

Имя пользователя:
Баранюк Александр Володимирович

ID проверки:
1011576581

Дата проверки:
14.06.2022 14:26:39 EEST

Тип проверки:
Doc vs Internet + Library

Дата отчета:
14.06.2022 14:42:34 EEST

ID пользователя:
100007114

Название файла: TYa82-StelmahRA-diploma-2022

Количество страниц: 109 Количество слов: 18072 Количество символов: 113974 Размер файла: 1.68 MB ID файла: 1011446680

Обнаружены модификации текста (могут влиять на процент совпадений)

12.5% Совпадения

Наибольшее совпадение: 3.31% с источником из Библиотеки (ID файла: 5975967)

2.56% Источники из Интернета 133 Страница 111

11.9% Источники из Библиотеки 349 Страница 112

0% Цитат

Исключение цитат выключено

Исключение списка библиографических ссылок выключено

0% Исключений

Нет исключенных источников

Модификации

Обнаружены модификации текста. Подробная информация доступна в онлайн-отчете.

Замененные символы 1100

Подозрительное форматирование 60 страниц

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, одиниць, скорочень і термінів.....	6
Вступ.....	8
1 ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА ТИПУ ВВЕР-1000	9
1.1 Загальні положення	9
1.2 Вхідні данні до розрахунку.....	10
1.3 Розрахунок геометричних параметрів активної зони	11
1.3.1 Розміри активної зони	11
1.4 Площі прохідних перерізів та еквівалентні діаметри паливної касети.....	11
1.5 Розрахунок витрати та швидкості теплоносія	13
1.6 Розрахунок розподілу тепловиділення по висоті тепловиділяючого елемента	14
1.7 Розрахунок втрат тиску по висоті ТВЗ.....	17
1.7.1 Втрати тиску на тертя в ТВЗ.....	17
1.7.2 Коефіцієнт опору тертя $\xi_{тр}$ для ТВЗ.....	17
1.7.3 Сумарні втрати тиску на місцевих опорах	18
1.7.4 Загальні втрати тиску по висоті ТВЗ	19
1.7.5 Тиск на вході у ТВЗ	19
1.8 Розрахунок розподілу температур теплоносія та коефіцієнтів тепловіддачі по висоті ТВЗ	20
1.8.1 Розрахунок розподілу температур теплоносія по висоті ТВЗ.....	20
1.8.2 Розрахунок локальних коефіцієнтів тепловіддачі по висоті ТВЗ... ..	22
1.9 Розрахунок температури оболонки ТВЕЛ і паливного осердя.....	23
1.9.1 Температура зовнішньої поверхні оболонки	24
1.9.2 Температура внутрішньої поверхні оболонки	25
1.9.3 Температура зовнішньої поверхні паливного осердя	26
1.9.4 Температура поверхні центрального отвору паливного осердя:	27

1.10	Визначення критичних теплових потоків та запасу до кризи теплообміну	29
1.10.1	Визначення паровмісту	29
1.10.2	Знаходження запасу до кризи теплообміну	31
1.11	Висновки до розділу	32
2	НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА ВВЕР-1000	35
2.1	Вхідні дані	35
2.2	Загальні положення	36
2.3	Розрахунок розмірів елементарної чарунки	37
2.4	Розрахунок ядерних концентрацій	40
2.4.1	Ядерні концентрації в паливі	40
2.4.2	Ядерні концентрації в оболонці	41
2.4.3	Ядерні концентрації в сповільнювачі	42
2.5	Розрахунок макроскопічних перерізів	43
2.5.1	Визначення перерізів при $T = T_{нг}$	44
2.6	Розрахунок коефіцієнта розмноження для нескінченного реактора	51
2.6.1	Розрахунок коефіцієнта розмноження на швидких нейтронах	52
2.6.2	Розрахунок коефіцієнта використання теплових нейтронів	58
2.6.3	Визначення ймовірності уникнення резонансного захвату	61
2.6.4	Визначення числа вторинних швидких нейтронів	64
2.6.5	Розрахунок квадрату довжини дифузії	66
2.6.6	Розрахунок квадрату довжини сповільнення	66
2.6.7	Розрахунок квадрату довжини міграції	67
2.7	Визначення ефективного коефіцієнта розмноження	67
2.8	Побудова графіка розподілу нейтронів	68
2.9	Висновок	72
3	БАСЕЙН ВИТРИМКИ НА РЕАКТОРІ ВВЕР-1000 ПРОЕКТУ В-320	73
3.1	Вступ	73
3.2	Експлуатація басейну	74

3.3	Загальна конструкція басейну витримки.....	78
4	ОХОРОНА ПРАЦІ.....	Error! Bookmark not defined.
4.1	Технічні рішення та організаційні заходи з радіаційної безпеки на АЕС та сховищах відпрацьованого палива.	Error! Bookmark not defined.
4.1.1	Басейн витримки	Error! Bookmark not defined.
4.1.2	Радіаційний контроль	Error! Bookmark not defined.
4.1.3	Сховища ядерного палива	Error! Bookmark not defined.
4.1.4	Основні вимоги до системи фізичного захисту	Error! Bookmark not defined.
4.2	Електробезпека.....	Error! Bookmark not defined.
4.2.1	Технічні рішення по запобіганню електротравмам від дотику до нормально струмовідних частин електроустаткування....	Error! Bookmark not defined.
4.2.2	Технічні рішення для запобігання електротравмам під час переходу напруги на нормально неструмовідні частини електроустаткування	Error! Bookmark not defined.
4.3	Пожежна безпека та профілактика.....	Error! Bookmark not defined.
	ВИСНОВКИ.....	85
5	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	86
6	ДОДАТОК А.....	88
7	ДОДАТОК Б.....	89
8	ДОДАТОК В.....	90
9	ДОДАТОК Г	91
10	ДОДАТОК Д.....	92
11	ДОДАТОК Е.....	93

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

Σ	-	макроскопічний переріз, см ⁻¹ ;
V^2	-	геометричний параметр, см;
d	-	діаметр, м;
D	-	коефіцієнт дифузії, см;
f	-	площа, м ² ;
G	-	витрата теплоносія через реактор, кг/с;
H	-	висота, м;
k	-	коефіцієнт розмноження;
n	-	кількість ТВЕЛів в ТВЗ, шт;
N	-	концентрація, см ⁻³ ;
P	-	тиск, МПа;
q	-	густина теплового потоку, Вт/м ² ;
t	-	Крок решітки ТВЕЛів в ТВЗ, м;
T	-	температура, °С;
V	-	об'єм, м ³ ;
α	-	коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м ² · К);
δ	-	товщина, м;
v	-	питомий об'єм, м ³ /КГ;
ρ	-	густина, кг/м ³ ;
σ	-	мікроскопічний переріз, барн.

Індекси нижні:

a	-	поглинання;
f	-	поділ;
max	-	максимальний;
s	-	розсіювання;
tr	-	транспортування;
еф	-	ефективний.

Індекси верхні:

вн	-	внутрішній;
зов	-	зовнішній;
н.г.	-	нейтронний газ.

Скорочення:

WIMS	-	Winfrith improved multigroup scheme
АЕС	-	атомна електрична станція;
ВВЕР	-	ВОДО-водяний енергетичний реактор;
ГЗ	-	газовий зазор;
ММР	-	малий модульний реактор;;
РУ	-	реакторна установка;
ТВЕЛ	-	тепловіділяючий елемент.

ВСТУП

Паливо з ходом часу вигоряє та через деякий час роботи на потужності становиться не придатним до роботи. Таке паливо називається відпрацьованим, та воно не може в достатній підтримувати ядерну реакцію ділення в реакторі. Однак воно ще не може йти на довгострокове зберігання через його залишкові тепловиділення.

1 ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА ТИПУ ВВЕР-1000

1.1 Загальні положення

Розділ завдяки методу теплогідравлічного розрахунку дає змогу з'ясувати параметри яких досягає а.з. при запропонованих вхідних значеннях.

Методика яка покладена в основу цього розділу відповідає повірочним розрахункам, які дають змогу визначити важливі параметри, за допомогою яких можна зробити висновок - відповідає а.з. регламентам безпеки чи ні. До таких параметрів можна віднести коефіцієнт теплопередачі, температуру оболонки ТВЕЛ, температуру паливного осердя, коефіцієнт запасу до кризи теплообміну та інше.

Задачею конструктивного розрахунку є вибір конструктивного оформлення, поверхні нагріву і визначення одиничної потужності при відомих параметрах і обмеженнях по їх гранично допустимим значенням. Конструкційний розрахунок проводиться на стадії створення і оптимізації того чи іншого типу реактору і вбачає проведення багатоваріантних розрахунків, що притаманні конструктивним розробкам.

Таким чином у даній роботі використовується методика повіркового розрахунку: дано певний реактор, для якого необхідно перевірити чи буде він працювати при нових заданих умовах. Для цього змінюється крок решітки і прохідний переріз для проходу теплоносія, тобто визначальні розміри активної зони, за якими проводиться розрахунок основних теплотехнічних параметрів середньо та найбільш тепловантаженої тепловиділяючої збірки і визначається її допустима потужність [1].

1.2 Вхідні данні до розрахунку

Вхідні дані для розрахунку представлені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Вхідні дані

Характеристика	Розмірність	Позначення	Чисельне значення
Електрична потужність реактора	МВт	$Q_{ел.}$	920
Співвідношення між висотою та діаметром активної зони	-	β	1,12
Збагачення за U-235	%	x	3,52
Питоме об'ємне енерговиділення	МВт/м ³	q_v	67
Зазор між касетами	см	$\delta_{ззз}$	0,2
Діаметр ТВЕЛ	см	$d_{ТВ}$	0,9
Товщина оболонки ТВЕЛ	см	$\delta_{ТВ}$	0,065
Крок ТВЕЛ	см	$l_{ТВ}$	1,3
Діаметр центрального отвору	см	$d_{цт}^3$	0,12
Діаметр центральної трубки	см	$d_{цт}$	1,03
Товщина центральної трубки	см	$\delta_{цт}$	0,065
Діаметр направляючих каналів	см	$d_{нк}^3$	1,26
Товщина направляючих каналів	см	$\delta_{нк}^3$	0,08
Кількість ТВЕЛ	шт	$n_{ТВ}$	312
Кількість кластерних труб	шт	$n_{к}$	18
Температура теплоносія на вході в активну зону	°C	$T_{вх}$	289
Тиск теплоносія в а.з.	МПа	$P_{вих}$	16

1.3 Розрахунок геометричних параметрів активної зони

1.3.1 Розміри активної зони

Теплова потужність реактора:

$$Q_T \equiv \frac{Q_{ед}}{\eta} = \frac{920}{0,333} = 2762,76 \text{ МВт}$$

Об'єм активної зони:

$$V_{аз} \equiv \frac{Q_T}{q_v} = \frac{2762,76}{67} = 41,235 \text{ м}^3$$

Діаметр активної зони:

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{4V_{аз}}{\beta\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 41,235}{1,12 \cdot 3,14}} = 3,606 \text{ м}$$

Висота активної зони:

$$H_0 = \beta \cdot D_0 = 1,12 \cdot 3,606 = 4,039 \text{ м}$$

1.4 Площі прохідних перерізів та еквівалентні діаметри паливної касети

Розмір касети «під ключ»:

$$S_1 = 2 \left[\left(\frac{1}{2} d_{цт} + 10 \cdot \frac{d_{ТВ}}{2} \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] =$$

$$= 2 \left[\left(\frac{1}{2} \cdot 0,0103 + 10 \cdot 0,013 + \frac{0,0095}{2} \right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \right] = 0,242 \text{ м}$$

Площа перерізу ТВЗ:

$$f_{ТВЗ} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{S_1}{2} \right)^2} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{0,242}{2} \right)^2} = 0,0508 \text{ м}^2$$

Площа перерізу чарунки з урахуванням газового зазору:

$$f_ч = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{S_1}{2} + \frac{\delta_{зая}}{2} \right)^2} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{0,242}{2} + \frac{0,002}{2} \right)^2} = 0,0517 \text{ м}^2$$

Площа прохідного перерізу ТВЗ:

$$S_{ТВЗ} \equiv f_{ТВЗ} = \frac{\pi}{4} (n_{ТВ} \cdot d_{ТВ}^2 + n_{НК} \cdot d_{НК}^2 + d_{ЦТ}^2) =$$

$$= 0,0508 - \frac{\pi}{4} (312 \cdot 0,0095^2 + 18 \cdot 0,0126^2 + 0,0103^2) = 0,0264 \text{ м}^2$$

Площа прохідного перерізу чарунки з врахуванням зазору:

$$S_ч = f_ч - f_{ТВЗ} + S_{ТВЗ} = 0,0517 - 0,0508 + 0,0264 = 0,0273 \text{ м}^2$$

Гідралічний діаметр:

$$d_г = \frac{4 \cdot S_{ТВЗ}}{\pi_г} = \frac{4 \cdot 0,0293}{9,660} = 0,01215 \text{ м}$$

Змочений периметр:

$$\pi_г = \pi (n_{ТВ} \cdot d_{ТВ} + n_{НК} \cdot d_{НК} + d_{ЦТ}) =$$

$$= \pi(312 \cdot 0,0095 + 18 \cdot 0,0126 + 0,0103) = 9,660 \text{ м}$$

Тепловий діаметр:

$$d_T = \frac{4 \cdot S_{ТВЗ}}{\Pi_T} = \frac{4 \cdot 0,0273}{8,915} = 0,01317 \text{ м}$$

Тепловий периметр:

$$\Pi_T = \pi \cdot n_{ТВ} \cdot d_{ТВ} = \pi \cdot 312 \cdot 0,0095 = 8,915 \text{ м}$$

Кількість чарунок в активній зоні:

$$N = \frac{\pi D_0^2}{4f_{ч}} = \frac{\pi \cdot 3,606^2}{4 \cdot 0,0517} = 193$$

1.5 Розрахунок витрати та швидкості теплоносія

Масова витрата теплоносія через активну зону реактора:

$$G = \frac{Q_T}{i_{вих} - i_{вх}} = \frac{Q_T}{c_p(T_{вих} - T_{вх})} = \frac{2762,7628 \cdot 10^6}{5583,6(322 - 289)} = 14992,9 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

де $c_p = f(P, \frac{T_{вих} + T_{вх}}{2})$ - масова теплоємність теплоносія.

Витрата теплоносія через максимально навантажену чарунку:

$$(G_{ч})_{\max} = \frac{G \cdot k_r}{N} = \frac{14992,9 \cdot 2,31}{193} = 179,448 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

де приймаємо $k_r = 2,31$

Швидкість теплоносія в середньонавантаженій чарунці:

$$w = \frac{G}{S_{ч} \cdot N \cdot \rho} = \frac{15807,7}{0,02934 \cdot 193 \cdot 715,887} = 3,6978 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

де $\rho = f(P, \frac{T_{вх} + T_{вих}}{2})$ - густина теплоносія.

Швидкість теплоносія в максимально навантаженій чарунці:

$$w_{\max} = \frac{(G_{ч})_{\max}}{S_{ч} \cdot \rho} = \frac{189,201}{0,02934 \cdot 715,887} = 8,542 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

1.6 Розрахунок розподілу тепловиділення по висоті тепловиділяючого елемента

Енерговиділення в ТВЕЛах:

$$Q = \kappa \cdot Q_T = 0,93 \cdot 2762,762 = 2569,37 \text{ МВт},$$

де приймаємо $\kappa = 0,93$.

Тепловий потік на одиницю поверхні ТВЕЛ:

$$q_s = \frac{Q}{F_{ТВЗ}} = \frac{Q}{N \cdot \pi d_{ТВ} \cdot n_{ТВ} \cdot H_0} = \frac{2569,3694}{193 \cdot \pi \cdot 0,0095 \cdot 312 \cdot 4,03904} = 0,373 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$$

Середній тепловий потік на одиницю довжини:

$$q_l(0) = \frac{Q \cdot k_z}{N \cdot H_0 \cdot n_{ТВ}} = \frac{2569,37 \cdot 1,57}{193 \cdot 4,039 \cdot 312} = 0,01658 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2},$$

де $k_z = 1,57$ - коефіцієнт нерівномірності тепловиділення по висоті ТВЕЛ.

Максимальна густина теплового потоку:

$$q_s^{\max} = q_s \cdot k_v = 0,375 \cdot 4,9881 = 1,874 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2},$$

де $k_v = k_r \cdot k_z \cdot k_k \cdot k_{\text{мех}} \cdot k_{\text{потуж}} = 2,31 \cdot 1,57 \cdot 1,15 \cdot 1,15 \cdot 1,04 = 4,9881$ – об'ємний коефіцієнт нерівномірності тепловиділення з врахуванням макроскопічних, локальних і технічних коефіцієнтів нерівномірності.

$k_k = 1,15$ – коефіцієнт нерівномірності розподілу потужності між ТВЕЛами в касеті ТВЗ.

$k_{\text{мех}} = 1,15$ – коефіцієнт, що враховує запас на неточність інженерних озрахунків та технологічні допуски на виготовлення елементів АкЗ

$k_{\text{потуж}} = 1,04$ – коефіцієнт, що враховує можливі відхилення потужності, тиску, температур, витрати.

Лінійна густина теплового потоку в середньому перетині ТВЕЛ максимально навантаженої чарунки:

$$q_{l \max}(0) = \frac{Q \cdot k_v}{N \cdot H_0 \cdot \eta_{\text{ТВ}}} = \frac{2569,36 \cdot 4,988}{193 \cdot 4,039 \cdot 312} = 0,05269 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$$

Розподілення тепловиділення по висоті:

$$q_l(z) = q_l(0) \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H_{\text{еф}}}\right)$$

Ефективна висота активної зони:

$$H_{\text{еф}} = H_0 + 2 \cdot \delta = 4,0039 + 2 \cdot 0,08 = 4,199\text{м},$$

де приймаємо екстрапольований доданок до розмірів активної зони $\delta = 0,08$ м.

Далі розрахунок проводиться для 5 основних точок: $z = -\frac{H_0}{2}$; $z = -\frac{H_0}{4}$, $z = 0$; $z = \frac{H_0}{4}$; $z = \frac{H_0}{2}$. За результатами розрахунку будемо графіки розподілу тепловиділення по висоті.

Тут і далі розрахунок буде приведений для точки $z = \frac{H_0}{4}$, інші результати будуть приводитись у таблицях.

$$q_l(z) = 0,0175986 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 4,0134}{4,1734}\right) = 0,010726 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$$

$$q_{l \max}(z) = 0,05591 \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot 4,0134}{4,1734}\right) = 0,128 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}$$

Результати обчислень тепловиділення по висоті представлені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати розрахунку розподілу тепловиділення по висоті ТВЗ

z, м	q_l , МВт/м	$q_{l \max}$, МВт/м
$\frac{H_0}{2}$	0,001004	0,003192
$\frac{H_0}{4}$	0,012	0,03837
0	0,01658	0,05269
$-\frac{H_0}{4}$	0,01207	0,0383
$-\frac{H_0}{2}$	0,001004	0,003192

Графік розподілу тепловиділення по висоті представлено у додатку А.

1.7 Розрахунок втрат тиску по висоті ТВЗ

1.7.1 Втрати тиску на тертя в ТВЗ

Знаходимо число Рейнольдса:

$$Re = \frac{k_r \cdot w \cdot d_r}{\nu} = \frac{2,31 \cdot 3,6978 \cdot 0,01215}{1,21 \cdot 10^{-7}} = 0,86 \cdot 10^6$$

$$Re_{\max} = \frac{k_r \cdot w_{\max} \cdot d_r}{\nu} = \frac{2,31 \cdot 9,694 \cdot 1,08 \cdot 10^{-2}}{1,21 \cdot 10^{-7}} = 1,98 \cdot 10^6$$

Коефіцієнт опору тертя в круглій трубці ξ_0 :

В обох випадках $Re > 10^5$

$$\xi_0 = (1,82 \cdot \lg(Re) - 1,64)^{-2} = (1,82 \cdot \lg(0,86 \cdot 10^6) - 1,64)^{-2} = 0,0281$$

$$\xi_{0 \max} = (1,82 \cdot \lg(Re_{\max}) - 1,64)^{-2} = (1,82 \cdot \lg(1,98 \cdot 10^6) - 1,64)^{-2} = 0,0243$$

1.7.2 Коефіцієнт опору тертя $\xi_{тр}$ для ТВЗ

Визначимо коефіцієнт a :

$$a = \frac{d_{ТВ}}{d_{ТВ}} = \frac{0,014}{0,0091} = 1,54 > 1,02$$

При $a = 1,54 > 1,02$ параметр a , який залежить від співвідношення між кроком ТВЕЛ та зовнішнім діаметром ТВЕЛ:

$$a = 0,58 + 9,2 \left(\frac{1}{d_{ТВ}} - 1 \right) = 0,58 + 9,2(1,348 - 1) = 3,7816$$

Знаходимо коефіцієнти опору тертя для ТВЗ:

$$\begin{aligned} \xi_{тр} &= \xi_0 \cdot \left(0,57 + 0,18 \cdot \left(\frac{1}{d_{ТВ}} - 1 \right) + 0,53 \cdot \left[1 - \exp^{-a} \right] \right) = \\ &= 0,0281 \\ &\cdot \left(0,57 + 0,18 \cdot (1,348 - 1) + 0,53 \cdot \left[1 - \exp^{-3,7816} \right] \right) = 0,0316 \\ \xi_{тр \max} &= \xi_{0 \max} \cdot \left(0,57 + 0,18 \cdot \left(\frac{1}{d_{ТВ}} - 1 \right) + 0,53 \cdot \left[1 - \exp^{-a} \right] \right) = \\ &= 0,0242 \cdot \left(0,57 + 0,18 \cdot (1,348 - 1) + 0,53 \cdot \left[1 - \exp^{-3,7816} \right] \right) = 0,0272 \end{aligned}$$

Втрати тиску на тертя:

$$\begin{aligned} \Delta p_{тр} &\equiv \xi_{тр} \frac{H_0 \rho}{d_r} \cdot \frac{(w \cdot k_r)^2}{2} = \\ &= 0,274 \text{ МПа} \end{aligned}$$

$$\Delta p_{тр \max} = \xi_{тр \max} \frac{H_0 \rho}{d_r} \cdot \frac{(w \cdot k_r)^2}{2} = 1,26 \text{ МПа}$$

1.7.3 Сумарні втрати тиску на місцевих опорах

По висоті ТВЗ враховуються:

- Місцеві опори входу до ТВЗ: $\xi_M^{вх} = 1$.

- Втрати опору на 1 дистанціюючій решітці, приймаємо: $\xi_M^{реш} = 0,55$.

- Кількість решіток n_p в значається з урахуванням того, що вони встановлюються із кроком $25 \cdot d_{ТВ}$:

$$n_p = \frac{H_0}{25 \cdot d_{ТВ}} = \frac{4,039}{25 \cdot 0,009} = 22$$

- Місцеві опори виходу із ТВЗ: $\xi_M^{вих} = 2,18$.

Результуючі втрати тиску на місцевих опорах:

$$\Delta p_M = (\xi_M^{вх} + n_p \cdot \xi_M^{реш} + \xi_M^{вих}) \cdot \frac{\rho \cdot (w \cdot k_r)^2}{2}$$

$$= (1 + 20 \cdot 0,55 + 2,18) \cdot \frac{715,887 \cdot (3,697 \cdot 2,31)^2}{2} = 0,3442 \text{ МПа}$$

$$\Delta p_M = (\xi_M^{вх} + n_p \cdot \xi_M^{реш} + \xi_M^{вих}) \cdot \frac{\rho \cdot (w \cdot k_r)^2}{2}$$

$$= (1 + 20 \cdot 0,55 + 2,18) \cdot \frac{715,887 \cdot (8,542 \cdot 2,31)^2}{2} = 3,44242 \text{ МПа}$$

1.7.4 Загальні втрати тиску по висоті ТВЗ

Приймаємо, що втрати тиску по висоті ТВЗ носять лінійних характер:

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \sum \Delta p_{мі} + \rho g H_0 =$$

$$= 4,433 \cdot 10^5 + 3,37 \cdot 10^5 + 715,887 \cdot 9,81 \cdot 3,697 = 0,647 \text{ МПа}$$

$$\Delta p_{мах} = \Delta p_{тр мах} + \sum \Delta p_{мі мах} + \rho g H_0 =$$

$$= 23,659 \cdot 10^5 + 20,44 \cdot 10^5 + 715,887 \cdot 9,81 \cdot 3,697 = 1,63 \text{ МПа}$$

1.7.5 Тиск на вході у ТВЗ

Тиски на вході у середньо і максимально навантажені чарунки:

$$p_{вх} = p_{вих} + \frac{\Delta p}{2} = 16 + 0,324 = 16,324 \text{ МПа}$$

$$P_{\text{вх max}} = P_{\text{вих}} + \frac{\Delta P_{\text{max}}}{2} = 16 + 0,816 = 16,816 \text{ МПа}$$

1.8 Розрахунок розподілу температур теплоносія та коефіцієнтів тепловіддачі по висоті ТВЗ

1.8.1 Розрахунок розподілу температур теплоносія по висоті ТВЗ

Для того щоб розрахувати розподіл температур теплоносія по висоті ТВЗ, по-перше треба розрахувати розподіл тисків по висоті ТВЗ, для того щоб з їхньою допомогою визначити локальні коефіцієнти теплоємності.

Розрахунок тисків по висоті ТВЗ наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Розподіл тисків по висоті ТВЗ.

Висота Z	P, МПа	P _{max} , МПа
2,12	16,32	16,81
1,06	16,626	16,408
0	16	16
-1,06	15,838	15,592
-2,12	15,676	15,184

Визначимо локальні температури теплоносія для середнього навантаження:

$$q_l(0) = 0,02034 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2}, w = 3,756 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Локальна температура теплоносія на висоті z розраховується за формулою:

$$T(z) = T_{ВХ} + \frac{q'(0) \cdot H \cdot n_{ТВ}}{w \cdot \rho \cdot S_{ТВЗ} \cdot C_p(z) \cdot \pi} \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H}\right) + \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \right)$$

Проведемо розрахунок для точки $z = \left(\frac{-H_0}{2}\right)$:

Для першого кроку ітерації приймаємо $T = T_{сп} = 305,5^\circ\text{C}$, $p = 16,25\text{МПа}$,
 $\rho = 716,404 \text{ кг/м}^3$, $C_p = 5,573 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$.

$$\begin{aligned} T\left(-\frac{H_0}{2}\right) &= T_{ВХ} + \frac{q'(0) \cdot H_{эф} \cdot n_{ТВ}}{w \cdot \rho \cdot S_{ТВЗ} \cdot C_p(0) \cdot \pi} \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H_{эф}}\right) + \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right) \right) = \\ &= 289 + \frac{0,02034 \cdot 10^6 \cdot 4,4 \cdot 312}{3,756 \cdot 716,404 \cdot 0,0364 \cdot 5573,4 \cdot 10^3 \cdot \pi} \times \\ &\quad \times \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot 4,24}{2 \cdot 4,4}\right) + \sin\left(\frac{-2,12 \cdot \pi}{4,4}\right) \right) = 289^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Другий крок ітерацій:

$$\begin{aligned} T\left(-\frac{H_0}{2}\right) &= T_{ВХ} + \frac{q'(0) \cdot H_{эф} \cdot n_{ТВ}}{w \cdot \rho \cdot S_{ТВЗ} \cdot C_p(0) \cdot \pi} \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot H_0}{2 \cdot H_{эф}}\right) + \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{H_{эф}}\right) \right) = \\ &= 289 + \frac{0,02034 \cdot 10^6 \cdot 4,4 \cdot 312}{3,756 \cdot 749,277 \cdot 0,0364 \cdot 5573,4 \cdot 10^3 \cdot \pi} \times \\ &\quad \times \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot 4,24}{2 \cdot 4,2}\right) + \sin\left(\frac{-2,12 \cdot \pi}{4,2}\right) \right) = 289^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

де $T = 289^\circ\text{C}$, $p = 16,25\text{МПа}$, $C_p = 5,2056 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$, $\rho = 749,277 \text{ кг/м}^3$.

