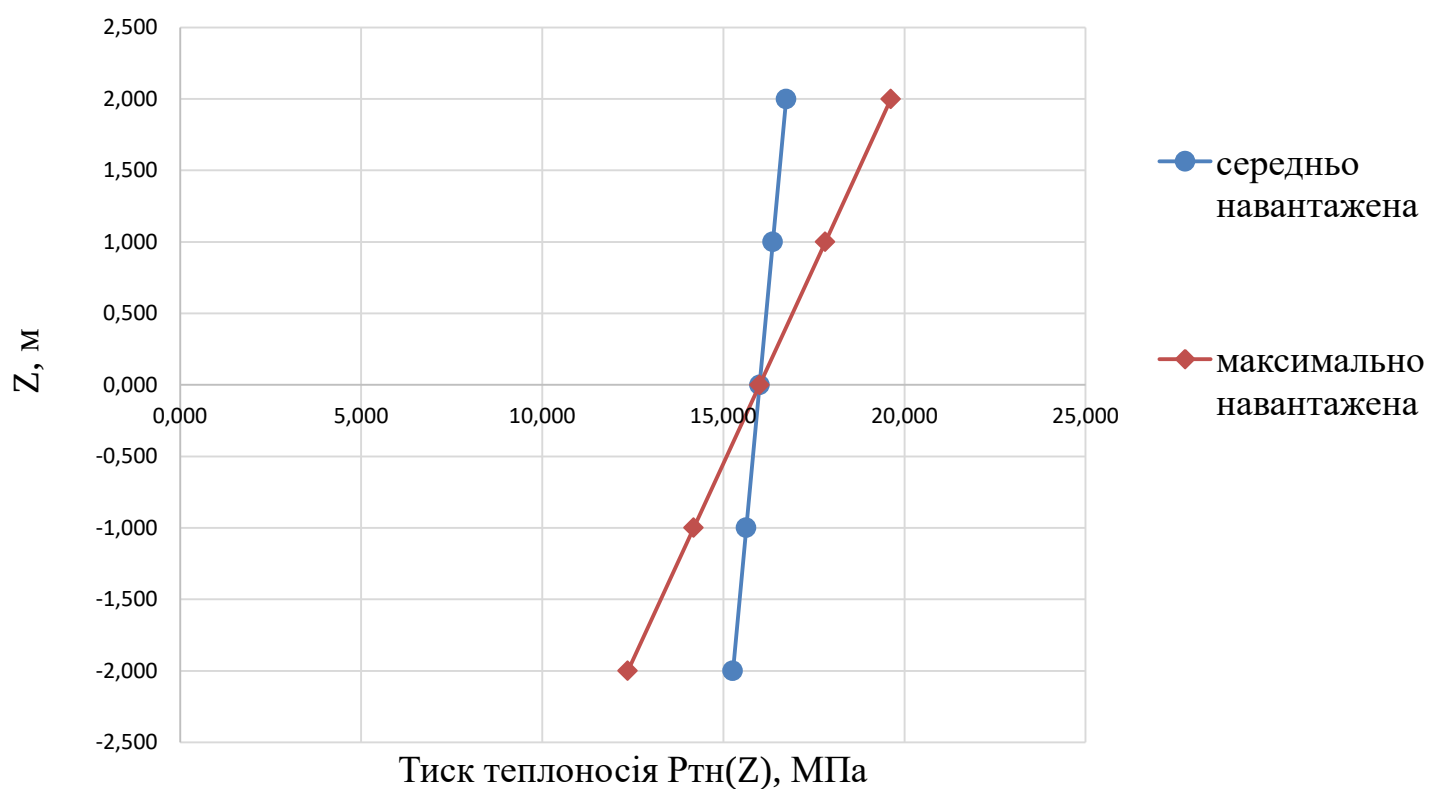


Рисунок А.2 - Зміна тиску по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.3 – Перший крок ітерації

z	$C_P(Z)$	$C_{P.max}(Z)$	$t(Z)$	$t_{max}(Z)$
$\frac{-H_0}{2}$	5555,408	5448,093	289	289
$\frac{-H_0}{4}$	5569,382	5512,691	294,037	295,912
0	5583,627	5749,485	305,193	310,622
$\frac{H_0}{4}$	5612,962	5634,84	315,087	322,359
$\frac{H_0}{2}$	5598,15	5662,072	318,524	325,571

Таблиця А.4 - кроки та результати проведених ітерацій

	2й крок				3й крок			
z	$t(Z)$	$t_{max}(Z)$	$C_P(Z)$	$C_{P.max}(Z)$	$t(Z)$	$t_{max}(Z)$	$C_P(Z)$	$C_{P.max}(Z)$
$\frac{-H_0}{2}$	289	289	5199,98	5150,28	289	289	5199,98	5150,28
$\frac{-H_0}{4}$	293,795	296,63	5312,98	5328,04	294,037	295,912	5315,39	5332,624
0	305,207	311,134	5590,26	5756,57	305,193	311,291	5629,03	5582,212
$\frac{H_0}{4}$	316,574	318,04	5911,26	6230,51	315,087	322,359	6098,14	6517,344
$\frac{H_0}{2}$	321,286	320,58	6066,49	6199,13	318,524	325,82	6126,4	6823,239

Продовження таблиці А.4

4й крок				
z	t(Z)	t _{max} (Z)	C _p (Z)	C _{p,max} (Z)
$\frac{-H_0}{2}$	289	289	5199,98	5150,28
$\frac{-H_0}{4}$	294,57	295,645	5313,03	5531,1
0	305,522	311,46	5593,25	5783,2
$\frac{H_0}{4}$	315,72	325,876	5937,99	6750,3
$\frac{H_0}{2}$	318,732	325,571	6126,55	6807,2

