

**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
<b>РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА И КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕАКТИВНОСТИ В ТЕЧЕНИИ МИКРОКАМПАНИИ</b>

УДК 621.311.25:621.039.54.001.6(470.21)

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5002	Александров Артем Витальевич		19.01.16

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Кузьмин А.В.	к.т.н., доцент		25.01.16

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Сергейчик С.И.	к.т.н., доцент		19.01.16

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Плахов А.М.	к.т.н., доцент		19.01.16

По разделу «Автоматизация технологических процессов»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры автоматизации технологических процессов	Иванова Е.В.	к.ф.-м.н.		21.01.16

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель кафедры АТЭС	М.А.Вагнер	-		25.01.16

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой атомных и тепловых электростанций	Матвеев А.С.	к.т.н., доцент		25.01.16

## РЕФЕРАТ

Дипломный проект состоит из 61 страниц, 12 рисунков, 20 таблиц, 5 источников, 2 листов графического материала.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были использованы следующие программные средства: Microsoft word, Mathcad, Компас-3D.

Ключевые слова: картограмма, загрузка, кампания, коэффициент реактивности, коэффициент размножения, нуклиды.

Объектом исследования является топливная загрузка четвертого энергоблока Кольской АЭС.

Целью работы - является расчет характеристик топлива и коэффициентов реактивности.

В процессе исследования определено среднее обогащение топливной загрузки, проведен расчет нейтронно – физических параметров топливной загрузки на различные режимы работы реактора, определены коэффициенты реактивности и рассчитано изменение нуклидного состава топлива на протяжении кампании загрузки.

В результате исследования определили эффективный коэффициент размножения на начало кампании, допустимые значения коэффициентов реактивности и процентное (массовое) содержания нуклидов образовавшихся в процессе выгорания топлива.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АРМ – автоматизированное рабочее место;  
АЭС – атомная электростанция;  
ВВЭР – водо – водяной энергетический реактор;  
ВРК – внутререакторный контроль;  
МКУ – минимальный контролируемый уровень;  
РК – рабочая кассета;  
РЦ – реакторный цех;  
СИЗ – средства индивидуальной защиты;  
ТВС – тепловыделяющая сборка;  
ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;  
эфф. сут. – эффективные сутки.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	11
1 ОБОСНОВАНИЕ ТЕМЫ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ .....	12
2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ОБОГАЩЕНИЯ В НАЧАЛЕ КАМПАНИИ.....	13
2.1 Определение средней глубины выгорания в зоне.....	13
2.2 Определение среднего обогащения топлива в зоне .....	25
3 ПОДГОТОВКА ПАРАМЕТРОВ К НЕЙТРОННО – ФИЗИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ .....	30
3.1 Выбор элементарной и эквивалентной ячеек .....	30
3.2 Определения ядерных плотностей .....	33
3.3 Определение по ячейки температуры нейтронного газа.....	36
3.4 Определение шивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов .....	36
3.5 Вычисление макроскопических сечений реакций усредненных по спектру максвелла и приведенных к температуре нейтронного газа.....	40
4 НЕЙТРОННО – ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ .....	46
4.1 Коэффициент размножения .....	46
4.2 Определение эффективных коэффициентов реактивности .....	50
5 РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ НУКЛИДНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ РЕАКТОРА .....	52
6 ТЕХНИКО – ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАБОТЫ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
6.1 Сетевое планирование.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
6.2 Расчет затрат на разработку темы.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.1 Техногенная безопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.1.1 Вредные вещества .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.1.2 Ионизирующее излучение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.1.3 Производственное освещение .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

7.1.4 Освещение реакторного цеха .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.1.5 Шум .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.1.6 Вибрация .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.1.7 Метеоусловия .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.2 Техносферная безопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.2.1 Электробезопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
7.2.2 Пожарная безопасность .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8 СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРА ВВЭР-440 .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.1 Описание технологической схемы .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.2 Разработка функциональной схемы .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.3 Выбор датчиков температур .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.3.1 Выбор датчиков температур первой группы ..	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.3.2 Выбор датчиков температур второй группы ..	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.3.3 Выбор датчиков температур третьей группы.	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.4 Приборы контроля давления .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.4.1 Приборы контроля давления первой группы измерения.....	91
8.4.2 Приборы контроля давления второй группы измерения.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.4.3 Приборы контроля давления третьей группы измерения.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.5 Прибор контроля уровня .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.6 Контроль концентрации борной кислоты .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
8.7 Контроль концентрации водорода .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Заключение.....	96
Список используемой литературы.....	97
Графический материал	
ФЮРА.421000.002.С2	

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время топливная проблема остается одной из главных для современного общества. Органическое топливо (нефть, газ, уголь) по ресурсно-экономическим и экологическим соображениям требует замены новым топливом. Альтернативой органическому топливу может стать только ядерное. Сегодня уже не вызывает сомнений тот факт, что именно ядерная энергетика как по ресурсно-экономическим, так и по экологическим соображениям может наиболее надежно обеспечить возрастающее энергопотребление общества на перспективный период.