Розрахунок рахуємо вірним, якщо різниця температур між двома послідовними Ітераціями не перевищує $0,5^{\circ}\text{C}$.

Аналогічний розрахунок проводиться для інших точок середньо та максимально навантаженої ТВЗ.

Кінцеві результати ітерацій зведено в таблицю Б.1 у додатку Б. За результатами розрахунків наведено графік розподілу локальних температур теплоносія по висоті ТВЗ із середнім та максимальним навантаженням у додатку Б.

1.8.2 Розрахунок локальних коефіцієнтів тепловіддачі по висоті ТВЗ

В залежності від висоти відповідно до температур визначені фізичні параметри наведені у таблицях 1.4 та 1.5.

Таблиця 1.4 - Середньо навантажена чарунка.

Висота Z	ν м ² /С	λ , Вт/м·К	Pr
-2,12	$1,24 \cdot 10^{-7}$	0,58	0,8354
-1,06	$1,24 \cdot 10^{-7}$	0,579	0,8371
0	$1,21 \cdot 10^{-7}$	0,550	0,878
1,06	$1,19 \cdot 10^{-7}$	0,53	0,921
2,12	$1,18 \cdot 10^{-7}$	0,521	0,946

Таблиця 1.5 - Максимально навантажена чарунка.

Висота Z	ν м ² /С	λ , Вт/м·К	Pr
-2,12	$1,24 \cdot 10^{-7}$	0,58	0,8357
-1,06	$1,23 \cdot 10^{-7}$	0,568	0,8497
0	$1,2 \cdot 10^{-7}$	0,539	0,8996
1,06	$1,18 \cdot 10^{-7}$	0,546	0,9733
2,12	$1,17 \cdot 10^{-7}$	0,547	0,1,02

Внаслідок того, що у реакторах типу ВВЕР процесу кипіння теплоносія не відбувається, то розрахунок місцевого коефіцієнту тепловіддачі можна проводити за формулою:

$$\text{Nu}(z) = 0,023 \cdot \text{Re}(z)^{0,8} \cdot \text{Pr}(z)^{0,43},$$

де $\text{Re} = \frac{w \cdot d_r}{\nu}$.

Проведемо розрахунок для однієї точки $z = \left(\frac{-H_0}{2}\right) = -2,12$:

$$\text{Re}(z) = \frac{3,697 \cdot 0,0151}{1,24 \cdot 10^{-7}} = 3,61 \cdot 10^5$$

$$\text{Re}(z)_{\max} = 8,54 = 8,35 \cdot 10^5$$

$$\text{Nu}(z) = 0,023 \cdot (4,566 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,8351^{0,43} = 595$$

$$\text{Nu}(z)_{\max} = 0,023 \cdot (10,54 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,8316^{0,43} = 1,16$$

Результати розрахунків для локальних значень критеріїв подібності для 5 основних точок для ТВЗ із середнім та максимальним навантаженням приведені у таблицях В.1 та В.2 додатку В.

Коефіцієнти тепловіддачі для конвективного теплообміну визначалися за формулою Міхєєва:

$$\alpha = \frac{\lambda \cdot \text{Nu}}{d_r}$$

За результатами розрахунків наведено графіки розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі по висоті ТВЗ із середнім та максимальним навантаженням у додатку В.

1.9 Розрахунок температури оболонки ТВЕЛ і паливного осердя

1.9.1 Температура зовнішньої поверхні оболонки

Температура зовнішньої поверхні оболонки визначається як:

$$T_{об}^{зов}(z) = T(z) + \frac{n_{ТВ} \cdot N}{\Pi_T \cdot \alpha(z)} q_l(z),$$

де $T(z)$ – місцева температура теплоносія;

$\alpha(z)$ – коефіцієнт тепловіддачі від ТВЕЛа до теплоносія в розрахунковому перетині ТВЗ із координатою z ;

$q_l(z)$ – лінійний тепловий потік у розрахунковій площині ТВЗ з координатою z .

Проведемо розрахунок для однієї точки:

$$\begin{aligned} T_{об}^{зов}(-2,12) &= T(z) + \frac{n_{ТВ} \cdot N}{\Pi_T \cdot \alpha(-2,12)} q_l(-2,12) = \\ &= 289 + \frac{312 \cdot 0,93 \cdot 0,00116 \cdot 10^6}{8,92 \cdot 27554,4} = 290,37^\circ\text{C} \\ T_{об}^{зов\max}(-2,12) &= T_{\max}(z) + \frac{n_{ТВ} \cdot N}{\Pi_T \cdot \alpha_{\max}(-2,12)} q_{l\max}(-2,12) = \\ &= 289 + \frac{312 \cdot 0,93 \cdot 0,00369 \cdot 10^6}{8,92 \cdot 53855,4} = 291,23^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Розрахунки для інших точок приведені в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Результати розрахунку температури зовнішньої поверхні оболонки ТВЕЛ по висоті ТВЗ.

Висота H_0	T , °C	T_{\max} , °C
2,12	318,364	323,861
1,06	314,815	321,401
0	305,383	310,784

-1,06	292,952	296,435
-2,12	289	289

1.9.2 Температура внутрішньої поверхні оболонки

Температура внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ визначається як:

$$T_{об}^{вн}(z) = T_{об}^{зов}(z) + \frac{q \cdot l(z)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{об}} \cdot \ln\left(\frac{r_{тв}}{r_1}\right)$$

де $r_{тв} = 0,00455\text{м}$, $r_1 = r_{тв} - \delta_{тв} = 0,00385\text{м}$ – відповідно зовнішній і внутрішній радіуси оболонки ТВЕЛа, м;

$\lambda_{об}$ – коефіцієнт теплопровідності цирконію, кВт/(м·К).

Проведемо розрахунок однієї точки:

$$\begin{aligned} T_{об}^{вн}(-2,12) &= T_{об}^{зов}(z) + \frac{q \cdot l(z)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{об}} \cdot \ln\left(\frac{r_{тв}}{r_1}\right) = \\ &= 290,37 + \frac{0,93 \cdot 1160}{2 \cdot 3,14 \cdot 20,674} \cdot \ln\left(\frac{0,00455}{0,00385}\right) = 291,76^\circ\text{C} \\ T_{об}^{вн\max}(-2,12) &= T_{об}^{зов\max}(z) + \frac{q \cdot l(z)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{об\max}} \cdot \ln\left(\frac{r_{тв}}{r_1}\right) = \\ &= 291,23 + \frac{0,93 \cdot 3690}{2 \cdot 3,14 \cdot 20,672} \cdot \ln\left(\frac{0,00455}{0,00385}\right) = 295,64^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Розрахунки температур внутрішньої поверхні стінки ТВЕЛ по висоті ТВЗ для середньо та максимально навантажених для інших точок наведені у таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 - Результати розрахунку температур внутрішньої поверхні стінки ТВЕЛ по висоті ТВЗ

Висота H ₀ /Z	λ, Вт/м·К	T, °C	λ _{max} , Вт/м·К	T _{max} , °C
2,12	20,594	320,12	20,567	329,46
1,06	20,563	329,28	20,513	345,41
0	20,575	324,32	20,521	342,64
-1,06	20,619	307,21	20,586	319,24
-2,12	20,668	290,32	20,663	291,33

1.9.3 Температура зовнішньої поверхні паливного осердя

Температура зовнішньої поверхні паливного осердя визначається як:

$$T_{oc}^{zov}(z) = T_{ob}^{vn}(z) + \frac{l_1(z)}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_3}$$

де α_3 - коефіцієнт тепловіддачі контактної оболонки. Він залежить від відношення товщини початкового зазору δ_3 до внутрішнього діаметру оболонки d_1 (рис. 1.1).

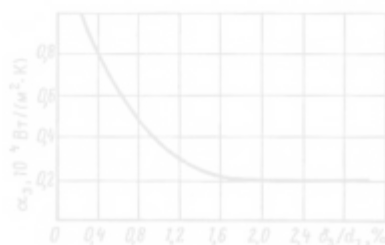


Рисунок 1.1 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі контактної оболонки від співвідношення початкового газопроводу до внутрішнього діаметру оболонки.

При $\frac{\delta_3}{d_1} = \frac{\delta_3}{2 \cdot r_1} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0077} = 1,298$ $\alpha_3 = 2900 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Проведемo розрахунок для однієї точки:

$$T_{\text{ос}}^{\text{зов}}(-2,12) = T_{\text{об}}^{\text{ВН}}(z) + \frac{q_1(z)}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_3} =$$

$$= 291,76 + \frac{0,93 \cdot 1160}{0,0077 \cdot 3,14 \cdot 2900} = 307,13^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{ос}}^{\text{зов max}}(-2,12) = T_{\text{об max}}^{\text{ВН}}(z) + \frac{q_{1 \text{ max}}(z)}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_3} =$$

$$= 295,64 + \frac{0,93 \cdot 3690}{0,0077 \cdot 3,14 \cdot 2900} = 344,56^\circ\text{C}$$

Результаты расчетов температур внешней поверхности паливного осердя по висоті ТВЗ для інших точек наведені у таблиці 1.8.

Таблица 1.8 - Результаты расчета температур внешней поверхности паливного осердя по висоті ТВЗ.

Висота Z м	T, °C	T _{max} , °C
2,12	331,23	329,28
1,06	465,65	776,24
0	510,54	933,56
-1,06	442,36	749,87
-2,12	301,41	327,23

1.9.4 Температура поверхности центрального отвору паливного осердя:

$$T_{\text{ос}}^{\text{ВН}}(z) = T_{\text{ос}}^{\text{зов}}(z) + \frac{q_1(z)}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_0(z) \cdot n_{\text{ТВ}}} \cdot \left(1 - \frac{r_{\text{ом}}^2}{(r_{\text{ос}}^2 - r_{\text{ом}}^2)} \cdot \ln \frac{r_{\text{ос}}}{r_{\text{ом}}}\right),$$

де r_{oc} , r_{om} – відповідно зовнішній та внутрішній радіуси паливного осердя, м;
 $\lambda_o(z)$ - коефіцієнт теплопровідності паливного осердя, кВт м·К

$$r_{oc} = r_1 - \delta_3 = 0,00375 \text{ м}, r_{om} = 0,0007 \text{ м}.$$

Проведемо розрахунок для однієї точки:

Для першого кроку ітерації приймаємо такі значення коефіцієнтів тепловіддачі які наведені у таблиці 1.9.

$$\begin{aligned} T_{oc}^{вн}(-2,12) &= T_{oc}^{зов}(z) + \frac{\alpha \cdot q_1(z)}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_o(-2,12)} \cdot \left(1 - \frac{r_{om}^2}{(r_{oc}^2 - r_{om}^2)} \cdot \ln \frac{r_o}{r_{om}}\right) = \\ &= 307,13 + \frac{0,93 \cdot 1160}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,8418} \cdot \left(1 - \frac{0,0007^2}{0,00375^2 - 0,0007^2} \cdot \ln \frac{0,00375}{0,0007}\right) = \\ &= 323,79^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{oc}^{вн\max}(-2,12) &= T_{oc}^{зов\max}(z) + \frac{\alpha \cdot q_1(z)}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_o(-2,12)} \cdot \left(1 - \frac{r_{om}^2}{(r_{oc}^2 - r_{om}^2)} \cdot \ln \frac{r_o}{r_{om}}\right) = \\ &= 307,13 + \frac{0,93 \cdot 3690}{4 \cdot 3,14 \cdot 4,6923} \cdot \left(1 - \frac{0,0007^2}{0,00375^2 - 0,0007^2} \cdot \ln \frac{0,00375}{0,0007}\right) = \\ &= 399,23^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Для решти точок проведемо ітерації, похибка між двома послідовними ітераціями має складати не більше 0,5°C. Результати розрахунку представлені у таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Початкові значення коефіцієнтів теплопровідності та результати розрахунків температур поверхні центрального отвору паливного осердя по висоті ТВЗ.

Висота Z	λ , Вт/м·К	T, °C	λ_{max} , Вт/м·К	T _{max} , °C
2,12	4,7932	605,33	4,7536	640,22
1,06	4,7536	748,26	4,6941	1086,32
0	4,7732	796,24	4,7032	1253,24
-1,06	4,842	724,32	3,5123	1053,14
-2,12	4,9126	575,04	4,9132	602,31

За результатами розрахунку у додатку Г наведено графіки розподілу зовнішніх та внутрішніх температур оболонки та паливного осердя ТВЕЛ по висоті ТВЗ із середнім (рис. Г.1) та максимальним (рис.Г.2) навантаженням.

1.10 Визначення критичних теплових потоків та запасу до кризи теплообміну

1.10.1 Визначення паровмісту

Для розрахунку критичного теплового потоку необхідно знати розподіл масового паровмісту $x(z)$ по висоті ТВЗ.

При визначенні $x(z)$ для ТВЗ середнього навантаження витратний масовий паровміст у розрахункових перетинах приймається рівним відносній ентальпії:

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

де $h(z) = f(p(z), T(z))$ – ентальпія теплоносія, Дж/кг;

$h'(z) = f(p(z))$ – ентальпія води на лінії насичення, Дж/кг;

$r(z) = f(p(z))$ – прихована теплота пароутворення, Дж/кг.

Знайдемо значення параметрів $h(z) = f(p(z), T(z))$, $h'(z) = f(p(z))$, $r(z) = f(p(z))$, для середньо навантаженої ТВЗ, які зазначені у таблиці 1.10.

Таблиця 1.10 – Параметри $h(z)$, $h'(z)$ та $r(z)$ для середньо навантаженої ТВЗ.

Z м	$h(z)$ кДж/кг·С	$h'(z)$ кДж/кг·С	$r(z)$ кДж/кг
2,12	1444,36	1450,85	1257,42
1,06	1422,23	1373,78	1366,41
0	1368,11	1374,51	1366,33
-1,06	1300,73	1306,41	1456,62
-2,12	1278,53	1284,42	1484,71

Знайдемо значення параметрів: $h(z) = f(p(z), T(z))$, $h'(z) = f(p(z))$, $r(z) = f(p(z))$ для максимальних навантаженої ТВЗ, які зазначені у таблиці 1.11.

Таблиця 1.11 – Параметри $h(z)$, $h'(z)$ та $r(z)$ для максимально навантаженої ТВЗ.

Z м	$h(z)$ кДж/кг·С	$h'(z)$ кДж/кг·С	$r(z)$ кДж/кг
2,12	1480,82	1487,29	1201,15
1,06	1463,094	1468,93	1229,94
0	1399,84	1402,05	1326,35
-1,06	1318,7	1323,09	1434,64
-2,12	1279,02	1284,41	1484,71

Визначасмо паровміст $x(z)$ та $x_{\max}(z)$ для точки $z = (-\frac{H_0}{2})$:

$$x(-H_0) = \frac{h(-H_0) - h'(-H_0)}{r(-H_0)} = \frac{1305,134718212,42}{2} = -0,00462$$

Для остальных точек как для средней так и для максимально навантаженой чарунки паровміст розраховується аналогічним способом. Результати занесені у таблицю 1.12.

Таблиця 1.12 – Паровміст.

Z м	x(z)	x _{max} (z)
2,12	-0,004773	-0,00583
1,06	-0,00779	-0,00407
0	-0,00366	-0,00226
-1,06	-0,004121	-0,003486
-2,12	-0,004043	-0,003369

1.10.23 знаходження запасу до кризи теплообміну

Запас до кризи теплообміну:

$$K(z) = \frac{q_{кр}(z)}{\alpha \cdot q_l(z) \cdot \frac{n_{ТВ}}{\Pi_T}}$$

Критичний тепловий потік у розрахунковому перетині ТВЗ:

$$q_{кр}(z) = 0,796(1 - x(z))^n (\rho_w)^m (1 - 0,0185 \cdot P(z)).$$

$$m = 0,311(1 - x(z)) - 0,127$$

$$n = 0,105 \cdot P(z) - 0,5.$$

Проведемо розрахунок для одної точки:

$$q_{кр}(-2,12) = 0,796(1 + 0,00396)^{1,206} (715,887 \cdot 3,756)^{0,185} \times$$

$$\begin{aligned} &\times (1 - 0,0185 \cdot 16,2504) = 2,42 \frac{\text{МВт}}{\text{м}^2} \\ m &= 0,311(1 + 0,00396) - 0,127 = 0,185 \\ n &= 0,105 \cdot 16,2504 - 0,5 = 1,206 \end{aligned}$$

Запас до кризи теплообміну:

$$K(z) = \frac{q_{кр}(z)}{K_c \cdot q(z)_{ПТВ} \cdot \frac{P_T}{P_T}}$$

$$K(-2,02) = \frac{2,48}{0,93 \cdot 0,00116 \cdot 8,92 \cdot 312} = 64,01$$

Розрахунок проводиться аналогічним способом для інших точок, як для середньо так і для максимально навантаженої ТВЗ. Результати приведені у таблиці 1.13.

Таблиця 1.13 – Результати розрахунку

Z м	n	m	n max	m max	q _{кр} (z)	q _{кр} (z) max	K(z)	K(z)max
2,12	1,15	0,185	1,09	0,185	2,43	2,78	74,91	27,14
1,06	1,16	0,186	1,14	0,185	2,45	2,81	6,24	2,27
0	1,18	0,185	1,18	0,184	2,42	2,80	4,53	1,65
-1,06	1,2	0,185	1,22	0,186	2,43	2,83	6,30	2,29
-2,12	1,21	0,185	1,27	0,185	2,42	2,87	75,01	27,92

1.11 Висновки до розділу

В результаті теплогідравлічного розрахунку реакторної установки ВВЕР-1000 були отримані дані, а саме:

1. Найбільше значення температури теплоносія по висоті ТВЗ складає: $T(z)=323,86^{\circ}\text{C}$. Температура насичення для найменшого значення тиску в 14,722МПа складає: $T_n=327,32^{\circ}\text{C}$, $T(z)<T_n$.

2. Мінімальне значення коефіцієнту запасу до кризи теплообміну по висоті ТВЗ складає: $K(z) = 1,38$. Мінімально допустиме значення $K_{\text{мін}}(z) = 1,3\dots 1,35$, $K(z)> K_{\text{мін}}(z)$.

Вскипання теплоносія по всій висоті активної зони не виникає і є запас до виникнення кризи теплообміну по висоті, як для середньо, так і для максимально навантажених ТВЗ. Це дає змогу виключити виникнення кипіння та явище перегріву і руйнування ТВЕЛ в наслідок погіршення тепловідводу від поверхні ТВЕЛ при утворенні пари.

3. Максимальна температура для цирконієвого сплаву, який використовується у конструкції ТВЕЛ, за якої не виникає погіршення фізичних та механічних властивостей складає: $T_{\text{об.мах}} = 1000^{\circ}\text{C}$, але при температурах вище 400°C цирконієві сплави більше піддаються корозії. Температура плавлення цирконієвого сплаву становить: $T_{\text{об.пл.}} = 1852^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{об}}< T_{\text{об.мах}}$, але $T_{\text{об}}> 400^{\circ}\text{C}$

Максимальна температура за якої може експлуатуватися паливне осердя, та за якої паливна таблетка не збільшить свого об'єму більше проектного значення складає: $T_{\text{ос.мах}} = 2600^{\circ}\text{C}$. Температура плавлення діоксиду урану дорівнює: $T_{\text{ос.пл.}} = 2750^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ос}}< T_{\text{ос.мах}}$.

При заданих вхідних параметрах, температури як оболонки ТВЕЛ, так і паливного осердя під час роботи не перевищують допустимих значень. Це, в свою чергу, дає змогу експлуатувати активну зону без ризику розпухання ТВЕЛів та їх подальшої розгерметизації. Але слід зауважити те що при заданих параметрах час перебування ТВЕЛ в АЗ обмежується, ці обмеження обумовлені більш сильним ефектом корозії з боку теплоносія. Даного ефекту можна уникнути, якщо підвищити швидкість циркуляції теплоносія через активну зону, наприклад за рахунок модернізації ГЦН.

Це дозволить підвищити не тільки швидкість проходу теплоносія через активну зону, але і тепловідвід від кожної ТВЗ. Підвищення швидкості веде за собою і зростання тиску в петлі I-го контур, а отже і в реакторі – завдяки цьому зросте порогове значення температури насичення, та може зрости коефіцієнт запасу до кризи теплообміну.

Реакторна установка із заданими вхідними параметрами може бути допущена до експлуатації без ризику розплавлення АЗ і витоку радіоактивних продуктів поділу у теплоносій I-го контуру і без додаткових заходів, але потрібно більше уваги приділити моніторингу стану ТВЕЛ ТВЗ, які максимально навантажені.

2 НЕЙТРОННО-ФИЗИЧНИЙ РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА ВВЕР-

1000

2.1 Вхідні дані

Вхідні данні зведені у таблицю 1.1, відповідно до варіанту №13.

Таблиця 1.1 – Вхідні дані

ВВЕР-440		
Величина	Позначення	Значення
Висота активної зони, см	H	250
Діаметр активної зони, см	D	288
Діаметр ТВЕЛУ, см	d_{mv}	0,92
Діаметр паливної таблетки, см	d_0	0,78
Товщина газового зазору, см	$\delta_{гз}$	0,01
Товщина стінки ТВЕЛа, см	$\delta_{об}$	0,065
Зазор між касетами, см	$\delta_{заз}$	0,2
Число ТВЕЛ в касеті	n_{mv}	127
Число кластерних труб	$n_{к}$	0
Число центральних труб	$n_{цт}$	1
Число елементів в касеті	$n_{ел}^{кас}$	127
Товщина кожуха, см	$\delta_{кж}$	0,2
Зовнішній діаметр центральної трубки, см	$d_{цт}^z$	1,03
Товщина центральної трубки, см	$\delta_{цт}$	0,065
Початкова температура теплоносія, °C	T_0	20
Температура теплоносія:		

Продовження таблиці 1.1

Величина	Позначення	Значення
- на вході в реактор, °C	$T_{вх}$	269
- на виході з реактора, °C	$T_{вих}$	300
Тиск теплоносія, МПа	P	12,5
Крок ТВЕЛів в ТВЗ, см	t	1,23
Матеріал оболонки ТВЕЛу	Zr+1.5%Nb	
Збагачення по ^{235}U , %	C_5	3,2

2.2 Загальні положення

Активна зона реактора складається з однакових по конструкції ТВЕЛ та ТВЗ, тому для нейтронно-фізичного розрахунку можна розглядати не всю активну зону, а тільки елементарну чарунку або ТВЗ. Для зручності розрахунку здійснений перехід від реальної конструкції ТВЗ до розрахункової моделі чарунки. Така модель справедлива для нейтронів, що сповільнюються, оскільки потоки нейтронів в оболонці й сповільнювачі мало різняться між собою, і при розрахунку, відношення цих потоків можна прийняти рівним одиниці. В енергетичних реакторах форма і розміри активної зони вибрані із конструктивних міркувань, тому власним числом задачі є ефективний коефіцієнт розмноження $K_{еф}$, який визначається при вирішенні системи рівнянь, що описують поведінку нейтронів в активній зоні і відбивачі. Нейтронно-фізичний розрахунок виконується для різних станів реактора («холодного», «гарячого»).

Для спрощення розрахунку вводиться ряд припущень:

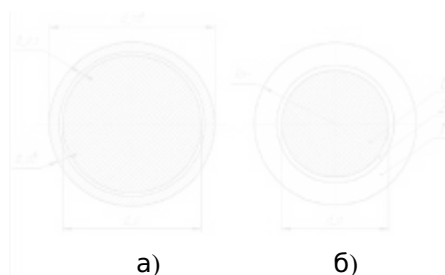
- решітка гетерогенного реактора являє собою повторювані в певному порядку елементарні чарунки, яким притаманні всі властивості решітки;

- виходячи з того, що $h_{акз} \cdot d_{чар}$ вирішується задача на площині, та із заміною шестигранної чарунки на еквівалентну їй за площею круглу – елементарна паливна чарунка з однорідними властивостями у всіх напрямках від центра;

- розглядаємо середню за умовами роботи чарунку висотою 1 см. На рисунку 1.1 представлено переріз ТВЕЛа та елементарної паливної чарунки [3].

2.3 Розрахунок розмірів елементарної чарунки

Гетерогенні решітки являють собою набір елементів (елементарних чарунок), що періодично повторюються. Елементарна чарунка володіє повним комплектом властивостей гетерогенної решітки. Це дає право замість всіх решіток розглядати ізольовану елементарну чарунку і для неї виконати всі розрахунки [3].