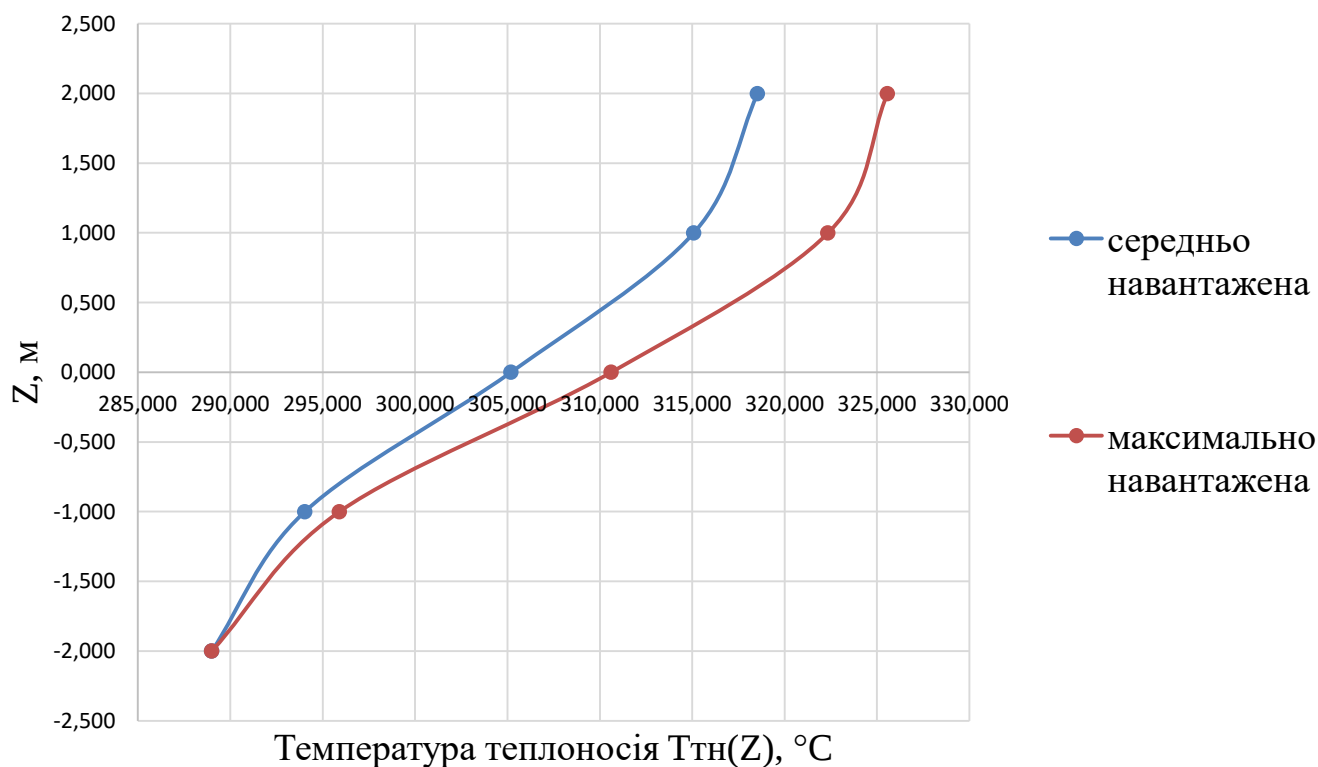


Рисунок А.3 - Зміна температури теплоносія по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.5 - Визначення чисел подібності

z	Pr	$Pr_{\max}$	$\nu \cdot 10^{-6}$	$\nu_{\max} \cdot 10^{-6}$	Re	$Re_{\max}$	Nu	$Nu_{\max}$
$\frac{-H_0}{2}$	0,834	0,827	0, 1242	0,125	262708,208	605248,330	460,725	895,027
$\frac{-H_0}{4}$	0,846	0,846	0,1230	0,123	265270,381	613972,186	467,091	914,124
0	0,878	0,901	0, 1209	0,120	270055,169	628927,131	481,595	957,301
$\frac{H_0}{4}$	0,924	0,986	0,1191	0,118	273999,897	640303,902	497,901	1009,771
$\frac{H_0}{2}$	0,950	1,046	0,1185	0, 117	275549,749	644794,189	506,111	1041,381

Таблиця А.6 - Визначення коефіцієнту тепловіддачі та теплопровідності

z	$\lambda(z)$ Вт/(м·К)	$\lambda_{\max}(z)$ Вт/(м·К)	$\alpha(z)$ кВт/(м ² * К)	$\alpha_{\max}(z),$ кВт/(м ² * К)
$\frac{-H_0}{2}$	0,581	0,584	46,877	91,620
$\frac{-H_0}{4}$	0,571	0,569	46,736	91,210
0	0,550	0,539	46,436	90,446
$\frac{H_0}{4}$	0,529	0,510	46,198	90,181
$\frac{H_0}{2}$	0,520	0,496	46,138	90,527

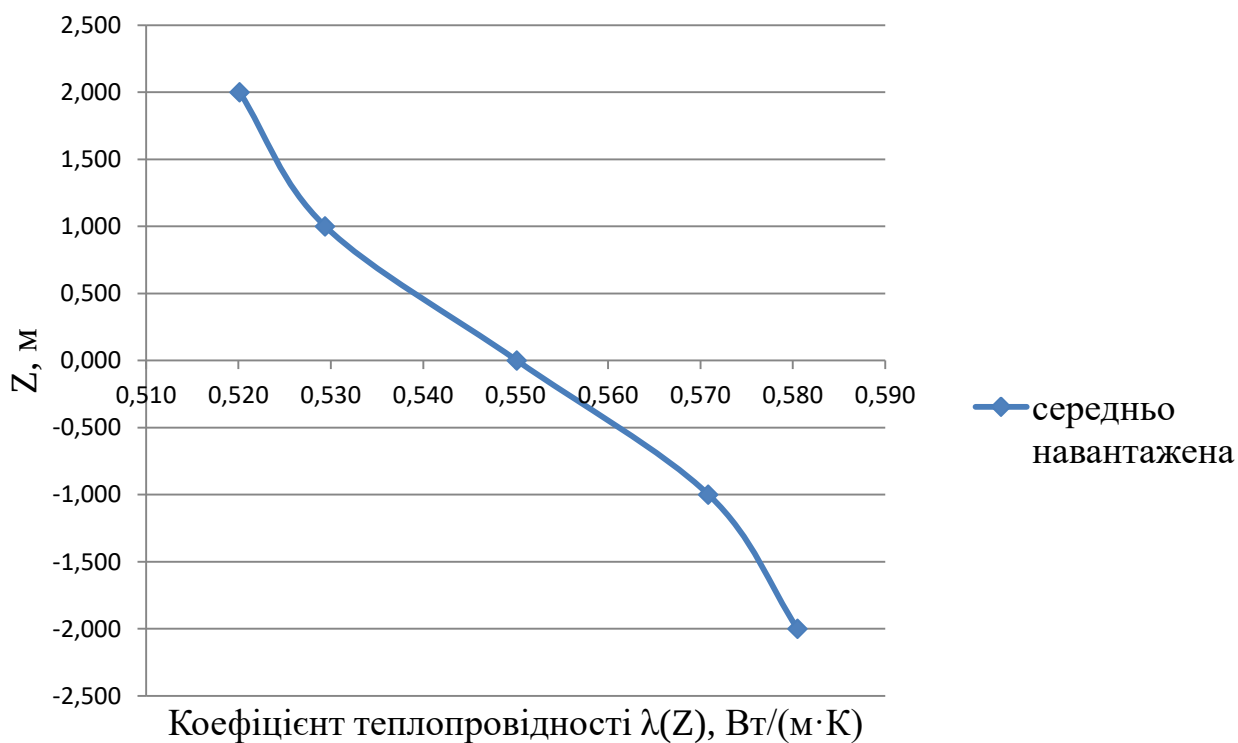


Рисунок А.4 - Зміна коефіцієнту теплопровідності теплоносія по висоті АЗ для середньо навантаженої ТВЗ