Хорошо освоенные ядерные топливные циклы ВВЭР на тепловых нейтронах позволяют разработать реактор большой мощности третьего поколения ВВЭР-1500, отвечающий всем мировым требованиям по безопасности и экономике. Стоимость выработки электроэнергии на АЭС уже сейчас в полтора раза ниже, чем на ТЭС, а из-за прогрессирующего роста цен на органическое топливо и уменьшения его запасов это соотношение будет увеличиваться.

Кроме того, достройка энергоблоков высокой степени строительной готовности и строительство новых энергоблоков на имеющихся площадках требует меньших капитальных вложений по сравнению с блоками такой же мощности тепловых электростанций.

Ядерная энергетика не потребляет атмосферный кислород и не оказывает негативного воздействия на окружающую среду, что показано более чем 50-летней эксплуатацией стационарной (атомные электростанции) и транспортной (атомные суда) энергетикой.

К настоящему времени в России созданы основные предпосылки для внедрения на АЭС с ВВЭР-1000 усовершенствованного топливного цикла. В частности, за последние несколько лет были выполнены работы по совершенствованию топливного цикла ВВЭР-1000 с целью повышения

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

надежности, безопасности и экономичности эксплуатации, а также конкурентоспособности реактора на внешнем рынке.

## 1 ОБОСНОВАНИЕ ТЕМЫ ДИПЛОМНОЙ РАБОТЫ

Нейтронно-физические и ядерно-физические явления составляют основу процессов, происходящих в реакторах атомных станций. Знание этих процессов обеспечивает безопасность и надежность работы реакторной установки (РУ).

Одними из важнейших нейтронно-физических характеристик являются:

- интегральные характеристики - температурный эффект реактивности (ТЭР), который для удобства разбивается на изотермический или температурный  $\rho_t$  и мощностной  $\rho_N$  эффекты реактивности;
- дифференциальные коэффициенты реактивности – изотермический  $\alpha_t$  и мощностной  $\alpha_N$ .

Во время работы в реакторе непрерывно протекают процессы, приводящие к изменению нуклидного состава реакторных материалов. Для нас представляют интерес лишь те из них, которые непосредственно влияют на нейтронно – физические характеристики реактора. Подавляющая часть таких процессов вызвана взаимодействием нейтронов с ядрами топлива. Состав уранового топлива изменяется в основном за счет деления  $U^{235}$  и  $U^{238}$ .

С течением времени постепенно исчезают ядра загруженного в реактор топлива и образуются новые. Среди последних следует выделить делящиеся ядра ( $Pu^{239}$  и  $Pu^{241}$ ). Процесс накопления этих ядер принято называть воспроизводством ядерного топлива. Поглощение нейтронов, концентрация которых относительно быстро достигает равновесных концентраций, называется отравлением реактора. Все остальные новые ядра объединяют в одну группу и называют их шлаками, а поглощение нейтронов этими ядрами – шлакованием реактора.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

## 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ОБОГАЩЕНИЯ В НАЧАЛЕ КАМПАНИИ

Цель этой главы, определение начального среднего обогащения топлива в реакторе.

### 2.1 Определение средней глубины выгорания в зоне

Даны две картограммы загрузки, на одной из них, рисунок 1, обозначены позиции ТВС и РК в зоне, сорт топлива и год эксплуатации. На второй, рисунок 2, обозначены позиция, начальная и конечная глубины выгорания (МВт·сут)/кгU<sup>235</sup> [1].

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



1 - номер кассеты	346	347	348	349
425v - сорт топлива	425v	425v	425v	425v
6.00 - год эксплуатации	6.00	7.00	6.00	6.00
	337	338	339	340
	425v	425v	425v	425v
	6.00	6.00	7.00	1.00
	325	326	327	328
	425v	425v	425v	425v
	6.00	6.00	1.00	2.00
	312	313	314	315
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	2.00	2.00
	296	297	298	299
	425v	425v	425v	425v
	6.00	6.00	2.00	2.00
	279	280	281	282
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	2.00	4.00
	261	262	263	264
	425v	425v	425v	425v
	7.00	1.00	3.00	3.00
	242	243	244	245
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	3.00	5.00
	185	186	187	188
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	2.00	3.00
	166	167	168	169
	425v	425v	425v	425v
	6.00	2.00	4.00	4.00
	146	147	148	149
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	2.00	3.00
	127	128	129	130
	425v	425v	425v	425v
	6.00	2.00	4.00	5.00
	109	110	111	112
	425v	425v	425v	425v
	6.00	2.00	3.00	2.00
	90	91	92	93
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	3.00	5.00
	72	73	74	75
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	3.00	3.00
	55	56	57	58
	425v	425v	425v	425v
	7.00	1.00	1.00	4.00
	39	40	41	42
	425v	425v	425v	425v
	6.00	7.00	2.00	2.00
	26	27	28	29
	425v	425v	425v	425v
	6.00	1.00	2.00	2.00
	14	15	16	17
	425v	425v	425v	425v
	6.00	6.00	1.00	2.00
	5	6	7	8
	425v	425v	425v	425v
	6.00	6.00	6.00	1.00
	1	2	3	4
	425v	425v	425v	425v
	6.00	6.00	7.00	6.00

Рисунок 1 – Картограмма сортов топлива

				Лист
				14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ФЮРА. 693100. 001 ПЗ



$$\rho_{\text{ср}}^i = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{ТВС}}^i} \rho^j}{N_{\text{ТВС}}^i}$$

$\rho_{\text{ср}}^i$  -средняя глубина выгорания i-го года эксплуатации;

$\rho_j^i$  -конечная глубина выгорания i-го года эксплуатации, j-ой ТВС;

$N_{\text{ТВС}}^i$  -количество ТВС i-го года эксплуатации.