а)переріз ТВЕЛу; б)еквівалентна чарунка:

0 - зона палива, 1 - зона уповільнювача, 2 - зона оболонки

Рисунок 1.1 - Переріз ТВЕЛу та елементарної паливної чарунки

Об'єм палива в ТВЕЛі

$$V_{UO_2} = \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 = 0,477836 \text{ см}^3$$

Об'єм палива в касеті

$$V_{UO_2}^{кас} = V_{UO_2} \cdot n_{ТВ} = 60,207366 \text{ см}^3$$

Об'єм оболонки ТВЕЛа

$$V'_{об} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ТВ}^2 - (d_0 + 2 \cdot \delta_{гз})^2) = 0,17663605 \text{ см}^3$$

Об'єм газового зазору в ТВЕЛі

$$V_{зз} = \frac{\pi}{4} \cdot ((d_0 + 2 \cdot \delta_{зз})^2 - d_0^2) = 0,02481858 \text{ см}^3$$

Об'єм газового зазору й оболонки

$$V_{об} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ТВ}^2 - d_0^2) = 0,20145463 \text{ см}^3$$

Густина матеріалу оболонки

$$\gamma_{об} = \gamma_{Zr} = \gamma_{Nb} = 6,4 \text{ Г/см}^3.$$

Приведена густина оболонки

$$\gamma'_{об} = \gamma_{об} \cdot \frac{V'_{об}}{V_{об}} = 5,6115 \text{ Г/см}^3$$

Розмір касети «під ключ»

$$S = 13 \cdot t \cdot \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) + 2 \cdot \delta_{кас} = 14,304038 \text{ см}$$

Розмір касети «під ключ» з врахуванням води в міжкасетному просторі

$$S_2 = S + \delta_{завз} = 14,504038 \text{ см}$$

Об'єм кожуха

$$V_{кож}^{кас} = 3 \cdot 2 \cdot (S^2 - (S - 2 \cdot \delta_{кож})^2) = 9,771564 \text{ см}^3$$

Об'єм кожуха касети, що припадає на 1 ТВЕЛ

$$V_{кож} = V_{кож}^{кас} / n_{ТВ}^{кас} = 0,0769414 \text{ см}^3$$

Об'єм води в касеті

$$V_{H_2O}^{кас} = 3 \cdot 2 \cdot S^2 - (V_{UO_2}^{кас} + V_{об} \cdot n_{ТВ} + V_{нт}^{кас}) = 72,05978 \text{ см}^3$$

Об'єм води в міжкасетному просторі

$$V_{завз}^{кас} = 3 \cdot 2 \cdot (S_2 - S)^2 = 4,989705 \text{ см}^3$$

Об'єм води, що припадає на 1 ТВЕЛ

$$V_{H_2O} = (V_{H_2O}^{кас} + I_{заз}^{кас}) / \eta_{вн}^{кас} = 0,606689 \text{ см}^3$$

Об'єм зони «0» (зона палива)

$$V_0 = V_{UO_2} = 0,477836 \text{ см}^3$$

Об'єм зони «1» (зона сповільнювача)

$$V_1 = (V_{кож} \cdot \eta_{H_2O}) = 0,68363 \text{ см}^3$$

Об'єм зони «2» (зона оболонки)

$$V_2 = V_{об} = 0,2014546 \text{ см}^3$$

Об'єм чарунки ТВЕЛа (мікрочарунки)

$$V_{чар} = V_0 + V_1 + V_2 = 1,362921 \text{ см}^3$$

Діаметр розрахункової чарунки

$$D_{чар} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot V_{чар}}{\pi}} = 1,317317 \text{ см}$$

Доля палива в зоні «0»

$$(\varepsilon_n)_0 = V_{UO_2} / V_0 = 1.$$

Доля води в зоні «1»

$$(\varepsilon_{H_2O})_1 = V_{H_2O} / V_1 = 0,887452$$

Доля кожуха в зоні «1»

$$(\varepsilon_{нт})_1 = V_{кож} / V_1 = 0,112548$$

Доля оболонки в зоні «2»

$$(\varepsilon_{об})_2 = \frac{V_{об}}{V_2} = 0,876803$$

Радіус зони «0»

$$r_0 = d_0 / 2 = 0,39 \text{ см}$$

Радіус зони «1»

$$r_1 = D_{чар} / 2 = 0,6586587 \text{ см}$$

Радіус зони «2»

$$r_2 = \frac{d_0 + 2\delta_{гз} + 2\delta_{об}}{2} = 0,465 \text{ см}$$

Таблиця 1.2 – Об'єми зон

Величина	Значення	Розмірність
V_0	0,477836	$см^3$
V_1	0,68363	$см^3$
V_2	0,2014546	$см^3$
$V_{\text{чар}}$	1,362921	$см^3$

2.4 Розрахунок ядерних концентрацій

Концентрація ядер i -го нукліда визначається за:

$$N_i = \frac{N_A \cdot C_i \cdot \gamma_i}{A_i},$$

де $N = \dots \cdot \text{моль}^{-1}$ - постійна Авогадро; γ_i - густина речовини, $г/см^3$; A_i - масове число елементу, а.о.м.

2.4.1 Ядерні концентрації в паливі

$$N_{UO_2} = \frac{\gamma_{UO_2} \cdot N_A}{A_{UO_2}} = 2,342709 \cdot 10^{22} \frac{1}{см^3},$$

$$N_{UO_2, \text{гр}} = \frac{\gamma_{UO_2, \text{гр}} \cdot N_A}{A_{UO_2}} = 2,27577 \cdot 10^{22} \frac{1}{см^3},$$

де $A_{UO_2} = A_5 \cdot C_5 + A_8 \cdot (1 - C_5) + 2A_6 = 269,9055$ а.о.м – середня молярна маса молекули UO_2 ;

$\gamma_{UO_2} = 10.5 \frac{г}{см^3}$, $\gamma_{UO_2, \text{гр}} = 10.2 \frac{г}{см^3}$ - густина UO_2 для холодного і гарячого реактора, відповідно;

$A_5 = 235$ а.о.м, $A_{16} = 16$ а.о.м, $A_{238} = 238$ а.о.м - масові числа ізоотопів у атомних одиницях маси;

$C_5 = 3,2\%$ - збагачення паливом по ^{235}U .

Концентрація ядер ^{16}O , ^{235}U , ^{238}U :

$$N_{16} = N_{\text{UO}_2} \cdot n_{16} \cdot (\varepsilon_n)_0 = 4,685417 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$N_{16\text{гp}} = N_{\text{UO}_2} \cdot n_{16} \cdot (\varepsilon_n)_0 = 4,55154859 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$N_5 = N_{\text{UO}_2} \cdot n_5 \cdot (\varepsilon_n)_0 = 7,3795328 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$N_{5\text{гp}} = N_{\text{UO}_2} \cdot n_5 \cdot (\varepsilon_n)_0 = 7,16868904 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$N_8 = N_{\text{UO}_2} \cdot n_8 \cdot (\varepsilon_n)_0 = 2,2689135 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$N_{8\text{гp}} = N_{\text{UO}_2} \cdot n_8 \cdot (\varepsilon_n)_0 = 2,2040874 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

де $n_5 = 1 \cdot C_5 = 0.032$, $n_8 = (1 - C_5) \cdot 1 = 0.968$, $n_{16} = 2$ - число нуклідів ^{235}U , ^{238}U , ^{16}O відповідно;

$(\varepsilon_n)_0 = 1$ - доля UO_2 в зоні «0»

2.4.2 Ядерні концентрації в оболонці

Розглянемо оболонку, що складається з Zr і 1.5 % Nb.

$$N_{91} = g_{06} \cdot \frac{N_A \cdot C_{\text{Zr}}}{A_{\text{Zr}}} \cdot (\varepsilon_n)_2 = 3,223433 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$N_{93} = g_{06} \cdot \frac{N_A \cdot C_{\text{Nb}}}{A_{\text{Nb}}} \cdot (\varepsilon_n)_2 = 3,18597196 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{см}^3}$$

де $g'_{об} = 5.6115 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$ -приведена густина матеріалу оболонки;

$A_{Zr} = 91 \text{ ао м}$ $A_{Nb} = 93 \text{ ао м}$ - масові числа відповідно цирконію і ніобію.

2.4.3 Ядерні концентрації в сповільнювачі

Густина молекул води:

$$N_{H_2O} = \frac{\gamma_{H_2O} \cdot N_A}{A_{H_2O}} = 3.345556 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

$$N_{H_{ор}} = \frac{\gamma_{H_{ор}} \cdot N_A}{A_{H_2O}} = 2.572732 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

де $A_{H_2O} = 18 \text{ ао м}$

$g_{H_2O} = f(p_{атм}, 293,15 \text{ К}) = 1 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$ - густина води для холодного реактора

$g_{H_{ор}} = f(12.5 \text{ МПа}, 557,65 \text{ К}) = 0.769 \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$ - густина води для гарячого реактора

Кількість нуклідів О в 1 см^3 в зоні 1:

$$N_O = N_{H_2O} = 2,969019 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3},$$

$$N_{O_{ор}} = N_{H_{ор}} = 2,283176 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

Кількість нуклідів Н в 1 см^3 в зоні 1:

$$N_H = 2 \cdot N_{H_2O} = 5,938038 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}.$$

$$= N_{H_{ор}} = 2 \cdot N_{H_{ор}} = 4,566352 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{см}^3}$$

Густина ядер Zr в зоні «1»:

$$N_{Zr} = \frac{g_{Zr} \cdot N_A \cdot C_{Zr}}{A_{Zr}} \cdot (\epsilon_{гг1})_1 = 4,2217719 \cdot 10^{21} \frac{1}{\text{см}^3}$$

Густина ядер Nb в зоні «1»:

$$N_{Nb} = \frac{g_{Nb} \cdot V \cdot C'_{Nb}}{A_{Nb}} \cdot (\epsilon_{tr})_1 = 4,17270819 \cdot 10^{19} \frac{1}{\text{см}^3}$$

де $C'_{Zr} = 0,99$, $C'_{Nb} = 0,01$, - долі цирконію, ніобію в сплаві центральної трубки;

Таблиця 1.3 - Ядерні концентрації

Величина	Значення	
	Холодний реактор	Гарячий реактор
N_5 , ядер см^{-3}	$7,3795328 \cdot 10^{20}$	$7,16868904 \cdot 10^{20}$
N_8 , ядер см^{-3}	$2,2689135 \cdot 10^{22}$	$2,2040874 \cdot 10^{22}$
N_{16} , ядер см^{-3}	$4,685417 \cdot 10^{22}$	$4,55154859 \cdot 10^{22}$
N_{91} , ядер см^{-3}	$3,223433 \cdot 10^{22}$	$3,223433 \cdot 10^{22}$
N_{93} , ядер см^{-3}	$3,18597196 \cdot 10^{20}$	$3,18597196 \cdot 10^{20}$
N_O , ядер см^{-3}	$2,969019 \cdot 10^{22}$	$2,283176 \cdot 10^{22}$
N_H , ядер см^{-3}	$5,938038 \cdot 10^{22}$	$4,566352 \cdot 10^{22}$
N_{Zr} , ядер см^{-3}	$4,2217719 \cdot 10^{21}$	$4,2217719 \cdot 10^{21}$
N_{Nb} , ядер см^{-3}	$4,17270819 \cdot 10^{19}$	$4,17270819 \cdot 10^{19}$

2.5 Розрахунок макроскопічних перерізів

Мікроскопічні перерізи взаємодії нейтронів з нуклідами ^{235}U , ^{238}U (при $E_0=0,0253$ еВ) беремо з таблиць Д1 та Д2.

Середньологарифмічний декремент енергії для кожного з нуклідів знайдемо за формулою

Для нукліда Н $\xi = 1$ [1]

$$\xi = \frac{2}{A}$$

Для нукліда О $\xi = \frac{2}{A+3}$

та зведемо до таблиці.

Таблиця 1.4 – Середньологарифмічний декремент енергії

	H_2	O_2	Zr	Nb	^{235}U	^{238}U
$\xi = \frac{2}{A}$	1	0.120	0.021978	0.021505	$8.51063810 \cdot 10^{-3}$	$8.403361 \cdot 10^{-3}$

2.5.1 Визначення перерізів при $T = T_{nr}$

Для холодного реактора $T = T_{nr} = 293,15$ К

Коефіцієнт β :

$$\beta = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T_0}{T_{nr}}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{293,15}{T_{nr}}} = 0,886227$$

g-фактор ^{235}U

$$g_a^s = 0,9628 - 0,0632 \left[\sqrt{\frac{T_{nr}}{293,15}} - 1 \right] = 0,9628$$

g-фактор ^{235}U

$$g_r^s = 0,9628 - 0,076 \left[\sqrt{\frac{T_{nr}}{293,15}} - 1 \right] = 0,9628$$

Для горячего реактора $T=T_{\text{нгр}}=T_1=557,65$ К

Коефициент β :

$$\beta_{\text{гр}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{T_1}{T_{\text{нгр}}}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{578,65}{T_{\text{нгр}}}} = 0,886227$$

g-фактор ^{235}U

$$g_{\text{агр}}^5 = 0,9628 - 0,0632 \left[\sqrt{\frac{T_{\text{нгр}}}{T_1} - 1} \right] = 0,9628$$

g-фактор ^{235}U

$$g_{\text{гр}}^5 = 0,9628 - 0,076 \left[\sqrt{\frac{T_{\text{нгр}}}{T_1} - 1} \right] = 0,9628$$

Для інших ядер приймаємо $g_a = 1$.

Проведемо розрахунок $T_{\text{нг}}$ за формулами і зведемо у таблиці:

2.5.1.1 Зона «0»

Макроскопічний переріз поглинання ^{235}U

$$\Sigma_a^5 = \beta \cdot \sigma_a^5 \cdot N_5 \cdot g_a^5 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{\text{агр}}^5 = \beta_{\text{гр}} \cdot \sigma_a^5 \cdot N_{5\text{гр}} \cdot g_{\text{агр}}^5 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопічний переріз поглинання ^{238}U

$$\Sigma_a^8 = \beta \cdot \sigma_a^8 \cdot N_8 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{\text{агр}}^8 = \beta_{\text{гр}} \cdot \sigma_a^8 \cdot N_{8\text{гр}} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопічний переріз поглинання O_2

$$\Sigma_a^{O_2} = \beta \cdot \sigma_a^{16} \cdot N_{16} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{\text{агр}}^{O_2} = \beta_{\text{гр}} \cdot \sigma_a^{16} \cdot N_{16\text{гр}} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання зони «0» при $T = T_0$

$$\Sigma_{a_0}(T_0) = \Sigma_a^5 + \Sigma_a^8 + \Sigma_a^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{ГР}}^5 = \Sigma_{a_{ГР}}^5 + \Sigma_{a_{ГР}}^8 + \Sigma_{a_{ГР}}^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз ділення ^{235}U

$$\Sigma_f^5 = \beta \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5 \cdot g_f^5 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{f_{ГР}}^5 = \beta_{ГР} \cdot \sigma_f^5 \cdot N_{5ГР} \cdot g_{f_{ГР}}^5 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз ділення зони «0»

$$\Sigma_{f0} = \Sigma_f^5 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{f0} = \Sigma_{f_{ГР}}^5 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння ^{235}U

$$\Sigma_s^5 = N_5 \cdot \sigma_s^5 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s_{ГР}}^5 = N_{5ГР} \cdot \sigma_s^5 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння ^{238}U

$$\Sigma_s^8 = N_8 \cdot \sigma_s^8 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s_{ГР}}^8 = N_{8ГР} \cdot \sigma_s^8 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння O_2

$$\Sigma_s^{16} = N_{16} \cdot \sigma_s^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s_{ГР}}^{16} = N_{16ГР} \cdot \sigma_s^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння зони «0»

$$\Sigma_{s0} = \Sigma_s^5 + \Sigma_s^8 + \Sigma_s^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s0\text{ГР}} = \Sigma_{\text{ГР}}^5 + \Sigma_{\text{ГР}}^8 + \Sigma_{\text{ГР}}^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для ^{235}U

$$(\xi \Sigma_s)_s = \xi_s \cdot \Sigma_s^5 \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{\text{ГР}} = \xi_{\text{ГР}} \cdot \Sigma_{\text{ГР}}^5 \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для ^{238}U

$$(\xi \Sigma_s)_8 = \xi_8 \cdot \Sigma_s^8 \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{\text{ГР}} = \xi_{\text{ГР}} \cdot \Sigma_{\text{ГР}}^8 \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для O_2

$$(\xi \Sigma_s)_{16} = \xi_{16} \cdot \Sigma_s^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{\text{ГР}} = \xi_{\text{ГР}} \cdot \Sigma_{\text{ГР}}^{16} \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для зони «0»

$$(\xi \Sigma_s)_0 = (\xi \Sigma_s)_s + (\xi \Sigma_s)_8 + (\xi \Sigma_s)_{16} \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{0\text{ГР}} = (\xi \Sigma_s)_{\text{ГР}s} + (\xi \Sigma_s)_{\text{ГР}8} + (\xi \Sigma_s)_{\text{ГР}16} \frac{1}{\text{см}}$$

2.5.1.2 Зона «1»

Макроскопічний переріз поглинання H_2O

$$\Sigma_a^{H_2O} = \beta \cdot (2 \cdot \sigma_a^H + \sigma_a^O) \cdot N_{H_2O} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{\text{ГР}}^{H_2O} = \frac{\gamma_{\text{хол р}}^{\text{ГР}}}{\gamma_{H_2O}^{\text{ГР}}} \cdot \beta_{\text{ГР}} \cdot (2 \cdot \sigma_a^H + \sigma_a^O) \cdot N_{H_2O} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопічний переріз поглинання Zr в зоні «1»

$$\Sigma_a^{Zr} = \beta \cdot N_{Zr} \cdot \sigma_a^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{ГР}}^{Zr} = \beta_{ГР} \cdot N_{Zr_{ГР}} \cdot \sigma_a^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання Nb в зоні «1»

$$\Sigma_a^{Nb} = \beta \cdot N_{Nb} \cdot \sigma_a^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{ГР}}^{Nb} = \beta_{ГР} \cdot N_{Nb_{ГР}} \cdot \sigma_a^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання зони «1»

$$\Sigma_{a_1} = \Sigma_a^{Zr} + \Sigma_a^{Nb} + \Sigma_a^{H_2O} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{ГР}} = \Sigma_{a_{ГР}}^{Zr} + \Sigma_{a_{ГР}}^{Nb} + \Sigma_{a_{ГР}}^{H_2O} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння H_2O

$$\Sigma_s^{H_2O} = (2 \cdot \sigma_s^H + \sigma_s^O) \cdot N_{H_2O} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s_{ГР}}^{H_2O} = \frac{\gamma_{H_2O}^{rap.p}}{\gamma_{H_2O}^{хол.p}} \cdot (2 \cdot \sigma_s^H + \sigma_s^O) \cdot N_{H_2O} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння Zr

$$\Sigma_s^{Zr} = N_{Zr} \cdot \sigma_s^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s_{ГР}}^{Zr} = N_{Zr_{ГР}} \cdot \sigma_s^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння Nb

$$\Sigma_s^{Nb} = N_{Nb} \cdot \sigma_s^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s_{ГР}}^{Nb} = N_{Nb_{ГР}} \cdot \sigma_s^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння зони «1»

$$\Sigma_{s_1} = \Sigma_s^{H_2O} + \Sigma_s^{Zr} + \Sigma_s^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{s,ГР} = \Sigma_{s,ГР}^{H_2O} + \Sigma_{s,ГР}^{Zr} + \Sigma_{s,ГР}^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для H_2O при $T_0 = 273,15K$

$$(\xi \Sigma_s)_{H_2O} = 1,35 \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для H_2O при $T = T_{ТН}$, $T = T_{НГ}$

$$(\xi \Sigma_s)_{H_2O,ГР} = (\xi \Sigma_s)_{H_2O} \cdot \frac{\gamma_{H_2O}^{гар.р}}{\gamma_{H_2O}^{хол.р}} \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для Zr

$$(\xi \Sigma_s)_{Zr} = \xi_{Zr} \cdot \Sigma_s^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{Zr} = \xi_{Zr} \cdot \Sigma_{s,ГР}^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для Nb

$$(\xi \Sigma_s)_{Nb} = \xi_{Nb} \cdot \Sigma_s^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{Nb,ГР} = \xi_{Nb} \cdot \Sigma_{s,ГР}^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для зони «1»

$$(\xi \Sigma_s)_1 = (\xi \Sigma_s)_{H_2O} + (\xi \Sigma_s)_{Zr} + (\xi \Sigma_s)_{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{1,ГР} = (\xi \Sigma_s)_{H_2O,ГР} + (\xi \Sigma_s)_{Zr,ГР} + (\xi \Sigma_s)_{Nb,ГР} \frac{1}{\text{см}}$$

2.5.1.3 Зона «2»

Макроскопічний переріз поглинання Zr зони «2»

$$\Sigma_a^{Zr} = \beta \cdot \sigma_a^{Zr} \cdot N_{91} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_a^{Zr} = \beta_{ГР} \cdot \sigma_a^{Zr} \cdot N_{91,ГР} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопічний переріз поглинання Nb зони «2»

$$\Sigma_a^{Nb} = \beta \cdot \sigma_a^{Nb} \cdot N_{93} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_a^{Nb} = \beta_{ГР} \cdot \sigma_a^{Nb} \cdot N_{93ГР} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання зони «2»

$$\Sigma_{a_2} = \Sigma_a^{Zr} + \Sigma_a^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_2} = \Sigma_{aLE}^{Zr} + \Sigma_{aLE}^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння Zr зони «2»

$$\Sigma_S^{Zr} = N_{91} \cdot \sigma_s^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{SLE}^{Zr} = N_{91ГР} \cdot \sigma_s^{Zr} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння Nb зони «2»

$$\Sigma_S^{Nb} = N_{93} \cdot \sigma_s^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_S^{Nb} = N_{93ГР} \cdot \sigma_s^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз розсіяння зони «2»

$$(\xi \Sigma_s)_2 = \xi_{Zr} \cdot \Sigma_S^{Zr} + \xi_{Nb} \cdot \Sigma_S^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{2ГР} = \xi_{Zr} \cdot \Sigma_{SLE}^{Zr} + \xi_{Nb} \cdot \Sigma_{SLE}^{Nb} \frac{1}{\text{см}}$$

2.5.1.4 Чарунка

Макроскопичний переріз поглинання чарунки

$$\Sigma_a^{\text{чар}}(T_0) = \frac{\Sigma_a(T) \cdot V_0 + \Sigma_a(T) \cdot V_1 + \Sigma_a(T) \cdot V_2}{V_{\text{чар}}} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{aLE}^{\text{чар}} = \frac{\Sigma_{aLE} \cdot V_0 + \Sigma_{aLE} \cdot V_1 + \Sigma_{aLE} \cdot V_2}{V_{\text{чар}}} \frac{1}{\text{см}}$$

Здатність уповільнювати для чарунки

$$(\xi_{\Sigma}^{\text{чар}}) = \frac{(\xi_{\Sigma_0})(T) \cdot V_0 + (\xi_{\Sigma_d})(T) \cdot V_1 + (\xi_{\Sigma_e})(T) \cdot V_2}{V_{\text{чар}}} \cdot \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi_{\Sigma_{dPP}}^{\text{чар}}) = \frac{(\xi_{\Sigma_0}) \cdot V + (\xi_{\Sigma_{dPP}}) \cdot V_1 + (\xi_{\Sigma_e}) \cdot V_2}{V_{\text{чар}}} \cdot \frac{1}{\text{см}}$$

Температура нейтронного газа реактора

$$T_{\text{нг}} = T_0 \left[1 + 1.8 \frac{\Sigma_a^{\text{чар}}}{(\xi_{\Sigma_0})^{\text{чар}}} \right]$$

$$T_{\text{нгГР}} = T_1 \left[1 + 1.8 \frac{\Sigma_{dPP}^{\text{чар}}}{(\xi_{\Sigma_{dPP}})^{\text{чар}}} \right]$$

Результаты розрахунку перерізів представленні в додатку Е

2.6 Розрахунок коефіцієнта розмноження для нескінченного реактора

Коефіцієнт розмноження нейтронів – відношення числа нейтронів наступного покоління до числа нейтронів у попередньому поколінні у всьому об'ємі розмножувального середовища (активної зони реактора). Він вказує, як зміниться загальна кількість нейтронів в об'ємі активної зони за час середнього циклу звернення нейтронів. Для його визначення будемо використовувати формулу чотирьох співмножників, при цьому доцільно враховувати ефекти, як в тепловій, так і в резонансній областях. Тоді формула знаходження коефіцієнта розмноження нейтронів в нескінченному середовищі буде мати вигляд [1]:

$$K_{\infty} = K_{\infty}^T + K_{\infty}^P,$$

де

$$K_{\infty}^T = \nu_{\text{эф}}^T \cdot \theta \cdot \varepsilon \cdot \rho_3 \cdot \rho_3 \cdot \rho_{\text{об}}$$

$$K_{\infty}^P = \nu_{\text{эф}}^P \cdot \varepsilon \cdot \rho_3 (1 - \rho_3) \cdot \rho_{\text{об}}$$

де

ν_{ef} - коефіцієнт розмноження на теплових нейтронах, це відношення числа вторинних швидких нейтронів на один поглинений тепловий нейтрон;

θ - коефіцієнт використання теплових нейтронів, це коефіцієнт який враховує долю теплових нейтронів, які поглинаються паливом, від всіх теплових нейтронів покоління, які поглинаються усіма компонентами активної зони;

ε - коефіцієнт розмноження на швидких нейтронах, це число яке показує у скільки разів число нейтронів ділення, які утворились в процесі ділення ядер палива нейтронами всіх енергій, більше числа нейтронів ділення, які утворились при діленні ядер урану-235 тільки тепловими нейтронами;

$\varphi_s, \varphi_8, \varphi_{ob}$ - ймовірність уникнути резонансного захоплення, це відношення кількості нейтронів, які досягли теплової області енергій, до повного числа швидких нейтронів. Оскільки матеріали оболонки, як правило, не є сильними поглиначами, приймаємо $\varphi_{ob} \approx 1$ [2].

2.6.1 Розрахунок коефіцієнта розмноження на швидких нейтронах

2.6.1.1 Зона «0»

Мікроскопічні перерізи для зони «0» (група 1) беремо з таблиці ДЗ

Макроскопічний переріз поглинання ^{238}U в зоні «0»

$$\Sigma_{a_0}^8 = N_8 \cdot \sigma_a^8 = 9,715488 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{GR}}^8 = N_{8GR} \cdot \sigma_a^8 = 9,437902 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопічний переріз поглинання ^{235}U в зоні «0»

$$\Sigma_{a_0}^5 = N_5 \cdot \sigma_a^5 = 9,212608 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{GR}}^5 = N_{5GR} \cdot \sigma_a^5 = 8,949391 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання a_{O_2} в зоні «0»

$$\Sigma_{a_0}^{16} = N_{16} \cdot \sigma_a^{16} = 2,014729 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{\text{ГР}}}^{16} = N_{16\text{ГР}} \cdot \sigma_a^{16} = 1,957166 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання зони «0»

$$\Sigma_{a_0} = \Sigma_{a_0}^5 + \Sigma_{a_0}^8 + \Sigma_{a_0}^{16} = 0,0126515 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{\text{ГР}}} = \Sigma_{a_{\text{ГР}}}^5 + \Sigma_{a_{\text{ГР}}}^8 + \Sigma_{a_{\text{ГР}}}^{16} = 0,01229 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз зсуву ^{238}U в зоні «0»

$$\Sigma_{R_0}^8 = N_8 \cdot \sigma_R^8 = 0,0433726 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{R_{\text{ГР}}}^8 = N_{8\text{ГР}} \cdot \sigma_R^8 = 0,04213 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз ділення ^{238}U в зоні «0»

$$\Sigma_{f_0}^8 = N_8 \cdot \sigma_f^8 = 8,81019 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{f_{\text{ГР}}}^8 = N_{8\text{ГР}} \cdot \sigma_f^8 = 8,55847 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

Діючий переріз ^{238}U в зоні «0»

$$\Sigma_{X_0}^8 = \Sigma_{a_0}^8 + \Sigma_{R_0}^8 - (\chi \cdot \nu_f^8 \cdot \Sigma_{f_0}^8) = 0,035001 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{X_{\text{ГР}}}^8 = \Sigma_{a_{\text{ГР}}}^8 + \Sigma_{R_{\text{ГР}}}^8 - (\chi \cdot \nu_f^8 \cdot \Sigma_{f_0\text{ГР}}^8) = 0,034001 \frac{1}{\text{см}},$$

де $\chi = 0,752$ - доля надпорогових нейтронів

Макроскопичний переріз зсуву O в зоні «0»

$$\Sigma_{R_0}^{16} = N_{16} \cdot \sigma_R^{16} = 0,01498396 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{R_{\text{ГР}}}^{16} = N_{16\text{ГР}} \cdot \sigma_R^{16} = 0,01455585 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз зсуву в зоні «0»

$$\Sigma_{R_0} = \Sigma_{R_0}^5 + \Sigma_{R_0}^8 + \Sigma_{R_0}^{16} = 0,059604 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{R_{LP}} = \Sigma_{R_{LP}}^5 + \Sigma_{R_{LP}}^8 + \Sigma_{R_{LP}}^{16} = 0,05790105 \frac{1}{\text{см}}$$

Діючий переріз в зоні «0»

$$\Sigma_{x_0} = \Sigma_{a_0} + \Sigma_{R_0} - (\chi \cdot \nu_f^8 \cdot \Sigma_{f_0}^8) = 0,0541685 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{x_{LP}} = \Sigma_{a_{LP}} + \Sigma_{R_{LP}} - (\chi \cdot \nu_f^8 \cdot \Sigma_{f_{LP}}^8) = 0,05262086 \frac{1}{\text{см}}$$

Ймовірність зіткнення в ^{238}U

$$T_{00} = \frac{\Sigma_{x_0}^8}{\Sigma_{x_0}} = 0,6461513$$

$$T_{00} = \frac{\Sigma_{x_{LP}}^8}{\Sigma_{x_{LP}}} = 0,64615129$$

Середня хорда в паливному блоці

$$l_0 = d_0 = 0.78 \text{ см}$$

Фактор Белла

$$a = 1,16$$

2.6.1.2 Зона «1' »

Для точніших розрахунків необхідно розглядати 2-х зонне вічко (до зони «1» необхідно додати оболонку і відповідно перерахувати всі величини) - всі перетини в I групі нейтронів [4].