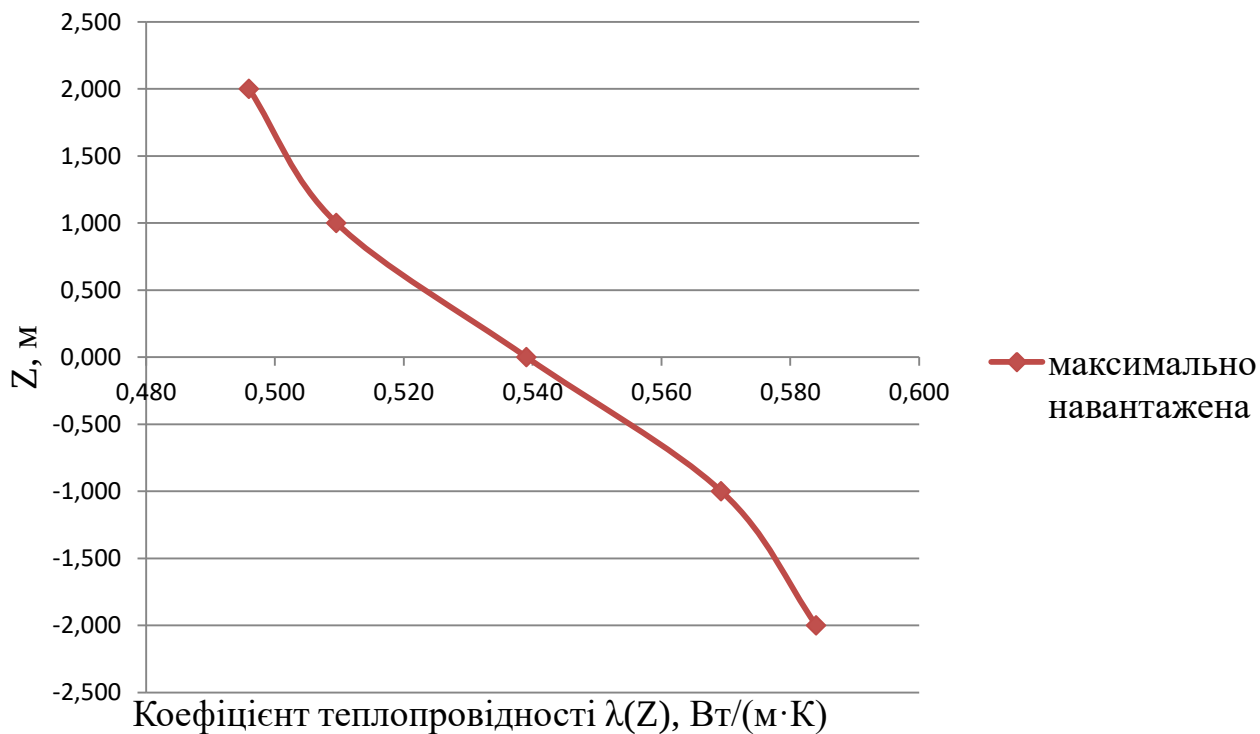


Рисунок А.5 - Зміна коефіцієнту теплопровідності теплоносія по висоті АЗ для максимально навантаженої ТВЗ

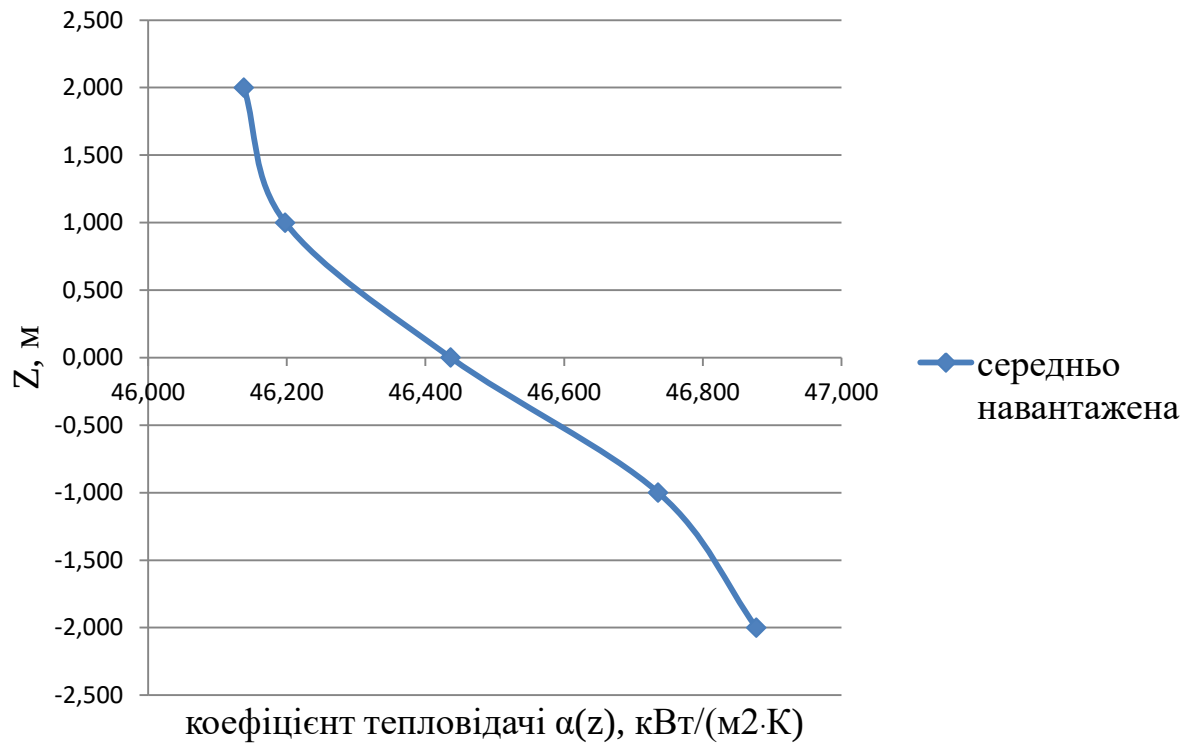


Рисунок А.6- Зміна значення коефіцієнту тепловідачі по висоті АЗ для середньо навантаженої ТВЗ