Таблицы глубин выгорания топлива для каждого года:

Таблица 1 – Первый год эксплуатации

j-ая ТВС	Позиция ТВС в картограмме	Конечная глубина выгорания, (МВт·сут)/кгU <sup>235</sup>
1	8	10,81
2	9	11,63
3	10	10,88
4	16	11,19
5	21	13,73
6	23	11,26
7	27	11,26
8	37	11,2
9	56	10,88
10	57	13,73
11	70	10,82
12	73	11,63
13	79	14,44
14	82	14,47
15	88	11,64
16	91	10,82
17	96	14,47
18	102	14,45
19	107	10,9
20	125	13,76
21	147	13,76
22	151	14,44
23	160	14,49
24	164	11,29
25	186	11,25
26	190	14,45
27	199	14,48
28	203	11,25
29	225	13,72
30	243	10,88
28	203	11,25
29	225	13,72
30	243	10,88
31	248	14,43
32	254	14,5

продолжение таблицы 1

33	259	10,91
34	262	11,63
35	268	14,47
36	271	14,47
37	277	11,73
38	280	10,82
39	293	13,8
40	294	10,96
41	313	11,2
42	323	11,26
43	327	11,27
44	329	13,78
45	334	11,2
46	340	10,94
47	341	11,7
48	342	10,89

Средняя глубина выгорания после первого года эксплуатации:

$$\rho_{\text{ср}}^1 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{TBC}}^1} \rho^j}{N_{\text{TBC}}^1} = \frac{\sum_{j=1}^{48} \rho^j}{48} = 12,32 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}^{235}}$$

Таблица 2 – Второй год эксплуатации

j-ая ТВС	Позиция ТВС в картограмме	Конечная глубина выгорания, (МВт·сут)/кгU <sup>235</sup>
1	17	19,23
2	18	23,19
3	22	19,41
4	28	21,42
5	29	21,5
6	35	21,43
7	36	19,41
8	41	21,43
9	42	22,05
10	46	22,24
11	47	22,24
12	51	21,5
13	52	19,24
14	69	23,2
15	94	22,24
16	104	22,06
17	110	23,2
18	112	22,05
19	123	22,22
20	128	19,24

продолжение таблицы 2

21	144	19,39
22	148	21,51
23	163	21,46
24	167	21,43
25	183	21,45
26	187	21,43
27	202	21,57
28	206	19,41
29	222	19,27
30	227	22,24
31	238	22,12
32	240	23,29
33	246	22,06
34	256	22,26
35	281	23,22
36	298	19,26
37	299	21,52
38	303	22,33
39	304	22,12
40	308	21,47
41	309	19,35
42	314	21,45
43	315	21,48
44	321	21,55
45	322	21,39
46	328	19,47
47	332	23,29
48	333	19,18

Средняя глубина выгорания после второго года эксплуатации:

$$\rho_{\text{ср}}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{TBC}}^I} \rho^j}{N_{\text{TBC}}^I} = \frac{\sum_{j=1}^{48} \rho^j}{48} = 21,33 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}^{235}}$$

Таблица 3 – Третий год эксплуатации

j-ая ТВС	Позиция ТВС в картограмме	Конечная глубина выгорания, (МВт·сут)/кгU <sup>235</sup>
1	19	30,23
2	20	31,86
3	31	30,67
4	33	30,4
5	44	30,79
6	49	30,81
7	59	30,82
8	67	30,78
9	74	31,86

продолжение таблицы 3

10	75	32,42
11	86	30,61
12	87	30,26
13	92	30,2
14	98	33,29
15	100	33,3
16	106	31,86
17	111	30,74
18	115	33,31
19	116	32,15
20	119	32,14
21	120	33,28
22	124	32,37
23	149	30,79
24	152	33,3
25	159	33,28
26	162	30,78
27	172	32,15
28	178	32,12
29	188	30,82
30	191	33,31
31	198	33,29
32	201	30,77
33	226	32,41
34	230	33,3
35	234	32,16
36	235	30,58
37	239	31,89
38	244	33,31
39	252	33,31
40	258	30,04
41	263	30,22
42	264	30,73
43	275	32,36
44	276	31,82
45	283	30,81
46	291	30,8
47	301	30,83
48	306	30,8
49	317	32,42
50	319	30,59
51	330	31,81
52	331	30,1

Средняя глубина выгорания после третьего года эксплуатации:

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

$$\rho_{\text{ср}}^3 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{TBC}}^3} \rho^j}{N_{\text{TBC}}^3} = \frac{\sum_{j=1}^{52} \rho^j}{52} = 31,67 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}^{235}}$$

