

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Энергетический  
Специальность: 140404 Атомные электрические станции и установки  
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

**Тема работы**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КСЕНОНОВОГО ОТРАВЛЕНИЯ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С  
УДЛИНЕННОЙ АКТИВНОЙ ЗОНОЙ**

УДК 621.311.25:621.039.54:539.163:546.2.001.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5002	Копысова Наталья Александровна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	А.В. Кузьмин	к.т.н., доцент		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	С.И. Сергейчик	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	А.М. Плахов	к.т.н., доцент		

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры автоматизации технологических процессов	Е.В. Иванова	к.ф.-м.н.		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры АТЭС	М.А. Вагнер	-		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Зав. кафедрой атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	к.т.н., доцент		

Томск – 2016 г.

## Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 69 страниц, 9 рисунков, 38 таблиц, 19 источников.

Ключевые слова: реактор, активная зона, стационарное отравление, ксенон-135, реактивность.

Объектом исследования является ядерный энергетический реактор типа ВВЭР - 1000 с удлиненной активной зоной.

Цель работы – определение зависимости стационарного отравления ксеноном от мощности реактора. Сравнение полученных результатов с данными АНФХ первой топливной загрузки РоАЭС энергоблок №3.

В процессе исследования проводились расчеты нейтронно-физических характеристик реактора на разных уровнях мощности.

В результате исследования была получена графическая зависимость стационарного отравления ксеноном от мощности реактора.

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		2

## Список принятых сокращений

АЭС - атомная электрическая станция,

ВВЭР - водо-водяной энергетический реактор,

ТВС - тепловыделяющая сборка,

АО - аксиальный офсет,

КНИ - канал нейтронного измерения,

ДПЗ - датчик прямого заряда,

ОР СУЗ - орган регулирования системы управления и защиты,

СГО - система спецгазоочистки,

АРЭ - аксиальное распределение энерговыделения,

аз - активная зона

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		3

## Оглавление

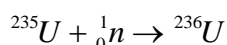
Введение .....	6
1 Исходные данные для расчета.....	11
1.1 Принимаемы допущения при проведении расчетов .....	13
2 Расчет нейтронно-физических характеристик активной зоны "холодного" реактора.....	15
2.1 Определение объемов компонентов активной зоны.....	15
2.2 Определение эффективной температуры.....	18
2.3 Определение ядерной и молекулярной плотностей нуклидов.....	21
2.4 Определение температуры нейтронного газа.....	23
2.5 Определение энергии сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов.....	24
2.6 Расчет сечений, усредненных по спектру Максвелла.....	27
2.7 Определение коэффициента использования тепловых нейтронов..	30
3 Расчет нейтронно-физических характеристик реактора на мощности.....	31
3.1 Определение объемов компонентов активной зоны.....	31
3.2 Определение нейтронно-физических характеристик на мощности $40\% N_{\text{НОМ}}$ .....	32
3.3 Определение нейтронно-физических характеристик на мощности $75\% N_{\text{НОМ}}$ .....	41
3.4 Определение нейтронно-физических характеристик на мощности $100\% N_{\text{НОМ}}$ .....	49
4 Определение зависимости стационарного отравления реактора ксеноном от мощности .....	58
5 Расчет нейтронно-физических характеристик активной зоны при разных значениях сечения поглощения гадолиния .....	62

6 Анализ результата расчетов стационарного отравления реактора на различных уровнях мощности.....	66
Список используемых источников.....	68

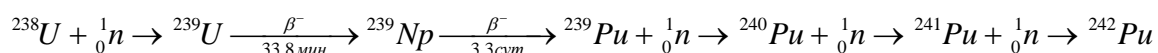
					ФЮРА.693100.001.ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ документа</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

## Введение

Во время работы в реакторе непрерывно протекают процессы, приводящие к изменению нуклидного состава реакторных материалов. Подавляющая часть таких процессов вызвана взаимодействием нейтронов с ядрами топлива. Состав уранового топлива изменяется в основном в результате следующих процессов, представленных на рисунке 1.



□ Осколки ;  
деления



□ Осколки деления □

Осколки деления

Рисунок 1 – Схема изменения состава уранового топлива

Видно, что с течением времени при работе реактора в ядерном топливе накапливаются продукты деления. Влияние радиоактивных продуктов деления на реактивность реактора называется отравлением.

Отравление реактора - это процесс накопления в нём короткоживущих продуктов деления, участвующих в непроизводительном захвате нейтронов и тем самым снижающих запас реактивности реактора при их образовании и, наоборот, высвобождающих его при их бета-распаде.

Основную роль в процессе отравления играет  $^{135}\text{Xe}$ , так как сечение поглощения превышает сечение поглощения нейтронов в ядерном топливе более чем в 1000 раз.

Особенности процесса отравления  $^{135}\text{Xe}$ :

1)  $^{135}\text{Xe}$  характеризуется величиной стандартного микросечения поглощения  $\sigma_{a0}^{Xe} = 2720000\text{б}$ , величина удельного выхода  $\gamma_{Xe} = 0,003$  и период полураспада  $T_{1/2}^{Xe} = 9,2$  часа (постоянна  $\beta$ -распада  $\lambda_{Xe} = 2,09 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ).

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		6

2) Отравление - процесс обратимый: при возрастании концентрации  $^{135}\text{Xe}$  реактор отравляется (и теряет запас реактивности), при снижении концентрации ксенона - он разотравляется (что приводит к высвобождению положительной реактивности).

3) Быстрое достижение равновесной концентрации (через 30...40 часов).

4) Увеличение отравления после остановки реактора ("йодная яма").

5) Из совмещённого графика энергетических спектров для теплового, промежуточного и быстрого реакторов вместе с зависимостью сечения поглощения  $^{135}\text{Xe}$  от энергии нейтронов  $E$  (рисунок 2) видно, что отравление ксеноном существенно для тепловых реакторов, малосущественно - для промежуточных и несущественно - для быстрых реакторов.

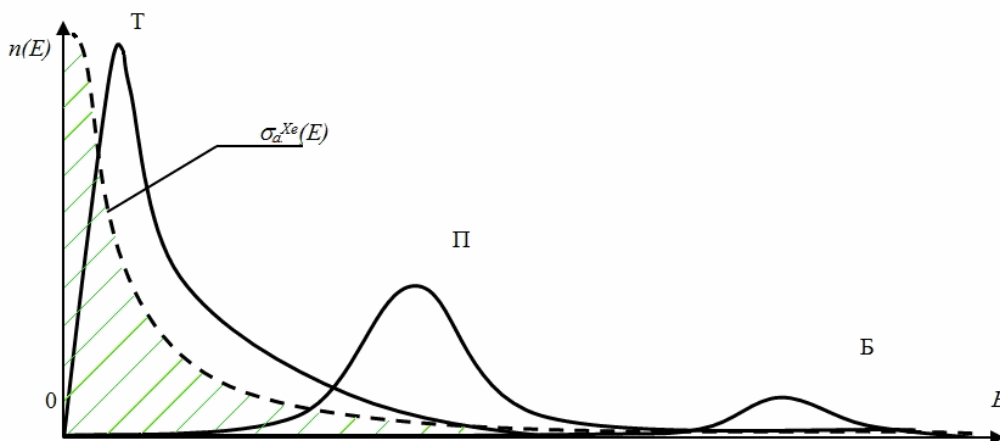


Рисунок 2 – Различия в поглощении нейтронов ксеноном-135 в тепловом (Т), быстром (Б) и промежуточном (П) реакторах.

$^{135}\text{Xe}$  образуется в реакторе двумя путями: непосредственно как осколок деления  $^{235}\text{U}$  с известным удельным выходом и как дочерний продукт  $\beta$ -распада  $^{135}\text{J}$ , который сам является продуктом  $\beta$ -распада  $^{135}\text{Te}$ , образующегося при делении с довольно большим удельным выходом ( $\gamma_{\text{Te}}=0,06$ ). Поскольку период полураспада  $^{135}\text{Te}$  во много раз меньше периода полураспада  $^{135}\text{J}$ , можно приближенно считать, что  $^{135}\text{J}$  является осколком реакции деления с фиктивным удельным выходом, равным величине истинного удельного выхода  $^{135}\text{Te}$ .

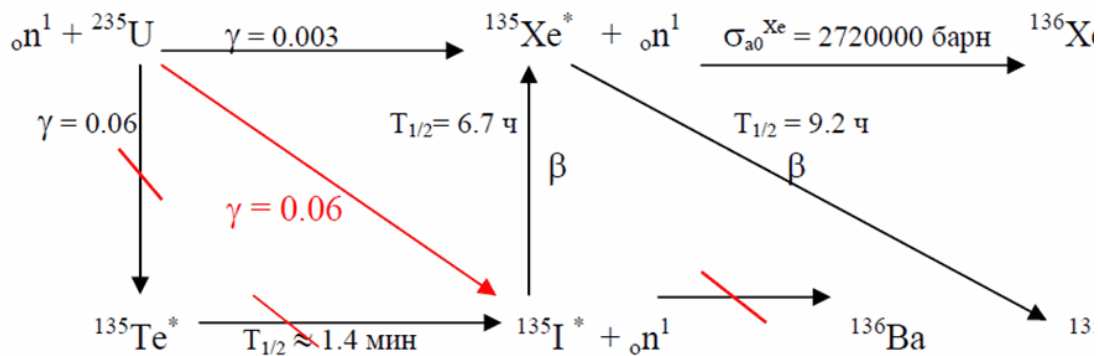


Рисунок 3 – Схема образования и убыли йода и ксенона

Дифференциальное уравнение скорости изменения концентрации ксенона запишется как разность скорости прибыли и убыли:

$$\frac{dN_{\text{Xe}}}{dT} = \gamma_{\text{Xe}} \cdot \Sigma_f \cdot \Phi_i + \lambda_{\text{I}} \cdot N_{\text{I}} - (\sigma_{\text{Xe}} \cdot \Phi_i + \lambda_{\text{Xe}}) \cdot N_{\text{Xe}},$$

где  $\gamma_{\text{Xe}} \cdot \Sigma_f \cdot \Phi_i$  – скорость образования ксенона как продукта деления,  
 $\lambda_{\text{I}} \cdot N_{\text{I}}$  – скорость прибыли ксенона из-за распада йода,  
 $\sigma_{\text{Xe}} \cdot \Phi_i \cdot N_{\text{Xe}}$  – скорость убыли ксенона за счет поглощения тепловых нейтронов,

$\lambda_{\text{Xe}} \cdot N_{\text{Xe}}$  – скорость убыли ксенона в результате  $\beta$ -распада,

$\gamma_{\text{Xe}}, \gamma_{\text{I}}$  – удельный выход ксенона и йода как продуктов деления,

$\sigma_{\text{Xe}}$  – сечение поглощения нейтронов ксенона,

$\Sigma_f$  – макроскопическое сечение деления,

$N_{\text{Xe}}, N_{\text{I}}$  – концентрации ксенона и йода,

$\lambda_{\text{Xe}}, \lambda_{\text{I}}$  – постоянные распада ксенона и йода,

$\Phi_i$  – плотность потока тепловых нейтронов.

Скорость изменения концентрации  $^{135}\text{I}$  является разницей скоростей образования  $^{135}\text{I}$  (как непосредственного продукта деления) и убыли его (за счёт  $\beta$ -распада):

$$\frac{dN_{\text{I}}}{dT} = \gamma_{\text{I}} \cdot \Sigma_f \cdot \Phi_i - \lambda_{\text{I}} \cdot N_{\text{I}},$$

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата
------	------	-------------	---------	------



где  $\gamma_I \cdot \Sigma_f \cdot \Phi_i$  – скорость образования йода как продукта деления,

$\lambda_I \cdot N_I$  – скорость убыли йода в результате  $\beta$ -распада.

После пуска реактора количество  $^{135}\text{Xe}$  в начале довольно резко возрастает, а затем, приблизительно, через 30...40 ч при работе реактора на постоянной мощности, из-за процесса образования в результате распада йода и процесса убыли вследствие распада и поглощения нейтронов достигается стационарный уровень (скорость убыли ксенона станет равной скорости его образования).

Стационарным называется отравление, свойственное реактору, длительно работающему на постоянном уровне мощности, в результате чего в его твэлах устанавливаются постоянные во времени концентрации йода и ксенона.

Условия стационарности отравления  $^{135}\text{Xe}$ :

$$\Phi(t) = idem = \Phi_0 ; N_{\text{Xe}}(t) = idem = N_{\text{Xe}}^{ct} ; N_I(t) = N_I^{ct}$$

Если подставить приведенные выше условия в дифференциальные уравнения отравления реактора, получим:

$$0 = \gamma_{\text{Xe}} \cdot \Sigma_f^5 \cdot \Phi_0 + \lambda_J \cdot N_J^{cm} - (\sigma_{\text{Xe}} \cdot \Phi_0 + \lambda_{\text{Xe}}) \cdot N_{\text{Xe}}^{cm},$$

$$0 = \gamma_J \cdot \Sigma_f^5 \cdot \Phi_0 - \lambda_J \cdot N_J^{cm}$$

Отсюда величина стационарной концентрации  $^{135}\text{J}$  и  $^{135}\text{Xe}$ :

$$N_J^{cm} = \frac{\gamma_J}{\lambda_J} \cdot \Sigma_f^5 \cdot \Phi_0$$

$$N_{\text{Xe}}^{cm} = \frac{(\gamma_{\text{Xe}} + \gamma_J)}{\sigma_{\text{Xe}} \cdot \Phi_0 + \lambda_{\text{Xe}}} \cdot \Sigma_f^5 \cdot \Phi_0$$

Видно, что количество ксенона при стационарном отравлении тем больше, чем выше значение потока нейтронов (мощности реактора).

Величина потерь реактивности при стационарном отравлении реактора ксеноном [2]:

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		9

$$\rho_{Xe}^{cm} = -\theta \frac{\sigma_f^5}{\sigma_a^5 + \sigma_a^8 \left( \frac{1-c_5}{c_5} \right)} \cdot \frac{\sigma_a^{Xe} (\gamma_I + \gamma_{Xe}) \Phi_0}{(\sigma_{Xe} \cdot \Phi_0 + \lambda_{Xe})},$$

где  $\theta$  - коэффициент использования тепловых нейтронов,

$c_5$  - обогащение урана изотопом  $U^{235}$ ,

$\sigma_a^5, \sigma_a^8, \sigma_f^5$  - микроскопические сечения поглощения и деления изотопов урана.

Потери запаса реактивности при стационарном отравлении реактора ксеноном определяются:

а) Величиной концентрации  $^{235}U$  (величиной обогащения топлива). Чем больше концентрация  $N_5$  - тем больше величина коэффициента использования тепловых нейтронов  $\theta$  - и тем больше будет абсолютная величина потерь реактивности при стационарном отравлении  $\rho_{Xe}^{ст}$ .

б) Величиной уровня мощности, на котором длительно работает реактор.

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		10

## 1 Исходные данные для расчета

В качестве исходных данных для расчета стационарного отравления ксеноном примем Альбом нейтронно-физических характеристик реактора третьего энергоблока Ростовской АЭС для первой топливной загрузки, полностью состоящей из топливных кассет типа ТВС-2М с удлиненным топливным столбом.

Таблица 1- Характеристики активной зоны [9]

Параметр, единицы измерения	Значение
Мощность реактора тепловая, МВт	3120
Рабочее давление на выходе из активной зоны, МПа	15.7
Расход теплоносителя через активную зону реактора, м <sup>3</sup> /ч,	87000
Температура теплоносителя на входе в реактор при МКУ мощности, °С	280
Температура теплоносителя на входе в реактор на мощности 3120 МВт, °С	287.3
Число ТВС, шт.	163
Число ТВС, содержащих органы регулирования, шт.	61

Таблица 2 - Характеристики ТВС-2М [9]

Наименование характеристики, единицы измерения	Значение
Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛЫ и ТВЭГИ):	
- количество ТВЭЛОВ и ТВЭГОВ в ТВС, ШТ	312
- шаг между ТВЭЛАМИ (ТВЭГАМИ), ММ	12,75
- высота топлива в холодном/горячем состоянии, ММ	3680/3700
- наружный диаметр оболочки ТВЭЛА (ТВЭГА), ММ	9,10
- внутренний диаметр оболочки ТВЭЛА (ТВЭГА), ММ	7,73
- материал оболочки и заглушек ТВЭЛА (ТВЭГА)	Э-110
- масса топлива (UO <sub>2</sub> ) в ТВЭЛЕ, КГ, номинальная	1,689
- масса топлива (UO <sub>2</sub> + Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) в ТВЭГЕ для содержания Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 5% / более 5%, КГ, номинальная	1,689/1,673
Таблетка ТВЭЛА и ТВЭГА:	
- наружный диаметр таблетки, ММ	7,6
- диаметр центрального отверстия таблетки, ММ	1,2
- высота таблетки, ММ	9 – 12
Направляющий канал и центральная трубка (под КНИ):	
- количество направляющих каналов, ШТ	18
- количество центральных трубок, ШТ.	1
- материал	Э-635
- наружный диаметр, ММ, номинальный	13
- внутренний диаметр, ММ, номинальный	11
Дистанционирующая решетка:	
- материал	Э-110
- количество (на уровне топлива), ШТ	12
- масса, Г	900

Таблица 3- Описание типов ТВС-2М первой топливной загрузки [9]

Обознач. ТВС	Кол. ТВС	Ср. обогащ. топлива, <sup>235</sup> U вес. %	Кол. ТВЭЛОВ, шт./ обогащение, <sup>235</sup> U вес. %		Характеристики (ТВЭГОВ)		
			Тип 1	Тип 2	Кол. ТВЭГОВ	Обогащ., <sup>235</sup> U вес.%	Содерж. Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , вес. %
U19	48	1.900	312 / 1,9	-	-	-	-
U19X6	18	1.900	306 / 1,9	-	6	1,9	8
U33W2	24	3.265	300 / 3,3	-	12	2,4	8
U36	12	3.600	312 / 3,6	-	-	-	-
U36W2	7	3.554	300 / 3,6	-	12	2,4	8
U39	24	3.915	246 / 4,0	66 / 3,6	-	-	-
U39B6	6	3.902	240 / 4,0	66 / 3,6	6	3,3	5
U39A8	24	3.883	234 / 4,0	60 / 3,6	18	3,3	5

### 1.1 Принимаемые допущения при проведении расчетов

Для проведения расчетов примем ряд важных допущений:

1) Точно- параметрическое приближение - предположим, что при нарастании нейтронной мощности реактора плотность тепловых нейтронов во всех точках активной зоны реактора будет нарастать синхронно и пропорционально величине средней плотности тепловых нейтронов в реакторе. В соответствии с этим определим среднее по активной зоне обогащение топлива и содержание оксида гадолиния;

2) Характеристики активной зоны определяем на начало кампании;

3) Учитываем расширение топливного столба только по высоте, пренебрегая при этом расширением по радиусу;

4) При усреднении сечений по спектру Максвелла примем, что микроскопическое сечение поглощения гадолиния подчиняется закону  $1/v$ ;

5) Рассматриваем только стационарное отравление реактора ксеноном.