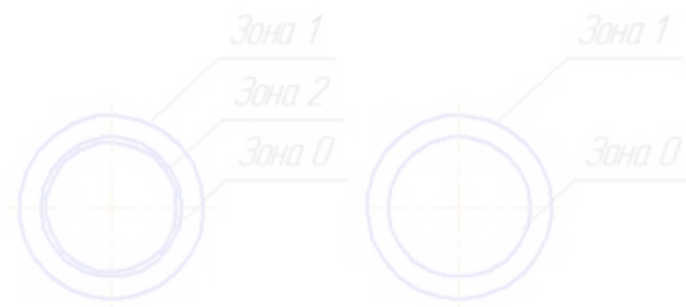


Рисунок 1.2 - Перехід від 3-х зонної чарунки до 2-х зонної

Мікроскопічні перерізи для зони «1» беремо з таблиці Д3

Об'єм об'єднаних зон "1" і "2"

$$V_{1'} = V_1 + V_2 = 0,885085 \text{ CM}^3$$

Густина ядер H_2O в зоні "1"

$$N'_{H_2O} = N_{H_2O} \cdot \frac{V_1}{V_{1'}} = 2,293239 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{CM}^3}$$

$$N'_{H_2OGR} = N_{H_2OGR} \cdot \frac{V_1}{V_{1'}} = 1,763501 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{CM}^3}$$

Густина ядер Zr в зоні "1"

$$N'_{Zr} = (N_{Zr_1} \cdot V_1 + N_{Zr_2} \cdot V_2) / V_{1'} = 1,059772 \cdot 10^{22} \frac{1}{\text{CM}^3}$$

Густина ядер Nb в зоні "1"

$$N'_{Nb} = (N_{Nb_1} \cdot V_1 + N_{Nb_2} \cdot V_2) / V_{1'} = 1,0474563 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{CM}^3}$$

Зробимо перехід від 3х-зонної чарунки до 2х-зонної для розрахунку ε і φ .

Мікроскопічний переріз поглинання H_2O в групі 1

$$\sigma_a^{H_2O} = 2 \cdot \sigma_a^H + \sigma_a^O = 4,30000 \cdot 10^{-26} \text{ CM}^2$$

Макроскопічний переріз поглинання H_2O в групі 1

$$\Sigma_a^{H_2O} = N'_{H_2O} \cdot \sigma_a^{H_2O} = 0,98609 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{CM}}$$

$$\Sigma_a^{H_2O} = N'_{H_2O} \cdot \sigma_a^{H_2O} = 7,583053 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{CM}}$$

Мікроскопічний переріз зсуву H_2O в групі 1

$$\sigma_R^{H_2O} = 2 \cdot \sigma_R^H + \sigma_R^O = 3,2182 \text{ барн}$$

Макроскопічний переріз зсуву H_2O в групі 1

$$\Sigma_R^{H_2O} = N_{H_2O}' \cdot \sigma_R^{H_2O} = 0,073801 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_{FP}}^{H_2O} = N_{H_2O,FP}' \cdot \sigma_R^{H_2O} = 0,056753 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання Zr в зоні "1' "

$$\Sigma_{a_{1'}}^{Zr} = N_{Zr}' \cdot \sigma_a^{Zr} = 6,70836 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз поглинання Nb в зоні "1' "

$$\Sigma_{a_{1'}}^{Nb} = N_{Nb}' \cdot \sigma_a^{Nb} = 0 \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний переріз зсуву Zr в зоні "1' "

$$\Sigma_{R_{1'}}^{Zr} = N_{Zr}' \cdot \sigma_R^{Zr} = 7,49259 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{см}}$$

Макроскопичний зсуву Nb в зоні "1' "

$$\Sigma_{R_{1'}}^{Nb} = N_{Nb}' \cdot \sigma_R^{Nb} = 8,620565 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{см}}$$

Повний переріз в зоні "1' " групи 1

$$\Sigma_{1'} = \Sigma_a^{H_2O} + \Sigma_R^{H_2O} + \Sigma_{a_{1'}}^{Zr} + \Sigma_{a_{1'}}^{Nb} + \Sigma_{a_{1'}}^{Fe} + \Sigma_{R_{1'}}^{Zr} + \Sigma_{R_{1'}}^{Nb} = 0,082959 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{FP,1'} = \Sigma_{FP}^{H_2O} + \Sigma_{FP}^{H_2O} + \Sigma_{FP}^{Zr} + \Sigma_{FP}^{Nb} + \Sigma_{FP}^{Fe} + \Sigma_{FP}^{Zr} + \Sigma_{FP}^{Nb} = 0,065683 \frac{1}{\text{см}}$$

Середня хорда в сповільнювачі

$$l_{1'} = \frac{4V_{1'}}{F_{1'}} = \frac{4V_{1'}}{\pi(d_{1'} - d_0)} = 2,097317 \text{ см}$$

Найкоротша відстань між поверхнями блоків, виміряна в одиницях $l_{1'}$

$$t = \frac{t_{TB} - d_0}{l_{1'}} = 0,216944 \text{ см}$$

Параметр (поправка Боналумі на форму чарунки)

$$\delta_{1'} = \frac{l_{1'} \cdot \Sigma_{1'}}{(7 + \beta l_{1'} \Sigma_{1'})} = 0,021787$$

$$\delta_{\text{ГР}} = \frac{l_1 \cdot \Sigma_{\text{ГР}}}{(7 + \beta l_1 \Sigma_{\text{ГР}})} = 0,017705$$

де $\beta = \frac{17}{3}$ -гексагональна решітка

Поправка Данкова-Гінсбурга

$$C = 1 - \frac{\exp(-\Sigma_{\text{ГР}} l_1)}{1 + \Sigma_{\text{ГР}} \cdot l_1 (1 - t - \delta_{\text{ГР}})} = 0,1496723$$

$$C = 1 - \frac{\exp(-\Sigma_{\text{ГР}} l_1)}{1 + \Sigma_{\text{ГР}} \cdot l_1 (1 - t - \delta_{\text{ГР}})} = 0,12201$$

Коефіцієнт затінення

$$\gamma_p = \frac{C_1}{1 + (a - 1)(1 - C_1)} = 0,131748$$

$$\gamma_{\text{РГР}} = \frac{C_{\text{ГР}}}{1 + (a - 1)(1 - C_{\text{ГР}})} = 0,10698$$

де $a = 1,16$

Коефіцієнт, що враховує тісноту решітки

$$Q_{00} = \frac{l_0 \cdot \Sigma_{x_0}}{l_0 \cdot \Sigma_{x_0} + a \cdot \gamma} = 0,216586$$

$$Q_{00\text{ГР}} = \frac{l_0 \cdot \Sigma_{\text{ГР}}}{l_0 \cdot \Sigma_{\text{ГР}} + a \cdot \gamma_{\text{РГР}}} = 0,248533$$

Параметр

$$\delta_0^{28} = \frac{\chi \cdot V_t^8 \cdot \Sigma_{t_0}^8}{\Sigma_{x_0}^8} = 0,513158$$

$$\delta_{\text{ГР}}^{28} = \frac{\chi \cdot V_t^8 \cdot \Sigma_{\text{ГР}}^8}{\Sigma_{\text{ГР}}^8} = 0,513158$$

Спектральний параметр

$$\delta^{28} = \delta_0^{28} \cdot T_{00} \cdot Q_{00} = 0,071815$$

$$\delta_{\text{ГР}}^{28} = \delta_{\text{ГР}}^{28} \cdot T_{00\text{ГР}} \cdot Q_{00\text{ГР}} = 0,082408$$

Коефіцієнт розмноження на швидких нейтронах

$$\varepsilon = 1 + \frac{(v_f^8 - \Sigma_{a_4} / \Sigma_{f_0}^8) \cdot \delta^{28}}{v_f^5} = 1,034278$$

$$\varepsilon_{ГР} = 1 + \frac{(v_{ГР}^8 - \Sigma_{a_4, ГР} / \Sigma_{f_0, ГР}^8) \cdot \delta_{ГР}^{28}}{v_f^5} = 1,039334$$

2.6.2 Розрахунок коефіцієнта використання теплових нейтронів

Середній косинус кута розсіяння Zr

$$\mu_0^{91} = \frac{2}{3 \cdot A_{91}} = 7,326007 \cdot 10^{-3}$$

Середній косинус кута розсіяння Nb

$$\mu_0^{93} = \frac{2}{3 \cdot A_{93}} = 7,168459 \cdot 10^{-3}$$

Транспортний переріз зони «2»

$$\Sigma_{tr_2} = \Sigma_{a_2} (T_{tr}) + \Sigma_s^{91} (1 - \mu_0^{91}) + \Sigma_s^{93} (1 - \mu_0^{93}) = 0,2111 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{tr_2, ГР} = \Sigma_{a_2, ГР} + \Sigma_{s, ГР}^{91} (1 - \mu_0^{91}) + \Sigma_{s, ГР}^{93} (1 - \mu_0^{93}) = 0,21098 \frac{1}{\text{см}}$$

Параметр зони «2»

$$\chi_2^2 = 3 \cdot \Sigma_{a_2} (T_{tr}) \cdot \Sigma_{tr_2} = 3,0059 \cdot 10^{-3}$$

$$\chi_{2, ГР}^2 = 3 \cdot \Sigma_{a_2, ГР} \cdot \Sigma_{tr_2, ГР} = 2,91776 \cdot 10^{-3}$$

Квадрат довжини дифузії H_2O :

$$L_{H_2O}^2 = \left(\frac{2,72}{\gamma_{H_2O}(T)} \left[\frac{T_0}{293,15} \cdot \frac{1,0614}{1 + 0,614 \cdot (T_0 / 293,15)^{0,5}} \right]^{0,5} \right)^2 = 4,865342 \text{ см}^2$$

$$L_{H_2O, ГР}^2 = \left(\frac{2,72}{\gamma_{H_2O, ГР}} \left[\frac{T_1}{293,15} \cdot \frac{1,0614}{1 + 0,614 \cdot (T_1 / 293,15)^{0,5}} \right]^{0,5} \right)^2 = 13,67746 \text{ см}^2$$

де $T_1 = 578,65 \text{ К}$ - середня температура середовища для гарячого реактора,
 $T_0 = 293,15 \text{ К}$ - для холодного реактора.

Транспортний переріз H_2O в зоні «1»

$$\Sigma_{tr_1}^{H_2O} = (3 \cdot L_{H_2O}^2 \cdot \Sigma_a^{H_2O}(T_{Hr}))^{-1} = 4,58637 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{tr_{GP}}^{H_2O} = (3 \cdot L_{H_2O,GP}^2 \cdot \Sigma_a^{H_2O})^{-1} = 2,184284 \frac{1}{\text{см}}$$

Транспортный перерез зоны "1"

$$\Sigma_{tr_1} = \Sigma_{tr_1}^{H_2O} + \Sigma_{s_1}^{Zr} (1 - \mu_0^{Zr}) + \Sigma_{s_1}^{Nb} (1 - \mu_0^{Nb}) = 4,6134 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{tr_{GP}} = \Sigma_{tr_{GP}}^{H_2O} + \Sigma_{s_{GP}}^{Zr} (1 - \mu_0^{Zr}) + \Sigma_{s_{GP}}^{Nb} (1 - \mu_0^{Nb}) = 2,21131 \frac{1}{\text{см}}$$

Параметр зоны "1"

$$\chi_1^2 = \frac{1}{L_1^2} = 3 \cdot \Sigma_a(T_{Hr}) \cdot \Sigma_{tr_1}(T) = 0,21535$$

$$\chi_{GP}^2 = \frac{1}{L_{GP}^2} = 3 \cdot \Sigma_a(T_{GP}) \cdot \Sigma_{tr_{GP}}(T) = 0,078023$$

Средний косинус кута розсіяння ^{235}U

$$\mu_0^5 = \frac{2}{3 \cdot A_{235}} = 2,836879 \cdot 10^{-3}$$

Средний косинус кута розсіяння ^{238}U

$$\mu_0^8 = \frac{2}{3 \cdot A_{238}} = 2,80112 \cdot 10^{-3}$$

Средний косинус кута розсіяння O_2

$$\mu_0^{16} = \frac{2}{3 \cdot A_{O_2}} = 0,041667$$

Транспортный перерез зоны "0" при T_{Hr}

$$\Sigma_{tr_0}(T_{Hr}) = \Sigma_{a_0}(T_{Hr}) + \Sigma_S^5(1 - \mu_0^5) + \Sigma_S^8(1 - \mu_0^8) + \Sigma_S^{16}(1 - \mu_0^{16}) = 0,785657 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{tr_{0GP}} = \Sigma_{a_{0GP}} + \Sigma_{s_{GP}}^5(1 - \mu_0^5) + \Sigma_{s_{GP}}^8(1 - \mu_0^8) + \Sigma_{s_{GP}}^{16}(1 - \mu_0^{16}) = 0,751114 \frac{1}{\text{см}}$$

Повний перерез зоны "0" при T_{Hr}

$$\Sigma_{tr_0} = \Sigma_{a_0} + \Sigma_S^5 + \Sigma_S^8 + \Sigma_S^{16} = 0,79359 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{tr_{0GP}} = \Sigma_{a_{0GP}} + \Sigma_{s_{GP}}^5 + \Sigma_{s_{GP}}^8 + \Sigma_{s_{GP}}^{16} = 0,7588 \frac{1}{\text{см}}$$

Коефіцієнт

$$\alpha = 0,067(r_0 \cdot \Sigma_{t_0}) - 0,0037(r_0 \cdot \Sigma_{t_0})^2 = 0,020382$$

$$\alpha_{ГР} = 0,067(r_0 \cdot \Sigma_{t_{ГР}}) - 0,0037(r_0 \cdot \Sigma_{t_{ГР}})^2 = 0,019504$$

$$\beta = 0,046(r_0 \cdot \Sigma_{t_0}) - 0,02(r_0 \cdot \Sigma_{t_0})^2 = 0,01232$$

$$\beta_{ГР} = 0,046(r_0 \cdot \Sigma_{t_{ГР}}) - 0,02(r_0 \cdot \Sigma_{t_{ГР}})^2 = 0,01186$$

$$A = 0,2707(r_0 \cdot \Sigma_{t_0}) + 0,1796(r_0 \cdot \Sigma_{t_0})^2 = 0,10099$$

$$A_{ГР} = 0,2707(r_0 \cdot \Sigma_{t_{ГР}}) + 0,1796(r_0 \cdot \Sigma_{t_{ГР}})^2 = 0,095841$$

Коефіцієнт екранування

$$Q_0 = \frac{\Phi_0(r_0)}{\Phi_0} = 1 + \left(\frac{\Sigma_{a_0}}{\Sigma_{r_0}} \right) \cdot A \left(1 + \alpha \left(\frac{\Sigma_s}{\Sigma_r} \right) + \beta \left(\frac{\Sigma_{s_0}}{\Sigma_{r_0}} \right)^2 \right) = 1,052778$$

$$Q_{0ГР} = \frac{\Phi_0(r_0)}{\Phi_0} = 1 + \left(\frac{\Sigma_{a_{ГР}}}{\Sigma_{r_{ГР}}} \right) \cdot A_{ГР} \left(1 + \alpha_{ГР} \left(\frac{\Sigma_{s_{ГР}}}{\Sigma_{r_{ГР}}} \right) + \beta_{ГР} \left(\frac{\Sigma_{s_{ГР}}}{\Sigma_{r_{ГР}}} \right)^2 \right) = 1,049318$$

$$\frac{\delta\Phi}{\Phi_0} = \chi^2_{2, \Sigma_{a_0}} \cdot \frac{\delta_{об}}{\Sigma_{a_0}} \cdot r_0 = 3,25365 \cdot 10^{-3} \text{ при } \delta_{об} \ll r_0$$

$$\frac{\delta\Phi}{\Phi_{0ГР}} = \chi^2_{2, \Sigma_{a_{ГР}}} \cdot \frac{\delta_{об}}{\Sigma_{a_{ГР}}} \cdot r_0 = 3,0616 \cdot 10^{-3} \text{ при } \delta_{об} \ll r_0$$

$$\Psi = \frac{r_1}{r_2} = 1,41647$$

Параметр ефективності граничної умови

$$\zeta = \frac{0,7223 - \frac{0,033}{\Psi} + \frac{0,314}{\Psi^2}}{\Sigma_{тГР} \cdot r_2 + \frac{2,3}{\Psi}} \quad \Psi = 1,008302$$

$$\zeta = \frac{0,7223 - \frac{0,033}{\Psi} + \frac{0,314}{\Psi^2}}{\Sigma_{тГР} \cdot r_2 + \frac{2,3}{\Psi}} \quad \Psi = 1,07266$$

Параметр

$$\delta = \frac{\chi^2 \cdot (r_1^2 - r_2^2)}{2} \cdot \frac{1}{r_2 \cdot \Sigma_{r_1}} \left(\zeta - \frac{2}{3} \right) = 3,731422 \cdot 10^{-3}$$

$$\delta = \frac{\chi_{ГР}^2 \cdot (k_1^2 - k_2^2)}{2} \cdot \frac{1}{r_2 \cdot \Sigma_{иГР}} \left(\zeta_{ГР} - \frac{2}{3} \right) = 3,35179 \cdot 10^{-3}$$

Відношення потоків

$$\frac{\Phi_2}{\Phi_0} = \Phi_{20} = \frac{\delta \Phi_{20}}{2} + Q_0 = 1,05441$$

$$\frac{\Phi_{2ГР}}{\Phi_{0ГР}} = \Phi_{20ГР} = \frac{\delta \Phi_{20ГР}}{2} + Q_{0ГР} = 1,05085$$

Відносне шкідливе поглинання за дифузійною теорією

$$q_1^{еф} = \frac{\chi_1^2 \cdot k_1^2}{2} \cdot \left(\frac{\Psi}{\Psi^2 - 1} \ln(\Psi) - \frac{3}{4} + \frac{1}{4 \cdot \Psi} \right) = 3,21048 \cdot 10^{-3}$$

$$q_{1ГР}^{еф} = \frac{\chi_{1ГР}^2 \cdot k_1^2}{2} \cdot \left(\frac{\Psi}{\Psi^2 - 1} \ln(\Psi) - \frac{3}{4} + \frac{1}{4 \cdot \Psi} \right) = 1,16318 \cdot 10^{-3}$$

Відносне шкідливе поглинання

$$q = q_1 + q_2 + q_3 = 0,070186$$

$$q_{ГР} = q_{1ГР} + q_{2ГР} + q_{3ГР} = 0,056291$$

Коефіцієнт використання теплових нейтронів

$$\Theta = \frac{1}{1 + q} = 0,934417$$

$$\Theta_{ГР} = \frac{1}{1 + q_{ГР}} = 0,946708$$

2.6.3 Визначення ймовірності уникнення резонансного захвату

Знову розглядаємо 2-Х-зонну чарунку і перераховуємо всі перетини в III групі нейтронів.

Значення мікроскопічних перерізів поглинання і розсіяння H_2, O_2, Zr, Nb, Fe беремо з таблиці ДЗ (група 3).

Мікроскопічний переріз поглинання H_2O в групі 3

$$\sigma_a^{H_2O} = 2 \cdot \sigma_a^H + \sigma_a^O = 5,04 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$$

Мікроскопічний переріз розсіяння H_2O в групі 3

$$\sigma_s^{H_2O} = 2 \cdot \sigma_s^H + \sigma_s^O = 4,526 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2$$

Повний переріз H_2O в зоні «1'»

$$\Sigma_{1'}^{H_2O} = N_{H_2O}' \cdot (\sigma_a^{H_2O} + \sigma_s^{H_2O}) = 1,039076 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{1'GR}^{H_2O} = N_{H_2OGR}' \cdot (\sigma_a^{H_2O} + \sigma_s^{H_2O}) = 0,7990493 \frac{1}{\text{см}}$$

Повний переріз Zr в зоні «1'»

$$\Sigma_{1'}^{Zr} = N_{Zr}' \cdot (\sigma_a^{Zr} + \sigma_s^{Zr}) = 0,0664064 \frac{1}{\text{см}}$$

Повний переріз Nb в зоні «1'»

$$\Sigma_{1'}^{Nb} = N_{Nb}' \cdot (\sigma_a^{Nb} + \sigma_s^{Nb}) = 8,065413 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{см}}$$

Повний макроскопічний переріз в зоні «1'»

$$\Sigma_{1'} = \Sigma_{1'}^{H_2O} + \Sigma_{1'}^{Zr} + \Sigma_{1'}^{Nb} = 1,105483 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{1'GR} = \Sigma_{1'GR}^{H_2O} + \Sigma_{1'GR}^{Zr} + \Sigma_{1'GR}^{Nb} = 0,8654565 \frac{1}{\text{см}}$$

Уповільнююча здатність зони «1'»

$$(\xi \Sigma_s)_{1'} = (\xi \Sigma_s)^{H_2O}(T_0) \cdot \gamma_{H_2O}(T_{1H}) + \sigma_{s1'}^{Zr} \cdot N_{Zr}' \cdot \xi_{Zr} + \sigma_{s1'}^{Nb} \cdot N_{Nb}' \cdot \xi_{Nb} = 1,351444 \frac{1}{\text{см}}$$

$$(\xi \Sigma_s)_{1'} = (\xi \Sigma_s)^{H_2O}(T_0) \cdot \gamma_{H_2O}(T_{1H}) + \sigma_{s1'}^{Zr} \cdot N_{Zr}' \cdot \xi_{Zr} + \sigma_{s1'}^{Nb} \cdot N_{Nb}' \cdot \xi_{Nb} = 1,039594 \frac{1}{\text{см}}$$

Відношення поверхні блока до маси поглиначача ^{238}U

$$F / M_U = \frac{2}{\gamma_{UO_2} \cdot r_0 (1 - C_5)} = 0,504286$$

$$F_{GR} / M_{GR} = \frac{2}{\gamma_{UO_2GR} \cdot r_0 (1 - C_5)} = 0,519117$$

Параметр (поправка Боналумі на форму чарунки)

$$\delta_1 = \frac{1_1 \cdot \Sigma_{1'}^{H_2O}}{(7 + \beta 1_1 \Sigma_{1'}^{H_2O})} = 0,115131$$

$$\delta_{\text{ГР}} = \frac{I_{\nu} \cdot \Sigma_{\text{ГР}}}{(7 + \beta I_{\nu} \Sigma_{\text{ГР}})} = 0,105008$$

де $\beta = \frac{17}{3}$ -гексагональна решітка

Поправка Данкова-Гінсбурга

$$C = 1 - \frac{\exp(-t \Sigma_{\nu} I_{\nu})}{1 + \Sigma_{\nu} \cdot I_{\nu} (1 - t - \delta_{\nu})} = 0,762728 .$$

$$C_{\text{ГР}} = 1 - \frac{\exp(-t \Sigma_{\nu} I_{\nu})}{1 + \Sigma_{\text{ГР}} \cdot I_{\nu} (1 - t - \delta_{\text{ГР}})} = 0,697635$$

Коефіцієнт затінення,

$$\gamma_p = \frac{C}{1 + (a - 1)(1 - C)} = 0,734831 .$$

де $a = 1,16$

Макроскопічний переріз розсіяння легких ядер, що входять до складу палива

$$\Sigma_m = N_{16} \cdot \sigma_s^{16} = 0,178046 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{\text{мГР}} = N_{16\text{ГР}} \cdot \sigma_s^{16} = 0,172959 \frac{1}{\text{см}}$$

$$h_0 = \frac{F}{M_U} \cdot \left(1 + \frac{1}{a} \Sigma_m\right) = 0,56469 .$$

$$h_{\text{ГР}} = \frac{F_{\text{ГР}}}{M_{\text{ГР}}} \cdot \left(1 + \frac{1}{a} \Sigma_{\text{мГР}}\right) = 0,579491 .$$

$$\beta = (0,535 + 0,47 \cdot h_0) \cdot 10^{-2} = 8,00389 \cdot 10^{-3} .$$

$$\beta = (0,535 + 0,47 \cdot h_{\text{ГР}}) \cdot 10^{-2} = 8,07361 \cdot 10^{-3} .$$

Коефіцієнт затінення решітки

$$\gamma_{\delta} = \frac{C}{1 + (a - 1)(1 - C)} = 0,734831 .$$

Ефективний резонансний інтеграл

$$I_{a_{\text{эф}}}^8 = \left(5,55 + 26,6 \cdot \frac{F}{M} \left(1 + \frac{I_0}{a} \Sigma_m \right) \cdot \gamma_p \right) \cdot 10^{-24} = 2,26844 \cdot 10^{-23}.$$

$$I_{a_{\text{ГР}}}^8 = \left(5,55 + 26,6 \cdot \frac{F_{\text{ГР}}}{M_{\text{ГР}}} \left(1 + \frac{I_0}{a} \Sigma_{\text{мГР}} \right) \cdot \gamma_p \right) \cdot 10^{-24} = 2,20681 \cdot 10^{-23}$$