Таблица 4 – Четвертый год эксплуатации

j-ая ТВС	Позиция ТВС в картограмме	Конечная глубина выгорания, (МВт·сут)/кгU <sup>235</sup>
1	30	43,22
2	34	43,5
3	43	42,66
4	50	42,68
5	58	43,51
6	60	41,09
7	66	41,11
8	68	43,21
9	97	43,69
10	99	40,46
11	101	43,73
12	117	42,75
13	118	41,83
14	129	43,22
15	133	40,43
16	134	41,83
17	135	39,25
18	136	38,49
19	137	39,25
20	138	42,83
21	139	40,46
22	143	43,52
23	153	42,76
24	154	38,49
25	155	40,93
26	156	40,93
27	157	38,47
28	158	41,82
29	168	42,7
30	169	41,13
31	171	43,68
32	173	39,26
33	174	40,98
34	176	40,88
35	177	39,24
36	179	43,73
37	181	40,96
38	182	42,63
39	192	41,87
40	193	38,52
41	194	40,86

продолжение таблицы 4

42	195	40,8
43	196	37,2
44	197	41,41
45	207	43,49
46	211	40,47
47	212	42,73
48	213	39,23
49	214	37,21
50	215	39,23
51	216	40,44
52	217	40,43
53	221	43,21
54	232	40,46
55	233	41,36
56	249	43,69
57	251	40,44
58	253	43,69
59	282	43,26
60	284	41,14
61	290	40,95
62	292	43,45
63	300	42,66
64	307	42,59
65	316	43,45
66	320	43,23

Средняя глубина выгорания после четвертого года эксплуатации:

$$\rho_{\text{ср}}^4 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{TBC}}^4} \rho^j}{N_{\text{TBC}}^4} = \frac{\sum_{j=1}^{66} \rho^j}{66} = 41,5 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}^{235}}$$

Таблица 5 – Пятый год эксплуатации

j-ая ТВС	Позиция ТВС в картограмме	Конечная глубина выгорания, (МВт·сут)/кгU <sup>235</sup>
1	32	49,88
2	48	46,87
3	61	46,02
4	62	48,83
5	63	46,35
6	64	48,73
7	65	45,5
8	76	46,81
9	77	45,45
10	78	49,46
11	80	47,27
12	81	47,27



продолжение таблицы 5

13	83	49,43
14	84	45,95
15	85	47,03
16	93	49,88
17	95	48,72
18	103	48,85
19	105	49,9
20	113	46,36
21	114	47,18
22	121	47,23
23	122	46,34
24	130	47,5
25	131	48,84
26	132	47,21
27	140	47,19
28	141	48,71
29	142	46,87
30	150	45,94
31	161	45,47
32	170	49,43
33	180	49,34
34	189	45,5
35	200	45,99
36	208	46,84
37	209	48,76
38	210	47,27
39	218	47,2
40	219	48,81
41	220	47
42	228	46,28
43	229	47,27
44	236	47,09
45	237	46,35
46	245	49,83
47	247	48,84
48	255	48,64
49	257	49,86
50	265	46,86
51	266	46,06
52	267	49,46
53	269	47,08
54	270	47,19
55	272	49,4
56	273	45,39
57	274	46,82
58	285	45,42
59	286	48,66
60	287	46,32
61	288	48,77
60	287	46,32

продолжение таблицы 5

61	288	48,77
62	289	45,98
63	302	46,81
64	305	46,83
65	318	49,73

Средняя глубина выгорания после пятого года эксплуатации:

$$\rho_{\text{cp}}^5 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{TBC}}^5} \rho^j}{N_{\text{TBC}}^5} = \frac{\sum_{j=1}^{66} \rho^j}{66} = 47,53 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}^{235}}$$

Таблица 6 – Шестой год эксплуатации

j-ая ТВС	Позиция ТВС в картограмме	Конечная глубина выгорания, (МВт·сут)/кгU <sup>235</sup>
1	1	51,15
2	2	41,05
3	4	51,97
4	5	50,46
5	6	47,92
6	7	42,93
7	12	47,88
8	1	49,68
9	14	49,65
10	15	49
11	24	48,99
12	25	50,45
13	26	47,88
14	38	47,86
15	39	51,97
16	53	42,96
17	54	51,17
18	71	40,98
19	72	41
20	90	51,15
21	108	41,95
22	109	42,45
23	127	47,89
24	145	47,87
25	146	50,49
26	165	49,97
27	166	49
28	175	52,53
29	184	48,94
30	185	49,68
31	204	50,44
30	185	49,68

продолжение таблицы 6

30	185	49,68
31	204	50,44
32	205	47,87
33	223	47,77
34	241	42,32
35	242	51,97
36	260	51,14
37	278	40,17
38	279	41,06
39	296	51,18
40	297	42,43
41	311	41,96
42	312	47,96
43	324	47,87
44	325	50,36
45	326	49,02
46	335	51,49
47	336	49,65
48	337	49,63
49	338	47,91
50	343	42,29
51	344	47,74
52	345	50,31
53	346	51,98
54	348	40,24
55	349	51,15

Средняя глубина выгорания после шестого года эксплуатации:

$$\rho_{\text{ср}}^6 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{TBC}}^6} \rho^j}{N_{\text{TBC}}^6} = \frac{\sum_{j=1}^{55} \rho^j}{55} = 47,69 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}^{235}}$$