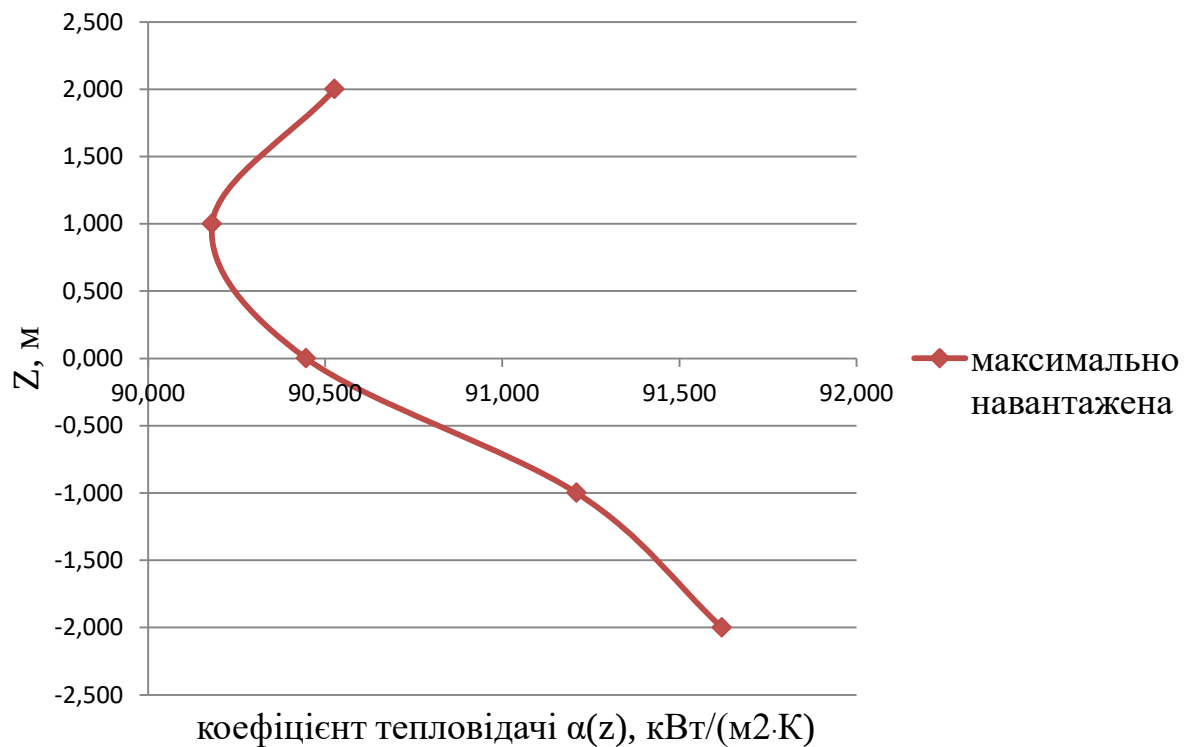


Рисунок А.7 - Зміна значення коефіцієнту тепловідачі по висоті АЗ для максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.7 – Зміна температури зонішньої поверхні оболонки ТВЕЛа

z	$t_{об}^{30B.}(z)$	$t_{об\ max}^{30B.}(z)$
$\frac{H_0}{2}$	289,061	289,100
$\frac{H_0}{4}$	300,378	306,235
0	314,188	325,294
$-\frac{H_0}{4}$	321,502	332,617
$-\frac{H_0}{2}$	318,604	323,552

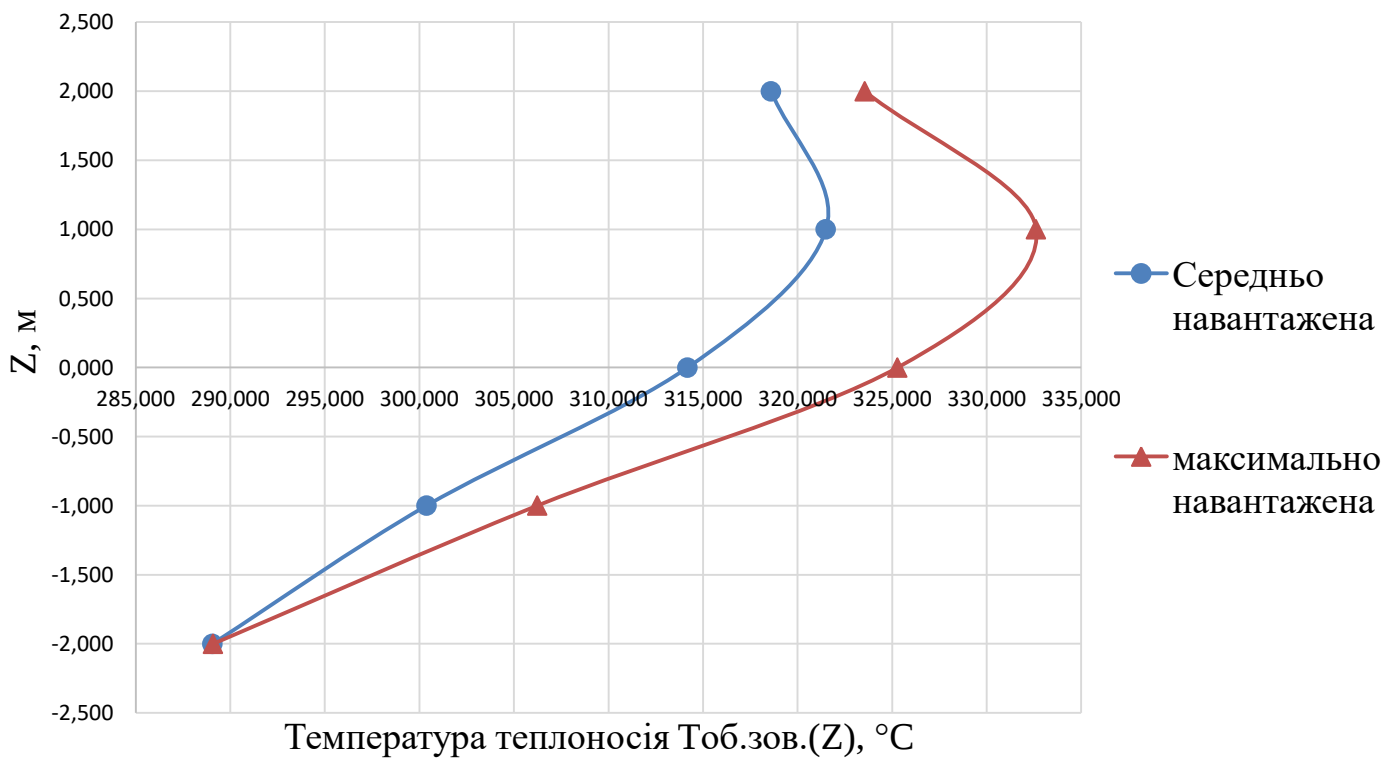


Рисунок А.8 - Зміна температури зовнішньої поверхні оболонки ТВЕЛ по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.8 - Визначення коефіцієнту тепловіддачі та теплопровідності по висоті

z	$\lambda_{06}^{30B.}(z)$	$\lambda_{06 \max}^{30B.}(z)$
$\frac{H_0}{2}$	20,633	20,633
$\frac{H_0}{4}$	20,599	20,588
0	20,572	20,549
$-\frac{H_0}{4}$	20,557	20,535
$-\frac{H_0}{2}$	20,563	20,553