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		14

## 2 Расчет нейтронно-физических характеристик активной зоны "холодного" реактора

### 2.1 Определение объемов компонентов активной зоны

Активная зона реактора представляет собой совокупность повторяющихся элементов, образующих решетку. Элемент периодичности решетки, который имеет одинаковую геометрическую форму и нейтронные характеристики - элементарная ячейка[3]. Для определения нейтронно-физических характеристик воспользуемся методом эквивалентной ячейки:

- 1) Элементарную ячейку преобразуем в двухзонную. Нейтронно-физические расчеты проводим на 1см высоты;
- 2) Эквивалентную ячейку разбиваем на две зоны: блок и замедлитель.

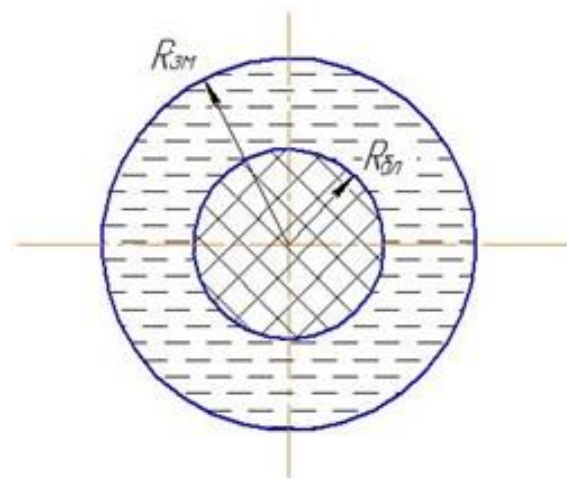


Рисунок 4 – Эскиз эквивалентной ячейки

Общее количество ТВЭлов, ТВЭгов центральных трубок и направляющих каналов в загрузке:

$$N_{ТВЭЛ} = 49908шт, N_{ТВЭГ} = 948шт, N_{УТ} = 163шт, N_{К} = 2934шт.$$

В данной работе рассматриваем ТВС со смешанным топливом ( $UO_2+Gd_2O_3$ ) в тепловыделяющих элементах, среднее обогащение топлива по урану составляет:

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		15

$$c_5 = \frac{\sum c_{5i} \cdot n_{твэл.i} \cdot n_{ТВС.i}}{n_{твэл} \cdot n_{ТВС}},$$

где  $c_{5i}$  - обогащение топлива по урану для соответствующей ТВС,

$n_{твэл.i}$  - число ТВЭЛ с соответствующим обогащением,

$n_{ТВС.i}$  - число ТВС.

По данным параметрам из таблицы 3 определили  $c_5=2,96\%$ .

По данным из таблиц 2 и 3 рассчитаем весовое содержание  $Gd_2O_3$  в одном ТВЭЛЕ:

$$m_{Gd2O3} = \frac{\sum m_{Gd2O3.i} \cdot m_{топл.i} \cdot n_{твэл} \cdot n_{ТВС}}{n_{твэл} \cdot n_{ТВС}},$$

где  $m_{Gd2O3.i}$  - содержание  $Gd_2O_3$  в ТВЭГе,

$m_{топл.i}$  - масса топлива в ТВЭГе.

Содержание  $Gd_2O_3$  в тепловыделяющем элементе при этом будет равно 2,04г. Тогда ядерная плотность оксида гадолиния :

$$\gamma_{Gd2O3} = \frac{m_{Gd2O3}}{\pi H_{аз} \left[ \frac{d_{табл}^2}{4} - \frac{d_{отв}^2}{4} \right]} = \frac{2,04}{3,14 \cdot 368 \left[ \frac{0,76^2}{4} - \frac{0,12^2}{4} \right]} = 0,0132 / \text{см}^3,$$

где  $H_{аз}$  - высота активной зоны,

$d_{табл}, d_{отв}$  - диаметр таблетки и отверстия.

Ядерная плотность оксида урана :

$$\gamma_{UO2} = \frac{m_{UO2}}{\pi H_{аз} \left[ \frac{d_{табл}^2}{4} - \frac{d_{отв}^2}{4} \right]} = \frac{1689}{3,14 \cdot 368 \left[ \frac{0,76^2}{4} - \frac{0,12^2}{4} \right]} = 10,3752 / \text{см}^3.$$

По известному общему числу мест определим число рядов  $N_{ряд}$ . Число тепловыделяющих элементов на главной диагонали составляет  $N_D = 21$ , тогда общее число рядов:



$$N_{\text{ряд}} = \frac{N_D - 1}{2} = \frac{21 - 1}{2} = 10.$$

Размер ТВС «под ключ»:

$$h_{\text{кл}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot a \cdot (1 + 1,5 \cdot N_{\text{ряд}}) = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot 1,275 \cdot (1 + 1,5 \cdot 10) = 23,55 \text{ см},$$

где  $a$  – шаг между ТВЭлами.

Площадь поперечного сечения ТВС:

$$S_{\text{ТВС}} = \frac{\sqrt{3} h_{\text{кл}}^2}{2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 23,556^2}{2} = 480,545 \text{ см}^2.$$

Определим объемы компонентов активной зоны "холодного" реактора:

$$V_{\text{ТВС}} = S_{\text{ТВС}} \cdot H_{\text{аз}} = 480,545 \cdot 368 = 1,768 \cdot 10^5 \text{ см}^3,$$

$$V_{\text{гор}} = \pi n_{\text{твэл}} H_{\text{аз}} 10^2 \left[ \frac{d_{\text{табл}}^2}{4} - \frac{d_{\text{отв}}^2}{4} \right] = 312 \cdot 3,14 \cdot 368 \left[ \frac{0,76^2}{4} - \frac{0,12^2}{4} \right] = 5,079 \cdot 10^4 \text{ см}^3 -$$

объем топлива в одной ТВС,

$$V_{\text{об.твэл}} = \pi n_{\text{твэл}} H_{\text{аз}} 10^2 \left[ \frac{d_{\text{тв.нар}}^2}{4} - \frac{d_{\text{тв.вн}}^2}{4} \right] = 312 \cdot 3,14 \cdot 368 \left[ \frac{0,91^2}{4} - \frac{0,773^2}{4} \right] =$$

$$= 2,079 \cdot 10^4 \text{ см}^3 - \text{объем оболочки ТВЭла в одной ТВС},$$

$$V_{\text{об.тр}} = \pi (n_{\text{нк}} + n_{\text{цт}}) H_{\text{аз}} 10^2 \left[ \frac{d_{\text{тр.нар}}^2}{4} - \frac{d_{\text{тр.вн}}^2}{4} \right] = 19 \cdot 3,14 \cdot 368 \left[ \frac{1,3^2}{4} - \frac{1,1^2}{4} \right] =$$

$$= 2,636 \cdot 10^3 \text{ см}^3 - \text{объем оболочки направляющего канала и центральной трубки одной ТВС},$$

$$V_{\text{He}} = \pi n_{\text{твэл}} H_{\text{аз}} 10^2 \left[ \frac{d_{\text{тв.вн}}^2}{4} - \frac{d_{\text{табл}}^2}{4} + \frac{d_{\text{отв}}^2}{4} \right] = 312 \cdot 3,14 \cdot 368 \cdot$$

$$\cdot \left[ \frac{0,773^2}{4} - \frac{0,76^2}{4} + \frac{0,12^2}{4} \right] = 3,096 \cdot 10^3 \text{ см}^3 - \text{объем, занятый гелием в одной ТВС},$$

где  $d_{\text{тв.вн}}$ ,  $d_{\text{тв.нар}}$  – внутренний и наружный диаметры оболочки ТВЭла

Объем дистанционирующих решеток:

$$V_{\text{дист}} = \frac{m_{\text{дист}} \cdot n_{\text{дист}}}{\rho_{\text{дист}}} = \frac{0,9 \cdot 10^6 \cdot 12}{6552} = 1,649 \cdot 10^3 \text{ см}^3,$$

где  $\rho_{дист} = 6636 - 0,286 \cdot T = 6636 - 0,286 \cdot (27 + 273) = 6550 \text{ кг / м}^3$  - плотность сплава Э110 при средней температуре теплоносителя в "холодном" реакторе [4],

$m_{дист}$  - масса дистанционирующей решетки,

$n_{дист}$  - число дистанционирующих решеток в одной ТВС.

Определим объемы конструкционных материалов (Zr) и теплоносителя (H<sub>2</sub>O):

$$V_{км} = V_{об.твэл} + V_{об.пр} + V_{дист} = 2,079 \cdot 10^4 + 2,636 \cdot 10^3 + 1,649 \cdot 10^3 = 2,508 \cdot 10^4 \text{ см}^3,$$

$$V_{тн} = V_{твс} - V_{км} - V_{He} - V_{зоп} = 1,768 \cdot 10^5 - 2,508 \cdot 10^4 - 3,096 \cdot 10^3 - 5,079 \cdot 10^4 = 9,788 \cdot 10^4 \text{ см}^3.$$

Все объемы эквивалентной ячейки отнесем к одному твэлу:

$$V_{зоп} = \frac{V_{зоп}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{5,079 \cdot 10^4}{312 \cdot 3,68 \cdot 10^2} = 0,442 \text{ см}^3,$$

$$V_{км} = \frac{V_{км}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{2,508 \cdot 10^4}{312 \cdot 3,68 \cdot 10^2} = 0,218 \text{ см}^3,$$

$$V_{тн} = \frac{V_{тн}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{9,719 \cdot 10^4}{312 \cdot 3,68 \cdot 10^2} = 0,853 \text{ см}^3,$$

$$V_{He} = \frac{V_{He}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{3,096 \cdot 10^3}{312 \cdot 3,68 \cdot 10^2} = 0,027 \text{ см}^3,$$

$$V_{зм} = V_{км} + V_{вода} + V_{He} = 0,218 + 0,846 + 0,027 = 1,098 \text{ см}^3,$$

$$V_{бл} = V_{зоп} = 0,442 \text{ см}^3,$$

$$V_{яч} = V_{бл} + V_{зм} = 0,442 + 1,092 = 1,54 \text{ см}^3.$$

## 2.2 Определение эффективной температуры

1) Расход теплоносителя через активную зону реактора:

$$G_{тн} = \frac{87000 \cdot \rho_{тн}}{3600} = \frac{87000 \cdot 1003}{3600} = 24240 \text{ кг / с}.$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		18

где  $\rho_{mn} = f(p_{xp}, T_{xp}) = 1003 \text{ кг} / \text{м}^3$ .

Через одну ТВС :  $G_{твс} = \frac{G_{аз}}{N_{твс}} = \frac{24240}{163} = 148,7 \text{ кг} / \text{с}$ .

Площадь проходного сечения ТВС:

$$S_{mn} = S_{твс} - \frac{\pi(d_{твэл}^2 \cdot n_{твэл} + d_{тр}^2 \cdot n_{твэл})}{4} = 0,048 - \frac{3,14 \cdot (0,0091^2 \cdot 312 + 0,013^2 \cdot 19)}{4} = 0,025 \text{ м}^2.$$

Тогда средняя скорость теплоносителя через одну ТВС:

$$w = \frac{G_{твс}}{S_{mn} \cdot \rho_{mn}} = \frac{148,7}{0,025 \cdot 1003} = 5,88 \text{ м} / \text{с}.$$

Гидравлический диаметр для треугольной решетки:

$$d_z = d_{твэл} \left[ \frac{2\sqrt{3}x^2}{\pi} - 1 \right] = 0,0091 \cdot \left[ \frac{2\sqrt{3} \cdot 1,4^2}{3,14} - 1 \right] = 0,011 \text{ м},$$

где  $x = \frac{s}{d_{твэл.нар}} = \frac{0,01275}{0,0091} = 1,4$  - относительный шаг решетки.

Площадь теплопередающей поверхности твэлов:

$$П = \pi d_{твэл.нар} n_{твэл} H_{аз} = 3,14 \cdot 0,0091 \cdot 312 \cdot 3,68 = 5,35 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

2) Температура теплоносителя в "холодном" реакторе  $t_{xp} = 27^\circ \text{C} = 300,15 \text{ К}$ .

Температура на поверхности оболочки твэла средней мощности:

$$T_{cm} = T_f + \frac{\Delta T_f}{2} + \Delta T_\alpha,$$

где  $T_f = 27^\circ \text{C}$  - средняя температура теплоносителя в аз,

$\Delta T_f = T_2 - T_1 = 0$  - полный подогрев теплоносителя в аз,

$\Delta T_\alpha = \frac{q_F}{\alpha} = 0$  - температурный напор "стенка-жидкость".

Отсюда получим, что наружная температура стенки твэла равна

$$T_{cm} = 27^\circ \text{C}.$$

### 3) Максимальное значение температуры топлива в ТВЭЛ средней

мощности:

$$T_{\max} = T_{\text{ст}} + \Delta T_{\text{об}} + \Delta T_{\text{заз}} + \Delta T_{\text{гор}}.$$

Максимальный перепад на тонкой оболочке ТВЭЛ можно представить в виде:

$$\Delta T_{\text{об}} = \bar{q}_F \cdot \frac{2d_{\text{тв.нар}}}{d_{\text{тв.вн}} + d_{\text{тв.вн}}} \cdot \frac{\delta_{\text{об}}}{\lambda_{\text{об}}} = 0,$$

где  $\frac{2d_{\text{тв.нар}}}{d_{\text{тв.вн}} + d_{\text{тв.вн}}}$  - множитель, корректирующий значение потока на средний диаметр оболочки,

$\delta_{\text{об}}, \lambda_{\text{об}}$  - толщина и коэффициент теплопроводности оболочки (материал цирконий).

Таким образом максимальный перепад температуры на оболочке ТВЭЛ примем равной  $T_{\text{ст.вн}} = T_{\text{ст.нар}} + \Delta T_{\text{об}} = 27 + 0 = 27^\circ \text{C}$ .

### 4) Температурный перепад в газовом зазоре находим по формуле:

$$\Delta T_{\text{заз}}^{\max} = \bar{q}_F^{\max} \cdot \frac{2d_{\text{тв.нар}}}{d_{\text{тв.вн}} + d_{\text{табл}}} \cdot \frac{\delta_{\text{заз}}}{\lambda_{\text{заз}}} = 0,$$

где  $d_T$  - диаметр топливной таблетки;

$\lambda_{\text{заз}}$  - коэффициент теплопроводности газа (гелия), определяется в зависимости от  $\overline{T_{\text{заз}}}$ .

Процесс расчета максимального перепада температуры в газовом зазоре также итерационный.

Отсюда найдем максимальную температуру наружной поверхности топливного сердечника:  $T_{\text{серд.нар}} = T_{\text{ст.вн}} + \Delta T_{\text{заз}} = 27 + 0 = 27^\circ \text{C}$ .

5) Определим максимальный радиальный перепад на сердечнике ТВЭЛ при постоянной теплопроводности.