Таблица 7 – Седьмой год эксплуатации

j-ая ТВС	Позиция ТВС в картограмме	Конечная глубина выгорания, (МВт·сут)/кгU <sup>235</sup>
1	3	46,97
2	11	47,85
3	40	47,87
4	89	47
5	126	47,87
6	224	47,86
7	310	47,66
8	295	46,89
9	339	47,63
10	347	46,89

Средняя глубина выгорания после седьмого года эксплуатации:

$$\rho_{\text{ср}}^7 = \frac{N_{\text{TBC}}^7}{N_{\text{TBC}}^7} = \frac{\sum_{j=1}^{10} \rho^j}{10} = 47,45 \frac{\text{МВт} \cdot \text{сут}}{\text{кгU}^{235}}.$$

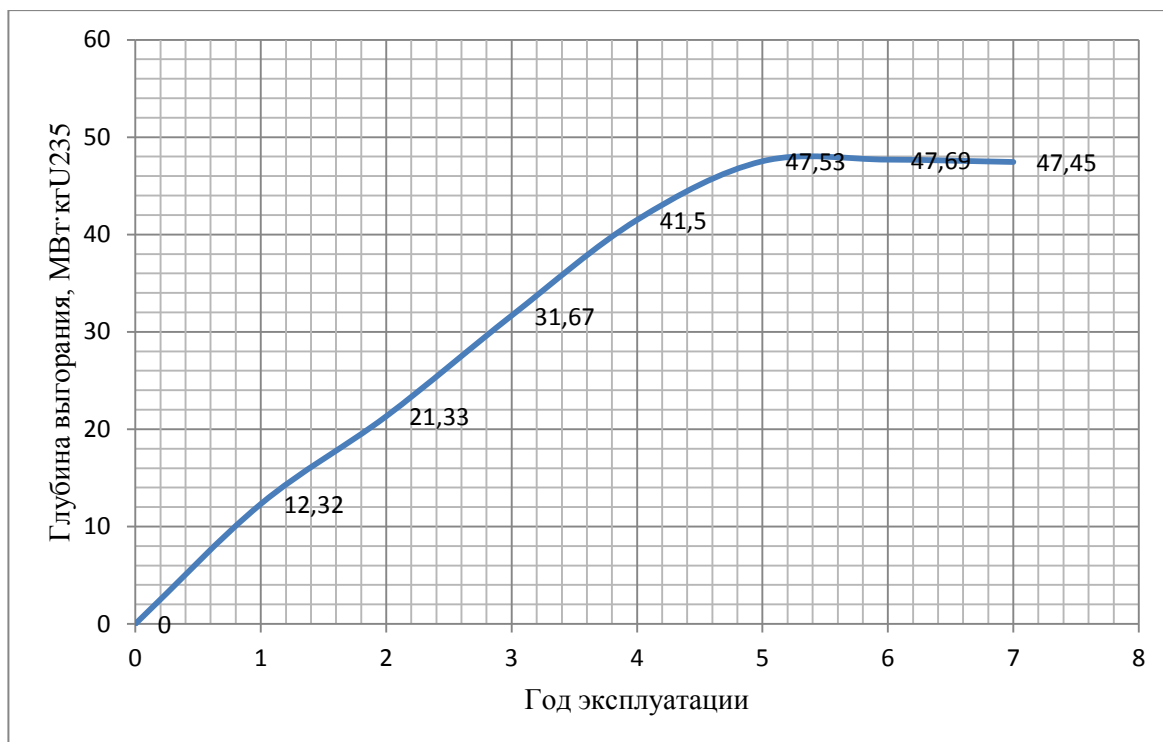


Рисунок 3 – Изменение средней по зоне глубины выгорания от года эксплуатации

Как видно из графика на участке времени от 0 до 5 лет принимается, что средняя глубина выгорания изменяется линейно, а на участке от 5 до 7 лет почти не изменяется. Это связано с тем, что ТВС шестого и седьмого годов ставятся на периферию зоны, для уменьшения флюенса нейтронов на корпус реактора, и в тепловыделение почти не участвуют. Маленький спад средней глубины выгорания в конце седьмого года эксплуатации кассет объясняется следующим образом, в конце каждой кампании основная масса кассет шестого года использования отправляется в бассейн выдержки, кроме 10 ТВС имеющих минимальную глубину выгорания по сравнению с остальными. Т.к. эти кассеты отправляются на периферию зоны, выгорание в них проходит минимальное, из-за этого средняя глубина выгорания ТВС седьмого года использования ниже чем у пятого и шестого годов.

## 2.2 Определение среднего обогащения в зоне

Т.к. средняя глубина выгорания в зоне изменяется линейно, допускается, что выгорание  $U^{235}$  тоже проходит линейно.

Известно, что на 1 тонну выгруженного топлива выгружается 8 кг  $U^{235}$  [2],

находится процентная составляющая  $U^{235}$  в выгружаемом топливе:

$$c_{\text{выгр}} = \frac{m_{U^{235}}}{m_{\text{топл}}} \cdot 100\% = \frac{8}{1000} \cdot 100\% = 0,8\%.$$

Принимается, что каждая кассета, неважно какого начального обогащения, в конце своей кампании имеет такую же процентную составляющую, то можно будет построить график выгорания  $U^{235}$ .