Таблиця А.9 - Розподіл температури внутрішньої поверхні оболонки твела по висоті

z	$t_{06}^{BH.}(z)$	$t_{06 \max}^{BH.}(z)$
$\frac{H_0}{2}$	289,168	289,437
$\frac{H_0}{4}$	311,346	341,103
0	329,667	374,526
$-\frac{H_0}{4}$	332,492	367,574
$-\frac{H_0}{2}$	318,711	323,891

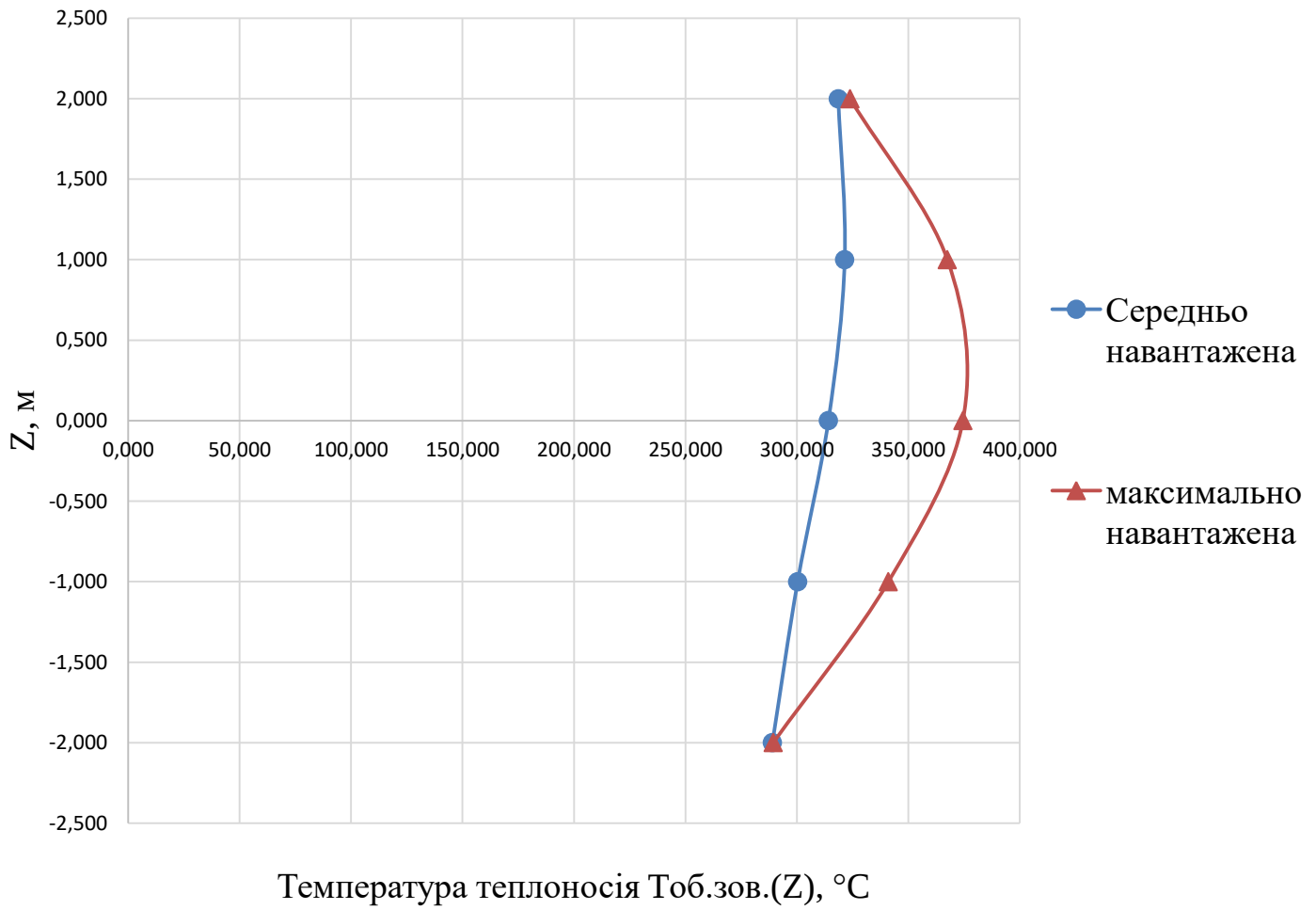


Рисунок А.9 - Зміна температури внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.10 - Розподіл температури зовнішньої поверхні осердя твела по висоті

z	$t_{oc}^{30B.}(z)$	$t_{oc\ max}^{30B.}(z)$
$\frac{H_0}{2}$	290,877	294,867
$\frac{H_0}{4}$	487,553	900,942
0	578,008	1163,548
$-\frac{H_0}{4}$	508,699	927,413
$-\frac{H_0}{2}$	320,420	329,321