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		20

Если пренебречь зависимостью профиля распределения плотности потока тепловых нейтронов, значение которого в поверхностных слоях топлива более высокое, и взять среднее значение энерговыделения, то получим:

$$T_{гор}(r) = T_{серд.нар} + \frac{\overline{q_v}}{4 \cdot \overline{\lambda_{гор}}} \left( \left( \frac{d_{табл}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{омв}}{2} \right)^2 \right),$$

где  $\overline{\lambda_{гор}}$  – средняя теплопроводность горючего при  $\overline{T_{серд}}$ .

$$\overline{q_v} = \frac{Q}{H_{аз} \cdot \pi n_{твэл} \left( \left( \frac{d_{табл}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{омв}}{2} \right)^2 \right)} = 0 \text{ Вт/м}^3.$$

Процесс расчета максимальной температуры топливного сердечника итерационный. Тогда средняя температура сердечника "холодном" реакторе:

$$\overline{T_{серд}} = 27^\circ \text{C} = 300,15 \text{K}.$$

Коэффициент теплопроводности для этой температуры найдем по формуле, приведенной в [2]:

$$\begin{aligned} \overline{\lambda_{гор}} &= 10^2 \left( 3,77 + 0,0258 \overline{T_{гор}} \right)^{-1} + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot \overline{T_{гор}} + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot \overline{T_{гор}}^3 \cdot \exp\left( 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot \overline{T_{гор}} \right), \\ \overline{\lambda_{гор}} &= 10^2 \left( 3,77 + 0,0258 \cdot 300,15 \right)^{-1} + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 300,15 + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot 300,15^3 \cdot \exp\left( 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 300,15 \right) = \\ &= 8,719 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

$$\Delta T_{гор} = \frac{\overline{q_v}}{4 \cdot \overline{\lambda_{гор}}} \left( \left( \frac{d_{табл}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{омв}}{2} \right)^2 \right) = 0^\circ \text{C}.$$

Максимальное значение температуры топлива в твэл средней мощности:

$$T^{\max} = T_{ст.нар} + \Delta T_{об} + \Delta T_{газ} + \Delta T_{гор} = 27^\circ \text{C}.$$

б) Отсюда определим эффективную температуру топлива по формуле:

$$T_{гор}^{\text{эф}} = T_{серд.нар} + 0,4 \cdot \left( T_{серд.вн} - T_{серд.нар} \right) = 27^\circ \text{C}.$$

### 2.3 Определение ядерной и молекулярной плотностей нуклидов

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
						21
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

Поскольку ячейка реактора состоит из нескольких зон с различными ядерными свойствами, рассчитаем нейтронно-физические характеристики для каждой зоны (горючее, оболочка, теплоноситель, замедлитель). Ядерные концентрации определяем по формуле:

$$N_i(N_{ij}) = \frac{N_A \cdot \gamma_i(\gamma_{ij})}{A_i(M_{ij})}, \text{ ядер/см}^{-3}(\text{мол/см}^{-3}),$$

где  $\gamma_i(\gamma_{ij})$  – ядерная и химическая плотности отдельных нуклидов,

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  – число Авогадро,

$A_i, M_{ij}$  – атомный и молекулярный вес.

1) Топливом является соединение ( $\text{UO}_2 + \text{Gd}_2\text{O}_3$ ), обогащенное по  $\text{U}^{235}$  на 2,96% с содержанием  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  2,04 г. Атомный вес и плотность для топлива определяем с учетом обогащения по делящемуся изотопу  $c_5$  %,::

$$A_{\text{UO}_2} = \left( \frac{c_5}{100} \right) \cdot A_5 + \left( \frac{100 - c_5}{100} \right) \cdot A_8 + 2 \cdot A_0 = \left( \frac{2,96}{100} \right) \cdot 235 + \left( \frac{100 - 2,96}{100} \right) \cdot 238 + 2 \cdot 16 = 269,92 / \text{моль}.$$

$$M_{\text{Gd}_2\text{O}_3} = 2M_{\text{Gd}} + 3M_{\text{O}} = 157,26 \cdot 2 + 3 \cdot 16 = 362,52 / \text{моль}.$$

$$N_{\text{UO}_2} = \frac{N_a \gamma_{\text{UO}_2}}{A_{\text{UO}_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,375}{269,9} = 2,315 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{Gd}_2\text{O}_3} = \frac{N_a \gamma_{\text{Gd}_2\text{O}_3}}{M_{\text{Gd}_2\text{O}_3}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,013}{362,52} = 2,083 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Расчет концентраций отдельных элементов, входящих в состав топлива:

$$N_{\text{U}^{235}} = \frac{c_5}{100} N_{\text{UO}_2} = \frac{2,96}{100} \cdot 2,315 \cdot 10^{22} = 6,853 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{U}^{238}} = \frac{100 - c_5}{100} N_{\text{UO}_2} = \frac{(100 - 2,96)}{100} \cdot 2,315 \cdot 10^{22} = 2,247 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{Gd}} = 2N_{\text{Gd}_2\text{O}_3} = 2 \cdot 2,083 \cdot 10^{19} = 4,165 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{O}} = 2N_{\text{UO}_2} + 3N_{\text{Gd}_2\text{O}_3} = 2 \cdot 2,315 \cdot 10^{22} + 3 \cdot 2,083 \cdot 10^{19} = 4,637 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		22

$$N_{zr} = \frac{N_a \gamma_{zr}}{A_{zr}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 6,4}{91,22} = 4,226 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{H_2O} = \frac{N_a \rho_{mn}}{A_{H_2O}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,003}{18} = 3,356 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{he} = \frac{N_a \gamma_{he}}{A_{he}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,0001785}{4,003} = 2,686 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Молекулярная концентрация борной кислоты при концентрации борной кислоты в теплоносителе  $c_{\text{бк}}=9,81\text{г/кг}$  [9]:

$$N_{\text{бк}} = \frac{N_a \rho_{mn} c_{\text{бк}}}{M_{\text{бк}}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1,003 \cdot 0,00981}{3 \cdot 1 + 11 + 16 \cdot 3} = 9,559 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Находим значения эффективных микроскопических сечений по [3].

Таблица 4 - Таблица эффективных микроскопических сечений

Эл.т	$V_i,$ $\text{см}^3$	$N_i \cdot 10^{-22},$ $\text{см}^{-3}$	$\sigma_a,$ барн	$\sigma_s,$ барн	$\xi$	$VN\sigma_a,$ $\text{см}^{-1}$	$VN\sigma_s\xi,$ $\text{см}^{-1}$
U <sub>5</sub>	0,442	0,06853	680,9	13,8	0,0085	0,206	$3,555 \cdot 10^{-5}$
U <sub>8</sub>	0,442	2,247	2,71	8,9	0,0084	0,027	$7,429 \cdot 10^{-4}$
O <sub>гор</sub>	0,442	4,637	0,00027	3,76	0,12	$5,538 \cdot 10^{-6}$	$9,254 \cdot 10^{-3}$
Gd	0,442	0,004165	37340	-	0,0127	0,688	0
H <sub>2</sub> O	0,853	3,356	0,664	48	0,954	0,019	1,31
Zr	0,218	4,226	0,185	6,4	0,0218	$1,707 \cdot 10^{-3}$	$1,288 \cdot 10^{-3}$
He	0,027	0,002686	0,007	0,8	0,425	$5,069 \cdot 10^{-9}$	$2,462 \cdot 10^{-7}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,853	0,00956	760	76,08	0,83	0,062	$5,146 \cdot 10^{-3}$

## 2.4 Определение температуры нейтронного газа

Простейший подход в расчёте  $T_{нг}$  соответствует одинаковой температуре нейтронного газа во всех зонах ячейки или же средней по объёму, т. е. эффективной температуре  $T_{нг}$  :

$$T_{нг} = T_0 \cdot \left[ 1 + C \cdot \left( \frac{\Sigma_a(T_0)}{\xi \Sigma_s(1)} \right) \right],$$

где  $T_0$  – средняя температура по элементарной ячейке,

$\Sigma_a(T_0)$  – макроскопическое сечение поглощения

гомогенизированной элементарной ячейки, поправленное на температуру среды в предположении, что  $\sigma_{aj}$  всех компонентов ячейки подчиняются закону  $1/v$ ,

$\xi \Sigma_s(1)$  – замедляющая способность гомогенизированной элементарной ячейки,

$C$  – эмпирическая константа, зависящая от вида ЗМ. Для ВВЭР  $C=1,7$ .

$$T_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C} = 300,15\text{K}.$$

$$\Sigma_a(T_0) = \sum_{j=1} \frac{(VN\sigma_a(0,0253))}{V_0} \cdot \sqrt{\frac{293,6}{T_0}},$$

$$\Sigma_a(T_0) = \frac{0,206 + 0,027 + 5,538 \cdot 10^{-6} + 0,688 + 0,019 + 1,707 \cdot 10^{-3} + 5,069 \cdot 10^{-9} + 0,062}{1,54}.$$

$$\cdot \sqrt{\frac{293,6}{300,15}} = 0,645\text{см}^{-1},$$

$$\xi \Sigma_s(1) = \sum_{j=1} \frac{(VN\xi\sigma_s(1))}{V_0},$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		24



$$\xi \Sigma_s(1) = \frac{3,555 \cdot 10^{-5} + 7,429 \cdot 10^{-4} + 9,254 \cdot 10^{-3} + 1,31 + 1,288 \cdot 10^{-3} + 2,462 \cdot 10^{-7} + 5,146 \cdot 10^{-3}}{1,54} =$$

$$= 0,861 \text{ см}^{-1}.$$

$$T_{\text{HT}} = 300,15 \cdot \left[ 1 + 1,7 \cdot \left( \frac{0,645}{0,861} \right) \right] = 682 \text{ K}.$$

## 2.5 Определение энергии сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов

Точка пересечения спектров Ферми и Максвелла для реактора на тепловых и не очень жёстких промежуточных нейтронах условно определяет верхнюю границу тепловой группы. Её определяют из следующего уравнения:

$$f = \frac{x^2 \cdot e^{-x}}{1 - (1+x) \cdot e^{-x}} = \frac{\Sigma_a(E_{zp}, E_m)}{\xi \Sigma_s(1)},$$

или

$$f = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot x^2 \cdot \exp(-x) = \frac{\Sigma_a(E_{zp}, E_m)}{\xi \Sigma_s(1)},$$

1) Задаемся значением  $x_{\text{гр}}$  :

Таблица 5 - Значения функции флев в зависимости от  $x_{\text{гр}}$

$x_{\text{гр}}$	2	4	6	8
$f_{\text{лев}}$	0,911	0,323	0,091	0,022

2) Выбираем три значения 2, 4, 6 и решаем правую часть уравнения.

Определим сечение поглощения гомогенной среды, усреднённое по спектру Максвелла:

$$\Sigma_a(E_{zp}, E_m) = \frac{1}{V_0} \cdot \sum_i V_i \cdot N_i \cdot \bar{\sigma}_a^i(E_{zp}, E_T),$$

где  $\bar{\sigma}_a^i(E_{zp}, E_T)$  – сечение поглощения отдельных элементов, усреднённые по спектру Максвелла.

Определим поправочные коэффициенты для трех точек по формуле:

$$F(x_{gp}) = \frac{2}{\sqrt{\pi} (1 - (1+x) \cdot \exp(-x))} \cdot \int_0^{x_{gp}} \sqrt{x} \cdot \exp(-x) dx.$$

Таблица 6 - Значения функции  $F$  в зависимости от  $x_{gp}$

$x_{gp}$	2	4	6
$F(x_{gp})$	1,243	1,05	1,01

Определим сечение поглощения гомогенной среды, усреднённое по спектру Максвелла:

$$\Sigma_a(E_{gp}, E_m) = \frac{1}{V_0} \cdot \sum_i V_i \cdot N_i \cdot \bar{\sigma}_a^i(E_{gp}, E_T),$$

где  $\bar{\sigma}_a^i(E_{gp}, E_T)$  – сечение поглощения отдельных элементов, усреднённые по спектру Максвелла.

$$\bar{\sigma}_a^i(E) = 0,886 \cdot \sigma_a^i \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{из}}} F(x_{gp})$$

Таблица 7 - Значения  $\bar{\sigma}_a^i(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{gp}$

Элемент	$x = 2$	$x = 4$	$x = 6$
	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн
U <sub>5</sub>	457,1	386,1	371,4
U <sub>8</sub>	1,959	1,654	1,591
O <sub>гор</sub>	$1,951 \cdot 10^{-4}$	$1,643 \cdot 10^{-4}$	$1,585 \cdot 10^{-4}$
Gd	$2,699 \cdot 10^4$	$2,28 \cdot 10^4$	$2,193 \cdot 10^4$
H <sub>2</sub> O	0,48	0,405	0,39
Zr	0,134	0,113	0,109
He	$5,059 \cdot 10^{-3}$	$4,273 \cdot 10^{-3}$	$4,11 \cdot 10^{-3}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	549,3	463,9	446,3

Таблица 8 - Значения  $VN\overline{\sigma}_a^i$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

	$x_{гр} = 2$	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 6$
Элемент	$VN\overline{\sigma}_a^i, \text{см}^{-1}$	$VN\overline{\sigma}_a^i, \text{см}^{-1}$	$VN\overline{\sigma}_a^i, \text{см}^{-1}$
U <sub>5</sub>	0,139	0,117	0,113
U <sub>8</sub>	0,019	0,016	0,016
O <sub>гор</sub>	$4,002 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^{-6}$	$3,252 \cdot 10^{-6}$
Gd	0,497	0,42	0,404
H <sub>2</sub> O	0,014	0,012	0,011
Zr	$1,234 \cdot 10^{-3}$	$1,042 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-3}$
He	$3,664 \cdot 10^{-9}$	$3,094 \cdot 10^{-9}$	$2,977 \cdot 10^{-9}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,045	0,038	0,036
$f_{\text{прав}}$	0,539	0,455	0,438

При расчете учитываем, что  $^{235}\text{U}$  не подчиняется закону  $1/v$ . Усреднение сечения поглощения по спектру Максвелла для этого элемента можно найти применяя  $g_{a5}$ - фактор, который можно определить с помощью [3] ( $g_{a5}=0,929$ ).

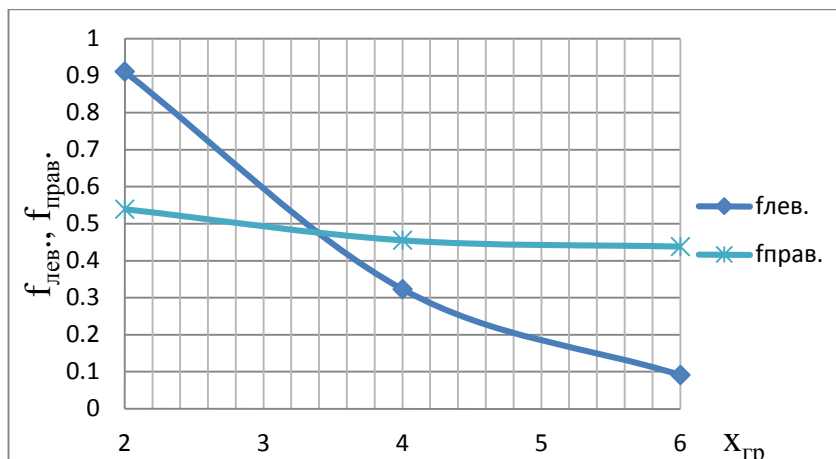


Рисунок 5 – Определение граничной энергии

В точке пересечения этих графиков находим точку  $x_{гр}$  и определяем его:  
 $x_{гр} = 3,4$ .

$E_{cp} = x_{cp} \cdot E_m = 3,4 \cdot 0,0253 = 0,086 \text{ эВ}$  – это и есть энергия сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов.

## 2.6 Расчет сечений, усредненных по спектру Максвелла

При  $x_{гр} = 3,4$ :  $F(x_{cp}) = 0,8779 \cdot x^{-1} + 0,01471 \cdot x + 0,7735 = 1,08$ .

Транспортное сечение определяем по формуле:

$$\sigma_{tr}^i = \sigma_a^i + \sigma_s^i \cdot (1 - \mu_i),$$

где  $\sigma_{tr}^i$  - транспортное сечение,

$$\mu_i = \frac{2}{3A_i} \text{ - средний косинус угла рассеяния.}$$

Таблица 9 - Значения  $\overline{\sigma_a^i}(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 3,4$	$(1 - \mu_i)$
	$\overline{\sigma_a^i}(E)$ , барн	
U <sub>5</sub>	397,1	0,997
U <sub>8</sub>	1,701	0,997
O <sub>гор</sub>	$1,695 \cdot 10^{-4}$	0,958
Gd	$2,344 \cdot 10^4$	0,996
H <sub>2</sub> O	0,417	0,963
Zr	0,116	0,993
He	$4,395 \cdot 10^{-3}$	0,833
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	477,2	0,989

Для U<sup>235</sup>  $\overline{\sigma_f}$  находим [3] при T<sub>нг</sub>.