В топливной загрузке четвертого энергоблока Кольской АЭС используются ТВС начального обогащения 3,82 %, 4,25% и 4,87 % [1], с помощью этих данных построено примерное изменение концентрации  $U^{235}$ , с возрастанием глубины выгорания:

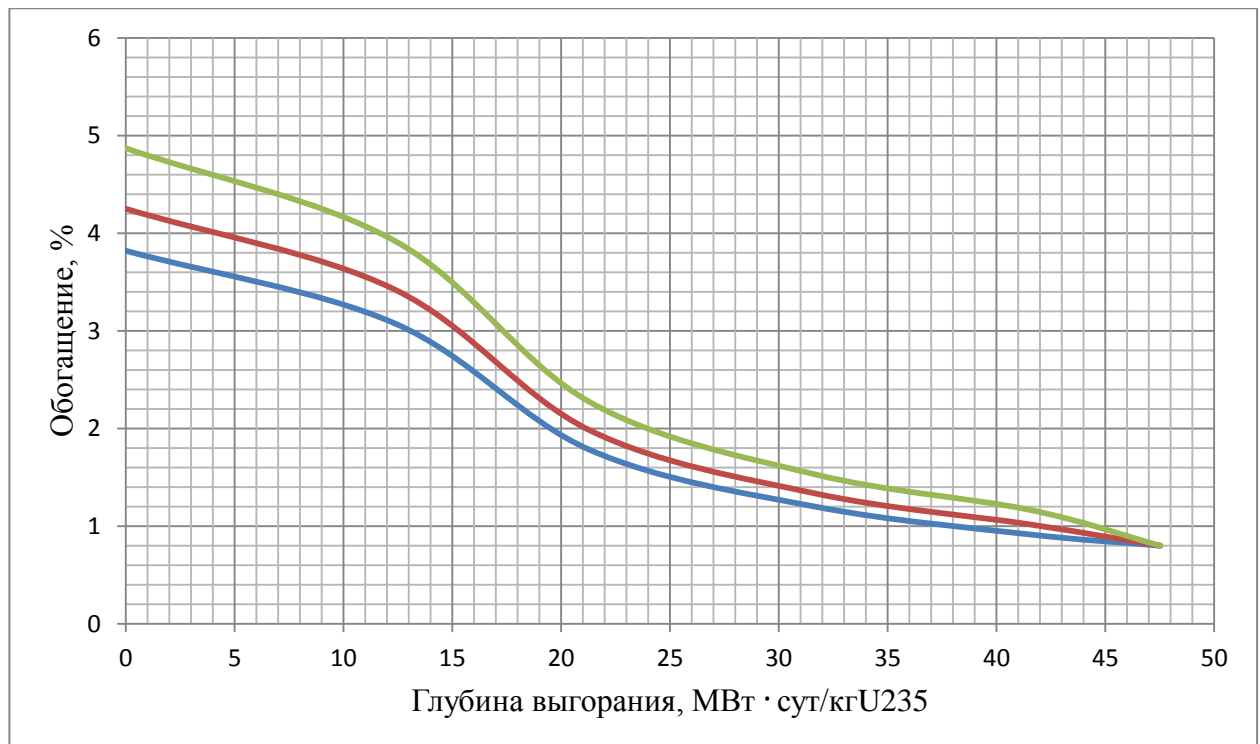


Рисунок 4 – Изменение концентрации  $U^{235}$ , с возрастанием глубины выгорания

Кассеты первого года эксплуатации в основном выставлены ближе к периферии зоны т.к. при компоновке загрузки стремятся выравнять

энерговыделение по всей зоне. А кассеты второго, третьего, четвертого и пятого годов выставляются в центре зоны. Самое высокое энерговыделение в центре зоны, тем самым можно предположить более интенсивное выгорание  $U^{235}$ . Этим и объясняется кривая полученная на участке от 15 до 35 МВт·сут/кг $U^{235}$

Для выбора расчетной ячейки зоны используются данные из [1], приведенные в таблице №8. При делении загрузки на ячейки по 30°, имеются 12 ячеек, при делении по 60°, 6 ячеек.

Выбирается второй вариант, предполагая, что каждая шестая часть из приведенных ниже сортов будет находиться в расчетной ячейки.

Таблица 8 – Количество и описание топлива

Сорт на картограмме	Среднее обогащение, %	Кол-во кассет
42pm	4,25	60
42pu	4,25	60
s42u	4,25	18
s38m	3,82	6
s38ur	3,82	1
s38u	3,82	6
487u	4,87	180
s487	4,87	6
3Gu	4,87	12