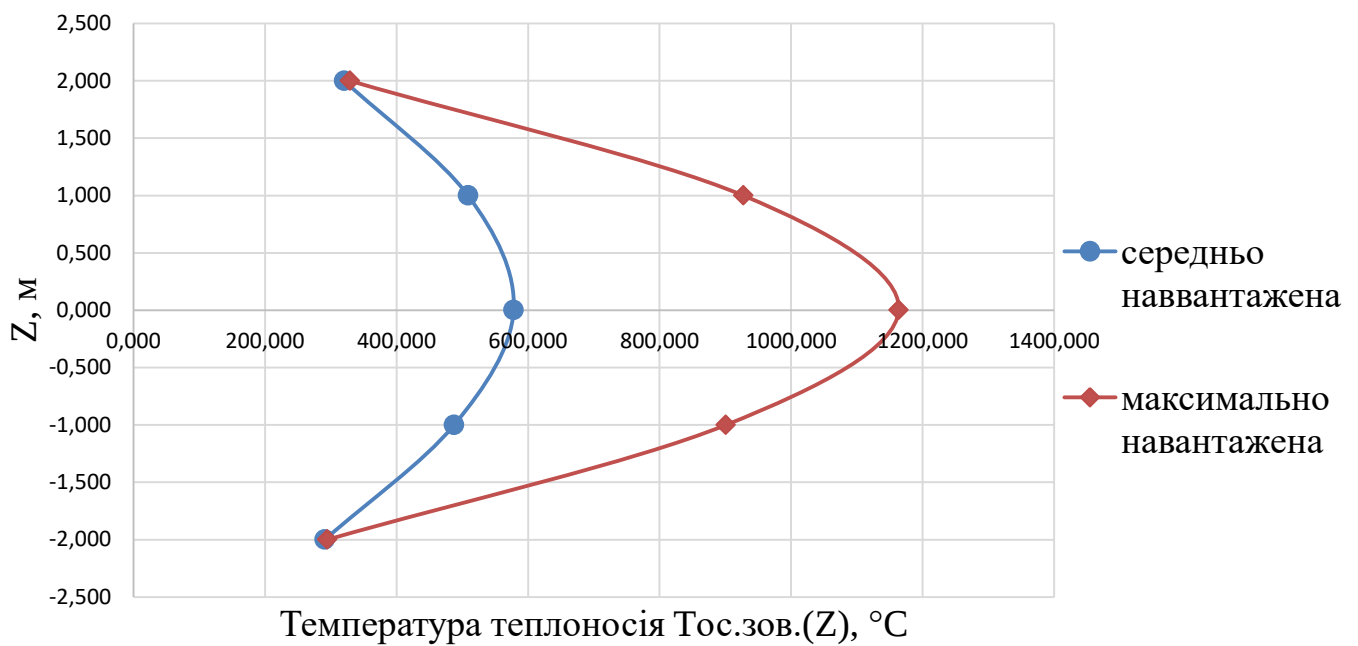


Рисунок А.10 - Зміна температури зовнішньої поверхні осердя ТВЕЛ по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.11 - Розподіл температури внутрішньої поверхні осердя твела по висоті

z	$t_{oc}^{BH.}(z)$	$t_{oc.max}^{BH.}(z)$
$\frac{H_0}{2}$	291,902	298,145
$\frac{H_0}{4}$	623,021	1519,714
0	787,941	2175,906
$-\frac{H_0}{4}$	647,335	1557,247
$-\frac{H_0}{2}$	321,489	332,759

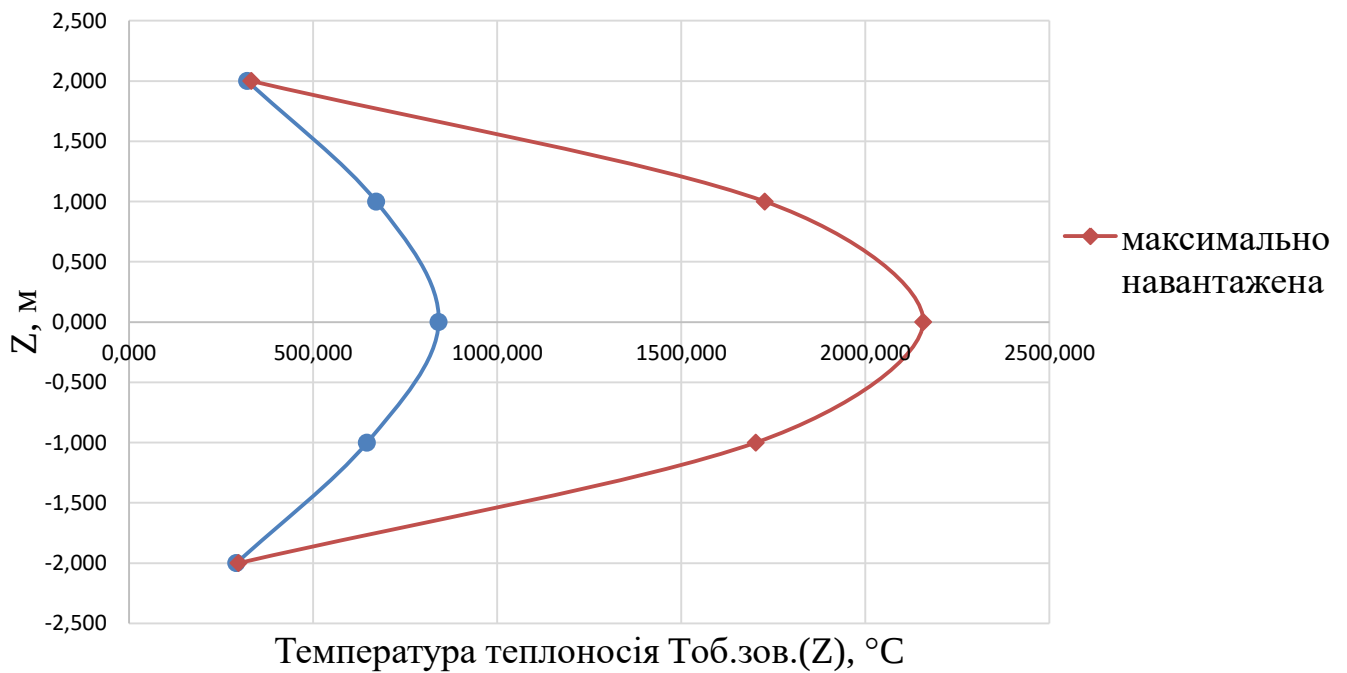


Рисунок А.11 - Зміна температури внутрішньої поверхні осердя ТВЕЛ по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