Эффективный резонансный интеграл при температуре $T=273$ К

$$I_{a_{\text{эф}}}^8 = I_{a_{\text{эф}}}^8 (1 + \beta (T - 300)) = 2,264827 \cdot 10^{-23}$$

$$I_{a_{\text{ГР}}}^8 = I_{a_{\text{ГР}}}^8 (1 + \beta_{\text{ГР}} (T - 300)) = 2,20327 \cdot 10^{-23}$$

Ймовірність уникнення резонансного захвату на ^{238}U

$$\phi_8 = \exp \left(- \frac{N_8 \cdot V_0 \cdot I_{a_{\text{эф}}}^8}{(\xi \Sigma_s)_i \cdot V_i} \right) = 0,81442$$

$$\phi_{8\text{ГР}} = \exp \left(- \frac{N_{8\text{ГР}} \cdot V_0 \cdot I_{a_{\text{эфГР}}}^8}{(\xi \Sigma_s)_i \cdot V_i} \right) = 0,777098$$

Резонансный интеграл ^{235}U

$$I_{a_{\infty}}^5 = 144 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$$

Ймовірність уникнення резонансного захвату на ^{235}U

$$\phi_5 = \exp \left(- \frac{N_5 \cdot V_0 \cdot I_{a_{\infty}}^5}{(\xi \Sigma_s)_i \cdot V_i} \right) = 0,958438$$

$$\phi_{5\text{ГР}} = \exp \left(- \frac{N_{5\text{ГР}} \cdot V_0 \cdot I_{a_{\infty\text{ГР}}}^5}{(\xi \Sigma_s)_{i\text{ГР}} \cdot V_i} \right) = 0,947803$$

Ймовірність уникнення резонансного захвату в оболонці

$$\phi_{ob} = 1.$$

Ймовірність уникнення резонансного захоплення

$$\phi = \phi_5 \cdot \phi_8 \cdot \phi_{ob} = 0,780569$$

$$\phi_{\text{ГР}} = \phi_{5\text{ГР}} \cdot \phi_{8\text{ГР}} \cdot \phi_{ob\text{ГР}} = 0,736536$$

2.6.4 Визначення числа вторинних швидких нейтронів

Для діоксидного палива з суміші ізотопів урану ефективне число вторинних швидких нейтронів на один поглинений тепловий нейтрон можна розрахувати по формулі:

$$v_{\text{эф}}^T = \frac{2,416 \cdot \Sigma_{f_0}}{\Sigma_a} \cdot \frac{g_{\text{I,II}}^5(\Gamma_{\text{HT}})}{1 + \frac{100 - C_5}{C_5} \frac{\sigma_a^8}{\sigma_a^5 \cdot g_a^5(\Gamma_{\text{HT}})}} = 1,83008$$

$$v_{\text{эф}}^T = \frac{2,416 \cdot \Sigma_{f_{\text{гр}}}}{\Sigma_{a \text{ гр}}} \cdot \frac{g_{\text{I,II}}^5(\Gamma_{\text{HT}})}{1 + \frac{100 - C_5}{C_5} \frac{\sigma_a^8}{\sigma_a^5 \cdot g_{a \text{ гр}}^5(\Gamma_{\text{HT}})}} = 1,827858$$

де $v_j^5 = 2,416$ - число вторинних швидких нейтронів на один акт ділення в тепловій області енергії

Число вторинних швидких нейтронів в резонансній (епітепловій) області при оцінному розрахунку приймаємо:

$$v_{\text{эф}}^P = 1,59.$$

Визначення K_{∞}

K_{∞} в тепловій області

$$k_{\infty}^T = v_{\text{эф}}^T \cdot \Theta \cdot \varepsilon \cdot \phi = 1,380575$$

$$K_{\infty \text{ гр}}^T = v_{\text{эф гр}}^T \cdot \Theta_{\text{ гр}} \cdot \varepsilon_{\text{ гр}} \cdot \phi_{\text{ гр}} = 1,32467$$

K_{∞} в резонансній області

$$k_{\infty}^P = v_{\text{эф}}^P \cdot \varepsilon \cdot \phi_s \cdot (1 - \phi_s) \cdot \phi_{\text{об}} = 0,055665$$

$$K_{\infty \text{ гр}}^P = v_{\text{эф гр}}^P \cdot \varepsilon_{\text{ гр}} \cdot \phi_{\text{ гр}} \cdot (1 - \phi_{\text{ гр}}) \cdot \phi_{\text{об гр}} = 0,06703$$

K_{∞} реактора

$$K_{\infty} = K_{\infty}^T + K_{\infty}^P = 1,43624$$

$$K_{\infty \text{ гр}} = K_{\infty \text{ гр}}^T + K_{\infty \text{ гр}}^P = 1,3917$$

2.6.5 Розрахунок квадрату довжини дифузії

Квадрат довжини дифузії зони «0»

$$L_0^2 = \frac{1}{3\Sigma_{tr}\Sigma_{a_0}(T_{HF})} = 1,046807 \text{ см}^2$$

$$L_{0GP}^2 = \frac{1}{3\Sigma_{trGP}\Sigma_{a_0GP}} = 1,162875 \text{ см}^2$$

Транспортний переріз зони «1'»

$$\Sigma_{tr_1'} = \Sigma_{tr_1} \cdot \frac{V_1}{V_1'} + \Sigma_{tr_2} \cdot \frac{V_2}{V_1'} = 3,611396 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{tr_1GP} = \Sigma_{trGP} \cdot \frac{V_1}{V_1'} + \Sigma_{tr_2GP} \cdot \frac{V_2}{V_1'} = 1,756015816 \frac{1}{\text{см}}$$

Переріз поглинання зони «1'»

$$\Sigma_{a_1'} = \Sigma_{a_1} \cdot \frac{V_1}{V_1'} + \Sigma_{a_2} \cdot \frac{V_2}{V_1'} = 0,01309846 \frac{1}{\text{см}}$$

$$\Sigma_{a_1GP} = \Sigma_{a_1GP} \cdot \frac{V_1}{V_1'} + \Sigma_{a_2GP} \cdot \frac{V_2}{V_1'} = 0,01013347 \frac{1}{\text{см}}$$

Квадрат довжини дифузії зони «1'»

$$L_{1'}^2 = \frac{1}{3\Sigma_{tr_1'}\Sigma_{a_1'}} = 7,04667 \text{ см}^2$$

$$L_{1'GP}^2 = \frac{1}{3\Sigma_{tr_1GP}\Sigma_{a_1GP}} = 18,73234 \text{ см}^2$$

Квадрат довжини дифузії решітки

$$L_p^2 = L_{1'}^2 \cdot (1 - \theta) + L_0^2 \cdot \theta = 1,4403 \text{ см}^2$$

$$L_{pGP}^2 = L_{1'GP}^2 \cdot (1 - \theta_{GP}) + L_{0GP}^2 \cdot \theta_{GP} = 2,0992 \text{ см}^2$$

2.6.6 Розрахунок квадрату довжини сповільнення

Вік нейтронів в чистій воді при $\gamma_{H_2O} = 1 \text{ г/см}^3$

$$\tau_{H_2O} = 27,3 \text{ см}^2$$

Квадрат довжини уповільнення (вік)

$$\tau_p = \frac{\tau_{H\phi} \cdot \left(1 + \frac{V_{UO_2}^0}{V_{H\phi}^1} + \frac{V_{Zr}^2}{V_{H\phi}^1} \right)^2}{\left(\gamma_{H_2O} + 0,82 \cdot \frac{V_{UO_2}^0}{V_{H\phi}^1} + 0,4 \cdot \frac{V_{Zr}^2}{V_{H\phi}^1} \right)^2} = 40,339 \text{ см}^2$$

$$\tau_{pGP} = \frac{\tau_{H\phi} \cdot \left(1 + \frac{V_{UO_2}^0}{V_{H\phi}^1} + \frac{V_{Zr}^2}{V_{H\phi}^1} \right)^2}{\left(\gamma_{H_2O} + 0,82 \cdot \frac{V_{UO_2}^0}{V_{H\phi}^1} + 0,4 \cdot \frac{V_{Zr}^2}{V_{H\phi}^1} \right)^2} = 53,0341 \text{ см}^2$$

де $V_{UO_2}^0 = V_{UO_2}^{\text{кас}} = 60,207367$

$$V_{H\phi}^1 = V_{H\phi}^{\text{кас}} + V_{\text{зав}}^{\text{кас}} = 77,049487$$

$$V_{Zr}^2 = V_{\text{об}}^{\text{кас}} + V_{\text{цт}}^{\text{кас}} = 31,9508$$

2.6.7 Розрахунок квадрату довжини міграції

Квадрат довжини міграції

$$M_p^2 = L_p^2 + \tau_p = 41,77928 \text{ см}^2$$

$$M_{pGP}^2 = L_{pGP}^2 + \tau_{pGP} = 55,13327 \text{ см}^2$$

2.7 Визначення ефективного коефіцієнта розмноження

Геометричний параметр реактора можна знайти по формулі:

$$B^2 = \left(\frac{2,405}{R} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{H} \right)^2 = 4,3685 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{см}^2}$$

Визначення коефіцієнта розмноження реактора скінченних розмірів:

$$K_{\text{эф}} = \frac{K_{\infty} e^{-B^2 \tau_p}}{1 + B^2 L_p^2} = 4,410265$$

$$K_{\text{эфGP}} = \frac{K_{\infty} e^{-B^2 \tau_{pGP}}}{1 + B^2 L_{pGP}^2} = 4,358582$$

Таблиця 1.6 – Значення, що були знайдені при визначенні $K_{\text{эф}}$

Величина	Значення	
	Холодный реактор	Горячий реактор
ε	1,034278	1,039334
Φ_2 Φ_0	1,05441	1,05085
Θ	0,934417	0,946708
ϕ	0,780569	0,736536
$\nu_{эф}^T$	1,83008	1,827858
K_{∞}^T	1,380575	1,32467
K_{∞}^P	0,055665	0,06703
K_{∞}	1,43624	1,3917
L_0^2	1.046807	1,162875
L_1^2	7,04667	18,73234
L_p^2	1,44403	2,0992
τ_p	40,339	53,0341
M_p^2	41,77928	55,13327
$K_{эф}$	1,410265	1,358582

2.8 Побудова графіка розподілу нейтронів

Залежність потоку нейтронів по радіусу активної зони реактора при $z=0$ та $r=0..R$ для «холодного» і «гарячого» реактора:

$$\Phi_r(r) = A \cdot I_0\left(\frac{2,405}{R} r\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{H} z\right)$$

$$\Phi_{r,гр}(r) = A_{гр} \cdot I_0\left(\frac{2,405}{R} r\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{H} z\right)$$

Середній потік нейтронів по радіусу активної зони реактора:

$$\Phi_{r.cep} = \frac{1}{156} \int_0^{156} A \cdot I_0 \left(\frac{2,405}{R} r \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{H} z \right) \cdot dr = 0.073423$$

$$\Phi_{r.cep.GP} = \frac{1}{156} \int_0^{156} A_{GP} \cdot I_0 \left(\frac{2,405}{R} r \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{H} z \right) \cdot dr = 0.073423$$

Залежність нейтронного потоку відносно середнього потоку нейтронів по радіусу активної зони реактора:

$$\Phi_{r.відн.}(r) = \frac{\Phi_r(r)}{\Phi_{r.cep}}$$

$$\Phi_{r.відн.GP}(r) = \frac{\Phi_r(r)_{GP}}{\Phi_{r.cep.GP}}$$

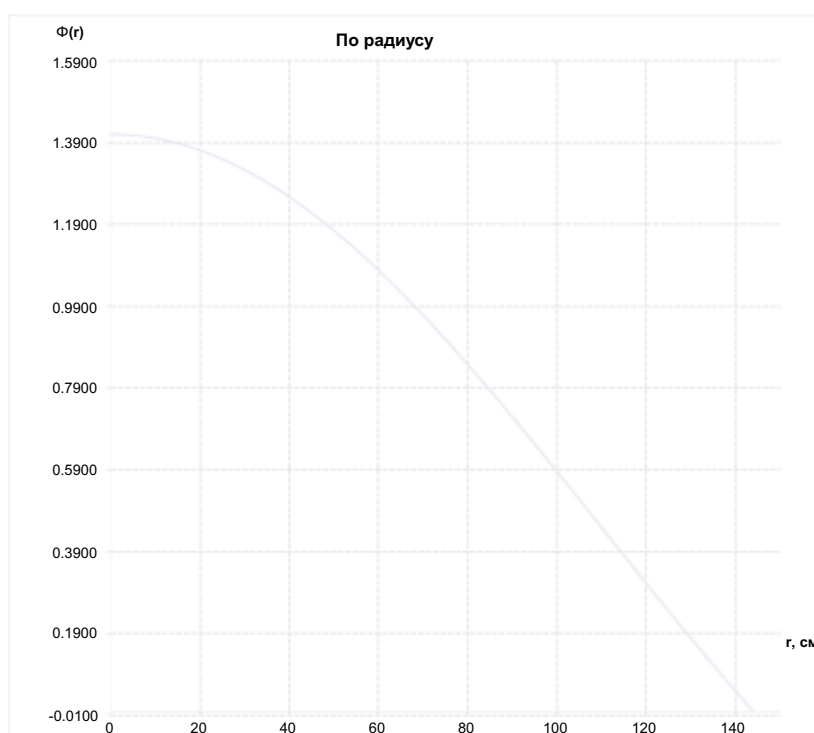


Рисунок 1.3 – Розподіл нейтронного потоку по радіусу активної зони холодного реактора

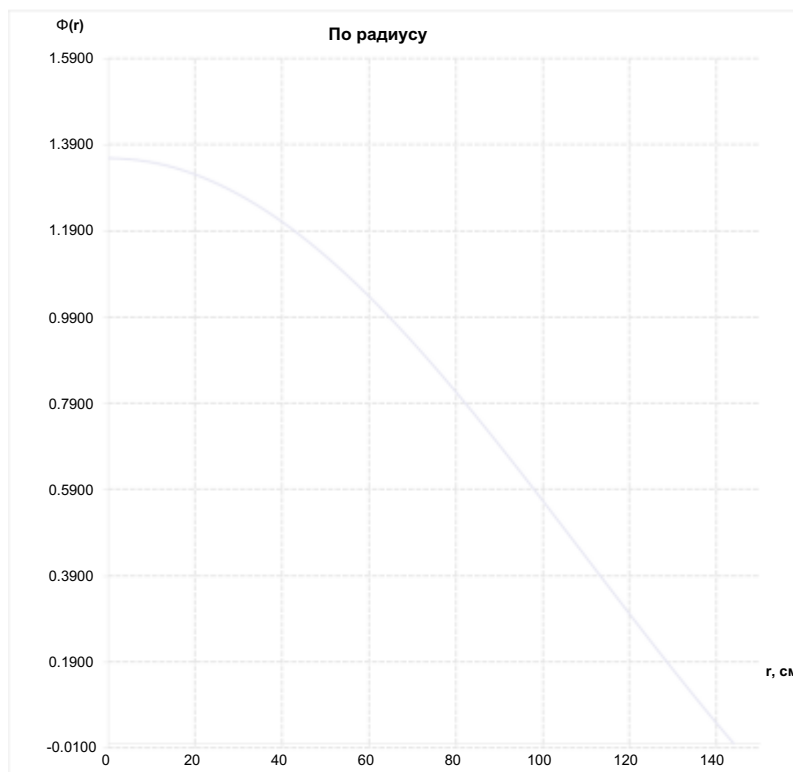


Рисунок 1.4 – Розподіл нейтронного потоку по радіусу активної зони гарячого реактора

Залежність потоку нейтронів по висоті на осі активної зони реактора, тобто при $r=0$ та $z=0..250$ для «холодного» і «гарячого» реактора:

$$\Phi_z(z) = A \cdot I_0 \left(\frac{2,405}{R} r \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{H} z \right)$$

$$\Phi_z(z)_{\text{ГР}} = A_{\text{ГР}} \cdot I_0 \left(\frac{2,405}{R} r \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{H} z \right)$$

Середній потік нейтронів по висоті активної зони реактора:

$$\Phi_{z,\text{сеп}} = \frac{1}{175} \int_0^{175} A \cdot I_0 \left(\frac{2,405}{R} r \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{H} z \right) \cdot dz = 0.07641$$

$$\Phi_{z.сер.ГР} = \frac{1}{175} \int_0^{175} A_{ГР} \cdot I_0 \left(\frac{2,405}{R} r \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{H} z \right) \cdot dz = 0.07641$$

Залежність нейтронного потоку відносно середнього потоку нейтронів по висоті активної зони реактора:

$$\Phi_{z.відн}(z) = \frac{\Phi_z(z)}{\Phi_{z.сер}}$$

$$\Phi_{z.відн}(z)_{ГР} = \frac{\Phi_z(z)_{ГР}}{\Phi_{z.сер.ГР}}$$

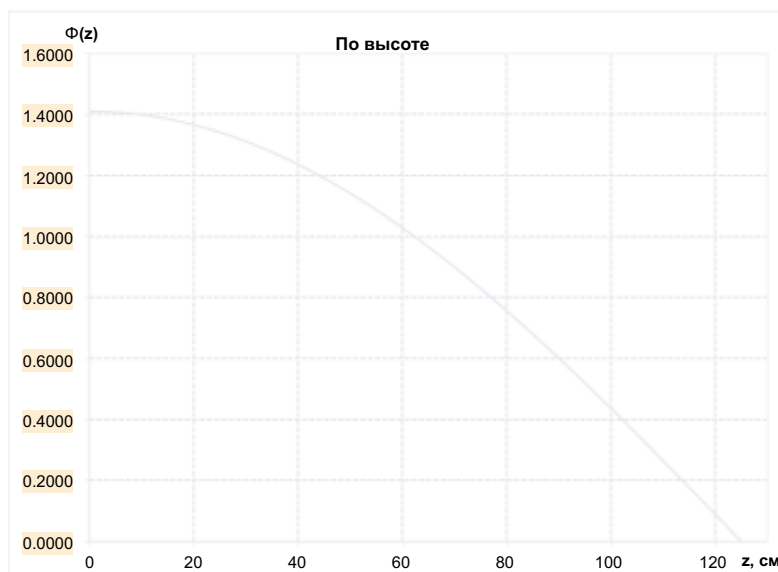


Рисунок 1.5 – Розподіл нейтронного потоку по висоті активної зони холодного реактора

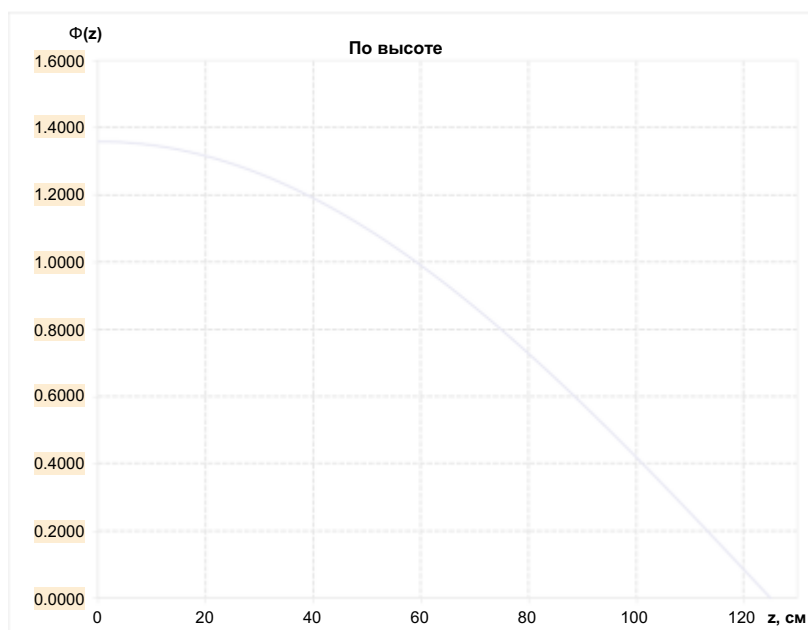


Рисунок 1.5 – Розподіл нейтронного потоку по висоті активної зони гарячого реактора

2.9 Висновок

У першій частині даної курсової роботи був зроблений спрощений нейтронно-фізичний розрахунок елементарної чарунки реактора типу ВВЕР-440. Були розраховані макроскопічні перерізи взаємодії для ^{235}U , ^{238}U , O, H, Zr, Nb, а також K_{eff} для холодного і гарячого реакторів. Розрахунки проводилися по досить наближеній оцінній методиці. Для реальних розрахунків потрібні більш громіздкі обчислення. Але, але хоч і цей метод спрощений, він дозволяє розрахувати деякі ефекти реактивності, чого достатньо для навчальних цілей.

3 БАСЕЙН ВИТРИМКИ НА РЕАКТОРІ ВВЕР-1000 ПРОЕКТУ В-320

3.1 Вступ

Поводження з відпрацьованим ТВЗ вимагає підвищеної уваги. Усі елементи, що витягуються з реактора, радіоактивні, недоступні безпосереднього обслуговування і вимагають наявності біологічного захисту персоналу під час проведення із нею технологічних операцій. Крім того, відпрацьовані касети мають залишкові тепловиділення і потребують охолодження.

Вивантажені з ядерного реактора ТВЗ, що відпрацьовали три роки, містять усередині твелів велику кількість радіоактивних речовин ("уламків" поділу урану). Одразу після вивантаження одна відпрацьована ТВЗ містить, у середньому, 0,3 мільйона кюрі р/а речовин, що виділяють енергію 100 кВт. У міру витримки відпрацьовали ТВЗ у воді басейну витримки зменшується їх радіоактивність і потужність залишкових енерговиділень.

Таблиця 1 - Залишкове тепловиділення однієї ТВЗ реактора ВВЕР-1000

Тривалість витримки	Потужність тепловиділень, кВт
3 місяці	14
6 місяців	11
1 рік	6
2 роки	2,8
3 роки	1,7

Таблиця 2 – Температура ТВЗ на повітрі.

Тривалість Витримки	3 місяці	6 місяців	1 рік	2 роки	3 роки
Температура на поверхності ТВЗ, градусів	270	220	120	75	55

У воді ТВЗ практично не змінює її температуру щодо поверхні чохла, але закриття ТВЗ у чохла з повітрям викликає збільшення її температури приблизно на величину, зазначену в попередній таблиці.

Для відведення залишкового тепла від ВТВЗ реакторний цех експлуатує систему охолодження басейну витримки. Устаткування системи охолодження басейну витримки відмарковано латинськими літерами TG. Власне БВ організаційно належить до обладнання ЦЦР, проте фактично є складовою системи TG.

За [1] Басейн витримки ядерного палива - споруда, яка входить до складу ядерної установки та призначена для тимчасового зберігання ядерного палива (опроміненого та/або відпрацьованого) у воді або водних нейтронно-поглинаючих розчинах (далі, якщо не зазначається окремо,- у воді);

3.2 Експлуатація басейну

Схема руху ядерного палива активною зоною в прийнятому тепер паливному циклі є традиційною. Вона здійснюється за три перевантаження палива в активній зоні. Свіжі ТВЗ збагаченням 4,4% по урану-235 встановлюють на периферію активної зони, а частково вигорілі - переставляють ближче до центру. Паливо, що відпрацювало три роки, видаляється з центру активної зони. Така схема руху палива (периферія – центр – центр) дозволяє забезпечувати рівномірне енерговиділення в паливі та максимальний запас до кризи теплообміну води на оболонках ТВЕЛ.

Враховуючи вимоги безпеки, пов'язані зі специфікою розміщення обладнання 1 контуру в захисній оболонці, перевантаження реактора, доставка "свіжого" палива, вивантаження відпрацьованого палива, вивезення відпрацьованого палива з реакторного відділення проводиться при реакторі, що не працює, в період його перевантаження.

Вилучення однієї ТВЗ з води БВ позбавляє її захисного шару води і створює велику потужність експозиційної дози гамма-випромінювання в реакторному залі до 60-100 рентген/год (на відстані 40-20 метрів), що неприпустимо для безпеки персоналу, що там працює.

Практика експлуатації вітчизняних та зарубіжних АЕС з вододіями реакторами, а також відомі проектні рішення з питань перевантаження ВВЕР дають підстави стверджувати, що найбільш оптимальним для цього типу реакторів є так званий "мокрый" спосіб перевантаження." спосіб перегрузки мокрий витримки з . - заключний етап усієї технологічної схеми експлуатації ядерного палива на етап "после - реакторного" циклу АЕС . Цейністю продуктів поділу, при якій транспортування його до місця призначення стане можливим і економічно доцільним.

Після вивантаження з реактора і до відправлення на регенерацію відпрацьоване паливо має зберігатися в басейні витримки протягом не менше трьох років для спаду залишкових енерговиділень до необхідного значення.

При зберіганні у басейні витримки відпрацьованого ядерного палива повинен забезпечуватися наступний режим:

- для виключення неконтрольованої ланцюгової реакції поділу підкритичність має бути не менше 0,05;
- виключення можливості потрапляння сторонніх предметів у касети;
- захист персоналу від радіоактивності (газової, аерозольної та гамма-випромінювання);
- можливість періодичного хімічного очищення води басейну витримки на СВО-4;

- виключення можливості випадкового спорожнення; виключення перегріву відпрацьованого палива через залишкове тепловиділення завдяки роботі системи розхолодження.

Система охолодження БВ призначена для відведення тепла від відпрацьованих або тимчасово вивантажених з реактора ТВЗ Тепло відводиться технічною водою VF, циркулює в трубному просторі теплообмінників розхолодження БВ. До складу системи входять.

насоси розхолодження БВ TG11(12,13)D01, розташовані в прим. А-122/1-3 на позначці 0.0; теплообмінники розхолодження БВ TG11 (12,13) WO1, розташовані в прим. А-122/1-3 на позначці 0.0;

трубопроводи, арматура, прилади КВП.

Вода в кожному відсіку басейну витримки циркулює через систему охолодження БВ, яка забезпечує допустиму температуру води басейну витримки не більше 70 ° С (при аварійному вивантаженні зони), визначену виходячи з умови неприпустимості закипання охолоджувальної води та розплавлення палива від залишкових енерговиділень.

№ п/п	Найменування параметра	Значення параметра
1	Температура води в БВ, не більше: - у режимі зберігання палива; - при повному розвантаженні а.з.	50 °С 70 °С
2	Концентрація РБК в БВ	16 г/дм3 до 20 г/дм3
3	Рівень води в БВ не менше: - режим зберігання відпрацьованого палива; - режим перевантаження палива	803 см 1535 см

Для подачі води до відсіків БВ передбачено встановлення 3-х насосів та 3-х теплообмінників. Кожен насос може подати воду в будь-який відсік БВ, для чого на всмоктуванні та натиску насосів передбачена перемичка.

При компонуванні насоси з відповідним теплообмінником були розташовані в окремих приміщеннях, не пов'язаних одне з одним, що дозволяє забезпечувати незалежність каналів охолодження, електропостачання, контролю тощо.