Таблица 10 - Усреднённые сечения по спектру Максвелла

Эл-т	$\overline{\sigma_a}$ , барн	$\overline{\sigma_f}$ , барн	$\overline{\sigma_{tr}}$ , барн	$VN\overline{\sigma_a}$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma_f}$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma_{tr}}$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>5</sub>	397,1	336,2	410,8	0,12	0,102	0,125
U <sub>8</sub>	1,701	-	10,557	0,017	-	0,105
O <sub>гор</sub>	1,695·10 <sup>-4</sup>	-	3,604	3,477·10 <sup>-6</sup>	-	0,074
Gd	2,344·10 <sup>4</sup>	-	2,344·10 <sup>4</sup>	0,4532	-	0,432
H <sub>2</sub> O	0,417	-	46,639	0,012	-	1,334
Zr	0,116	-	6,469	1,072·10 <sup>-3</sup>	-	0,06
He	4,395·10 <sup>-3</sup>	-	0,671	3,182·10 <sup>-9</sup>	-	4,859·10 <sup>-7</sup>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	477,2	-	552,4	0,039	-	0,045

1) Находим макроскопические сечения поглощения:

По элементарной ячейке:

$$\Sigma_a^{\text{ЭЯ}} = \frac{1}{V_0} \sum (VN\overline{\sigma_a}) = 0,403 \text{ см}^{-1}.$$

По зонам блока:

$$\Sigma_a^{\text{БЛ}} = \frac{1}{V_{\text{БЛ}}} \sum (VN\overline{\sigma_a}) = 1,287 \text{ см}^{-1}.$$

По замедлителю:

$$\Sigma_a^{\text{ЗМ}} = \frac{1}{V_{\text{ЗМ}}} \sum (VN\overline{\sigma_a}) = 0,047 \text{ см}^{-1}.$$

2) Находим макроскопические транспортные сечения рассеяния:

По элементарной ячейке:

$$\Sigma_{tr}^{\text{ЭЯ}} = \frac{1}{V_0} \sum (VN\overline{\sigma_{tr}}) = 1,412 \text{ см}^{-1}.$$

По зонам блока:

$$\Sigma_{tr}^{БЛ} = \frac{1}{V_{БЛ}} \sum (VN \overline{\sigma_{tr}}) = 1,663 \text{см}^{-1}.$$

По замедлителю:

$$\Sigma_{tr}^{ЗМ} = \frac{1}{V_{ЗМ}} \sum (VN \overline{\sigma_{tr}}) = 1,311 \text{см}^{-1}.$$

3) Находим макроскопические сечения деления:

По элементарной ячейке:

$$\Sigma_f^{ЭЯ} = \frac{1}{V_0} \sum (VN \overline{\sigma_f}) = 0,066 \text{см}^{-1}.$$

По зонам блока:

$$\Sigma_f^{БЛ} = \frac{1}{V_{БЛ}} \sum (VN \overline{\sigma_f}) = 0,066 \text{см}^{-1}.$$

По замедлителю:

$$\Sigma_f^{ЗМ} = \frac{1}{V_{ЗМ}} \sum (VN \overline{\sigma_f}) = 0.$$

2.7 Определение коэффициента использования тепловых нейтронов

$$\frac{1}{\theta} = 1 + f \cdot \frac{\Sigma_a^{ЗМ}}{\Sigma_a^{БЛ}} + (E - 1),$$

где  $E - 1 \approx \frac{(\alpha'' R_{ЗМ})^2}{2} \cdot (\ln(R_{ЗМ} \cdot \alpha') - 0,75)$  - поправка на внешний блок-эффект,

$$f = 1 + \frac{(\alpha' R_{БЛ})^2}{8} - \frac{(\alpha' R_{БЛ})^4}{192} - \text{коэффициент проигрыша.}$$

$$R_{ЭЯ} = \sqrt{\frac{V_{ЭЯ}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,54}{3,14}} = 0,7 \text{м.} - \text{радиус элементарной ячейки.}$$

$$R_{БЛ} = \sqrt{\frac{V_{БЛ}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,442}{3,14}} = 0,375 \text{м.} - \text{радиус блока.}$$

$$R_{ЗМ} = \sqrt{\frac{V_{ЗМ}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,098}{3,14}} = 0,591 \text{м.} - \text{радиус замедлителя.}$$

Рассчитаем поправку на внешний блок - эффект:

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		30

$$\alpha'' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{3M}}{D}} = \sqrt{3\Sigma_{tr}^{3M} \cdot \Sigma_a^{3M}} = \sqrt{3 \cdot 1,311 \cdot 0,047} = 0,431 - \text{коэффициент замедлителя,}$$

$$\alpha' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{\text{бл}}}{D}} = \sqrt{3\Sigma_{tr}^{\text{бл}} \cdot \Sigma_a^{\text{бл}}} = \sqrt{3 \cdot 1,663 \cdot 1,287} = 2,533 - \text{коэффициент блока.}$$

$$E-1 \approx \frac{(0,431 \cdot 0,591)^2}{2} \cdot (\ln(0,591 \cdot 2,533) - 0,75) = -0,011.$$

Рассчитаем коэффициент проигрыша:

$$f = 1 + \frac{(2,533 \cdot 0,375)^2}{8} - \frac{(2,533 \cdot 0,375)^4}{192} = 1,109.$$

Тогда коэффициент использования тепловых нейтронов будет равен:

$$\frac{1}{\theta} = 1 + 1,109 \cdot \frac{1,098 \cdot 0,047}{1,4 \cdot 1,287} - 0,011 = 1,09 \Rightarrow \theta = 0,918.$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		31

### 3 Расчет нейтронно-физических характеристик реактора на мощности

#### 3.1 Определение объемов компонентов активной зоны

Определим объемы компонентов активной зоны "горячего" реактора с учетом того, что произошло увеличение длины топливного столба до 370см.

$$V_{TBC} = S_{TBC} \cdot 10^4 \cdot H_{аз} \cdot 10^2 = 480,545 \cdot 370 = 1,778 \cdot 10^5 \text{ см}^3,$$

$$V_{гор} = \pi n_{твэл} H_{аз} 10^2 \left[ \frac{d_{табл}^2}{4} - \frac{d_{омв}^2}{4} \right] = 312 \cdot 3,14 \cdot 370 \left[ \frac{0,76^2}{4} - \frac{0,12^2}{4} \right] = 5,106 \cdot 10^4 \text{ см}^3,$$

$$V_{об.твэл} = \pi n_{твэл} H_{аз} 10^2 \left[ \frac{d_{тв.нар}^2}{4} - \frac{d_{тв.вн}^2}{4} \right] = 312 \cdot 3,14 \cdot 370 \left[ \frac{0,91^2}{4} - \frac{0,773^2}{4} \right] = 2,091 \cdot 10^4 \text{ см}^3,$$

$$V_{об.тр} = \pi (n_{нк} + n_{шт}) H_{аз} 10^2 \left[ \frac{d_{тр.нар}^2}{4} - \frac{d_{тр.вн}^2}{4} \right] = 19 \cdot 3,14 \cdot 370 \left[ \frac{1,3^2}{4} - \frac{1,1^2}{4} \right] = 2,65 \cdot 10^3 \text{ см}^3.$$

$$V_{He} = \pi n_{твэл} H_{аз} 10^2 \left[ \frac{d_{тв.вн}^2}{4} - \frac{d_{табл}^2}{4} + \frac{d_{омв}^2}{4} \right] = 312 \cdot 3,14 \cdot 370 \left[ \frac{0,773^2}{4} - \frac{0,76^2}{4} + \frac{0,12^2}{4} \right] = 3,112 \cdot 10^3 \text{ см}^3.$$

Объем дистанционирующих решеток:

$$V_{дист} = \frac{m_{дист} \cdot n_{дист}}{\rho_{дист}} = \frac{0,9 \cdot 10^6 \cdot 12}{6472} = 1,669 \cdot 10^3 \text{ см}^3,$$

где  $\rho_{дист} = 6636 - 0,286 \cdot T = 6636 - 0,286 \cdot (303 + 273) = 6472 \text{ кг} / \text{м}^3$  - плотность сплава Э110 при средней температуре теплоносителя в "горячем" реакторе [4].

Объемы конструкционных материалов и теплоносителя:

$$V_{км} = V_{об.твэл} + V_{об.тр} + V_{дист} = 2,091 \cdot 10^4 + 2,65 \cdot 10^3 + 1,669 \cdot 10^3 = 2,552 \cdot 10^4 \text{ см}^3,$$

$$V_{ми} = V_{твс} - V_{км} - V_{He} - V_{гор} = 1,778 \cdot 10^5 - 2,552 \cdot 10^4 - 3,112 \cdot 10^3 - 5,106 \cdot 10^4 = 9,84 \cdot 10^4 \text{ см}^3.$$

Все объемы эквивалентной ячейки отнесем к одному твэлу:

$$V_{гор} = \frac{V_{гор}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{5,106 \cdot 10^4}{312 \cdot 3,7 \cdot 10^2} = 0,442 \text{ см}^3,$$

$$V_{км} = \frac{V_{км}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{2,552 \cdot 10^4}{312 \cdot 3,7 \cdot 10^2} = 0,219 \text{ см}^3,$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		32



$$V_{mn} = \frac{V_{mn}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{9,84 \cdot 10^4}{312 \cdot 3,7 \cdot 10^2} = 0,852 \text{ см}^3,$$

$$V_{He} = \frac{V_{He}}{N_{твэл} \cdot H_{аз}} = \frac{3,112 \cdot 10^3}{312 \cdot 3,7 \cdot 10^2} = 0,027 \text{ см}^3,$$

$$V_{зм} = V_{км} + V_{mn} + V_{He} = 0,219 + 0,852 + 0,027 = 1,098 \text{ см}^3,$$

$$V_{бл} = V_{зоп} = 0,442 \text{ см}^3,$$

$$V_{яч} = V_{бл} + V_{зм} = 0,442 + 1,098 = 1,54 \text{ см}^3.$$

### 3.2 Определение нейтронно-физических характеристик на мощности 40% N<sub>ном</sub>

1) Расход теплоносителя через активную зону реактора с учетом изменения температуры теплоносителя:

$$G_{mn} = \frac{87000 \cdot \rho_{mn}}{3600} = \frac{87000 \cdot 725}{3600} = 17520,8 \text{ кг} / \text{с},$$

где  $\rho_{mn} = f(p_1, T_{mn}) = 725 \text{ кг} / \text{м}^3$ .

Через одну ТВС :  $G_{твс} = \frac{G_{аз}}{N_{твс}} = \frac{17520,8}{163} = 107,5 \text{ кг} / \text{с}.$

Средняя скорость теплоносителя через одну ТВС:

$$w = \frac{G_{твс}}{S_{mn} \cdot \rho_{mn}} = \frac{107,5}{0,025 \cdot 725} = 5,9 \text{ м} / \text{с}.$$

Площадь теплопередающей поверхности твэлов:

$$П = \pi d_{твэл.нар} n_{твэл} H_{аз} = 3,14 \cdot 0,0091 \cdot 312 \cdot 3,7 = 5,379 \cdot 10^3 \text{ м}^2.$$

2) Коэффициент теплоотдачи в пучках стержней найдем по зависимости:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}.$$

Критерий Рейнольдса определим по формуле:

$$Re = \frac{w d_2}{\nu_{ср}} = \frac{5,9 \cdot 0,011}{1,217 \cdot 10^{-7}} = 5,115 \cdot 10^5.$$

где  $Pr = f(p_{xp}, T_{xp}) = 0,8649$  – число Прандтля,

$\lambda = f(p_{xp}, T_{xp}) = 0,5585 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – теплопроводность теплоносителя,

$\nu_{cp} = f(p_{xp}, T_{xp}) = 1,217 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$  – коэффициент кинематической вязкости.

Тогда  $Nu = 0,021 \cdot (5,115 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,8649^{0,43} = 728$ .

Зная критерий Нуссельта определим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_2} = 728 \cdot \frac{0,5585}{0,011} = 3,837 \cdot 10^4 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \text{К}).$$

Тепловой поток при этом в будет равен:

$$q_f = \frac{Q}{\Pi} = \frac{1200}{5,379 \cdot 10^3} = 2,231 \cdot 10^5 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

3) Температура теплоносителя на мощности реактора  $40\%N_{\text{ном}}$   
 $t_{xp} = 300,9^\circ \text{C} = 574 \text{K}$ .

Температура на поверхности оболочки твэл средней мощности:

$$T_{cm} = T_f + \frac{\Delta T_f}{2} + \Delta T_\alpha,$$

где  $T_f = 300,9^\circ \text{C}$  - средняя температура теплоносителя в аз,

$\Delta T_f = T_2 - T_1 = 319 - 282,8 = 36,2^\circ \text{C}$  - полный подогрев теплоносителя в аз,

$\Delta T_\alpha = \frac{\overline{q_f}}{\alpha} = \frac{2,231 \cdot 10^5}{3,837 \cdot 10^4} = 6^\circ \text{C}$  - температурный напор "стенка-жидкость".

Отсюда получим, что наружная температура стенки твэла равна

$$T_{cm} = 300,9 + \frac{36,2}{2} + 6 = 325^\circ \text{C}.$$

4) Максимальное значение температуры топлива в твэл средней мощности:

$$T_{\text{max}} = T_{cm} + \Delta T_{об} + \Delta T_{зав} + \Delta T_{гор}.$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		34

Максимальный перепад на тонкой оболочке ТВЭЛ можно представить в виде:

$$\Delta T_{об} = \bar{q}_F \cdot \frac{2d_H}{d_H + d_B} \cdot \frac{\delta_{об}}{\lambda_{об}},$$

Процесс расчета максимального перепада температуры на оболочке твэла итерационный. Примем максимальную температуру на внутренней стенке оболочки  $T_{ст.вн} = 334^\circ C$ . Тогда средняя температура оболочки:

$$\bar{T}_c = \frac{T_{ст.вн} + T_{ст.нар}}{2} = \frac{335 + 3325}{2} = 330^\circ C.$$

По этой температуре находим из [4] для материала оболочки из сплава циркония с ниобием (1%) Э-110:

$$\lambda_{об} = 23,5 - 0,0192(\bar{T}_c + 273,15) + 1,68 \cdot 10^{-5} (\bar{T}_c + 273,15)^2 = 18,031 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$$

$$\Delta T_{об} = 2,231 \cdot 10^5 \cdot \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}}{9,1 \cdot 10^{-3} + 7,73 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{6,85 \cdot 10^{-4}}{18,031} = 9^\circ C.$$

Таким образом максимальный перепад температуры на оболочке твэла примем равной

$$T_{ст.вн} = T_{ст.нар} + \Delta T_{об} = 324 + 9 = 334^\circ C.$$

Таким образом максимальный перепад температуры на оболочке твэла примем равной  $\Delta T_{об}^{\max} = 9^\circ C$ .

5) Температурный перепад в газовом зазоре находим по формуле:

$$\Delta T_{заз}^{\max} = \bar{q}_F^{\max} \cdot \frac{2d_{тв.нар}}{d_{тв.вн} + d_{табл}} \cdot \frac{\delta_{заз}}{\lambda_{заз}},$$

Процесс расчета максимального перепада температуры в газовом зазоре также итерационный. В первом приближении примем максимальную температуру сердечника  $T_{серд.нар} = 388^\circ C$ . Тогда средняя температура газового зазора:

$$\bar{T}_{заз} = \frac{T_{ст.вн} + T_{серд.нар}}{2} = \frac{334 + 388}{2} = 361^\circ C.$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		35

По этой температуре при давлении 2 МПа находим из [4]

$$\overline{\lambda_{\text{газ}}} = 0,26107 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

$$\Delta T_{\text{газ}}^{\text{max}} = 2,231 \cdot 10^5 \cdot \frac{2 \cdot 7,73 \cdot 10^{-3}}{7,6 \cdot 10^{-3} + 7,73 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{6,5 \cdot 10^{-5}}{0,26107} = 56^\circ \text{C}.$$

Отсюда найдем максимальную внутреннюю температуру стенки твэла и максимальную температуру наружной поверхности топливного сердечника:

$$T_{\text{серд.нар}} = T_{\text{ст.вн}} + \Delta T_{\text{газ}} = 334 + 56 = 388^\circ \text{C}.$$

Максимальный перепад температуры в газовом зазоре примем равным  $\Delta T_{\text{газ}} = 56^\circ \text{C}$ .

б) Определим максимальный радиальный перепад на сердечнике твэла при постоянной теплопроводности.