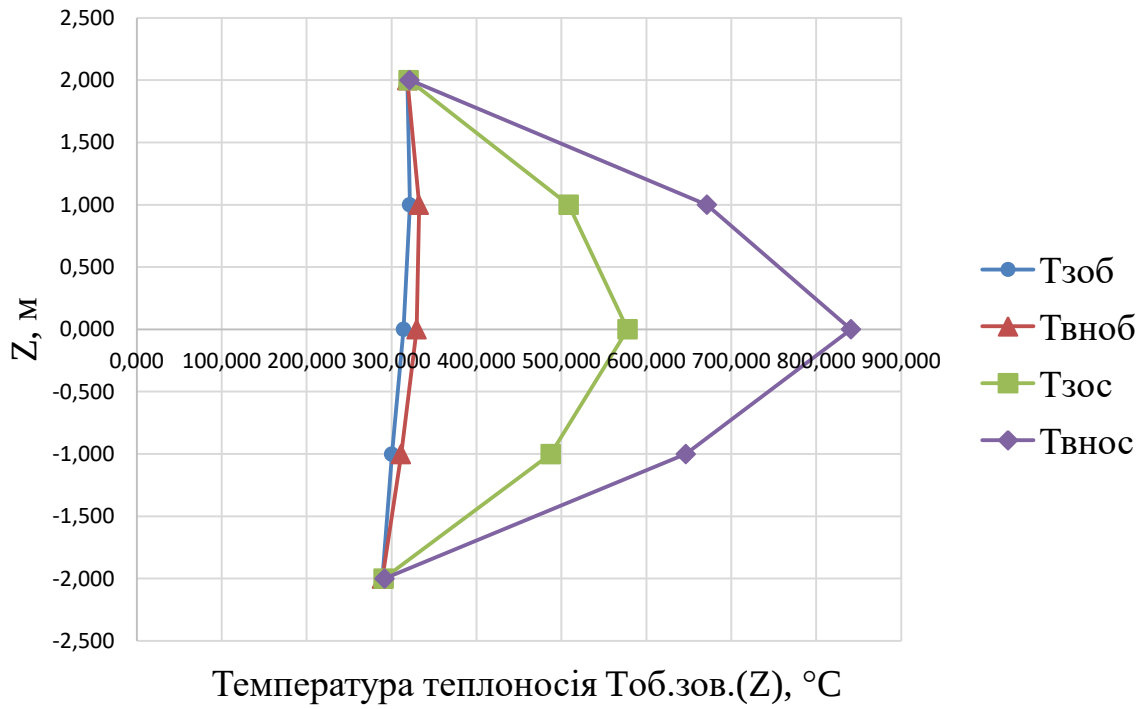


Рисунок А.12 - Зміна всіх чотирьох температур поверхонь ТВЕЛ по висоті активної зони для середньо навантаженої ТВЗ

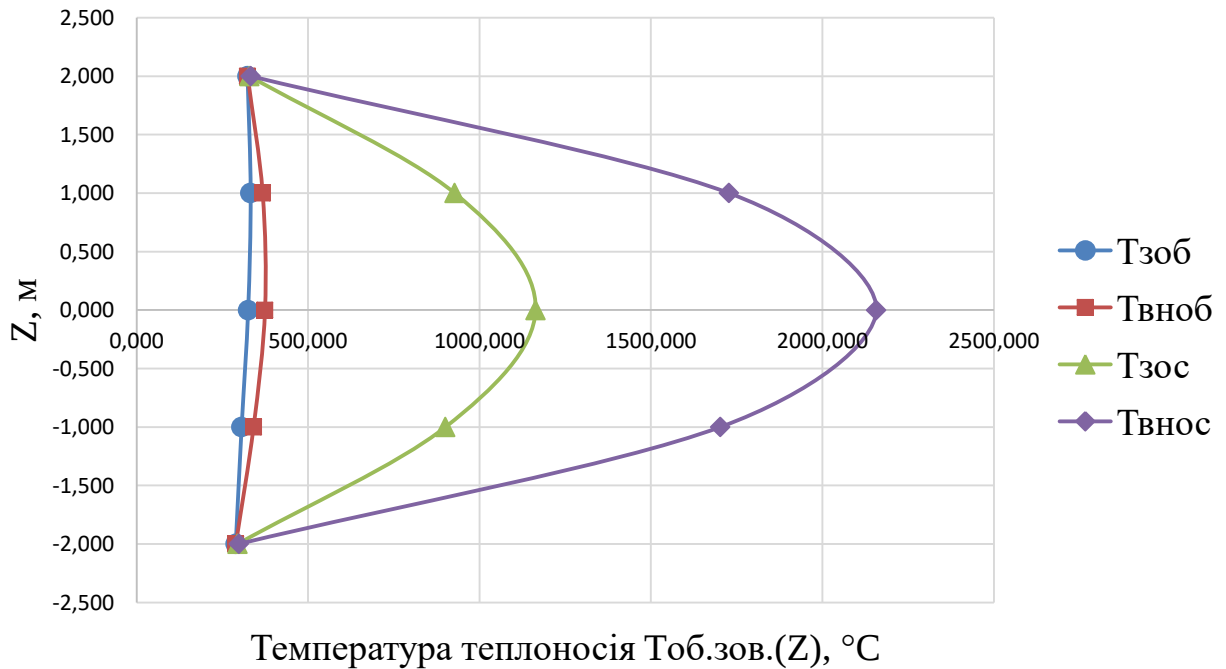


Рисунок А.13 - Зміна всіх чотирьох температур поверхонь ТВЕЛ по висоті активної зони для максимально навантаженої ТВЗ

Таблиця А.12 - Визначення критичних густин теплових потоків та запасу до кризи теплообміну

z	$h(z)$	$h_{max}(z)$	$h'(z)$	$h'_{max}(z)$	$r(z)$	$r_{max}(z)$
$\frac{-H_0}{2}$	1278,4	1277,4	1284,4	1284,4	1483,7	1483,700
$\frac{-H_0}{4}$	1307,5	1317,7	1314,4	1325,7	1445,1	1430,200
0	1368,4	1400	1376,8	1409,3	1361,1	1315,600
$\frac{H_0}{4}$	1425,5	1467	1434,8	1474,5	1278,8	1220,000
$\frac{H_0}{2}$	1449,1	1500,5	1458,2	1503,7	1244,3	1175,200

Таблиця А.13 - Розподіл масового паровмісту по висоті

z	$X(z)$	$X_{max}(z)$
$\frac{-H_0}{2}$	-0,00404	-0,00472
$\frac{-H_0}{4}$	-0,00477	-0,00559
0	-0,00617	-0,00707
$\frac{H_0}{4}$	-0,00727	-0,00615
$\frac{H_0}{2}$	-0,00731	-0,00272

Таблиця А.14 – Розподіл $q_{кр}(z)$ та $k(z)$ по висоті

z	$q_{кр}(z)$	$q_{кр_{max}}(z)$	$k(z)$	$k_{max}(z)$
$\frac{H_0}{2}$	2,49682	2,67287	868,6765	292,68928
$\frac{H_0}{4}$	2,515	2,80537	8,48581	2,97952
0	2,526	2,93176	6,04877	2,20933
$-\frac{H_0}{4}$	2,541	3,08689	8,57389	3,27853
$-\frac{H_0}{2}$	2,565	3,27207	892,55486	358,30477

Таблиця А.15 – Розподіл параметрів $n(Z)$, $m(Z)$ по висоті

z	$n(z)$	$n_{max}(z)$	$m(z)$	$m_{max}(z)$
$\frac{H_0}{2}$	1,25706	1,56073	0,18274	0,18253
$\frac{H_0}{4}$	1,21853	1,37088	0,18252	0,18226
0	1,18000	1,18000	0,18208	0,18180
$-\frac{H_0}{4}$	1,14147	0,98912	0,18174	0,18209
$-\frac{H_0}{2}$	1,10294	0,79823	0,18173	0,18315