У разі відмови працюючого насоса, розхолодження БВ здійснюється від резервного насоса, що включається оператором БЦУ. Насоси охолодження БВ запитані від секцій 2 категорії надійного живлення, які у разі знеструмлення отримують енергопостачання від дизель-генератора. Однак при знеструмленні секції надійного живлення будь-якого СБ автоматичного включення насосів не відбувається. Вони можуть бути включені, у разі потреби, з КУ БЦУ за наявності запасу за потужністю дизеля після закінчення запуску всіх механізмів СБ за програмою ПСП.

У разі втрати охолодження БВ або виникнення течі передбачено підживлення басейну витримки від спринклерної системи (через арматуру TQ11-31S14).

На напірних та всмоктуючих магістралях системи встановлені по дві локалізуючі пневмоармути. З метою недопущення переповнення басейну в кожному з його відсіків встановлено по 2 переливи, один з яких відповідає рівню води при тривалому зберіганні палива, другий - рівню води при перевантаженні. не призводили до зниження рівня нижче за відмітку, необхідної для режиму зберігання палива. Крім того, напірні трубопроводи від насосів TG11-13D01, що проходять під шаром води до самого дна відсіків, обладнані пристроєм пасивного зриву сифону, який може виникнути при розриві зазначених трубопроводів. Ці пристрої є гідрозатвором з отвором у верхній точці, що з'єднує гідрозатвор з атмосферою захисної оболонки.

При зберіганні палива у всіх аналізованих режимах забезпечується підкритичність не менше ,05 в чистій воді, Ощо досягається в першу чергу за рахунок конструкції стелажа БВ, в якому ТВЗ встановлені з кроком 400 мм по трикутній решітці.

Крім того система розхолодження БВ забезпечує захисний рівень води в БВ при зберіганні ТВЗ, що відпрацювали, який становить не менше 2900 мм і забезпечує захист обслуговуючого персоналу від опромінення При цьому потужність дози на рівні підлоги реакторного залу не перевищує $2,2 \cdot 10^3$ бер/год.

Основним критерієм виконання системою розхолодження БВ своїх функцій є підтримання температури в басейні витримки не більше 50°C при плановому навантаженні та тривалому зберіганні палива і не більше 70°C при розвантаженні всієї активної зони.

Система охолодження БВ є системою, важливою для безпеки, у частині напірних трубопроводів у гермозоні вона відноситься до захисних систем безпеки. У частині інших трубопроводів система є системою нормальної експлуатації.

Обладнання системи зберігання відпрацьованих ТВЗ та конструкції БВ розраховані на навантаження при сейсмічній дії не менше 7 балів за шкалою MSK-64, на ударну хвилю від розриву головного циркуляційного трубопроводу, ваги ТВЗ, стелажів БВ та води БВ.

3.3 Загальна конструкція басейну витримки

Басейн витримки та перевантаження палива (БВ) розташовується всередині захисної оболонки і служить для зберігання та витримки відпрацьованого палива. БВ примикає безпосередньо до шахти реактора, з'єднаний з нею перевантажувальним каналом для пронесення паливного складання. Огороджувальні конструкції БВ:

- зберігають задані функції (щільність і міцність) з утримання активних продуктів поділу у всіх режимах експлуатації, включаючи

режим проектної аварії у поєднанні із сейсмічними впливами до проектного землетрусу - 6 балів включно, а також при сейсмічних впливах максимального розрахункового землетрусу - 7 балів ;
- забезпечують біологічний захист як за умов нормальної експлуатації, і при проектних аваріях; вогнестійкість відповідно до ВСН-01-87 не менше ніж 2,5 години.

Басейн витримки ВВЕР-1000 з РУ 8-320 складається з чотирьох відсіків: три відсіки TG21B01-03 під установку ТВЗ та герметичних пеналів та гніздо універсальне TG21B04. (Рис. 1) Охолоджуваними виконані лише касетні відсіки БВ TG21B01-03. Поділ БВ на три касетні відсіки дає можливість проводити ремонтні роботи в одному з них при розміщенні відпрацьованих касет в інших з осушенням відсіку, що ремонтується.



Рисунок 1 Знаходження басейну витримки в реакторному цеху.

1. - TG21B03; 2. - TG21B01; 3. - TG21B04; 4. - TG21B02.

У відсіках TG21B01-03 розташовуються стелажі для одноярусного зберігання відпрацьованого палива (ВТВЗ). Стелажі виконані з шести окремих секцій, кожна з яких складається з двох плит, що дистанціюють, і однієї (нижньої) - несучої. Несуча плита встановлена на опори, розташовані на днищі басейну, а плити, що дистанціюють, встановлюються на опорні стійки, закріплені на несучій плиті. Конструкція стелажів розроблена з урахуванням

навантажень, спричинених максимальним розрахунковим землетрусом 9 балів за шкалою MSK-64. Конструкція стелажів забезпечує

вертикальність встановлених у ньому збірок та герметичних пеналів;

виключення механічних пошкоджень зовнішніх поверхонь збірок при їх установці/витягу з осередків стелажу;

фіксацію в плані встановлюваних у стелаж паливних збірок та герметичних пеналів (захватні пальці касет та пробок герметичних пеналів розташовуються по осі II-IV); надійне зняття залишкового тепловиділення відпрацьованих ТВЗ, розміщених безпосередньо в гніздах стелажу або герметичних пеналах;

розміщення осередків по рівносторонньому трикутнику зі стороною 600 мм, при якій підкритичність більше 0,05 положення касет (безпосередньо в осередках стелажу та в герметичних пеналах) на одному рівні.

Універсальне гніздо TG21B04, яке іноді ще називають контейнерним відсіком, використовується для установки чохла зі свіжими ТВЗ, чохла для герметичних пеналів або спеціального транспортного контейнера ТК-13, розрахованого під установку в нього 12 ВТВЗ. Гніздо універсальне є кільцевою металоконструкцією з горизонтальними посадковими поверхнями і фіксуючими пазами, що забезпечують вільну, без заїдань, установку і зняття вищевказаного обладнання, а також центрування і фіксацію його в плані.

Стіни БВ виконані з конструкцій типу "змішаних сталевих осередків", армованих звичайною стрижневою та зовнішньою (з боку боксу) листовою арматурою. Товщина стін – 1000 мм, товщина внутрішніх перегородок 400 мм та 680 мм.

До позначки 30.70 стінки відсіків БВ облицьовані двома шарами листової сталі: внутрішній шар у бік бетону – вуглецевою сталлю товщиною 8 мм, зовнішній шар – сталлю 08X18H10T товщиною 8 мм. Вище відмітки 30.70 виконано лише нержавіюче облицювання завтовшки 6 мм.

Підлоги виконуються також двошаровими. Внутрішнє облицювання підлог у БВ - товщиною 8 мм із сталі ВС-Зпсб, у контейнерному відсіку - товщиною 6 мм. Нержавіюче облицювання днища БВ укладено на заставні деталі, що сприймають навантаження від встановлених стелажів для зберігання ТВЗ. У днищі простір між облицюваннями заповнюється дренажним бетоном, який дозволяє відводити протікання через днище у спеціально організовані дренажні трубки.

Зазор між облицюваннями стін величиною 8 мм, виконаний установкою проміжних прокладок і заглушок, утворює замкнуту загальну порожнину з підлогою і стінами до позначки 30.7 і дозволяє організувати дренаж протікання через нержавіюче облицювання:

З TG21B01 - в приміщення ГА-407/2;

З TG21803.04 - до приміщення ГА-405/6;

З TG21B02 - у приміщення ГА-405/1

У відсіку TG21B03 крім стелажів також встановлена механічна частина системи контролю герметичності оболонок КГО, що складається з чотирьох пеналів, імпульсних ліній та КВП.

При експлуатації РУ на потужності БВ перебуває у режимі "зберігання ВТВЗ". При цьому повинні бути заповнені тільки відсіки TG21B01-03 за позначкою 28,8, а загальний обсяг води в них дорівнює 541м³. При зберіганні палива рівень води БВ повинен завжди підтримуватися на позначці 28.8. Віс всмоктувальних трубопроводів по компоновці знаходиться на позначці 27.9 метрів, що значно вище за відмітку гори, що зберігаються в басейні ТВЗ (верхня позначка головок ТВЗ становить 25.9 метра).

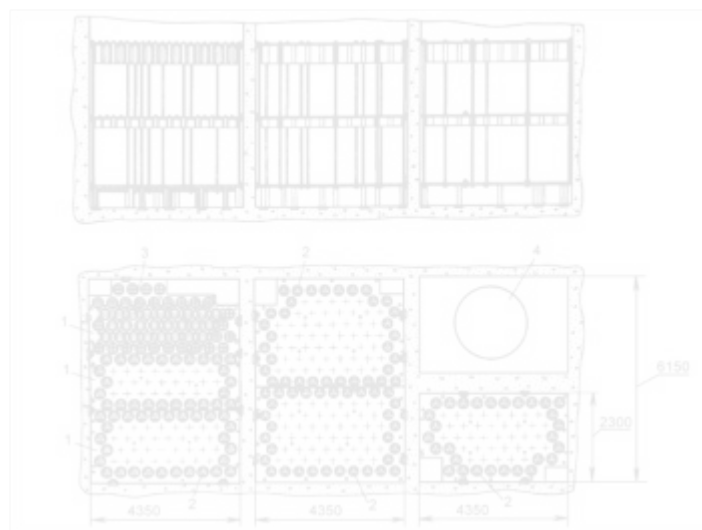


Рисунок 2 – Конструкція БВ

1. – Секції стелажів під встановлення ТВЗ; 2. – комірки під встановлення ТВЗ;
3.- пенали СОДС, 4. – універсальне гніздо TG21B04

Всмоктування насосів TG виконано у вигляді отвору в облицювання касетних відсіків TG21B01-03 на отм28.6. Повернення охолодженої води провадиться трубопроводами, які входять у відсіки TG21801-03 на позначці 28.6 та опускаються до позначки 20.94. У системі TG встановлено три насоси розхолодження TG11-13D01, причому кожен насос має індивідуальні всмоктувальну та напірну лінії з відповідного касетного відсіку БВ. На напірних та всмоктуючих трубопроводах охолодження БВ встановлені по дві локалізуючі швидкодіючі засувки (одна зовні і одна всередині гермооболонки).

Для виключення можливості випадкового спорожнення відсіки для ВТВЗ дренажів не мають. Всі трубопроводи, що входять і виходять з паливних відсіків басейну витримки, заведені зверху БВ таким чином, щоб їх розриви не призводили до зниження рівня води нижче рівня, необхідного в

режимі зберігання палива. З метою недопущення переповнення басейну в кожному з його відсіків встановлено по 2 переливи, один з яких відповідає рівню води за тривалого зберігання палива, а другий - рівню води при перевантаженні палива.

Басейн витримки може бути відокремлений від шахтного обсягу спеціальним гідрозатвором плоским ковзним, який зазвичай називають шандорою. Шандора поставляється в комплекті із заставною рамою. Власне шандора - це підйомне полотнище, що представляє собою плиту товщиною 40 мм, оконтовану з боків опорними стійками і об'язками знизу і зверху. Ущільнення шандор здійснюється гумовим шнуром спеціального профілю, закріпленим на бічних стійках і нижній об'язці притискними планками.

Аналогічними шандорами відсікаються від загального обсягу універсальне гніздо TG21B04 та касетний відсік TG21B02. Зняття шандори дозволяється лише за рівних рівнях у сусідніх відсіках. Шандора розрахована на такі навантаження:

- гідростатичне навантаження з боку басейну витримки – 7,32 метра;
- сейсмічна навантаження - сейсмостійкість у стані при землетрусі силою 9 балів за шкалою MSK- 64, включаючи гідродинаміческое навантаження.

ВИСНОВКИ

В теплогидравлическом расчете, при заданных входных параметрах, температуры как оболочки ТВЕЛ, так и топливного осердя под час работы не превышают допустимых значений. След заважитищо при заданных параметрах час перебування ТВЕЛ в АЗ обмежується, ці обмеження обумовлені більш сильним ефектом корозії з боку теплоносія. Реакторна установка із заданими входними параметрами може бути допущена до експлуатації і без додаткових заходів, але потрібно більше уваги приділити моніторингу стану ТВЕЛ ТВЗ, які максимально навантажені.

В нейтронно-фізичному розрахунку була розглянута спрощена активна зона реактору ВВЕР-1000, до набору елементарних чарунок, отриманих на основі ТВЕЛ ТВС-2М із зоною уповільнювача навколо нього. Недостатній ефективний коефіцієнт розмноження для холодного стану реактору можна виправити шляхом зменшення кроку ТВЕЛ. Реакторна установка із заданими входними параметрами не може бути допущена до експлуатації без втілення додаткових заходів.

Басейн витримки є одним з найголовніших елементів атомної станції його безпека запезпечує ядерну та радіаційну безпеку на майданчику АЕС та поза майданчиком.

Розділ охорони праці містить необхідні технічні рішення та організаційні заходи щодо забезпечення радіаційної безпеки на АЕС, електробезпеки, пожежної безпеки і профілактики, при дотриманні яких можна звести до мінімуму імовірність виникнення нещасного випадку або захворювання працівника з одночасним забезпеченням комфортних умов при максимальній продуктивності праці.

4 ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Широков С.В., Гальченко В.В. Методичні вказівки до курсового проекту з курсу „Теорія ядерних реакторів” - Теплогідравлічний розрахунок.
2. Широков С.В., Гальченко В.В. Методичні вказівки до курсового проекту з курсу „Теорія ядерних реакторів” - Нейтронно-фізичний розрахунок.
3. Вимоги безпеки під час поводження з ядерним паливом ЗАТВЕРДЖЕНО Наказ Державної інспекції ядерного регулювання України 21 червня 2019 року № 269 Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 30 липня 2019 р. за № 833/33804
4. Технологические системы реакторного отделения. Балаковская атомная станция, центр подготовки персонала 2000.
5. Технологические системы реакторного отделения (часть 2) Балаковская атомная станция, центр подготовки персонала 2000.
6. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока №5 Запорожской АЭС. Предварительный отчет-D4.4. ВОА 274408-A-R4.
7. Технологічний регламент безпечної експлуатації ЮУАЕС Блок 3
8. Про затвердження Правил пожежної безпеки при експлуатації атомних станцій (НАПБ А.01.001-2004), зареєстровані Мін'юстом 06.09.2007 р. за № 1039/14306 / Міністерство юстиції України. – 2007. Режим доступу до ресурсу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1039-07>
9. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
<https://nvfi.biz/-norms/-ДСТУ/2016%20ДСТУ%20Б%20В.1.1-36%20Визначення%20категорій%20приміщень>
10. Про затвердження «Правил будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок» (ДНАОП 0.00-1.32-01),

зарегістровано Міністерством праці та соціальної політики України 21.06.2001

N 272. Режим доступу до ресурсу:

<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>

11. ППБ-АЕ-95. Правила пожежної безпеки при експлуатації АЕС України – К. : Міністерство палива і енергетики, 2005. – 76 с.

5 ДОДАТОК А

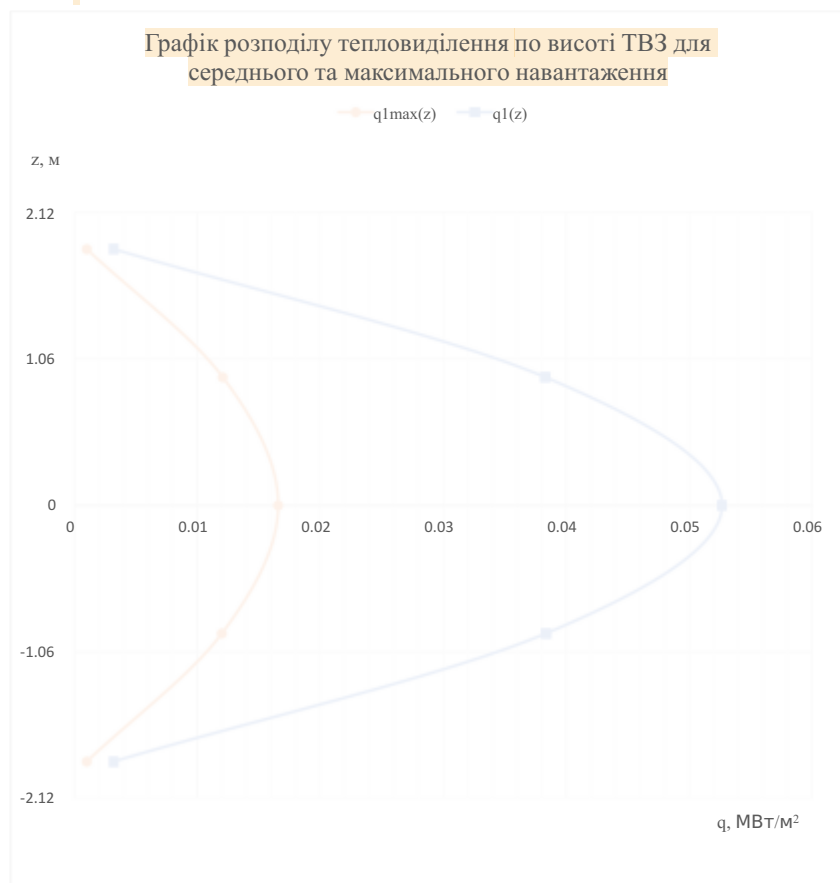


Рисунок А.1 - Графік розподілу тепловиділення по висоті ТВЗ для середнього та максимального навантаження

6 ДОДАТОК Б

Таблиця Б.1 - Остаточні результати розподілу локальних температур по висоті ТВЗ із середнім і максимальним навантаженням.

Z	P МПа	P _{max} МПа	T ⁰ С	T _{max} ⁰ С
2,12	16,32	16,81	318,364	323,861
1,06	16,626	16,408	314,815	321,401
0	16	16	305,383	310,784
-1,06	15,838	15,592	292,952	296,435
-2,12	15,676	15,184	289	289



Рисунок Б.1 - Графік розподілу локальних температур по висоті ТВС із середнім і максимальним навантаженням

7 ДОДАТОК В

Таблиця В.1 - Результати розрахунку критеріїв подібності для ТВЗ із середнім та максимальним навантаженням.

Z м	Re	Re _{max}	Nu	Nu _{msx}
2,12	362324,8	949855,6	596,240	1289,245
1,06	362324,8	949855,6	596,761	1298,489
0	362324,8	949855,6	609,128	1330,746
-1,06	362324,8	949855,6	621,782	1376,575
-2,12	362324,8	949855,6	628,984	1404,598

Таблиця В.2 - Результати розрахунку локальних коефіцієнтів тепловіддачі для ТВЗ із середнім та максимальним навантаженням.

Висота Z	α , Вт/м ² ·К	α_{max} , Вт/м ² ·К
2,12	28462,47	61544,23
1,06	27897,97	61878,59
0	27022,24	60239,53
-1,06	27941,79	60048,15
-2,12	28317,21	60230,08

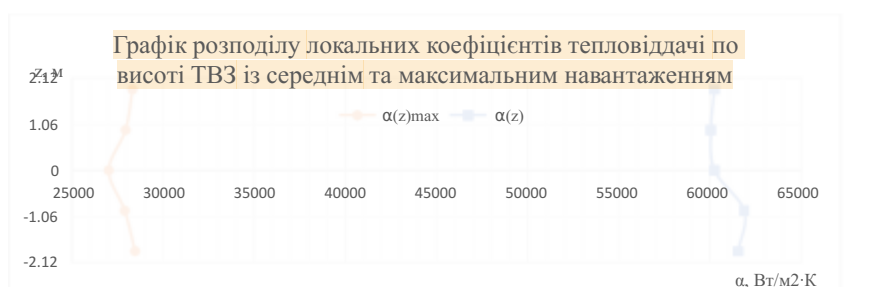


Рисунок 5.2 - Графік розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі по висоті ТВЗ із середнім та максимальним навантаженням.

8 ДОДАТОК Г

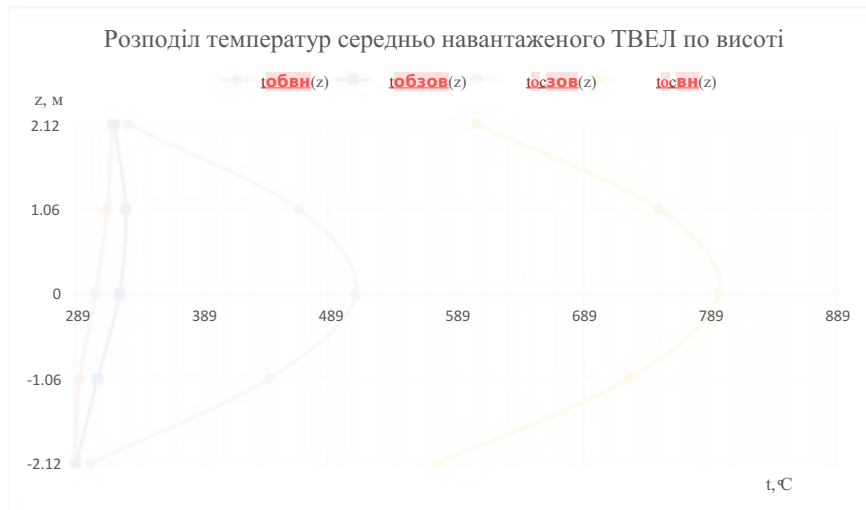


Рисунок Г.1 - Розподіл температур середньо навантаженого ТВЕЛ по висоті.

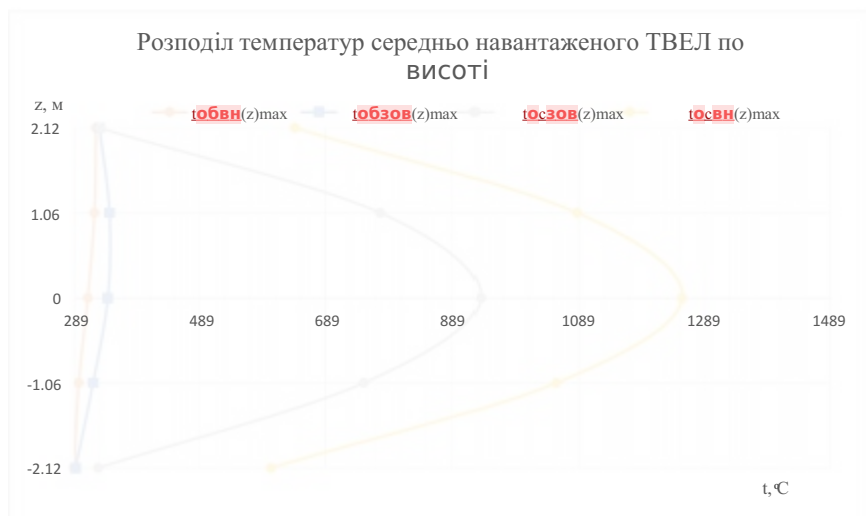
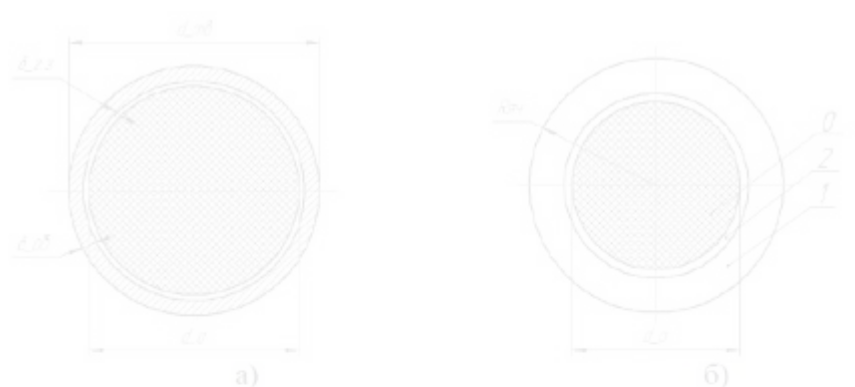


Рисунок Г.2 - Розподіл температур максимально навантаженого ТВЕЛ по висоті.

9 ДОДАТОК Д



а) переріз ТВЕЛа; б) еквівалентна комірка:

0 – зона палива; 1 – зона уповільнювача; 2 – зона оболонки (включає газовий зазор).

Рисунок Д.1 – Переріз ТВЕЛ та елементарної паливної комірки

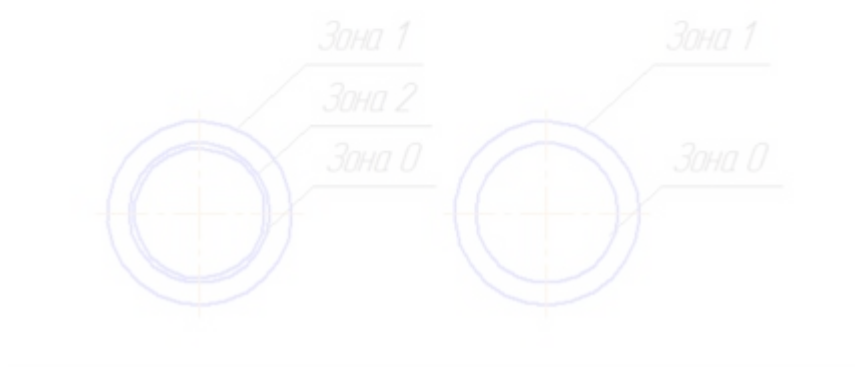


Рисунок Д.2 - Перехід від 3-х зонної чарунки до 2-х зонної

10 ДОДАТОК Е

Для холодного реактора:

Варто відмітити, що при розрахунку T_{H2} необхідно проводити декілька ітерацій доти, доки збіжність процесу не становитиме 5 % або менше.