Если пренебречь зависимостью профиля распределения плотности потока тепловых нейтронов, значение которого в поверхностных слоях топлива более высокое, и взять среднее значение энерговыделения, то получим:

$$T_{\text{гор}}(r) = T_{\text{серд.нар}} + \frac{\overline{q_v}}{4 \cdot \overline{\lambda_{\text{гор}}}} \left( \left( \frac{d_{\text{табл}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{оме}}}{2} \right)^2 \right),$$

$$\begin{aligned} \overline{q_v} &= \frac{Q}{N_{\text{аз}} \cdot \pi n_{\text{твэл}} \left( \left( \frac{d_{\text{табл}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{оме}}}{2} \right)^2 \right)} = \frac{1200}{\pi \cdot 3,7 \cdot 50856 \left( \left( \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right)} = \\ &= 1,442 \cdot 10^8 \text{ Вт} / \text{м}^3. \end{aligned}$$

Процесс расчета максимальной температуры топливного сердечника итерационный. Примем максимальную температуру топливного сердечника

$$T_{\text{серд}} = 508^\circ \text{C}.$$

Коэффициент теплопроводности для этой температуры найдем по формуле, приведенной в [2]:

$$\overline{\lambda_{\text{гор}}} = 10^2 \left( 3,77 + 0,0258 T_{\text{серд}} \right)^{-1} + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{серд}} + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot T_{\text{серд}}^3 \cdot \exp \left( 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{серд}} \right),$$

										Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата	ФЮРА.693100.001.ПЗ					36

$$\overline{\lambda}_{\text{гор}} = 10^2 (3,77 + 0,0258 \cdot 781,15)^{-1} + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 781,15 + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot 781,15^3 \cdot \exp(7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 781,15) =$$

$$= 4,274 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta T_{\text{гор}} = \frac{\overline{q}_v}{4 \cdot \overline{\lambda}_{\text{гор}}} \left( \left( \frac{d_{\text{табл}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{оме}}}{2} \right)^2 \right) = \frac{1,442 \cdot 10^8}{4 \cdot 4,274} \left( \left( \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) = 120^\circ \text{C}.$$

Максимальное значение температуры топлива в ТВЭЛ средней мощности:

$$T_{\text{серд.вн}} = T_{\text{серд.нар}} + \Delta T_{\text{гор}} = 388 + 120 = 508^\circ \text{C}.$$

7) Отсюда определим эффективную температуру топлива по формуле:

$$T_{\text{гор}}^{\text{эф}} = T_{\text{серд.нар}} + 0,4 \cdot (T_{\text{серд.вн}} - T_{\text{серд.нар}}) = 438^\circ \text{C}.$$

Ядерная плотность топлива также изменится с увеличением топливного столба :

$$\gamma_{\text{Gd203}} = \frac{m_{\text{Gd203}}}{\pi H_{\text{аз}} \left[ \frac{d_{\text{табл}}^2}{4} - \frac{d_{\text{оме}}^2}{4} \right]} = \frac{2,04}{3,14 \cdot 370 \left[ \frac{0,76^2}{4} - \frac{0,12^2}{4} \right]} = 0,012 \text{ г} / \text{см}^3.$$

$$\gamma_{\text{UO2}} = \frac{m_{\text{UO2}}}{\pi H_{\text{аз}} \left[ \frac{d_{\text{табл}}^2}{4} - \frac{d_{\text{оме}}^2}{4} \right]} = \frac{1689}{3,14 \cdot 370 \left[ \frac{0,76^2}{4} - \frac{0,12^2}{4} \right]} = 10,32 \text{ г} / \text{см}^3.$$

1) Тогда концентрации компонентов активной зоны будут равны:

$$N_{\text{UO2}} = \frac{N_a \gamma_{\text{UO2}}}{A_{\text{UO2}}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,32}{269,9} = 2,303 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{Gd203}} = \frac{N_a \gamma_{\text{Gd203}}}{M_{\text{Gd203}}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,012}{362,52} = 2,071 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Расчет концентраций отдельных элементов, ходящих в состав топлива:

$$N_{\text{U5}} = \frac{c_5}{100} N_{\text{UO2}} = \frac{2,96}{100} \cdot 2,303 \cdot 10^{22} = 6,815 \cdot 10^{20} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{U8}} = \frac{100 - c_5}{100} N_{\text{UO2}} = \frac{(100 - 2,96)}{100} \cdot 2,303 \cdot 10^{22} = 2,235 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{Gd}} = 2 N_{\text{Gd203}} = 2 \cdot 2,071 \cdot 10^{19} = 4,143 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_o = 2N_{UO_2} + 3N_{Gd_2O_3} = 2 \cdot 2,303 \cdot 10^{22} + 3 \cdot 2,071 \cdot 10^{19} = 4,612 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{H_2O} = \frac{N_a \rho_{\text{ми}}}{A_{H_2O}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,725}{18} = 2,426 \cdot 10^{22} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3},$$

$$N_{\text{бк}} = \frac{N_a \rho_{\text{ми}} c_{\text{бк}}}{M_{\text{бк}}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 0,725 \cdot 0,00981}{3 \cdot 1 + 11 + 16 \cdot 3} = 6,909 \cdot 10^{19} \frac{\text{ядер}}{\text{см}^3}.$$

Находим значения эффективных микроскопических сечений по [3].

Таблица 11 - Таблица эффективных микроскопических сечений

Эл.т	$V_i,$ $\text{см}^3$	$N_i \cdot 10^{-22},$ $\text{см}^{-3}$	$\sigma_a,$ барн	$\sigma_s,$ барн	$\xi$	$VN\sigma_a,$ $\text{см}^{-1}$	$VN\sigma_s\xi,$ $\text{см}^{-1}$
U <sub>5</sub>	0,442	0,06815	680,9	13,8	0,0085	0,205	$3,536 \cdot 10^{-5}$
U <sub>8</sub>	0,442	2,235	2,71	8,9	0,0084	0,027	$7,39 \cdot 10^{-4}$
O <sub>гор</sub>	0,442	4,612	0,00027	3,76	0,12	$5,508 \cdot 10^{-6}$	$9,205 \cdot 10^{-3}$
Gd	0,442	0,004143	37340	-	0,0127	0,684	0
H <sub>2</sub> O	0,852	2,426	0,664	48	0,954	0,014	0,947
Zr	0,219	4,226	0,185	6,4	0,0218	$1,708 \cdot 10^{-3}$	$1,288 \cdot 10^{-3}$
He	0,027	0,002686	0,007	0,8	0,425	$5,069 \cdot 10^{-9}$	$2,462 \cdot 10^{-7}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,852	0,006909	760	76,1	0,83	0,045	$3,719 \cdot 10^{-3}$

Температура нейтронного газа:

$$T_{\text{нг}} = T_0 \cdot \left[ 1 + C \cdot \left( \frac{\sum_a(T_0)}{\xi \sum_s(1)} \right) \right]$$

$$\sum_a(T_0) = \sum_{j=1} (VN\sigma_a(0,0253)) \cdot \sqrt{\frac{293,6}{T_0}},$$

$$\Sigma_a(T_0) = \frac{0,205 + 0,027 + 5,508 \cdot 10^{-6} + 0,684 + 0,014 + 1,708 \cdot 10^{-3} + 5,069 \cdot 10^{-9} + 0,045}{1,54}$$

$$\sqrt{\frac{293,6}{574}} = 0,453 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi \Sigma_s(1) = \sum_{j=1} \frac{(VN \xi \sigma_s(1))}{V_0},$$

$$\xi \Sigma_s(1) = \frac{3,536 \cdot 10^{-5} + 7,39 \cdot 10^{-4} + 9,205 \cdot 10^{-3} + 0,947 + 1,288 \cdot 10^{-3} + 2,462 \cdot 10^{-7} + 3,719 \cdot 10^{-3}}{1,54} =$$

$$= 0,625 \text{ см}^{-1}.$$

$$T_{HR} = 574 \cdot \left[ 1 + 1,7 \cdot \left( \frac{0,453}{0,625} \right) \right] = 1283 \text{ K}.$$

Определим энергию сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов.

Сечение поглощения отдельных элементов, усреднённых по спектру Максвелла:

$$\bar{\sigma}_a^i(E) = 0,886 \cdot \sigma_a^i \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{нг}}} F(x_{2p})$$

Таблица 12 - Значения  $\bar{\sigma}_a^i(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 2$	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 6$
	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн
U <sub>5</sub>	327,8	276,9	266,3
U <sub>8</sub>	1,428	1,206	1,16
O <sub>гор</sub>	$1,423 \cdot 10^{-4}$	$1,202 \cdot 10^{-4}$	$1,156 \cdot 10^{-4}$
Gd	$1,968 \cdot 10^4$	$1,662 \cdot 10^4$	$1,599 \cdot 10^4$
H <sub>2</sub> O	0,35	0,296	0,284
Zr	0,098	0,082	0,079
He	$3,689 \cdot 10^{-3}$	$3,116 \cdot 10^{-3}$	$2,997 \cdot 10^{-3}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	400,6	338,3	325,4

Таблица 13 - Значения  $\overline{VN\sigma_a^i}$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

	$x_{гр} = 2$	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 6$
Элемент	$\overline{VN\sigma_a^i}, \text{см}^{-1}$	$\overline{VN\sigma_a^i}, \text{см}^{-1}$	$\overline{VN\sigma_a^i}, \text{см}^{-1}$
U <sub>5</sub>	0,099	0,083	0,08
U <sub>8</sub>	0,014	0,012	0,011
O <sub>гор</sub>	$2,903 \cdot 10^{-6}$	$2,452 \cdot 10^{-6}$	$2,359 \cdot 10^{-6}$
Gd	0,361	0,305	0,293
H <sub>2</sub> O	$7,237 \cdot 10^{-3}$	$6,113 \cdot 10^{-3}$	$5,88 \cdot 10^{-3}$
Zr	$9,003 \cdot 10^{-4}$	$7,604 \cdot 10^{-4}$	$7,315 \cdot 10^{-4}$
He	$2,672 \cdot 10^{-9}$	$2,257 \cdot 10^{-9}$	$2,171 \cdot 10^{-9}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,024	0,02	0,019
f <sub>прав</sub>	0,525	0,444	0,427

При расчете учитываем, что  $^{235}\text{U}$  не подчиняется закону  $1/\nu$ . Усреднение сечения поглощения по спектру Максвелла для этого элемента можно найти применяя  $g_{a5}$ - фактор, который можно определить с помощью [3] ( $g_{a5}=0,913$ ).

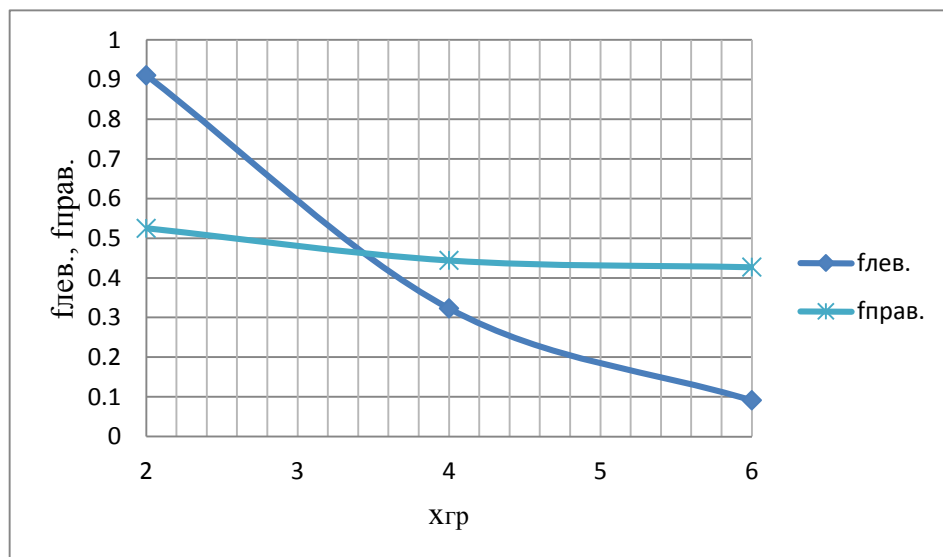


Рисунок 6 – Определение граничной энергии



В точке пересечения этих графиков находим точку  $x_{гр}$  и определяем его:  
 $x_{гр} = 3,43$ .

$E_{сп} = x_{сп} \cdot E_m = 3,43 \cdot 0,0253 = 0,087 \text{ эВ}$  – это и есть энергия сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов.

Произведем расчет сечений, усредненных по спектру Максвелла.

При  $x_{гр} = 3,43 : F(x_{сп}) = 0,8779 \cdot x^{-1} + 0,01471 \cdot x + 0,7735 = 1,078$ .

Таблица 14 - Значения  $\bar{\sigma}_a^i(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 3,43$	$(1 - \mu_i)$
	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	
U <sub>5</sub>	284,2	0,997
U <sub>8</sub>	1,239	0,997
O <sub>гор</sub>	$1,234 \cdot 10^{-4}$	0,958
Gd	$1,707 \cdot 10^4$	0,996
H <sub>2</sub> O	0,303	0,963
Zr	0,085	0,993
He	$3,199 \cdot 10^{-3}$	0,833
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	347,4	0,989

Таблица 15 - Усреднённые сечения по спектру Максвелла

Эл-т	$\overline{\sigma}_a$ , барн	$\overline{\sigma}_f$ , барн	$\overline{\sigma}_{tr}$ , барн	$VN\overline{\sigma}_a$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma}_f$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma}_{tr}$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>5</sub>	284,2	238,5	297,9	0,086	0,072	0,09
U <sub>8</sub>	1,239	-	10,114	0,012	-	0,1
O <sub>гор</sub>	1,234·10 <sup>-4</sup>	-	3,603	2,518·10 <sup>-6</sup>	-	0,074
Gd	1,707·10 <sup>4</sup>	-	1,707·10 <sup>4</sup>	0,313	-	0,313
H <sub>2</sub> O	0,303	-	46,526	6,276·10 <sup>-3</sup>	-	0,962
Zr	0,085	-	6,438	7,807·10 <sup>-4</sup>	-	0,059
He	3,199·10 <sup>-3</sup>	-	0,67	2,317·10 <sup>-9</sup>	-	4,851·10 <sup>-7</sup>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	347,4		422,6	0,02		0,025

Таблица 16 - Макроскопические сечения

	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$
ЭЯ	0,284	1,053	0,047
БЛ	0,928	1,302	0,047
ЗМ	0,025	0,953	0

### 3.3 Мощность реактора 75%N<sub>ном</sub>

Определим эффективную температуру топлива.

1) При изменении температуры теплоносителя также изменится расход теплоносителя через активную зону:

$$G_{mn} = \frac{87000 \cdot \rho_{mn}}{3600} = \frac{87000 \cdot 722,5}{3600} = 17460,4 \text{ кг / с},$$

где  $\rho_{mn} = f(p_1, T_{mn}) = 722,5 \text{ кг / м}^3$ .

Через одну ТВС :  $G_{\text{твс}} = \frac{G_{\text{аз}}}{N_{\text{твс}}} = \frac{17460,4}{163} = 107,1 \text{ кг} / \text{с}.$

Тогда средняя скорость теплоносителя через одну ТВС:

$$w = \frac{G_{\text{твс}}}{S_{\text{тн}} \cdot \rho_{\text{тн}}} = \frac{107,1}{0,025 \cdot 722,5} = 5,87 \text{ м} / \text{с}.$$

2) Коэффициент теплоотдачи в пучках стержней найдем по зависимости:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}.$$

Критерий Рейнольдса определим по формуле:

$$Re = \frac{w d_z}{\nu_{\text{ср}}} = \frac{5,87 \cdot 0,011}{1,215 \cdot 10^{-7}} = 5,109 \cdot 10^5.$$

где  $Pr = f(p_{\text{хр}}, T_{\text{хр}}) = 0,8685$  – число Прандтля,

$\lambda = f(p_{\text{хр}}, T_{\text{хр}}) = 0,5562 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$  – теплопроводность теплоносителя,

$\nu_{\text{ср}} = f(p_{\text{хр}}, T_{\text{хр}}) = 1,215 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$  – коэффициент кинематической вязкости.

Тогда  $Nu = 0,021 \cdot (5,124 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,8685^{0,43} = 730.$

Зная критерий Нуссельта определим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_z} = 730 \cdot \frac{0,5585}{0,011} = 3,833 \cdot 10^4 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Тепловой поток при этом в "горячем" реакторе будет равен:

$$q_f = \frac{Q}{\Pi} = \frac{2250}{5,379 \cdot 10^3} = 4,183 \cdot 10^5 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

3) Температура теплоносителя на мощности реактора  $75\% N_{\text{ном}}$

$$t_{\text{хр}} = 302,1^\circ \text{C} = 575,3 \text{ К}.$$

Температура на поверхности оболочки твэл средней мощности:

$$T_{\text{ст}} = T_f + \frac{\Delta T_f}{2} + \Delta T_\alpha,$$

где  $T_f = 302,1^\circ \text{C}$  - средняя температура теплоносителя в аз,

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		43

$$\Delta T_f = T_2 - T_1 = 319 - 285,2 = 33,8^\circ C - \text{полный подогрев теплоносителя в}$$

аз,

$$\Delta T_\alpha = \frac{\bar{q}_F}{\alpha} = \frac{4,183 \cdot 10^5}{3,841 \cdot 10^4} = 11^\circ C - \text{температурный напор "стенка-жидкость".}$$

Отсюда получим, что наружная температура стенки твэла равна

$$T_{cm} = 302,1 + \frac{33,8}{2} + 11 = 330^\circ C.$$

4) Максимальное значение температуры топлива в твэле средней мощности:

$$T_{max} = T_{cm} + \Delta T_{об} + \Delta T_{газ} + \Delta T_{гор}.$$

Максимальный перепад на тонкой оболочке ТВЭЛ можно представить в виде:

$$\Delta T_{об} = \bar{q}_F \cdot \frac{2d_H}{d_H + d_B} \cdot \frac{\delta_{об}}{\lambda_{об}},$$

Примем максимальную температуру на внутренней стенке оболочки  $T_{ст.вн} = 347^\circ C$ . Тогда средняя температура оболочки:

$$\bar{T}_c = \frac{T_{ст.вн} + T_{ст.нар}}{2} = \frac{347 + 330}{2} = 339^\circ C.$$

По этой температуре находим из [4] для материала оболочки из сплава циркония с ниобием (1%) Э-110:

$$\lambda_{об} = 23,5 - 0,0192(\bar{T}_c + 273,15) + 1,68 \cdot 10^{-5} (\bar{T}_c + 273,15)^2 = 18,041 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$$

$$\Delta T_{об} = 4,183 \cdot 10^5 \cdot \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}}{9,1 \cdot 10^{-3} + 7,73 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{6,85 \cdot 10^{-4}}{18,041} = 17^\circ C.$$

Таким образом максимальный перепад температуры на оболочке твэла примем равной

$$T_{ст.вн} = T_{ст.нар} + \Delta T_{об} = 330 + 17 = 347^\circ C.$$

Таким образом максимальный перепад температуры на оболочке твэла примем равной  $\Delta T_{об}^{max} = 17^\circ C$ .