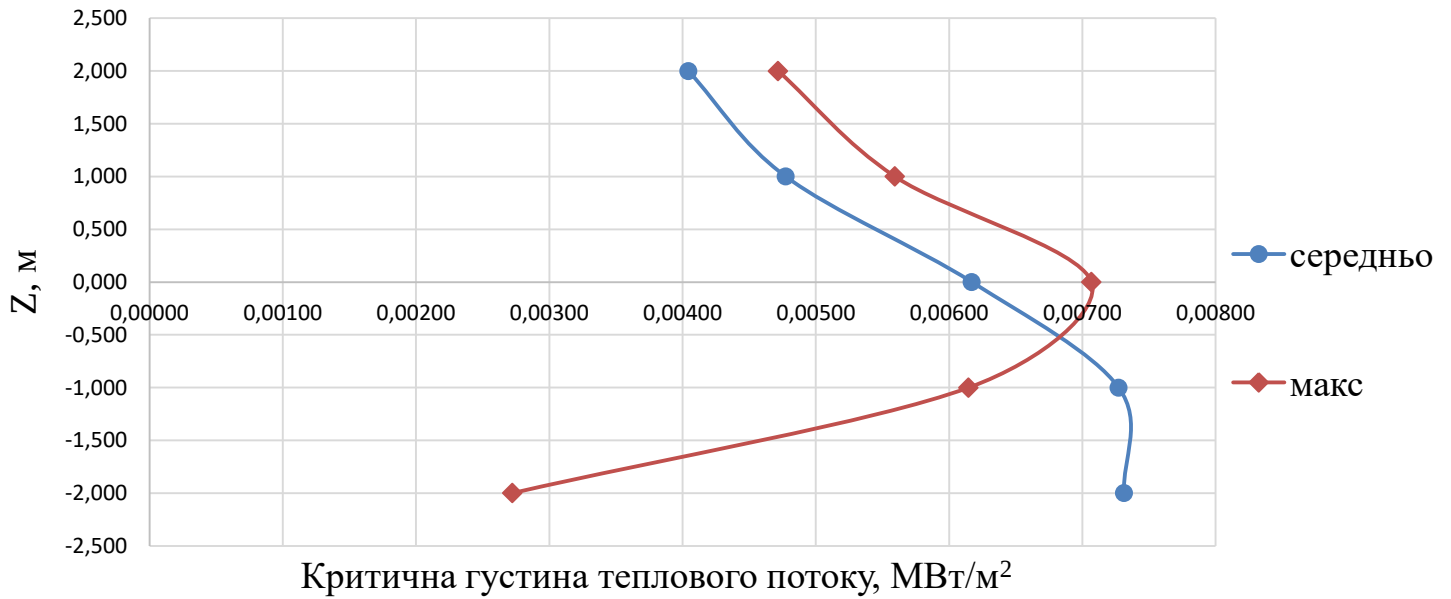


Рисунок А.14 - Зміна критичної густини теплового потоку по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ

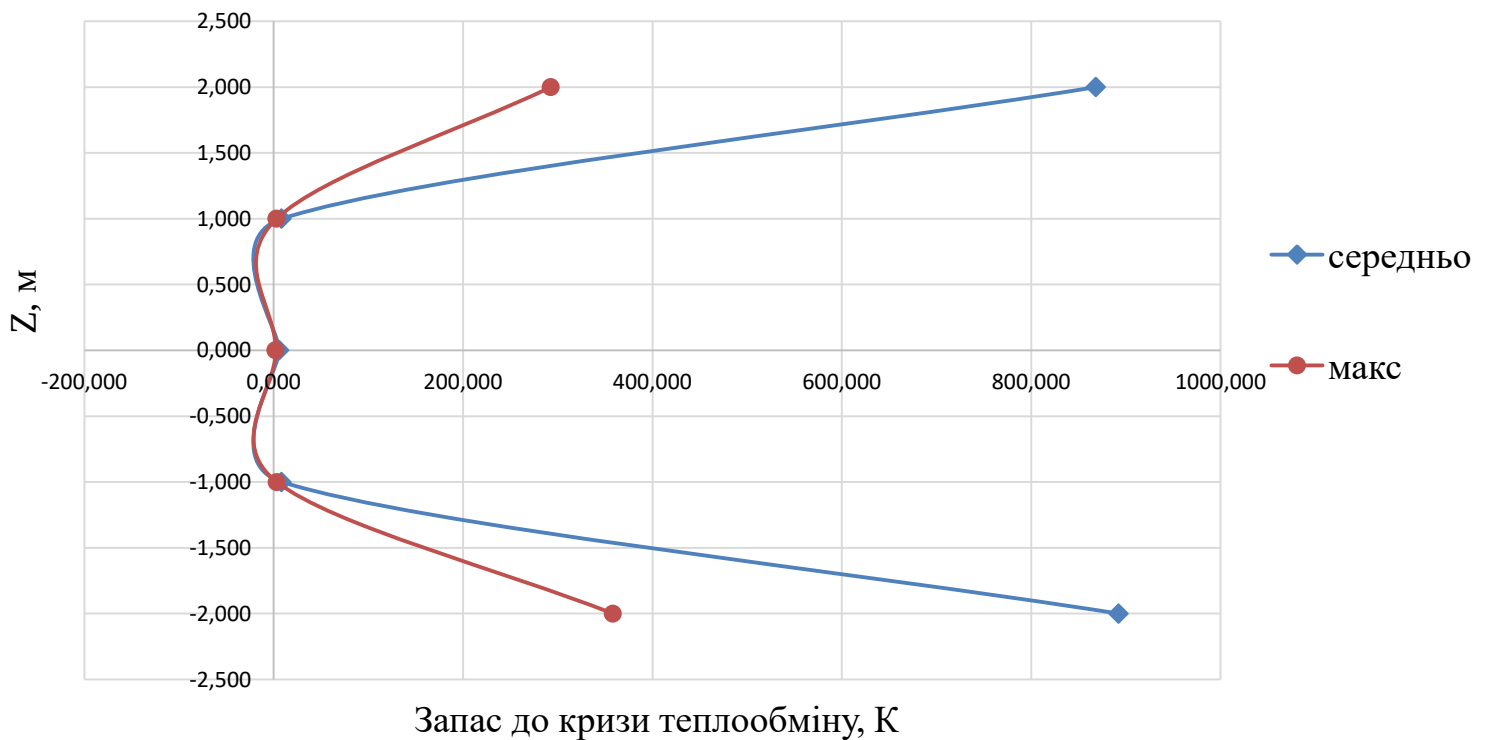


Рисунок А.15 - Зміна запасу до кризи теплообміну по висоті активної зони для середньо та максимально навантаженої ТВЗ