$\sigma_a^{235\text{U}}$	Мікропереріз поглинання ^{235}U	6,809000E-22	см ²
$\sigma_a^{238\text{U}}$	Мікропереріз поглинання ^{238}U	2,700000E-24	см ²
σ_a^{Zr}	Мікропереріз поглинання Zr	1,850000E-25	см ²
σ_a^{Nb}	Мікропереріз поглинання Nb	1,150000E-24	см ²
σ_a^{Fe}	Мікропереріз поглинання Fe	2,550000E-24	см ²
σ_a^{O2}	Мікропереріз поглинання O	2,700000E-26	см ²
σ_a^{H2}	Мікропереріз поглинання H	3,320000E-25	см ²
$\sigma_f^{235\text{U}}$	Мікропереріз ділення ^{235}U	5,835000E-22	см ²
$\sigma_s^{235\text{U}}$	Мікропереріз розсіювання ^{235}U	1,380000E-23	см ²
$\sigma_s^{238\text{U}}$	Мікропереріз розсіювання ^{238}U	8,900000E-24	см ²
σ_s^{Zr}	Мікропереріз розсіювання Zr	6,400000E-24	см ²
σ_s^{Nb}	Мікропереріз розсіювання Nb	5,000000E-24	см ²
σ_s^{Fe}	Мікропереріз розсіювання Fe	1,090000E-23	см ²
σ_s^{O2}	Мікропереріз розсіювання O	3,760000E-24	см ²
σ_s^{H2}	Мікропереріз розсіювання H	2,040000E-23	см ²
ξ_s	Середньологарифмічний декримент енергії ^{235}U	8,510638E-03	-
ξ_s	Середньологарифм.декр. енергії ^{238}U	8,403361E-03	-
ξ_{Zr}	Середньологарифм.декр. енергії Zr	2,197802E-02	-
ξ_{Nb}	Середньологарифм.декр. енергії Nb	2,150538E-02	-
ξ_{O2}	Середньологарифм.декр. енергії O	1,200000E-01	-
ξ_{H2}	Середньологарифм.декр. енергії H	1,000000E+00	-

1-а ітерація

Зона "0"			
	Макроскопічний переріз		
Σ_a^5	поглинання ^{235}U	4,287392E-01	см ⁻¹
Σ_a^8	Макроскопічний переріз поглинання ^{238}U	5,429085E-02	см ⁻¹
Σ_a^{O2}	Макроскопічний переріз поглинання O	1,121133E-03	см ⁻¹
$\Sigma_{a0}(T_0)$	Макроскопічний переріз поглинання зони "0" при T=T ₀	4,841512E-01	см ⁻¹
Σ_f^5	Макроскопічний переріз ділення ^{235}U	3,677914E-01	см ⁻¹
	Макроскопічний переріз ділення		
$\Sigma_{f0}(T_0)$	зони "0" при T=T ₀	3,677914E-01	см ⁻¹
Σ_s^5	Макроскопічний переріз розсіяння ^{235}U	1,018376E-02	см ⁻¹
Σ_s^8	Макроскопічний переріз розсіяння ^{238}U	2,019333E-01	см ⁻¹
Σ_s^{O2}	Макроскопічний переріз розсіяння O	1,761717E-01	см ⁻¹
Σ_{s0}	Макроскопічний переріз розсіяння зони"0"	3,882888E-01	см ⁻¹
ξ_s	Середньологарифм.декр. енергії ^{235}U	8,510638E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^5$	Сповільнююча здібність ^{235}U	8,667026E-05	см ⁻¹
ξ_s	Середньологарифм.декр. енергії ^{238}U	8,403361E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^8$	Сповільнююча здібність ^{238}U	1,696919E-03	см ⁻¹
ξ_{O2}	Середньологарифм.декр. енергії O	1,200000E-01	-
$(\xi\Sigma_s)^{O2}$	Сповільнююча здібність O	2,114060E-02	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)_0$	Сповільнююча здібність зони "0"	2,292419E-02	см ⁻¹
Зона "1"			
	Макроскоп. поглинання при		
$\Sigma_a^{H2O}(T_0)$	H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,765552E-02	см ⁻¹
	Макроскопічний переріз поглинання		
Σ_a^{Zr}	Zr в зоне "1"	6,921679E-04	см ⁻¹
	Макроскопічний переріз поглинання		
Σ_a^{Nb}	Nb в зоне "1"	4,252661E-05	см ⁻¹

$\Sigma_a^{Fe'}$	Макроскопичний переріз поглинання Fe в зоні "1"	0,000000E+00	см ⁻¹
$\Sigma_{a1}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони «1»	1,839021E-02	см ⁻¹
$\Sigma_s^{H_2O}(T_0)$	Макроскопичний переріз розсіяння H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,322995E+00	см ⁻¹
Σ_s^{Zr}	Макроскопичний переріз розсіяння Zr	2,701934E-02	см ⁻¹
Σ_s^{Nb}	Макроскопичний переріз розсіяння Nb	2,086354E-04	см ⁻¹
Σ_s^{Fe}	Макроскопичний переріз розсіяння Fe	0,000000E+00	см ⁻¹
$\Sigma_{s1}(T_0)$	Макроскопичний переріз розсіяння зони «1» при T ₀	1,350223E+00	см ⁻¹
ξ_{Zr}	Середньологарифм.декр. енергії Zr	2,197802E-02	-
ξ_{Nb}	Середньологарифм.декр. енергії Nb	2,150538E-02	-
$(\xi\Sigma_s)^{H_2O}(T)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T=273,15K	1,350000E+00	см ² /г
$(\xi\Sigma_s)^{H_2O}(T_0)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,350000E+00	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)^{Zr}$	Сповільнююча здібність Zr	5,938317E-04	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)^{Nb}$	Сповільнююча здібність Nb	4,486783E-06	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)^{Fe}$	Сповільнююча здібність Fe	0,000000E+00	
$(\xi\Sigma_s)_1(T_0)$	Сповільнююча здібність зони "1" при T ₀ =293,15K	1,350598E+00	см ⁻¹
Зона "2"			
Σ_a^{Zr}	Макроскопичний переріз поглинання Zr	5,284883E-03	см ⁻¹
Σ_a^{Nb}	Макроскопичний переріз поглинання Nb	3,247018E-04	см ⁻¹
$\Sigma_{a2}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони "2"	5,609585E-03	см ⁻¹
Σ_s^{Zr}	Макроскопичний переріз розсіяння Zr	2,062997E-01	см ⁻¹
Σ_s^{Nb}	Макроскопичний переріз розсіяння Nb	1,592986E-03	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)_2$	Сповільнююча здібність зони "2"	4,568318E-03	см ⁻¹
Чарунка			
$\Sigma_a^{яч}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання чарунки при T ₀ =293,15K	1,797956E-01	см ⁻¹

$(\xi \Sigma_s)^{94}(T_0)$	Сповільнююча здібність чарунки	6,861617E-01	см ⁻¹
	при T ₀ =293,15K		
T _{нр} (T ₀)1	Температура нейтронного газу холодного	4,314158E+02	K
	реактора T=T ₀ =293,15K		

2-а ітерація

β	Коефіцієнт	7,305364E-01
g_a^5	g_a^5 -фактор ²³⁵ U	9,493309E-01
g_r^5	g_r^5 -фактор ²³⁵ U	9,476030E-01

Зона "0"

Σ_a^5	Макроскопічний переріз	3,484750E-01	см ⁻¹
	поглинання ²³⁵ U		
Σ_a^8	Макроскопічний переріз поглинання ²³⁸ U	4,475314E-02	см ⁻¹
Σ_a^{O2}	Макроскопічний переріз поглинання O ₂	9,241744E-04	см ⁻¹
$\Sigma_{ad}(T_0)$	Макроскопічний переріз поглинання	3,941524E-01	см ⁻¹
	зони "0" при T=T ₀		
Σ_f^5	Макроскопічний переріз ділення ²³⁵ U	2,980836E-01	см ⁻¹
$\Sigma_{f0}(T_0)$	Макроскопічний переріз ділення	2,980836E-01	см ⁻¹
	зони "0" при T=T ₀		
Σ_s^5	Макроскопічний переріз розсіяння ²³⁵ U	1,018376E-02	см ⁻¹
Σ_s^8	Макроскопічний переріз розсіяння ²³⁸ U	2,019333E-01	см ⁻¹
Σ_s^{O2}	Макроскопічний переріз розсіяння O ₂	1,761717E-01	см ⁻¹
Σ_{s0}	Макроскопічний переріз розсіяння ЗОНИ"0"	3,882888E-01	см ⁻¹
ξ_5	Середньологарифм.декр. енергії ²³⁵ U	8,510638E-03	-
$(\xi \Sigma_s)^5$	Сповільнююча здібність ²³⁵ U	8,667026E-05	см ⁻¹
ξ_8	Середньологарифм.декр. енергії ²³⁸ U	8,403361E-03	-
$(\xi \Sigma_s)^8$	Сповільнююча здібність ²³⁸ U	1,696919E-03	см ⁻¹
ξ_{O2}	Середньологарифм.декр. енергії O ₂	1,200000E-01	-
$(\xi \Sigma_s)^{O2}$	Сповільнююча здібність O ₂	2,114060E-02	см ⁻¹
$(\xi \Sigma_s)_0$	Сповільнююча здібність зони "0"	2,292419E-02	см ⁻¹
Зона "1"			
$\Sigma_a^{H2O}(T_0)$	Макроскоп. поглинання при	1,498763E-02	см ⁻¹

	H ₂ O при T ₀ =293,15K		
$\sum_a^{Zr'}$	Макроскопичний переріз поглинання Zr в зоні "1"	5,705692E-04	см ⁻¹
$\sum_a^{Nb'}$	Макроскопичний переріз поглинання Nb в зоні "1"	3,505562E-05	см ⁻¹
$\sum_a^{Fe'}$	Макроскопичний переріз поглинання Fe в зоні "1"	0,000000E+00	см ⁻¹
$\sum_{a1}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони «1»	1,559325E-02	см ⁻¹
$\sum_s^{H_2O}(T_0)$	Макроскопичний переріз розсіяння H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,322995E+00	см ⁻¹
\sum_s^{Zr}	Макроскопичний переріз розсіяння Zr	2,701934E-02	см ⁻¹
\sum_s^{Nb}	Макроскопичний переріз розсіяння Nb	2,086354E-04	см ⁻¹
\sum_s^{Fe}	Макроскопичний переріз розсіяння Fe	0,000000E+00	см ⁻¹
$\sum_{s1}(T_0)$	Макроскопичний переріз розсіяння зони «1» при T ₀	1,350223E+00	см ⁻¹
ξ_{Zr}	Середньологарифм.декр. енергії Zr	2,197802E-02	-
ξ_{Nb}	Середньологарифм.декр. енергії Nb	2,150538E-02	-
$(\xi \sum_s)^{H_2O}(T)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T=273,15K	1,350000E+00	см ² /г
$(\xi \sum_s)^{H_2O}(T_0)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,350000E+00	см ⁻¹
$(\xi \sum_s)^{Zr}$	Сповільнююча здібність Zr	5,938317E-04	см ⁻¹
$(\xi \sum_s)^{Nb}$	Сповільнююча здібність Nb	4,486783E-06	см ⁻¹
$(\xi \sum_s)^{Fe}$	Сповільнююча здібність Fe	0,000000E+00	
$(\xi \sum_s)_1(T_0)$	Сповільнююча здібність зони "1" при T ₀ =293,15K	1,350598E+00	см ⁻¹
Зона "2"			
\sum_a^{Zr}	Макроскопичний переріз поглинання Zr	4,356445E-03	см ⁻¹
\sum_a^{Nb}	Макроскопичний переріз поглинання Nb	2,676589E-04	см ⁻¹
$\sum_{a2}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони "2"	4,624104E-03	см ⁻¹
\sum_s^{Zr}	Макроскопичний переріз розсіяння Zr	2,062997E-01	см ⁻¹

Σ_S^{Nb}	Макроскопичний переріз розсіяння Nb	1,592986E-03	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_S)_2$	Сповільнююча здібність зони "2"	4,568318E-03	см ⁻¹
Чарунка			
$\Sigma_a^{ЯЧ}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання чарунки при T ₀ =293,15K	1,466936E-01	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_S)^{ЯЧ}(T_0)$	Сповільнююча здібність чарунки при T ₀ =293,15K	6,861617E-01	см ⁻¹
T _{нр} (T ₀) ₂	Температура нейтронного газу холодного реактора T=T ₀ =293,15K	405,959893	K

T _{нр} - після 1-ої ітерації	431.42
T _{нр} - після 2-ої ітерації	405.96
Похибка,%	-5,90

3 ітерація

β	Коефіцієнт	7,530925E-01	-
g_a^5	g_a^5 -фактор ²³⁵ U	9,516273E-01	-
g_f^5	g_f^5 -фактор ²³⁵ U	9,503644E-01	-

Зона "0"			
Σ_a^5	Макроскопичний переріз поглинання ²³⁵ U	3,601036E-01	см ⁻¹
Σ_a^8	Макроскопичний переріз поглинання ²³⁸ U	4,613495E-02	см ⁻¹
Σ_a^{O2}	Макроскопичний переріз поглинання O ₂	9,527093E-04	см ⁻¹
$\Sigma_{ad}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони "0" при T=T ₀	4,071912E-01	см ⁻¹
Σ_f^5	Макроскопичний переріз ділення ²³⁵ U	3,081827E-01	см ⁻¹
$\Sigma_{f0}(T_0)$	Макроскопичний переріз ділення зони "0" при T=T ₀	3,081827E-01	см ⁻¹
Σ_s^5	Макроскопичний переріз розсіяння ²³⁵ U	1,018376E-02	см ⁻¹
Σ_s^8	Макроскопичний переріз розсіяння ²³⁸ U	2,019333E-01	см ⁻¹
Σ_s^{O2}	Макроскопичний переріз розсіяння O ₂	1,761717E-01	см ⁻¹
Σ_{s0}	Макроскопичний переріз розсіяння ЗОНИ"0"	3,882888E-01	см ⁻¹

ξ_5	Средньюлогарифм.декр. энергии ^{235}U	8,510638E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^5$	Сповільнююча здібність ^{235}U	8,667026E-05	см^{-1}
ξ_8	Средньюлогарифм.декр. энергии ^{238}U	8,403361E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^8$	Сповільнююча здібність ^{238}U	1,696919E-03	см^{-1}
ξ_{O_2}	Средньюлогарифм.декр. энергии O_2	1,200000E-01	-
$(\xi\Sigma_s)^{\text{O}_2}$	Сповільнююча здібність O_2	2,114060E-02	см^{-1}
$(\xi\Sigma_s)_0$	Сповільнююча здібність зони "0"	2,292419E-02	см^{-1}
Зона "1"			
$\Sigma_a^{\text{H}_2\text{O}}(T_0)$	Макроскоп. поглинання при H_2O при $T_0=293,15\text{K}$	1,500320E-02	см^{-1}
$\Sigma_a^{\text{Zr}'}$	Макроскопічний переріз поглинання Zr в зоні "1"	5,881862E-04	см^{-1}
$\Sigma_a^{\text{Nb}'}$	Макроскопічний переріз поглинання Nb в зоні "1"	3,613801E-05	см^{-1}
$\Sigma_a^{\text{Fe}'}$	Макроскопічний переріз поглинання Fe в зоні "1"	0,000000E+00	см^{-1}
$\Sigma_{a1}(T_0)$	Макроскопічний переріз поглинання зони «1»	1,562752E-02	см^{-1}
$\Sigma_s^{\text{H}_2\text{O}}(T_0)$	Макроскопічний переріз розсіяння H_2O при $T_0=293,15\text{K}$	1,322995E+00	см^{-1}
Σ_s^{Zr}	Макроскопічний переріз розсіяння Zr	2,701934E-02	см^{-1}
Σ_s^{Nb}	Макроскопічний переріз розсіяння Nb	2,086354E-04	см^{-1}
Σ_s^{Fe}	Макроскопічний переріз розсіяння Fe	0,000000E+00	см^{-1}
$\Sigma_{s1}(T_0)$	Макроскопічний переріз розсіяння зони «1» при T_0	1,350223E+00	см^{-1}
ξ_{Zr}	Средньюлогарифм.декр. энергии Zr	2,197802E-02	-
ξ_{Nb}	Средньюлогарифм.декр. энергии Nb	2,150538E-02	-
$(\xi\Sigma_s)^{\text{H}_2\text{O}}(T)$	Сповільнююча здібність H_2O при $T=273,15\text{K}$	1,350000E+00	$\text{см}^2/\text{г}$
$(\xi\Sigma_s)^{\text{H}_2\text{O}}(T_0)$	Сповільнююча здібність H_2O при $T_0=293,15\text{K}$	1,350000E+00	см^{-1}
$(\xi\Sigma_s)^{\text{Zr}}$	Сповільнююча здібність Zr	5,938317E-04	см^{-1}
$(\xi\Sigma_s)^{\text{Nb}}$	Сповільнююча здібність Nb	4,486783E-06	см^{-1}

$(\xi\Sigma_s)^{Fe}$	Сповільнююча здібність Fe	0,000000E+00	
	Сповільнююча здібність зони "1"		
$(\xi\Sigma_s)_1(T_0)$	при $T_0=293,15K$	1,350598E+00	см ⁻¹
Зона "2"			
Σ_a^{Zr}	Макроскопічний переріз поглинання Zr	4,490956E-03	см ⁻¹
Σ_a^{Nb}	Макроскопічний переріз поглинання Nb	2,759231E-04	см ⁻¹
	Макроскопічний переріз поглинання зони "2"		
$\Sigma_{a2}(T_0)$		4,766879E-03	см ⁻¹
Σ_S^{Zr}	Макроскопічний переріз розсіяння Zr	2,062997E-01	см ⁻¹
Σ_S^{Nb}	Макроскопічний переріз розсіяння Nb	1,592986E-03	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)_2$	Сповільнююча здібність зони "2"	4,568318E-03	см ⁻¹
Чарунка			
	Макроскопічний переріз поглинання		
$\Sigma_a^{Pu}(T_0)$	чарунки при $T_0=293,15K$	1,513033E-01	см ⁻¹
	Сповільнююча здібність чарунки		
$(\xi\Sigma_s)^{Pu}(T_0)$	при $T_0=293,15K$	6,861617E-01	см ⁻¹
	Температура нейтронного газу холодного реактора $T=T_0=293,15K$		
$T_{ng}(T_0)$		409,504813	K

T_{ng} - після 2-ої ітерації	405,96
T_{ng} - після 3-ої ітерації	409,50
Похибка, %	0,873219

Отже, T_{ng} для холодного реактора = 409,5 K

Визначаємо перерізи при $T_{ng}=409,5 K$

β	Коефіцієнт	7,498258E-01	-
g_a^5	g_a^5 -фактор ²³⁵ U	9,513033E-01	-
g_r^5	g_r^5 -фактор ²³⁵ U	9,499748E-01	-
Зона "0"			
	Макроскоп. переріз поглинання		
$\Sigma_a^5(T_{ng})$	²³⁵ U	3,584195E-01	см ⁻¹
	Макроскоп. переріз поглинання		
$\Sigma_a^8(T_{ng})$	²³⁸ U	4,593483E-02	см ⁻¹

$\Sigma_f^{235}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз ділення ^{235}U	3,067201E-01	см^{-1}
$\Sigma_a^{O_2}$	Макроскоп. переріз поглинання O_2	9,485767E-04	см^{-1}
$\Sigma_{a0}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання зони "0"	4,053029E-01	см^{-1}
$\Sigma_{f0}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз ділення зони "0"	3,067201E-01	см^{-1}
Зона "1"			
β	Коефіцієнт	7,498258E-01	-
$\Sigma_{aH_2O}^{H_2O}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання H_2O хол. реактора при $T=T_{нг}$ в зоні "1"	1,493812E-02	см^{-1}
$\Sigma_a^{Zr}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання Zr в зоні "1" при $T=T_{нг}$	5,856348E-04	см^{-1}
$\Sigma_a^{Fe}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання Fe в зоні "1" при $T=T_{нг}$	0,000000E+00	см^{-1}
$\Sigma_a^{Nb}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання Nb в зоні "1" при $T=T_{нг}$	3,598125E-05	см^{-1}
$\Sigma_{a1}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання зони "1" при $T_{нг}$	1,555973E-02	см^{-1}
Зона "2"			
$\Sigma_a^{Zr}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання Zr в зоні "1" при $T_{нг}$	4,471475E-03	см^{-1}
$\Sigma_a^{Nb}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання Zr в зоні "1" при $T_{нг}$	2,747263E-04	см^{-1}
$\Sigma_{a2}(T_{нг})$	Макроскоп. переріз поглинання Zr в зоні "1" при $T_{нг}$	4,746201E-03	см^{-1}

Розрахунок $T_{нг}$ для гарячого реактора

ТНГ=Т0			
β	Коэффициент	8,862269E-01	
g_a^5	g_a^5 -фактор ^{235}U	9,628000E-01	
g_f^5	g_f^5 -фактор ^{235}U	9,638000E-01	
Зона "0"			
Σ_a^5	Макроскопичний переріз поглинання ^{235}U	4,164895E-01	см ⁻¹
	Макроскопичний переріз поглинання ^{238}U		
Σ_a^8	Макроскопичний переріз поглинання ^{238}U	5,273968E-02	см ⁻¹
$\Sigma_a^{O_2}$	Макроскопичний переріз поглинання O_2	1,089100E-03	см ⁻¹
$\Sigma_{ac}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони "0" при $T=T_0$	4,703183E-01	см ⁻¹
	Макроскопичний переріз ділення ^{235}U		
Σ_f^5	Макроскопичний переріз ділення зони "0" при $T=T_0$	3,572831E-01	см ⁻¹
$\Sigma_{f0}(T_0)$	Макроскопичний переріз ділення ^{235}U	3,572831E-01	см ⁻¹
	Макроскопичний переріз розсіяння ^{235}U		
Σ_s^5	Макроскопичний переріз розсіяння ^{235}U	9,892791E-03	см ⁻¹
Σ_s^8	Макроскопичний переріз розсіяння ^{238}U	1,961638E-01	см ⁻¹
$\Sigma_s^{O_2}$	Макроскопичний переріз розсіяння O_2	1,711382E-01	см ⁻¹
Σ_{s0}	Макроскопичний переріз розсіяння зони "0"	3,771948E-01	см ⁻¹
ξ_5	Середньологарифм.декр. енергії ^{235}U	8,510638E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^5$	Сповільнююча здібність ^{235}U	8,419396E-05	см ⁻¹
ξ_8	Середньологарифм.декр. енергії ^{238}U	8,403361E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^8$	Сповільнююча здібність ^{238}U	1,648435E-03	см ⁻¹

ξ_{O_2}	Средньюлогарифм.декр. енергії O ₂	1,200000E-01	-
$(\xi_{\Sigma s})_{O_2}$	Сповільнююча здібність O ₂	2,053659E-02	см ⁻¹
$(\xi_{\Sigma s})_0$	Сповільнююча здібність зони "0"	2,226922E-02	см ⁻¹
Зона "1"			
$\Sigma_a^{H_2O}(T_0)$	Макроскоп. поглинання при H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,357709E-02	см ⁻¹
Σ_a^{Zr}	Макроскопічний переріз поглинання Zr в зоні "1"	6,921679E-04	см ⁻¹
Σ_a^{Nb}	Макроскопічний переріз поглинання Nb в зоні "1"	4,252661E-05	см ⁻¹
Σ_a^{Fe}	Макроскопічний переріз поглинання Fe в зоні "1"	0,000000E+00	см ⁻¹
$\Sigma_{t1}(T_0)$	Макроскопічний переріз поглинання зони «1»	1,431179E-02	см ⁻¹
$\Sigma_s^{H_2O}(T_0)$	Макроскопічний переріз розсіяння H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,017383E+00	см ⁻¹
Σ_s^{Zr}	Макроскопічний переріз розсіяння Zr	2,701934E-02	см ⁻¹
Σ_s^{Nb}	Макроскопічний переріз розсіяння Nb	2,086354E-04	см ⁻¹
Σ_s^{Fe}	Макроскопічний переріз розсіяння Fe	0,000000E+00	см ⁻¹
$\Sigma_{s1}(T_0)$	Макроскопічний переріз розсіяння зони «1» при T ₀	1,044611E+00	см ⁻¹
ξ_{Zr}	Средньюлогарифм.декр. енергії Zr	2,197802E-02	-
ξ_{Nb}	Средньюлогарифм.декр. енергії Nb	2,150538E-02	-

$(\xi\Sigma_s)^{H_2O(T)}$	Сповільнююча здібність H_2O при $T=273,15K$	1,350000E+00	cm^2/g
$(\xi\Sigma_s)^{H_2O(T_0)}$	Сповільнююча здібність H_2O при $T_0=293,15K$	1,038150E+00	cm^{-1}
$(\xi\Sigma_s)^{Zr}$	Сповільнююча здібність Zr	5,938317E-04	cm^{-1}
$(\xi\Sigma_s)^{Nb}$	Сповільнююча здібність Nb	4,486783E-06	cm^{-1}
$(\xi\Sigma_s)^{Fe}$	Сповільнююча здібність Fe	0,000000E+00	
$(\xi\Sigma_s)_1(T_0)$	Сповільнююча здібність зони "1" при $T_0=293,15K$	1,038748E+00	cm^{-1}
Зона "2"			
Σ_a^{Zr}	Макроскопічний переріз поглинання Zr	5,284883E-03	cm^{-1}
Σ_a^{Nb}	Макроскопічний переріз поглинання Nb	3,247018E-04	cm^{-1}
$\Sigma_a(T_0)$	Макроскопічний переріз поглинання зони "2"	5,609585E-03	cm^{-1}
Σ_s^{Zr}	Макроскопічний переріз розсіяння Zr	2,062997E-01	cm^{-1}
Σ_s^{Nb}	Макроскопічний переріз розсіяння Nb	1,592986E-03	cm^{-1}
$(\xi\Sigma_s)_2$	Сповільнююча здібність зони "2"	4,568318E-03	cm^{-1}
Чарунка			
$\Sigma_a^{яч}(T_0)$	Макроскопічний переріз поглинання чарунки при $T_0=293,15K$	1,729001E-01	cm^{-1}
$(\xi\Sigma_s)^{яч}(T_0)$	Сповільнююча здібність чарунки при $T_0=293,15K$	5,295106E-01	cm^{-1}
$T_{нг}(T_0)$	Температура нейтронного газу ХОЛОДНОГО реактора $T=T_0=293,15K$	8,854091E+02	K
Ітерація 2			
β	Коефіцієнт	7,033214E-01	

g_a^5	g_a^5 -фактор ^{235}U	9,463642E-01	
g_r^5	g_r^5 -фактор ^{235}U	9,440355E-01	
Зона "0"			
Σ_a^5	Макроскопичний переріз	3,248891E-01	см^{-1}
	поглинання ^{235}U		
Σ_a^8	Макроскопичний переріз поглинання ^{238}U	4,185491E-02	см^{-1}
Σ_a^{O2}	Макроскопичний переріз поглинання O_2	8,643244E-04	см^{-1}
$\Sigma_{a0}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання	3,676084E-01	см^{-1}
	зони "0" при $T=T_0$		
Σ_f^5	Макроскопичний переріз ділення ^{235}U	2,777299E-01	см^{-1}
	Макроскопичний переріз ділення		
$\Sigma_{f0}(T_0)$	Макроскопичний переріз ділення	2,777299E-01	см^{-1}
	зони "0" при $T=T_0$		
Σ_s^5	Макроскопичний переріз розсіяння ^{235}U	9,892791E-03	см^{-1}
Σ_s^8	Макроскопичний переріз розсіяння ^{238}U	1,961638E-01	см^{-1}
Σ_s^{O2}	Макроскопичний переріз розсіяння O_2	1,711382E-01	см^{-1}
Σ_{s0}	Макроскопичний переріз розсіяння ЗОНИ"0"	3,771948E-01	см^{-1}
ξ_5	Середньологарифм.декр. енергії ^{235}U	8,510638E-03	-
$(\xi \Sigma_s)^5$	Сповільнююча здібність ^{235}U	8,419396E-05	см^{-1}
ξ_8	Середньологарифм.декр. енергії ^{238}U	8,403361E-03	-
$(\xi \Sigma_s)^8$	Сповільнююча здібність ^{238}U	1,648435E-03	см^{-1}
ξ_{O2}	Середньологарифм.декр. енергії O_2	1,200000E-01	-
$(\xi \Sigma_s)^{O2}$	Сповільнююча здібність O_2	2,053659E-02	см^{-1}
$(\xi \Sigma_s)_0$	Сповільнююча здібність зони "0"	2,226922E-02	см^{-1}
Зона "1"			
$\Sigma_a^{H2O}(T_0)$	Макроскоп. поглинання при	1,109612E-02	см^{-1}
	H_2O при $T_0=293,15\text{K}$		
$\Sigma_a^{Zr'}$	Макроскопичний переріз поглинання	5,493135E-04	см^{-1}
	Zr в зоні "1"		
$\Sigma_a^{Nb'}$	Макроскопичний переріз поглинання	3,374968E-05	см^{-1}
	Nb в зоні "1"		
$\Sigma_a^{Fe'}$	Макроскопичний переріз поглинання	0,000000E+00	см^{-1}
	Fe в зоні "1"		