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
						44
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

5) Температурный перепад в газовом зазоре находим по формуле:

$$\Delta T_{\text{заз}}^{\text{max}} = \bar{q}_F^{\text{max}} \cdot \frac{2d_{\text{тв.нар}}}{d_{\text{тв.вн}} + d_{\text{табл}}} \cdot \frac{\delta_{\text{заз}}}{\lambda_{\text{заз}}},$$

В первом приближении примем максимальную температуру сердечника

$T_{\text{серд.нар}} = 447^\circ \text{C}$ . Тогда средняя температура газового зазора:

$$\bar{T}_{\text{заз}} = \frac{T_{\text{ст.вн}} + T_{\text{серд.нар}}}{2} = \frac{447 + 347}{2} = 398^\circ \text{C}.$$

По этой температуре при давлении 2 МПа находим из [4]

$$\bar{\lambda}_{\text{заз}} = 0,273712 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

$$\Delta T_{\text{заз}}^{\text{max}} = 4,183 \cdot 10^5 \cdot \frac{2 \cdot 7,73 \cdot 10^{-3}}{7,6 \cdot 10^{-3} + 7,73 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{6,5 \cdot 10^{-5}}{0,273712} = 100^\circ \text{C}.$$

Максимальная внутренняя температура стенки твэла и максимальная температура наружной поверхности топливного сердечника:

$$T_{\text{серд.нар}} = T_{\text{ст.вн}} + \Delta T_{\text{заз}} = 347 + 100 = 447^\circ \text{C}.$$

Максимальный перепад температуры в газовом зазоре примем равным

$$\Delta T_{\text{заз}} = 100^\circ \text{C}.$$

6) Определим максимальный радиальный перепад на сердечнике твэла при постоянной теплопроводности.

Среднее значение энерговыделения:

$$\begin{aligned} \bar{q}_v &= \frac{Q}{N_{\text{аз}} \cdot \pi n_{\text{твэл}} \left( \left( \frac{d_{\text{табл}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{оме}}}{2} \right)^2 \right)} = \frac{2250}{\pi \cdot 3,7 \cdot 50856 \left( \left( \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right)} = \\ &= 2,703 \cdot 10^8 \text{ Вт / м}. \end{aligned}$$

Примем максимальную температуру топливного сердечника  $T_{\text{серд}} = 715^\circ \text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности для этой температуры найдем по формуле, приведенной в [5]:

$$\bar{\lambda}_{\text{гор}} = 10^2 \left( 3,77 + 0,0258 T_{\text{серд}} \right)^{-1} + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{серд}} + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot T_{\text{серд}}^3 \cdot \exp \left( 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{серд}} \right),$$

$$\overline{\lambda_{\text{гор}}} = 10^2 (3,77 + 0,0258 \cdot 988)^{-1} + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 988 + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot 988^3 \cdot \exp(7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 988) = 3,546 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta T_{\text{гор}} = \frac{\overline{q_v}}{4 \cdot \overline{\lambda_{\text{гор}}}} \left( \left( \frac{d_{\text{табл}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{омг}}}{2} \right)^2 \right) = \frac{2,703 \cdot 10^8}{4 \cdot 3,546} \left( \left( \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) = 268^\circ \text{C}.$$

Максимальное значение температуры топлива в твэле средней мощности:

$$T_{\text{серд.вн}} = T_{\text{серд.нар}} + \Delta T_{\text{гор}} = 447 + 268 = 715^\circ \text{C}.$$

7) Эффективная температура топлива:

$$T_{\text{гор}}^{\text{эф}} = T_{\text{серд.нар}} + 0,4 \cdot (T_{\text{серд.вн}} - T_{\text{серд.нар}}) = 555^\circ \text{C}.$$

Определим ядерную и молекулярную плотности нуклидов. Находим значения эффективных микроскопических сечений по [3].

Таблица 17 - Таблица эффективных микроскопических сечений

Эл.т	$V_i$ , см <sup>3</sup>	$N_i \cdot 10^{-22}$ , см <sup>-3</sup>	$\sigma_a$ , барн	$\sigma_s$ , барн	$\xi$	$VN\sigma_a$ , см <sup>-1</sup>	$VN\sigma_s\xi$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>5</sub>	0,442	0,06815	680,9	13,8	0,0085	0,205	$3,536 \cdot 10^{-5}$
U <sub>8</sub>	0,442	2,235	2,71	8,9	0,0084	0,027	$7,39 \cdot 10^{-4}$
O <sub>гор</sub>	0,442	4,612	0,00027	3,76	0,12	$5,508 \cdot 10^{-6}$	$9,205 \cdot 10^{-3}$
Gd	0,442	0,004143	37340	-	0,0127	0,684	0
H <sub>2</sub> O	0,853	2,418	0,664	48	0,954	0,014	0,944
Zr	0,218	4,226	0,185	6,4	0,0218	$1,707 \cdot 10^{-3}$	$1,287 \cdot 10^{-3}$
He	0,027	0,002686	0,007	0,8	0,425	$5,069 \cdot 10^{-9}$	$2,462 \cdot 10^{-7}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,853	0,006885	760	76,08	0,83	0,045	$3,707 \cdot 10^{-3}$

Температура нейтронного газа:

$$T_{нз} = T_0 \cdot \left[ 1 + C \cdot \left( \frac{\Sigma_a(T_0)}{\xi \Sigma_s(1)} \right) \right].$$

где  $T_0 = 302,1^\circ C = 575,3 K$  – средняя температура по элементарной ячейке.

$$\Sigma_a(T_0) = \sum_{j=1} \frac{(VN\sigma_a(0,0253))}{V_0} \cdot \sqrt{\frac{293,6}{T_0}},$$

$$\Sigma_a(T_0) = \frac{0,205 + 0,027 + 5,508 \cdot 10^{-4} + 0,684 + 0,014 + 1,707 \cdot 10^{-3} + 5,069 \cdot 10^{-9} + 0,045}{1,54}$$

$$\cdot \sqrt{\frac{293,6}{575,3}} = 0,453 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi \Sigma_s(1) = \sum_{j=1} \frac{(VN\xi\sigma_s(1))}{V_0},$$

$$\xi \Sigma_s(1) = \frac{3,536 \cdot 10^{-5} + 7,39 \cdot 10^{-4} + 9,205 \cdot 10^{-3} + 0,944 + 1,287 \cdot 10^{-3} + 2,462 \cdot 10^{-7} + 3,707 \cdot 10^{-3}}{1,54} =$$

$$= 0,623 \text{ см}^{-1}.$$

$$T_{нз} = 575,3 \cdot \left[ 1 + 1,7 \cdot \left( \frac{0,453}{0,623} \right) \right] = 1287 K.$$

Энергии сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов. Сечение поглощения отдельных элементов, усреднённые по спектру Максвелла.

$$\bar{\sigma}_a^i(E) = 0,886 \cdot \sigma_a^i \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{нз}}} F(x_{2p})$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		47

Таблица 18 - Значения  $\overline{\sigma}_a^i(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 2$	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 6$
	$\overline{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\overline{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\overline{\sigma}_a^i(E)$ , барн
U <sub>5</sub>	327,2	276,4	265,8
U <sub>8</sub>	1,426	1,205	1,159
O <sub>гор</sub>	$1,421 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,154 \cdot 10^{-4}$
Gd	$1,965 \cdot 10^4$	$1,66 \cdot 10^4$	$1,596 \cdot 10^4$
H <sub>2</sub> O	0,349	0,295	0,284
Zr	0,097	0,082	0,079
He	$3,684 \cdot 10^{-3}$	$3,111 \cdot 10^{-3}$	$2,993 \cdot 10^{-3}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	399,9	337,8	324,9

Таблица 19 - Значения  $\overline{vN\sigma}_a^i$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 2$	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 6$
	$\overline{vN\sigma}_a^i$ , см <sup>-1</sup>	$\overline{vN\sigma}_a^i$ , см <sup>-1</sup>	$\overline{vN\sigma}_a^i$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>5</sub>	0,099	0,083	0,08
U <sub>8</sub>	0,014	0,012	0,011
O <sub>гор</sub>	$2,899 \cdot 10^{-6}$	$2,448 \cdot 10^{-6}$	$2,355 \cdot 10^{-6}$
Gd	0,36	0,304	0,293
H <sub>2</sub> O	$7,202 \cdot 10^{-3}$	$6,083 \cdot 10^{-3}$	$5,851 \cdot 10^{-3}$
Zr	$8,982 \cdot 10^{-4}$	$7,586 \cdot 10^{-4}$	$7,297 \cdot 10^{-4}$
He	$2,667 \cdot 10^{-9}$	$2,253 \cdot 10^{-9}$	$2,167 \cdot 10^{-9}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,023	0,02	0,019
f <sub>прав</sub>	0,526	0,444	0,427



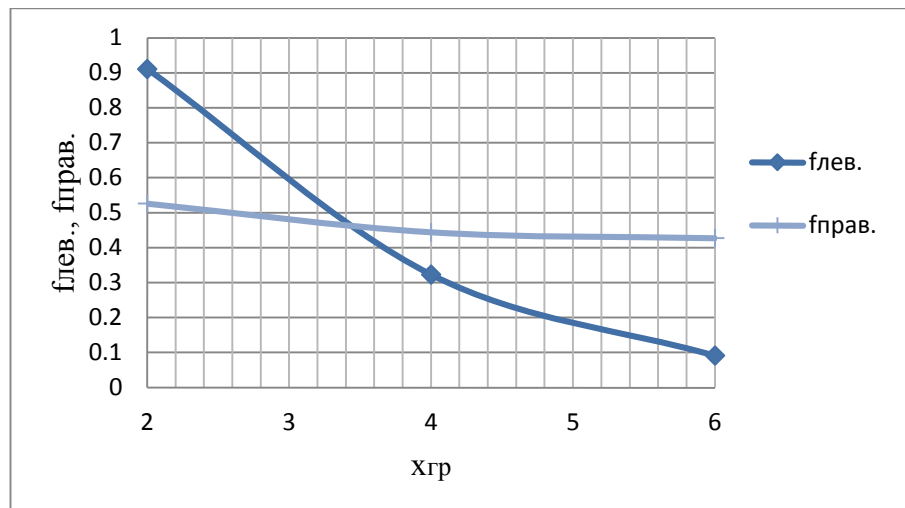


Рисунок 7 – Определение граничной энергии

В точке пересечения этих графиков находим точку  $x_{гр}$  и определяем его:

$$x_{гр} = 3,44.$$

$$E_{сп} = x_{сп} \cdot E_m = 3,44 \cdot 0,0253 = 0,087 \text{ эВ} - \text{энергия сшивки.}$$

### 3.3.5 Расчет сечений, усредненных по спектру Максвелла

$$\text{При } x_{гр} = 3,44 : F(x_{сп}) = 0,8779 \cdot x^{-1} + 0,01471 \cdot x + 0,7735 = 1,078.$$

Таблица 20 - Значения  $\bar{\sigma}_a^i(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 3,44$	$(1 - \mu_i)$
	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	
U <sub>5</sub>	283,6	0,997
U <sub>8</sub>	1,236	0,997
O <sub>гор</sub>	$1,231 \cdot 10^{-4}$	0,958
Gd	$1,703 \cdot 10^4$	0,996
H <sub>2</sub> O	0,303	0,963
Zr	0,084	0,993
He	$3,193 \cdot 10^{-3}$	0,833
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	346,6	0,989

Таблица 21 - Усреднённые сечения по спектру Максвелла

Эл-т	$\overline{\sigma}_a$ , барн	$\overline{\sigma}_f$ , барн	$\overline{\sigma}_{tr}$ , барн	$VN\overline{\sigma}_a$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma}_f$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma}_{tr}$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>5</sub>	283,6	237,9	297,4	0,085	0,072	0,09
U <sub>8</sub>	1,236	-	10,11	0,012	-	0,1
O <sub>гор</sub>	1,231·10 <sup>-4</sup>	-	3,603	2,512·10 <sup>-6</sup>	-	0,074
Gd	1,703·10 <sup>4</sup>	-	1,703·10 <sup>4</sup>	0,312	-	0,312
H <sub>2</sub> O	0,303	-	46,53	6,242·10 <sup>-3</sup>	-	0,959
Zr	0,084	-	6,438	7,784·10 <sup>-4</sup>	-	0,059
He	3,193·10 <sup>-3</sup>	-	0,67	2,312·10 <sup>-9</sup>	-	4,851·10 <sup>-7</sup>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	346,6	-	421,9	0,02	-	0,025

Таблица 22 - Макроскопические сечения

	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$
ЭЯ	0,284	1,051	0,047
БЛ	0,926	1,300	0,047
ЗМ	0,025	0,950	0

### 3.4 Мощность реактора 100%N<sub>ном</sub>

Определим эффективную температуру топлива.

1) Расход теплоносителя через активную зону:

$$G_{mn} = \frac{87000 \cdot \rho_{mn}}{3600} = \frac{87000 \cdot 720,3}{3600} = 17407,3 \text{ кг / с},$$

где  $\rho_{mn} = f(p_1, T_{mn}) = 720,3 \text{ кг / м}^3$ .

Через одну ТВС :  $G_{мс} = \frac{G_{аз}}{N_{мс}} = \frac{17407,3}{163} = 106,8 \text{ кг / с}.$

Средняя скорость теплоносителя через одну ТВС:

$$w = \frac{G_{\text{теп}}}{S_{\text{теп}} \cdot \rho_{\text{теп}}} = \frac{106,8}{0,025 \cdot 720,3} = 5,87 \text{ м/с.}$$

2) Коэффициент теплоотдачи в пучках стержней найдем по зависимости:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}.$$

Критерий Рейнольдса определим по формуле:

$$Re = \frac{w d_z}{\nu_{\text{ср}}} = \frac{5,87 \cdot 0,011}{1,213 \cdot 10^{-7}} = 5,132 \cdot 10^5.$$

$$Pr = f(p_1, T_{\text{теп}}) = 0,8718$$

$$\lambda = f(p_1, T_{\text{теп}}) = 0,5543 \text{ Вт / (м} \cdot \text{К)}$$

$$\nu_{\text{ср}} = f(p_1, T_{\text{теп}}) = 1,213 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с.}$$

$$\text{Тогда } Nu = 0,021 \cdot (5,132 \cdot 10^5)^{0,8} \cdot 0,8718^{0,43} = 732,5.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d_z} = 732,5 \cdot \frac{0,5543}{0,011} = 3,831 \cdot 10^4 \text{ Вт / (м}^2 \text{К)}.$$

Тепловой поток при этом в "горячем" реакторе будет равен:

$$q_f = \frac{Q}{\Pi} = \frac{3000}{5,379 \cdot 10^3} = 5,577 \cdot 10^5 \text{ Вт / м}^2.$$

3) Температура теплоносителя на мощности реактора  $100\% N_{\text{ном}}$   
 $t_{\text{теп}} = 303,15^\circ \text{C} = 576,3 \text{ К.}$

Температура на поверхности оболочки твэл средней мощности:

$$T_{\text{ст}} = T_f + \frac{\Delta T_f}{2} + \Delta T_\alpha,$$

где  $T_f = 303,15^\circ \text{C}$  - средняя температура теплоносителя в аз,

$\Delta T_f = T_2 - T_1 = 319 - 287,3 = 31,7^\circ \text{C}$  - полный подогрев теплоносителя в аз,

$\Delta T_\alpha = \frac{\overline{q_f}}{\alpha} = \frac{5,577 \cdot 10^5}{3,831 \cdot 10^4} = 15^\circ \text{C}$  - температурный напор "стенка-жидкость".

Наружная температура стенки твэла равна  $T_{\text{ст}} = 303,15 + \frac{31,7}{2} + 15 = 334^\circ \text{C}$ .

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		51

4) Максимальное значение температуры топлива в ТВЭЛ средней

МОЩНОСТИ:

$$T_{\max} = T_{\text{ст}} + \Delta T_{\text{об}} + \Delta T_{\text{газ}} + \Delta T_{\text{гор}}.$$

$$\Delta T_{\text{об}} = \bar{q}_F \cdot \frac{2d_H}{d_H + d_B} \cdot \frac{\delta_{\text{об}}}{\lambda_{\text{об}}},$$

Примем максимальную температуру на внутренней стенке оболочки

$T_{\text{ст.вн}} = 357^\circ \text{C}$ . Средняя температура оболочки:

$$\bar{T}_c = \frac{T_{\text{ст.вн}} + T_{\text{ст.нар}}}{2} = \frac{357 + 334}{2} = 345^\circ \text{C}.$$

По этой температуре находим из [4] для материала оболочки из сплава циркония с ниобием (1%) Э-110:

$$\lambda_{\text{об}} = 23,5 - 0,0192(\bar{T}_c + 273,15) + 1,68 \cdot 10^{-5} (\bar{T}_c + 273,15)^2 = 18,051 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$$

$$\Delta T_{\text{об}} = 5,577 \cdot 10^5 \cdot \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-3}}{9,1 \cdot 10^{-3} + 7,73 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{6,85 \cdot 10^{-4}}{18,051} = 23^\circ \text{C}.$$

Таким образом максимальный перепад температуры на оболочке ТВЭЛ примем равной

$$T_{\text{ст.вн}} = T_{\text{ст.нар}} + \Delta T_{\text{об}} = 334 + 23 = 357^\circ \text{C}.$$

Таким образом максимальный перепад температуры на оболочке ТВЭЛ примем равной  $\Delta T_{\text{об}}^{\max} = 23^\circ \text{C}$ .