336  
 46.12  
 49.65  
 323 324  
 0.00 42.76  
 11.26 47.87  
 308 309 310 311  
 7.16 6.96 41.24 48.52  
 21.47 19.35 47.66 51.96  
 291 292 293 294 295  
 18.09 31.76 0.00 0.00 42.25  
 30.80 43.45 13.80 10.96 46.89  
 273 274 275 276 277 278  
 35.37 36.50 19.31 19.22 0.00 35.22  
 45.39 46.82 32.36 31.82 11.73 40.17  
 254 255 256 257 258 259 260  
 0.00 38.76 8.15 39.18 17.32 0.00 47.64  
 14.50 48.64 22.26 49.86 30.04 10.91 51.14  
 235 236 237 238 239 240 241  
 20.31 37.01 36.44 8.01 17.41 10.61 35.67  
 33.31 47.09 46.35 22.12 30.58 23.29 42.32  
 216 217 218 219 220 221 222 223  
 28.29 28.65 37.14 38.97 36.73 31.64 7.02 42.66  
 40.44 40.43 47.20 48.81 47.00 43.21 19.27 47.77  
 196 197 198 199 200 201 202 203 204  
 25.03 29.36 20.30 0.00 36.05 18.11 7.34 0.00 46.93  
 37.20 41.41 33.29 14.48 45.99 30.77 21.57 11.25 50.44  
 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184  
 44.84 29.72 27.14 19.08 31.76 39.46 30.82 30.77 8.17 42.96  
 52.53 40.88 39.24 32.12 43.73 49.34 40.96 42.63 21.45 48.94

Рисунок 5 – Ячейка загрузки

С помощью рисунка №4 определяется начальное обогащение каждой ТВС, а после находится среднее обогащение по ячейки.

Таблица 9 – К определению начального обогащения каждой ТВС в ячейки

Позиция на картограмме	Начальное обогащение свежей ТВС, %	Начальная глубина выгорания ТВС в ячейке, (МВт*сут)/кгU <sup>235</sup>	Начальное обогащение ТВС в ячейке, %
175	3,82	44,84	0,85
176	4,87	29,72	1,19
177	4,87	27,14	1,22
178	4,25	19,08	1,25
179	4,87	31,36	1,56
180	4,25	39,46	1,11
181	4,87	30,82	1,58
182	4,87	30,77	1,59
183	4,87	8,17	4,25
184	3,82	42,96	0,84
196	4,87	25,03	1,95
197	4,87	29,36	1,63
198	4,87	20,3	2,44
199	4,87	0	4,87
200	4,25	36,05	1,91
201	4,87	18,11	2,9

продолжение таблицы 9

202	4,87	7,34	4,35
203	4,87	0	4,87
204	4,25	46,93	0,8
216	4,87	28,29	1,7
217	4,87	28,65	1,69
218	4,25	37,14	1,65
219	4,25	38,97	1,11
220	4,25	36,73	1,13
221	4,87	31,64	1,49
222	4,87	7,02	4,4
223	4,25	42,66	0,99
235	4,87	20,31	2,41
236	4,25	37,01	1,16
237	3,82	36,44	1,04
238	4,87	8,01	4,16
239	4,87	17,41	2,72
240	4,25	10,61	3,62
241	4,25	35,67	1,18
254	4,87	0	4,87
255	4,25	38,76	1,11
256	4,87	8,15	4,24
257	4,25	39,18	1,1
258	4,87	17,32	3
259	4,87	0	4,87
260	4,25	47,64	0,8
273	4,25	35,37	1,18
274	4,25	36,5	1,17
275	4,87	19,31	2,6
276	4,87	19,22	2,6
277	4,87	0	4,87
278	4,25	35,22	1,18
291	4,87	18,09	2,83
292	4,87	31,76	1,46
293	4,25	0	4,25
294	4,87	0	4,87
295	4,25	42,25	0,97
308	4,87	7,16	4,39
309	4,87	6,96	4,41
310	4,25	41,24	1,18
311	4,25	48,52	0,8
323	4,87	0	4,87
324	4,25	42,76	0,93
336	4,25	46,12	0,85



Среднее обогащение в ячейке:

$$c_{\text{cp}}^5 = \frac{\sum_{j=1}^{N_{\text{TBC}}} c^j}{N_{\text{TBC}}} = \frac{\sum_{j=1}^{59} c^j}{59} = 2,3 \%$$

В дальнейшем будет рассчитываться загрузка ячейки из свежего топлива, начальное обогащение которой принимается среднее обогащение в ячейке рассмотренной выше.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

### 3 ПОДГОТОВКА ПАРАМЕТРОВ К НЕЙТРОННО – ФИЗИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ

Целью расчетов данной главы, является определение микроскопических сечений реакции, усредненные по спектру Максвелла и приведенные к температуре нейтронного газа  $T_{нр}$  и макроскопических сечений реакции.

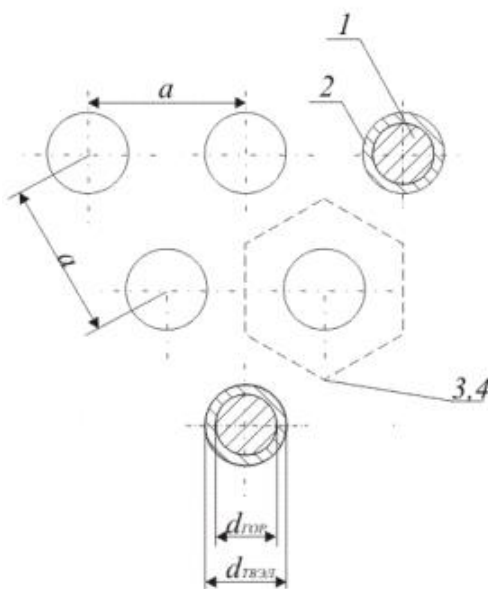
Эти сечения рассчитываются для трех вариантов: холодный реактор  $20^{\circ}\text{C}$ , горячий реактор  $260^{\circ}\text{C}$  и реактор на мощности 100%.