$\Sigma a_1(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони «1»	1,167918E-02	см ⁻¹
$\Sigma s^{H_2O}(T_0)$	Макроскопичний переріз розсіяння H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,017383E+00	см ⁻¹
Σs^{Zr}	Макроскопичний переріз розсіяння Zr	2,701934E-02	см ⁻¹
Σs^{Nb}	Макроскопичний переріз розсіяння Nb	2,086354E-04	см ⁻¹
Σs^{Fe}	Макроскопичний переріз розсіяння Fe	0,000000E+00	см ⁻¹
$\Sigma s_1(T_0)$	Макроскопичний переріз розсіяння зони «1» при T ₀	1,044611E+00	см ⁻¹
ξ_{Zr}	Середньологарифм.декр. енергії Zr	2,197802E-02	-
ξ_{Nb}	Середньологарифм.декр. енергії Nb	2,150538E-02	-
$(\xi \Sigma s)^{H_2O}(T)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T=273,15K	1,350000E+00	см ² /г
$(\xi \Sigma s)^{H_2O}(T_0)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,038150E+00	см ⁻¹
$(\xi \Sigma s)^{Zr}$	Сповільнююча здібність Zr	5,938317E-04	см ⁻¹
$(\xi \Sigma s)^{Nb}$	Сповільнююча здібність Nb	4,486783E-06	см ⁻¹
$(\xi \Sigma s)^{Fe}$	Сповільнююча здібність Fe	0,000000E+00	
$(\xi \Sigma s)_1(T_0)$	Сповільнююча здібність зони "1" при T ₀ =293,15K	1,038748E+00	см ⁻¹
Зона "2"			
Σa^{Zr}	Макроскопичний переріз поглинання Zr	4,194153E-03	см ⁻¹
Σa^{Nb}	Макроскопичний переріз поглинання Nb	2,576876E-04	см ⁻¹
$\Sigma a_2(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони "2"	4,451840E-03	см ⁻¹
Σs^{Zr}	Макроскопичний переріз розсіяння Zr	2,062997E-01	см ⁻¹
Σs^{Nb}	Макроскопичний переріз розсіяння Nb	1,592986E-03	см ⁻¹
$(\xi \Sigma s)_2$	Сповільнююча здібність зони "2"	4,568318E-03	см ⁻¹
Чарунка			
$\Sigma a^{ЯЧ}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання чарунки при T ₀ =293,15K	1,353986E-01	см ⁻¹
$(\xi \Sigma s)^{ЯЧ}(T_0)$	Сповільнююча здібність чарунки при T ₀ =293,15K	5,295106E-01	см ⁻¹

$T_{нг}(T_0)$	Температура нейтронного газа холодного	814,319285	К
	реактора $T=T_0=293,15K$		

$T_{нг}$ - після 1-ої ітерації	885,41
$T_{нг}$ - після 2-ої ітерації	814,32
Похибка, %	-8,03

Ітерація 3

β	Коэффициент	7,333789E-01	-
g_a^5	g_a^5 -фактор ^{235}U	9,496281E-01	-
g_r^5	g_r^5 -фактор ^{235}U	9,479604E-01	-
Зона "0"			
Σ_a^5	Макроскопічний переріз	3,399422E-01	см ⁻¹
	поглинання ^{235}U		
Σ_a^8	Макроскопічний переріз	4,364364E-02	см ⁻¹
	поглинання ^{238}U		
Σ_a^{O2}	Макроскопічний переріз	9,012627E-04	см ⁻¹
	поглинання O ₂		
$\Sigma_{a0}(T_0)$	Макроскопічний переріз	3,844871E-01	см ⁻¹
	поглинання зони "0" при $T=T_0$		
Σ_s^5	Макроскопічний переріз ділення	2,908032E-01	см ⁻¹
	^{235}U		
$\Sigma_{s0}(T_0)$	Макроскопічний переріз ділення	2,908032E-01	см ⁻¹
	зони "0" при $T=T_0$		
Σ_s^5	Макроскопічний переріз розсіяння	9,892791E-03	см ⁻¹
	^{235}U		
Σ_s^8	Макроскопічний переріз розсіяння	1,961638E-01	см ⁻¹
	^{238}U		
Σ_s^{O2}	Макроскопічний переріз розсіяння	1,711382E-01	см ⁻¹
	O ₂		
Σ_{s0}	Макроскопічний переріз розсіяння зони"0"	3,771948E-01	см ⁻¹

ξ_5	Средньологарифм.декр. енергії ^{235}U	8,510638E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^5$	Сповільнююча здібність ^{235}U	8,419396E-05	см^{-1}
ξ_8	Средньологарифм.декр. енергії ^{238}U	8,403361E-03	-
$(\xi\Sigma_s)^8$	Сповільнююча здібність ^{238}U	1,648435E-03	см^{-1}
ξ_{O_2}	Средньологарифм.декр. енергії O_2	1,200000E-01	-
$(\xi\Sigma_s)^{\text{O}_2}$	Сповільнююча здібність O_2	2,053659E-02	см^{-1}
$(\xi\Sigma_s)_0$	Сповільнююча здібність зони "0"	2,226922E-02	см^{-1}
Зона "1"			
$\Sigma_a^{\text{H}_2\text{O}}(\text{T}_0)$	Макроскоп. поглинання при H_2O при $\text{T}_0=293,15\text{K}$	1,123544E-02	см^{-1}
$\Sigma_a^{\text{Zr}'}$	Макроскопічний переріз поглинання Zr в зоні "1"	5,727893E-04	см^{-1}
$\Sigma_a^{\text{Nb}'}$	Макроскопічний переріз поглинання Nb в зоні "1"	3,519203E-05	см^{-1}
$\Sigma_a^{\text{Fe}'}$	Макроскопічний переріз поглинання Fe в зоні "1"	0,000000E+00	см^{-1}
$\Sigma_{\text{a}1}(\text{T}_0)$	Макроскопічний переріз поглинання зони «1»	1,184343E-02	см^{-1}
$\Sigma_s^{\text{H}_2\text{O}}(\text{T}_0)$	Макроскопічний переріз розсіяння H_2O при $\text{T}_0=293,15\text{K}$	1,017383E+00	см^{-1}
Σ_s^{Zr}	Макроскопічний переріз розсіяння Zr	2,701934E-02	см^{-1}
Σ_s^{Nb}	Макроскопічний переріз розсіяння Nb	2,086354E-04	см^{-1}
Σ_s^{Fe}	Макроскопічний переріз розсіяння Fe	0,000000E+00	см^{-1}

$\Sigma_{s1}(T_0)$	Макроскопичний переріз розсіяння зони «1» при T_0	1,044611E+00	см ⁻¹
ξ_{Zr}	Середньологарифм.декр. енергії Zr	2,197802E-02	-
ξ_{Nb}	Середньологарифм.декр. енергії Nb	2,150538E-02	-
$(\xi\Sigma_s)^{H_2O}(T)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T=273,15K	1,350000E+00	см ² /г
$(\xi\Sigma_s)^{H_2O}(T_0)$	Сповільнююча здібність H ₂ O при T ₀ =293,15K	1,038150E+00	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)^{Zr}$	Сповільнююча здібність Zr	5,938317E-04	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)^{Nb}$	Сповільнююча здібність Nb	4,486783E-06	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)^{Fe}$	Сповільнююча здібність Fe	0,000000E+00	
$(\xi\Sigma_s)_1(T_0)$	Сповільнююча здібність зони "1" при T ₀ =293,15K	1,038748E+00	см ⁻¹
Зона "2"			
Σ_a^{Zr}	Макроскопичний переріз поглинання Zr	4,373397E-03	см ⁻¹
Σ_a^{Nb}	Макроскопичний переріз поглинання Nb	2,687003E-04	см ⁻¹
$\Sigma_{a2}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання зони "2"	4,642097E-03	см ⁻¹
Σ_s^{Zr}	Макроскопичний переріз розсіяння Zr	2,062997E-01	см ⁻¹
Σ_s^{Nb}	Макроскопичний переріз розсіяння Nb	1,592986E-03	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)_2$	Сповільнююча здібність зони "2"	4,568318E-03	см ⁻¹
Чарунка			
$\Sigma_a^{ЯЧ}(T_0)$	Макроскопичний переріз поглинання чарунки при T ₀ =293,15K	1,414268E-01	см ⁻¹
$(\xi\Sigma_s)^{ЯЧ}(T_0)$	Сповільнююча здібність чарунки	5,295106E-01	см ⁻¹

	при $T_0=293,15\text{K}$		
	Температура нейтронного газа		
	ХОЛОДНОГО		
$T_{нг}(T_0)$	реактора $T=T_0=293,15\text{K}$	825,746562	K

$T_{нг}$ - після 2-ої ітерації	814,32
$T_{нг}$ - після 3-ої ітерації	825,75
Похибка, %	1,403292

Отже, $T_{нг}$ для гарячого реактора = 825,75 K

Визначаємо перерізи при $T_{нг}=825,75\text{ K}$

13				
8	β	Коэффициент	7,282867E-01	-
13				
9	g_a^5	g_a^5 -фактор ^{235}U	9,490941E-01	-
14				
0	g_r^5	g_r^5 -фактор ^{235}U	9,473182E-01	-
Зона "0"				
14		Макроскоп. переріз поглинання		
1	$\Sigma_a^5(T_{нг})$	^{235}U	3,373920E-01	см^{-1}
		Макроскоп. переріз поглинання		
	$\Sigma_a^8(T_{нг})$	^{238}U	4,334061E-02	см^{-1}
14				
2	$\Sigma_f^5(T_{нг})$	Макроскоп. переріз ділення ^{235}U	2,885884E-01	см^{-1}
14		Макроскоп. переріз поглинання		
3	Σ_a^{O2}	O_2	8,950048E-04	см^{-1}
14		Макроскоп. переріз поглинання		
4	$\Sigma_{ad}(T_{нг})$	зони "0"	3,816276E-01	см^{-1}
14		Макроскоп. переріз ділення зони		
5	$\Sigma_{fd}(T_{нг})$	"0"	2,885884E-01	см^{-1}
Зона "1"				
14				
6	β	Коефіцієнт	7,282867E-01	-

		Макроскоп. переріз поглинання		
		H ₂ O		
14	$\Sigma_{a_{xp}}^{H_2O}(T_{нг})$	хол. реактора при T=T _{нг} в зоні "1"	1,115743E-02	см ⁻¹
7				
14				
8				
		Макроскоп. переріз поглинання		
		Zr		
14	$\Sigma_a^{Zr}(T_{нг})$	в зоні "1" при T=T _{нг}	5,688122E-04	см ⁻¹
9				
		Макроскоп. переріз поглинання		
		Fe		
	$\Sigma_a^{Fe}(T_{нг})$	в зоні "1" при T=T _{нг}	0,000000E+00	см ⁻¹
15		Макроскоп. переріз поглинання		
		Nb		
	$\Sigma_a^{Nb}(T_{нг})$	в зоні "1" при T=T _{нг}	3,494767E-05	см ⁻¹
15				
		Макроскоп. переріз поглинання		
		зони "1" при T _{нг}	1,176119E-02	см ⁻¹
1	$\Sigma_{a1}(T_{нг})$			
Зона "2"				
		Макроскоп. переріз поглинання		
		Zr в		
15	$\Sigma_a^{Zr}(T_{нг})$	зоні "1" при T _{нг}	4,343030E-03	см ⁻¹
2				
		Макроскоп. переріз поглинання		
		Zr в		
15	$\Sigma_a^{Nb}(T_{нг})$	зоні "1" при T _{нг}	2,668346E-04	см ⁻¹
3				
		Макроскоп. переріз поглинання		
		Zr в		
15	$\Sigma_{a2}(T_{нг})$	зоні "1" при T _{нг}	4,609865E-03	см ⁻¹
4				

Совпадения

Источники из Интернета

133

36	https://studopedya.ru/1-33212.html	1.37%
72	https://ksada.org/doc/confer-dec-2020.pdf	23 источника 0.2%
85	https://ldubgd.edu.ua/sites/default/files/3_nauka/konferenz/2021/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%...	0.14%
86	http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=47257	0.14%
90	https://lpnu.ua/sites/default/files/2020/pages/187/zbirnyknlp2020biznes.pdf	9 источников 0.13%
91	https://zp.edu.ua/sites/default/files/konf/konspekt_lekciy_opg_2020_menedzhment.pdf	0.12%
92	https://diplomba.ru/work/27134	0.12%
93	https://duan.edu.ua/images/News-UA/Departments/Management/2020/monograph_ekstr_dyst_navch.pdf	0.12%
95	http://ni.biz.ua/8/8_12/8_122524_vvedenie.html	0.11%
96	https://1library.co/document/lzg253ny-alisis-economico-y-financiero-naturhouse-health-s.html	0.1%
97	http://lsej.org.ua/11_2021/148.pdf	0.1%
100	https://euroservis.com.ua/content/uploads/files/pro-zatverdzhennja-pravil-ekspluatac-ta-tipovix-norm-nalezhnost	30 источников 0.1%
106	https://archive.org/stream/developmentofkno00greg/developmentofkno00greg_djvu.txt	0.09%
107	https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/89494/Palomino_VVM-SD.pdf?isAllowed=y&sequence=1	0.09%
108	https://www.doria.fi/handle/10024/173301	3 источника 0.09%
109	http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/40972	0.09%
110	http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/UCV/21613/fernandez_cl.pdf?is=&sequence=1	0.09%
114	https://docplayer.net/54490936-Teoriya-i-praktika-gasinnya-pozhezh-ta-likvidaciyi-nadzvichaynih-situacij.html	0.06%
115	http://eom.com.ua/index.php?action=dlattach;topic=19481.0;attach=21785	10 источников 0.05%
116	http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/21706	0.05%
118	https://nadoest.com/opis-kreditnogo-modulya-disciplini-energetichni-yaderni-reakto	0.05%
119	https://ua-referat.com/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%BE%D0%...	6 источников 0.05%

120	https://ukrbukva.net/page,5,112696-Geografiya-atomnoiy-energetiki-mira.html	0.05%
121	https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B5%D1%84%D1%96%D1%86%D1%96%D1%94%D0%BD%D1%82_%D1%...	0.05%
127	https://www.ua-referat.com/uploaded/kontrolena-robotaz-disciplini-osnovi-ohoroni-praci-v2/index1.html	25 источников 0.04%
128	https://dodiplom.ru/ready/37350	0.04%
131	https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2015/09/Soyuz-Users-Manual-March-2012.pdf	0.04%
133	https://ua-referat.com/%D0%9E%D1%80%D0%B3%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1...	4 источника 0.04%
134	http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/15008	0.04%
135	http://lib.iitta.gov.ua/721147/1/%D0%9C%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D1%8F_201...	0.04%
136	http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE15628.html	0.04%

Источники из Библиотеки

349

1	TYa41-ProkopchukAA-diploma-2018	ID файла: 5975967	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	7 источник 3.31%
2	TYa41-StolyarchycDV-diploma-2018	ID файла: 5984464	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	2.65%
3	TYa41-KvitkaVA-diploma-2018	ID файла: 5990689	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	2 источник 2.63%
4	TYa51-SemakPS-diploma-2019	ID файла: 1000058446	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	12 источник 2.48%
5	TYa41-KukhotskaO-diploma-2018	ID файла: 5984465	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	11 источник 2.45%
6	TYa42-SemeniukAM-diploma-2018	ID файла: 5990686	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	4 источник 2.45%
7	TYa-Leschenko-diploma-2019	ID файла: 1000032426	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	3 источник 2.37%
8	TYa52-TarasiukBV-diploma-2019	ID файла: 1000051888	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	7 источник 2.35%
9	TYa51-HorbachykoSO-diploma-2019	ID файла: 1000051958	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	3 источник 2.34%
10	TYa51-Tkach-diploma-2019	ID файла: 1000053605	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	2.34%
11	TYa42-Yatsiuk-diploma-2018	ID файла: 5976180	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2.33%
12	TYa41-ShulgachDA-diploma-2018	ID файла: 5976031	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	2.32%
13	TYa51-MyronenkoMO-diploma-2019	ID файла: 1000051901	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	2 источник 2.3%
14	TYa51-VershnyakVL-diploma-2019	ID файла: 1000051890	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"	2.27%

15	TYa41-BryzhukEV-diploma-2018	ID файла: 5976028	Учебное заведение: National Technical University of	3 Источник	2.27%
16	TYa42-GorbanIP-diploma-2018	ID файла: 5976203	Учебное заведение: National Technical University of U	5 Источник	2.17%
17	TYa42-DanilyukVA-diploma-2018	ID файла: 5984033	Учебное заведение: National Technical University of	4 Источник	2.17%
18	TYa52-GritchinaE-diploma-2019	ID файла: 1000051006	Учебное заведение: National Technical University of Ukrai...		2.16%
19	TYa51-KarzakovKM-diploma-2019	ID файла: 1000053782	Учебное заведение: National Technical University of Ukr...		2.12%
20	TYA42-TyshkoVY-diploma-2018	ID файла: 5990621	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "...		2.1%
21	TYa42-KalabskiyVV-diploma-2018	ID файла: 5976033	Учебное заведение: National Technical University of Ukrain...		2.09%
22	TYa42-VolivachTI-diploma-2018	ID файла: 5976176	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine ...		2.03%
23	TYa-Matkovsky-diploma-2019	ID файла: 1000032436	Учебное заведение: National Technical University of	2 Источник	2.01%
24	TYa41-OdarchukAM-diploma-2018	ID файла: 5990622	Учебное заведение: National Technical University of Ukrain...		1.96%
25	TYa42-MandrychenkoKE-diploma-2018	ID файла: 5990699	Учебное заведение: National Technical University of U...		1.94%
26	TYa41-BasyukRV-diploma-2018	ID файла: 5976194	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "...		1.93%
27	TYa61-Lukichov-diploma-2020-mod	ID файла: 1004101818	Учебное заведение: National Technical University of U...		1.8%
28	TYa42-ShambirDV-diploma-2018	ID файла: 5975965	Учебное заведение: National Technical University of	2 Источник	1.69%
29	TYa51-OstapovetsAO-diploma-2019	ID файла: 1000051975	Учебное заведение: National Technical University of U...		1.69%
30	TYa41-TitovAS-diploma-2018	ID файла: 5984462	Учебное заведение: National Technical University of Ukr	3 Источник	1.57%
31	TYa41-PinyohaSM-diploma-2018	ID файла: 5976029	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine...		1.57%
32	TYa51-Solovei-diploma-2019	ID файла: 1000053601	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine ...		1.55%
33	TYA52-Rizhko-diploma-2019	ID файла: 1000053811	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine ...		1.52%
34	TYa41-RakovetsAS-diploma-2018	ID файла: 5990652	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine...		1.46%
35	TYa52-PetrichyukI-diploma-2019	ID файла: 1000063004	Учебное заведение: National Technical University of Ukr...		1.46%
37	TYa52-MykytyukIO-diploma-2019	ID файла: 1000063003	Учебное заведение: National Technical University of Ukr...		1.31%
38	TYa51-PapezhukDP-diploma-2019	ID файла: 1000051886	Учебное заведение: National Technical University of Ukr...		1.27%

39	TYa42-RigaDO-diploma-2018	ID файла: 5990702	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	1.25%
40	Студенческая работа	ID файла: 1008287771	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	2 Источник 1.25%
41	TYa41-NoskevichIM-diploma-2018	ID файла: 5990640	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	1.24%
42	TYa52-KnovetsDV-diploma-2019	ID файла: 1000053708	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	1.15%
43	TYa52-TaglinYP-diploma-2019	ID файла: 1000053713	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	1.07%
44	TYa52-RoiVS-diploma-2019	ID файла: 1000053711	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник 1.04%
45	TYa52-ShynkarchukDO-diploma_2019	ID файла: 1000051211	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	1.03%
46	TYa51-PotoskuievVS-diploma-2019 (1)	ID файла: 1000051892	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	1.01%
47	TYa-Pritika-diploma-2018	ID файла: 5956826	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	1.01%
48	TYa51-Semko-diploma-2019	ID файла: 1000053607	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.95%
49	TYa82-YavorskiyMO-diploma-2022	ID файла: 1011426327	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	4 Источник 0.9%
50	TYa52-Filoniuk-diploma-2019	ID файла: 1000053709	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.87%
51	TYa81m-KovbVO-thesis-2019-2	ID файла: 1000787367	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник 0.79%
52	TYa72mp-ShyrovDO-thesis-2018	ID файла: 8433838	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	5 Источник 0.77%
53	TYa51-MaslygaYO-diploma-2019	ID файла: 1000053756	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.74%
54	TYa42-KozyrRV-diploma-2018	ID файла: 5990696	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.67%
55	TYa42-HavlichukDV-diploma-2018	ID файла: 5975962	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.66%
56	TYa52-KovriginVV-diploma-2019	ID файла: 1000053707	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.65%
57	TYa41-KokorskiyAR-diploma-2018	ID файла: 5976201	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник 0.65%
58	TYa52-Zavalniuk-diploma-2019	ID файла: 1000053754	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.61%
59	TYa61-PalamarchykMM-diploma-2020-mod	ID файла: 1004049723	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник 0.6%
60	TYa81-HEA-diplom	ID файла: 1011417209	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.44%
61	TYa51-DarybohovMM-diploma-2019	ID файла: 1000051893	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	0.41%

62	TYa71mp-StelmakhDI-thesis-2018	ID файла: 8371518	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник	0.39%
63	Студенческая работа	ID файла: 1009547023	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	2 Источник	0.34%
64	TYA81-BulanA-diplom	ID файла: 1011417076	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.32%
65	TYa52-RudenkoYaO-diploma-2019	ID файла: 1000051894	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.31%
66	Студенческая работа	ID файла: 1000087859	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	78 Источник	0.25%
67	TYA71mn-YankovskyiVG-thesis-2019	ID файла: 11989520	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	13 Источник	0.24%
68	TYa71mn-ZaiatsMS-thesis-2019	ID файла: 11923738	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	3 Источник	0.22%
69	TYa61-Sitnik-diploma-2020-mod	ID файла: 1004101396	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.22%
70	TYa61-PyliukPA-diploma-2020-mod	ID файла: 1004150173	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.21%
71	TYa71mp-SholudkoMS-thesis-2018	ID файла: 8372565	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.2%
73	TYa72mp-FiloniukAK-thesis-2018	ID файла: 8396831	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник	0.19%
74	TYa71mn-OnyshchukYA-thesis-2019	ID файла: 11883545	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник	0.19%
75	TYa91mn-Leshenko-diploma-2021	ID файла: 1007841590	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.19%
76	TYa71mn-KopchynskalV-thesis-2019	ID файла: 11854059	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	2 Источник	0.18%
77	TYa62-Riznichenko-diploma-2020-mod	ID файла: 1004145638	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.18%
78	Боровець М Ф	ID файла: 1000085570	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	10 Источник	0.18%
79	TYa52-Kondratov-diploma-2019	ID файла: 1000062904	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.18%
80	TYa71mp-NechyporukOP-thesis-2018 (1)	ID файла: 8316496	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	4 Источник	0.16%
81	TYa81mp-IllinOM-thesis-2019-1	ID файла: 1000749392	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.16%
82	TYA01mn-PetrychukIO-diploma-2022	ID файла: 1011350665	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.15%
83	Мищенко РТФ	ID файла: 1000782353	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"	10 Источник	0.15%
84	Студенческая работа	ID файла: 1000043726	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University		0.15%
87	TYa62-Anyushkyna-diploma-2020-mod	ID файла: 1004028322	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"		0.14%

88	TYa62-Viktororov-diploma-2020-mod	ID файла: 1004091340	Учебное заведение: National Technical University of ...	0.14%
89	TYa62-Petishin-diploma-2020-mod	ID файла: 1004138998	Учебное заведение: National Technical University of Uk...	0.13%
94	Студенческая работа	ID файла: 1011446114	Учебное заведение: Lutsk National Technical Universit	10 Источник 0.12%
98	Студенческая работа	ID файла: 1000036021	Учебное заведение: Odesa National University of Technology	0.1%
99	Студенческая работа	ID файла: 1008422232	Учебное заведение: National University of Water Mana	21 Источник 0.1%
101	Студенческая работа	ID файла: 1005000675	Учебное заведение: Taras Shevchenko National University of Kyiv	0.09%
102	TYa81mp-ProkopchukAA-thesis-2019-1	ID файла: 1000749402	Учебное заведение: National Technical University o...	0.09%
103	Студенческая работа	ID файла: 47789	Учебное заведение: Lviv Polytechnic National University	0.09%
104	TYa91mn-RyzhkoAV-diploma-2021	ID файла: 1007841591	Учебное заведение: National Technical University of Uk...	0.09%
105	TYa62-Malyar-diploma-2020-mod	ID файла: 1004150093	Учебное заведение: National Technical University of Ukr...	0.09%
111	Коломійчук М О	ID файла: 1008354813	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine	10 Источник 0.07%
112	TF71m-HurovDI-diploma-2019	ID файла: 11846072	Учебное заведение: National Technical University of I	2 Источник 0.06%
113	Студенческая работа	ID файла: 1254782	Учебное заведение: National University of Life and Environmental S...	0.06%
117	Студенческая работа	ID файла: 1008400528	Учебное заведение: Taras Shevchenko National University of Kyiv	0.05%
122	Студенческая работа	ID файла: 8712449	Учебное заведение: National University of Water Managem	2 Источник 0.05%
123	Студенческая работа	ID файла: 1000801527	Учебное заведение: Vinnytsia State Pedagogical Univers	5 Источник 0.05%
124	KusyI-1-2020b	ID файла: 1003967542	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv	2 Источник 0.04%
125	Студенческая работа	ID файла: 1009835285	Учебное заведение: V.I. Vernadsky Taurida National Uni	6 Источник 0.04%
126	Студенческая работа	ID файла: 1008217401	Учебное заведение: Taras Shevchenko National University of Kyiv	0.04%
129	Карпенко_	ID файла: 5676874	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv Poly	7 Источник 0.04%
130	Студенческая работа	ID файла: 1011413374	Учебное заведение: National University of Life and Envi	2 Источник 0.04%
132	Студенческая работа	ID файла: 1005734265	Учебное заведение: National Aviation University	3 Источник 0.04%
137	Записка Дмуховский	ID файла: 5975481	Учебное заведение: National Technical University of Ukraine "Kyiv P...	0.04%