5) Температурный перепад в газовом зазоре:

$$\Delta T_{\text{газ}}^{\max} = \bar{q}_F^{\max} \cdot \frac{2d_{\text{тв.нар}}}{d_{\text{тв.вн}} + d_{\text{табл}}} \cdot \frac{\delta_{\text{газ}}}{\lambda_{\text{газ}}},$$

В первом приближении примем максимальную температуру сердечника

$$T_{\text{серд.нар}} = 480^\circ \text{C}.$$

Средняя температура газового зазора  $\bar{T}_{\text{газ}} = \frac{T_{\text{ст.вн}} + T_{\text{серд.нар}}}{2} = \frac{480 + 357}{2} = 422^\circ \text{C}$ .

По этой температуре при давлении 2 МПа находим из [4]  $\bar{\lambda}_{\text{газ}} = 0,29694 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

										Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата						52

$$\Delta T_{\text{газ}}^{\text{max}} = 5,577 \cdot 10^5 \cdot \frac{2 \cdot 7,73 \cdot 10^{-3}}{7,6 \cdot 10^{-3} + 7,73 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{6,5 \cdot 10^{-5}}{0,29694} = 123^{\circ} \text{C}.$$

Максимальная внутренняя температура стенки твэла и максимальная температура наружной поверхности топливного сердечника:

$$T_{\text{серд.нар}} = T_{\text{ст.вн}} + \Delta T_{\text{газ}} = 357 + 123 = 480^{\circ} \text{C}.$$

Максимальный перепад температуры в газовом зазоре примем равным  $\Delta T_{\text{газ}} = 123^{\circ} \text{C}$ .

б) Максимальный радиальный перепад на сердечнике твэла при постоянной теплопроводности.

$$\begin{aligned} \bar{q}_v &= \frac{Q}{H_{\text{аз}} \cdot \pi n_{\text{твэл}} \left( \left( \frac{d_{\text{мабл}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{оме}}}{2} \right)^2 \right)} = \frac{3000}{\pi \cdot 3,7 \cdot 50856 \left( \left( \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right)} = \\ &= 3,604 \cdot 10^8 \text{ Вт} / \text{м}^3. \end{aligned}$$

Примем максимальную температуру топливного сердечника  $T_{\text{серд}} = 885^{\circ} \text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности для этой температуры найдем по формуле, приведенной в [5]:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_{\text{гор}} &= 10^2 \left( 3,77 + 0,0258 T_{\text{серд}} \right)^{-1} + 1,1 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{серд}} + 1,01 \cdot 10^{-11} \cdot T_{\text{серд}}^3 \cdot \exp \left( 7,2 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{серд}} \right) = \\ &= 3,135 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}. \\ \Delta T_{\text{гор}} &= \frac{\bar{q}_v}{4 \cdot \bar{\lambda}_{\text{гор}}} \left( \left( \frac{d_{\text{мабл}}}{2} \right)^2 - \left( \frac{d_{\text{оме}}}{2} \right)^2 \right) = \frac{3,604 \cdot 10^8}{4 \cdot 3,135} \left( \left( \frac{7,6 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 - \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \right) = 405^{\circ} \text{C}. \end{aligned}$$

Максимальное значение температуры топлива в твэл средней мощности:

$$T_{\text{серд.вн}} = T_{\text{серд.нар}} + \Delta T_{\text{гор}} = 480 + 405 = 885^{\circ} \text{C}.$$

7) Эффективная температура топлива:

$$T_{\text{гор}}^{\text{эф}} = T_{\text{серд.нар}} + 0,4 \cdot \left( T_{\text{серд.вн}} - T_{\text{серд.нар}} \right) = 641^{\circ} \text{C}.$$

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		53

Таблица 23 - Таблица эффективных микроскопических сечений

Эл.Т	$V_i$ , см <sup>3</sup>	$N_i \cdot 10^{-22}$ , см <sup>-3</sup>	$\sigma_a$ , барн	$\sigma_s$ , барн	$\xi$	$VN\sigma_a$ , см <sup>-1</sup>	$VN\sigma_s\xi$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>5</sub>	0,442	0,06815	680,9	13,8	0,0085	0,205	$3,536 \cdot 10^{-5}$
U <sub>8</sub>	0,442	2,235	2,71	8,9	0,0084	0,027	$7,39 \cdot 10^{-4}$
O <sub>гор</sub>	0,442	4,612	0,00027	3,76	0,12	$5,508 \cdot 10^{-6}$	$9,205 \cdot 10^{-3}$
Gd	0,442	0,004143	37340	-	0,0127	0,684	0
H <sub>2</sub> O	0,853	2,41	0,664	48	0,954	0,014	0,941
Zr	0,218	4,226	0,185	6,4	0,0218	$1,707 \cdot 10^{-3}$	$1,287 \cdot 10^{-3}$
He	0,027	0,002686	0,007	0,8	0,425	$5,069 \cdot 10^{-9}$	$2,462 \cdot 10^{-7}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,853	0,006977	760	76,08	0,83	0,045	$3,756 \cdot 10^{-3}$

Температура нейтронного газа:

$$\Sigma_a(T_0) = \sum_{j=1} (VN\sigma_a(0,0253)) \cdot \sqrt{\frac{293,6}{T_0}},$$

$$\Sigma_a(T_0) = \frac{0,205 + 0,027 + 5,508 \cdot 10^{-6} + 0,684 + 0,014 + 1,707 \cdot 10^{-3} + 5,069 \cdot 10^{-9} + 0,045}{1,54}$$

$$\cdot \sqrt{\frac{293,6}{576,3}} = 0,453 \text{ см}^{-1},$$

$$\xi \Sigma_s(1) = \sum_{j=1} \frac{(VN\xi\sigma_s(1))}{V_0},$$

$$\xi_{\Sigma_s}(1) = \frac{3,536 \cdot 10^{-5} + 7,39 \cdot 10^{-4} + 9,205 \cdot 10^{-3} + 0,941 + 1,287 \cdot 10^{-3} + 2,462 \cdot 10^{-7} + 3,756 \cdot 10^{-3}}{1,534} = 0,621 \text{ см}^{-1}.$$

$$T_{HR} = 576,3 \cdot \left[ 1 + 1,7 \cdot \left( \frac{0,453}{0,621} \right) \right] = 1291 \text{ К}.$$

Энергия сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов.

Таблица 24 - Значения  $\overline{\sigma}_a^i(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 2$	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 6$
	$\overline{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\overline{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\overline{\sigma}_a^i(E)$ , барн
U <sub>5</sub>	326,6	275,9	265,4
U <sub>8</sub>	1,424	1,203	1,157
O <sub>гор</sub>	$1,419 \cdot 10^{-4}$	$1,198 \cdot 10^{-4}$	$1,152 \cdot 10^{-4}$
Gd	$1,962 \cdot 10^4$	$1,657 \cdot 10^4$	$1,594 \cdot 10^4$
H <sub>2</sub> O	0,349	0,295	0,283
Zr	0,097	0,082	0,079
He	$3,678 \cdot 10^{-3}$	$3,106 \cdot 10^{-3}$	$2,988 \cdot 10^{-3}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	399,3	337,2	324,4

Таблица 25 - Значения  $VN\overline{\sigma}_a^i$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

	$x_{гр} = 2$	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 6$
Элемент	$VN\overline{\sigma}_a^i, \text{см}^{-1}$	$VN\overline{\sigma}_a^i, \text{см}^{-1}$	$VN\overline{\sigma}_a^i, \text{см}^{-1}$
U <sub>5</sub>	0,098	0,083	0,08
U <sub>8</sub>	0,014	0,012	0,011
O <sub>гор</sub>	$2,894 \cdot 10^{-6}$	$2,444 \cdot 10^{-6}$	$2,351 \cdot 10^{-6}$
Gd	0,359	0,304	0,292
H <sub>2</sub> O	$7,168 \cdot 10^{-3}$	$6,055 \cdot 10^{-3}$	$5,824 \cdot 10^{-3}$
Zr	$8,967 \cdot 10^{-4}$	$7,574 \cdot 10^{-4}$	$7,285 \cdot 10^{-4}$
He	$2,663 \cdot 10^{-9}$	$2,249 \cdot 10^{-9}$	$2,164 \cdot 10^{-9}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,024	0,02	0,019
f <sub>прав</sub>	0,527	0,445	0,428

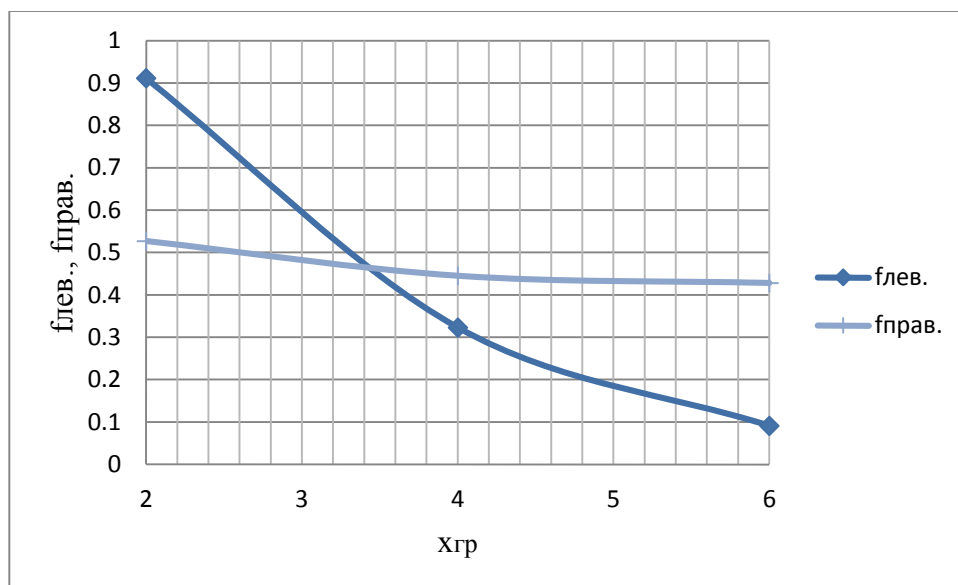


Рисунок 8 – Определение граничной энергии

В точке пересечения этих графиков находим точку  $x_{гр} = 3,44$ .

$E_{сп} = x_{сп} \cdot E_m = 3,44 \cdot 0,0253 = 0,087 \text{ эВ}$  – энергия сшивки.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата



Произведем расчет сечений, усредненных по спектру Максвелла.

Таблица 26 - Значения  $\overline{\sigma}_a^i(E)$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

Элемент	$x_{гр} = 3,44$	$(1 - \mu_i)$
	$\overline{\sigma}_a^i(E)$ , барн	
U <sub>5</sub>	283,1	0,997
U <sub>8</sub>	1,234	0,997
O <sub>гор</sub>	$1,229 \cdot 10^{-4}$	0,958
Gd	$1,7 \cdot 10^4$	0,996
H <sub>2</sub> O	0,302	0,963
Zr	0,084	0,993
He	$3,187 \cdot 10^{-3}$	0,833
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	346,1	0,989

Таблица 27 - Усреднённые сечения по спектру Максвелла

Эл-т	$\overline{\sigma}_a$ , барн	$\overline{\sigma}_f$ , барн	$\overline{\sigma}_{tr}$ , барн	$VN\overline{\sigma}_a$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma}_f$ , см <sup>-1</sup>	$VN\overline{\sigma}_{tr}$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>5</sub>	283,1	237,6	296,8	0,085	0,072	0,089
U <sub>8</sub>	1,234	-	10,109	0,012	-	0,1
O <sub>гор</sub>	$1,229 \cdot 10^{-4}$	-	3,603	$2,508 \cdot 10^{-6}$	-	0,074
Gd	$1,7 \cdot 10^4$	-	$1,7 \cdot 10^4$	0,312	-	0,312
H <sub>2</sub> O	0,302	-	46,525	$6,213 \cdot 10^{-3}$	-	0,956
Zr	0,084	-	6,437	$7,772 \cdot 10^{-4}$	-	0,059
He	$3,187 \cdot 10^{-3}$	-	0,67	$2,308 \cdot 10^{-9}$	-	$4,851 \cdot 10^{-7}$
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	346,1	-	421,3	0,021	-	0,025

Таблица 28 - Макроскопические сечения

	$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$
ЭЯ	0,284	1,049	0,046
БЛ	0,925	1,299	0,046
ЗМ	0,025	0,948	0

#### 4 Определение зависимости стационарного отравления реактора ксеноном от мощности

Определим плотность потока тепловых нейтронов на различных уровнях мощности. Мощность реактора по [6] равна:

$$N_i = \frac{\Phi_i \cdot \Sigma_f^{БЛ} \cdot V_{ТВС}}{3,1 \cdot 10^{13}}$$

Тогда плотность потока:

$$\Phi_i = \frac{3,1 \cdot 10^{13} \cdot N_i}{\Sigma_f^{БЛ} V_{ТВС}}$$

где  $m_s$  - масса  $U^{235}$  в г,

$N$  - в кВт.

Таблица 29 - Плотность потока нейтронов на различных уровнях мощности

N, %	0	40	75	100
$\Phi$ , нейтрон/см <sup>2</sup> с	0	$2,749 \cdot 10^{13}$	$5,167 \cdot 10^{13}$	$6,901 \cdot 10^{13}$

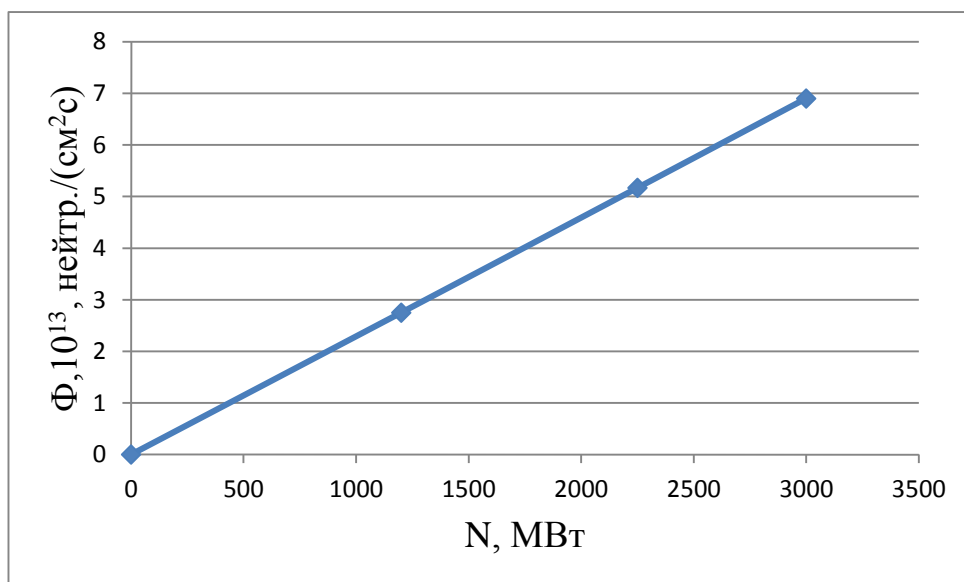


Рисунок 9 – Зависимость плотности потока нейтронов от мощности реактора

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата
------	------	-------------	---------	------

Стационарная концентрация ксенона определяется равновесием между скорости прибыли ксенона из распадающегося йода и как осколка деления и скоростью убыли его путем радиоактивного распада и поглощения нейтронов:

$$N_{0Xe} = -\theta \frac{\gamma_I + \gamma_{Xe}}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi} \cdot \Sigma_{f_{0I}} \Phi.$$

Стационарная концентрация йода прямопропорциональна мощности реактора:

$$N_{0I} = \frac{\gamma_I}{\lambda_I} \cdot \Sigma_{f_{0I}} \Phi.$$

Таблица 30 - Стационарные концентрации ксенона и йода

N, %	0	40	75	100
$N_{0Xe} \cdot 10^{-15}$ , ядер/см <sup>3</sup>	0	1,490	1,849	1,988
$N_{0I} \cdot 10^{-15}$ , ядер/см <sup>3</sup>	0	2,505	4,696	6,261

Сечение поглощения ксенона рассчитываем по аппроксимационной формуле из [11]:

$$\sigma_{Xe} = 231500 + 3,5 \cdot 10^6 \left( -\frac{T_{НГ}}{920} \right).$$

Таблица 31 - Сечение поглощения нейтронов ксенона на различных уровнях мощности реактора

N, %	0	40	75	100
$\sigma_{Xe}$ , барн	$1,881 \cdot 10^6$	$1,082 \cdot 10^6$	$1,078 \cdot 10^6$	$1,074 \cdot 10^6$

Коэффициент использования тепловых нейтронов с учетом отравления ксеноном:

$$\frac{1}{\theta} = 1 + f \cdot \frac{\Sigma_a^{3M}}{\Sigma_a^{\bar{0}l} + \Sigma_a^{omp}} + (E - 1),$$

где  $\Sigma_a^{omp} = \sigma_{Xe} \cdot N_{0Xe}$ .

Коэффициент замедлителя:

$$\alpha'' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{3M}}{D}} = \sqrt{3 \Sigma_{tr}^{3M} \cdot \Sigma_a^{3M}}.$$

Коэффициент блока:

$$\alpha' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{\bar{0}l}}{D}} = \sqrt{3 \frac{\left( \sum_i V_i^{\bar{0}l} N_i^{\bar{0}l} \sigma_{tr,i}^{\bar{0}l} + V_{Xe} N_{Xe}^0 \sigma_{tr}^{Xe} \right)}{V_{\bar{0}l}} \cdot \left( \sum_i V_i^{\bar{0}l} N_i^{\bar{0}l} \sigma_{a,i}^{\bar{0}l} + V_{Xe} N_{Xe}^0 \sigma_a^{Xe} \right)}{V_{\bar{0}l}}}.$$

Таблица 32 - Коэффициент использования тепловых нейтронов на различных уровнях мощности реактора

N, %	0	40	75	100
$\theta$	0,918	0,941	0,941	0,94

Потерю реактивности при отравлении ксеноном определим по формуле из [2]:

$$\rho_{0Xe} = -\theta \frac{\gamma_I + \gamma_{Xe}}{1 + \frac{\lambda_{Xe}}{\sigma_{Xe} \Phi}} \cdot \frac{\sigma_{f5}}{\sigma_{a5} + \sigma_{a8} \frac{1 - \frac{c_5}{100}}{\frac{c_5}{100}}}.$$

В таблице 33 помимо результатов расчета также приведены значения реактивности при стационарном отравлении реактора, взятые из Альбома нейтронно-физических характеристик шестой топливной загрузки блока №2 Ростовской АЭС, значения для условного теплового реактора и результаты расчета первой топливной загрузки блока №1 Ростовской АЭС [19].

Таблица 33 - Стационарное отравление ксеноном-135 на различных уровнях мощности реактора

Обозначение	N, %	0	40	75	100
	$\rho_{0Xe}$ , %				
1	Результаты расчета	0	-2,384	-2,956	-3,171
2	Данные АНФХ шестой топливной загрузки 2 блока РoАЭС	0	-1,952	-2,698	-2,868
3	УТР	0	-2,5	-3,7	-4,0
4	Результаты расчета первой топливной загрузки 1 блока РoАЭС	0	-1,423	-1,941	-2,167

Графическая зависимость стационарного отравления ксеноном от мощности реактора представлена в приложении А.

## 5 Расчет нейтронно-физических характеристик активной зоны при разных значениях сечения поглощения гадолиния

При выполнении работы было принято допущение о подчинении закону  $1/v$  сечения поглощения гадолиния. В ходе расчетов, приведенных выше, значение сечения поглощения гадолиния при стандартной энергии тепловых нейтронов было принято из [13]  $\sigma_{aGd} = 37340$  барн, при этом предполагалось, что в теплоносителе присутствует борная кислота. Для определения влияния величины сечения поглощения гадолиния на характер изменения реактивности при стационарном отравлении реактора проведем расчет нейтронно-физических характеристик активной зоны без учета борной кислоты. Для сравнения помимо ранее принятого значения сечения поглощения Gd (1 вариант) произведем расчет для значения, взятого из другого литературного источника [7]  $\sigma_{aGd} = 49000$  барн (2 вариант). Результаты расчетов представим в таблицах.

Таблица 34 - Температура нейтронного газа

N, %	0	40	75	100
T <sub>НГ</sub> (1 вариант), К	660	1253	1257	1260
T <sub>НГ</sub> (2 вариант), К	742	1408	1413	1417

Таблица 35 - Значения  $x_{гр}$

N, %	0	40	75	100
X <sub>гр</sub> (1 вариант)	3,48	3,5	3,5	3,5
X <sub>гр</sub> (2 вариант)	3,15	3,17	3,17	3,17

Таблица 36 - Макроскопические сечения

N, %		$\Sigma_a, \text{см}^{-1}$		$\Sigma_{tr}, \text{см}^{-1}$		$\Sigma_f, \text{см}^{-1}$	
		1 вар.	2 вар.	1 вар.	2 вар.	1 вар.	2 вар.
0	ЭЯ	0,383	0,453	1,387	1,458	0,067	0,064
	БЛ	1,303	1,549	1,679	1,925	0,067	0,064
	ЗМ	0,012	0,012	1,270	1,270	0	0
40	ЭЯ	0,273	0,324	1,039	1,090	0,047	0,045
	БЛ	0,936	1,113	1,310	1,487	0,047	0,045
	ЗМ	0,007	0,006	0,931	0,930	0	0
75	ЭЯ	0,273	0,324	1,037	1,088	0,047	0,045
	БЛ	0,934	1,112	1,308	1,486	0,047	0,045
	ЗМ	0,007	0,006	0,928	0,927	0	0
100	ЭЯ	0,273	0,323	1,035	1,085	0,047	0,045
	БЛ	0,933	1,111	1,307	1,484	0,047	0,045
	ЗМ	0,006	0,006	0,925	0,925	0	0

Таблица 37 - Коэффициент использования тепловых нейтронов

N, %	0	40	75	100
$\theta$ (1 вариант)	0,978	0,984	0,984	0,984
$\theta$ (2 вариант)	0,981	0,987	0,987	0,987



Таблица 38 - Характеристики стационарного отравления ксеноном

	N, %	0	40	75	100
1 вариант	$N_{0Xe} \cdot 10^{-15}$ , ядер/см <sup>3</sup>	0	1,475	1,827	1,963
	$\sigma_{Xe}$ , барн	$1,922 \cdot 10^6$	$1,110 \cdot 10^6$	$1,106 \cdot 10^6$	$1,103 \cdot 10^6$
	$\rho_{0Xe}$ , %	0	-2,512	-3,107	-3,332
	$N_{0Xe} \cdot 10^{-15}$ , ядер/см <sup>3</sup>	0	1,552	1,948	2,103
2 вариант	$\sigma_{Xe}$ , барн	$1,776 \cdot 10^6$	$9,708 \cdot 10^5$	$9,669 \cdot 10^5$	$9,634 \cdot 10^5$
	$\rho_{0Xe}$ , %	0	-2,422	-3,032	-3,268

Графическая зависимость стационарного отравления ксеноном от мощности реактора представлена в приложении Б.

## 6 Анализ результата расчетов стационарного отравления реактора на различных уровнях мощности

Из полученной зависимости стационарного отравления реактора ксеноном от мощности, представленной в приложении А, видно, что результаты расчета отличаются от данных, взятых из Альбома нейтронно-физических характеристик шестой топливной загрузки блока №2 Ростовской АЭС. Стоит отметить, что расчет проводился по данным первой топливной загрузки блока №3 Ростовской АЭС, что могло сказаться на разнице полученных результатов, так как компоновка активных зон обеих загрузок отличается количеством ТВЭЛОВ и ТВЭГОВ, а также средним обогащением топлива по урану и содержанием оксида гадолиния в ТВЭГАХ.

Вернемся к допущениям, принятым в начале расчетов. Синхронное изменение плотности тепловых нейтронов во всех точках активной зоны невозможно: наиболее динамичные изменения плотности тепловых нейтронов всегда будут происходить в областях непосредственного возмущения активной зоны, и чем дальше располагается та или иная область объема активной зоны от области непосредственного источника возмущений, тем более асинхронно будут протекать в ней переходные процессы изменения плотности тепловых нейтронов. Приняв основное допущение - модель реактора в точечно-параметрическом приближении - упростили задачу. Это позволило провести расчет нейтронно-физических характеристик для среднего обогащения топлива и среднего содержания оксида гадолиния в ТВЭЛЕ по всей активной зоне. Вместе с этим задача была упрощена заменой элементарной ячейки на эквивалентную. Такие допущения в значительной мере могли повлиять на результат расчетов.

Следующее принятое допущение - в процессе работы реактора происходит распухание топливного стержня только по высоте. Пренебрежение увеличением таблетки по радиусу также могло сказаться на

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		66

неточности полученных результатов, так как при учете изменения размеров топлива по радиусу произойдет изменение концентрации топлива в объеме элементарной ячейки, а, следовательно, и других нейтронно-физических характеристик активной зоны.

Еще одна характеристика, которая могла оказать влияние на результат расчетов: сечение поглощения гадолиния. В литературе не указан характер зависимости сечения поглощения Gd от температуры, поэтому было принято еще одно допущение: подчинение данной характеристики закону  $1/v$ . В 5 разделе приведены расчеты при значениях сечения поглощения Gd из разных источников:  $\sigma_a^{Gd} = 49000$  барн [7] и  $\sigma_a^{Gd} = 37340$  барн [13]. Опираясь на полученные значения нейтронно-физических характеристик можно сказать, что наибольшее влияние на их величину оказывает гадолиний, даже при небольшой его концентрации в объеме активной зоны. Исходя из этого можно предположить, что усреднение сечения поглощения гадолиния по спектру Максвелла, возможно, требует более строгой постановки задачи термализации нейтронов.

Использование в качестве выгорающего поглотителя  $^{10}B$ , у которого стандартное сечение поглощения  $\sigma_a^{^{10}B} = 3837$  барн [7] при концентрации  $7,7 \cdot 10^{20}$  ядер/см<sup>3</sup> [19], и Gd со стандартным сечением поглощения  $\sigma_a^{Gd} = 37340$  барн [13] и содержанием  $4,2 \cdot 10^{19}$  ядер/см<sup>3</sup> определяют границу возможных значений равновесной концентрации ксенона в зависимости от мощности реактора.

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		67

## Список используемых источников

- 1 Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 536 с.
- 2 Владимиров В.И. Физика ядерных реакторов: Практические задачи по их эксплуатации. Изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 480 с.
- 3 Кузьмин А. В. Подготовка параметров к нейтронно-физическому расчету реактора на тепловых нейтронах. Издательство ТПУ 2009. – 60 с.
- 4 Теплофизические свойства материалов ядерной техники : учебно-справочное пособие / под ред. П. Л. Кириллова. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ИздАт, 2007. — 200 с. : ил. — Библиография в конце разделов.
- 5 Теплофизические свойства твердого диоксида урана в рабочем диапазоне температур современных ВВЭР / Е.Ю.Синяткин, А.В.Кузьмин.
- 6 Бойко В.И., Кошелев Ф.П., Шаманин И.В., Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В. Физический расчёт ядерного реактора на тепловых нейтронах: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 504 с.
- 7 Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д. Основы теории и методы расчёта ядерных энергетических реакторов: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. 1989. – 512 с.:ил.
- 8 Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов: Учеб. Пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. -272 с.: ил.
- 9 Альбом нейтронно-физических характеристик первой топливной загрузки ВВЭР-1000 Энергоблок №3 АНФХ.3.УС.ОЯБиН/3.01
- 10 Теплофизические свойства материалов ядерной техники : учебно-справочное пособие / под ред. П. Л. Кириллова. — 2-е изд., испр. и доп. — М. : ИздАт, 2007. — 200 с. : ил. — Библиография в конце разделов.

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		68

11 Аппроксимации к определению зависимости равновесного отравления ксеноном от мощности реактора / А.Г.Белоусов, А.В.Кузьмин

12 Беляев С.А., Кузьмин А.В. Методика теплового и нейтронно-физического расчётов реактора на тепловых нейтронах. Учебное пособие. Томск, изд. ТПИ им. С.М. Кирова, 1981. – 81 с.

13 Абагян Л.П., Базазянц Н.О. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. Учебное пособие. Атомиздат. 1964. - 137с.

14 Экономика ядерной энергетики/ В. В. Батов, Ю. И. Корякин. - М.: Атомиздат, 1969. - 400 с.: ил.

15 Синев Н. М. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: Учеб. пособие для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 480 с.: ил.

16 Пособие для стажеров по ядерной физике реакторов ВВЭР-1000, Энергодар 1997г.

17 Рабочий технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №3 Ростовской АЭС. РГ.3.01. 2013г.

18 Коренной А.А./ Совершенствование методов управления распределением энерговыделения в аз реактора ВВЭР-1000.

19 Кузьмин И.С. Дипломная работа. Вывод зависимости стационарного отравления ксеноном-135 от мощности реактора, 95 с.

					ФЮРА.693100.001.ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		69

## Приложение А

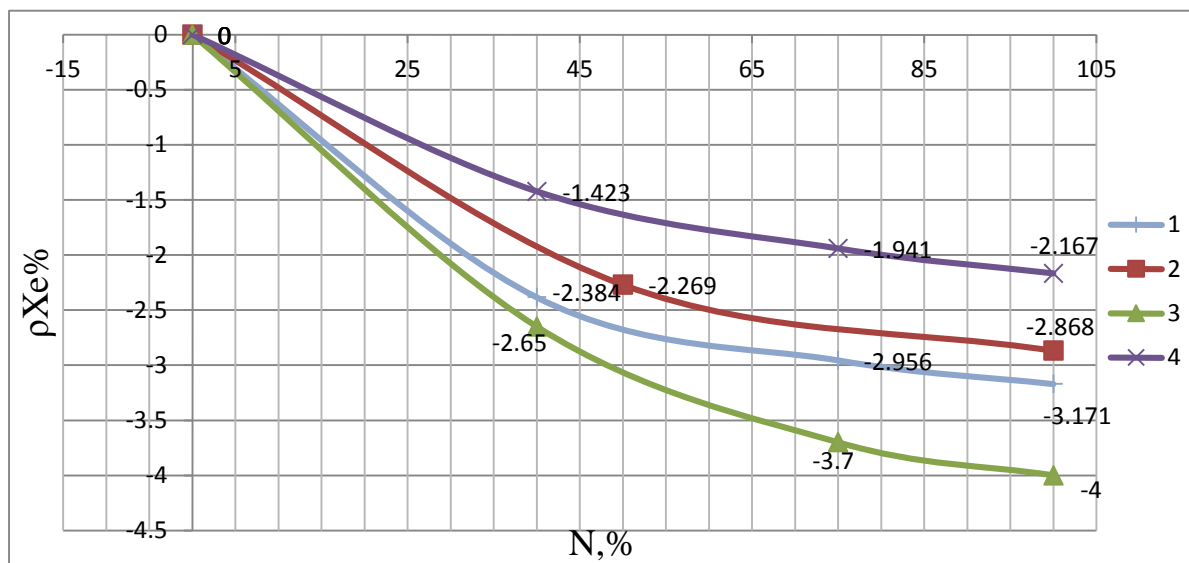


Рисунок А.1 – Зависимость равновесного отравления ксеноном от мощности

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.693100.001.ПЗ

Лист

70

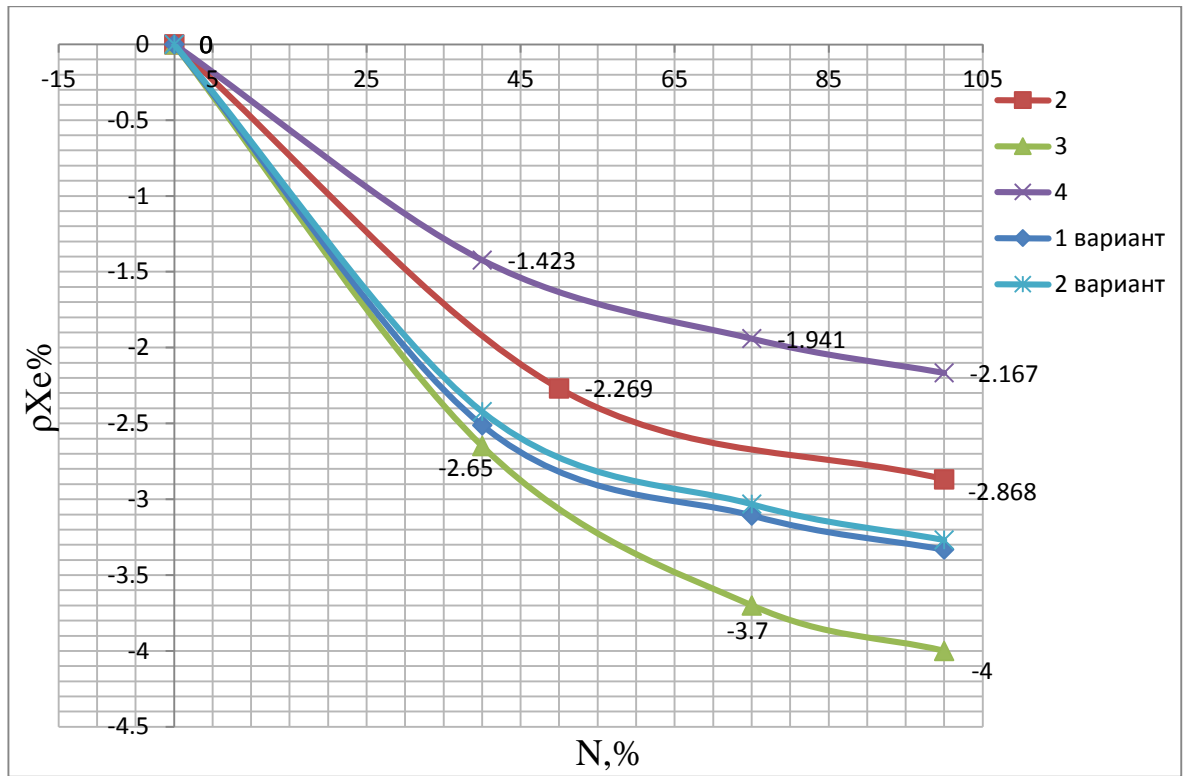


Рисунок А.2 – Зависимость равновесного отравления ксеноном от мощности реактора при разных значениях сечения поглощения гадолиния

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.693100.001.ПЗ

Лист

71