#### 3.1 Выбор элементарной и эквивалентной ячеек активной зоны реактора

Любой гетерогенный реактор может быть представлен конечной совокупностью регулярно повторяющихся элементов, образующих, так называемую, решетку.

Элементарной ячейкой называют элемент периодичности решетки, имеющий одинаковую геометрическую форму и нейтронные характеристики.

В нашем случае элементарная ячейка состоит из твэла и окружающего его теплоносителя.

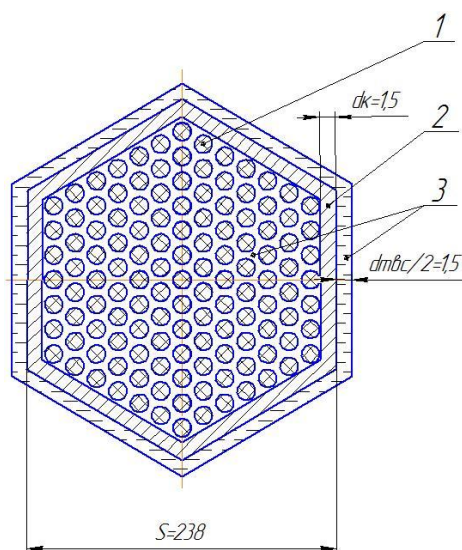


1-топливо, 2- оболочка твэла, 3-замедлитель, 4-теплоноситель.

Рисунок 6 – Элементарная ячейка

Нейтронно-физический расчет будем проводить по методу эквивалентной ячейки. Этот метод используется для оценки микрораспределения потока

тепловых нейтронов в элементарной ячейки. Расчет будем производить на 1 см ВЫСОТЫ.



1- ТВЭл, 2 - Чехол ТВС, 3 - Замедлитель, теплоноситель.

Рисунок 7 – Рассчитываемая ТВС (размеры в мм)

Таблица 10 – Геометрические характеристики ТВС и твэл [4]

Параметр	Размер, м (см)
Наружный диаметр твэл а, $d_{нар}^{ТВ}$	0,0091 (0,91)
Внутренний диаметр твэла, $d_{вн}^{ТВ}$	0,00773 (0,773)
Диаметр внутреннего отверстия, $d_{вн}^{отв}$	0,0012 (0,12)
Наружный диаметр центральной трубки, $d_{нар}^{ЦТ}$	0,0103 (1,03)
Внутренний диаметр центральной трубки, $d_{вн}^{ЦТ}$	0,0088 (0,88)
Шаг решетки, а	0,00122 (0,122)
Диаметр топливной таблетки, $d_{гор}$	0,0076 (0,76)
Число твэлов в ТВС, $n_{ТВ}$	126
Размер под ключ ТВС, S	238 (23,8)
Толщина чехла, $d_ч$	1,5 (0,15)
Зазор между ТВС, $d_{ТВС}$	3 (0,3)

Площадь ячейки:

$$V_{яч} = \frac{\left(\frac{S + \delta_{ТВС}}{2}\right)^2}{\sqrt{3}} \cdot 6 = \frac{\left(\frac{14,4 + 3}{2}\right)^2}{\sqrt{3}} \cdot 6 = 187,139 \text{ см}^2$$

Площадь ТВС с чехлом:

$$V_{\text{ТВС}}^{\text{ч}} = \frac{\left(\frac{S}{2}\right)^2}{\sqrt{3}} \cdot 6 = \frac{\left(\frac{14,4}{2}\right)^2}{\sqrt{3}} \cdot 6 = 179,579 \text{ см}^2.$$

Площадь ТВС внутри чехла:

$$V_{\text{ТВС}} = \frac{\left(\frac{S}{2} - \delta_{\text{ч}}\right)^2}{\sqrt{3}} \cdot 6 = \frac{\left(\frac{14,4}{2} - 0,15\right)^2}{\sqrt{3}} \cdot 6 = 172,175 \text{ см}^2.$$

Объем горючего:

$$V_{\text{гор}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{гор}} - d_{\text{ВН}}^{\text{отв}})^2}{4} \cdot n_{\text{ТВ}} = \frac{\pi \cdot (0,76 - 0,12)^2}{4} \cdot 126 = 55,734 \text{ см}^2.$$

Объем занимаемый твэлами ТВС:

$$V_{\text{ТВЭЛ}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{нап}}^{\text{ТВ}}^2}{4} \cdot n_{\text{ТВ}} = \frac{\pi \cdot 0,91^2}{4} \cdot 126 = 81,949 \text{ см}^2.$$

Объем циркония в центральной трубки:

$$V_{\text{цт}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{нап}}^{\text{цт}} - d_{\text{ВН}}^{\text{цт}})^2}{4} \cdot n_{\text{цт}} = \frac{\pi \cdot (1,03 - 0,88)^2}{4} \cdot 1 = 0,018 \text{ см}^2$$

Объем чехла ТВС:

$$V_{\text{ч}} = V_{\text{ТВС}}^{\text{ч}} - V_{\text{ТВС}} = 179,579 - 172,175 = 7,405 \text{ см}^2.$$

Объем оболочек твэлов:

$$V_{\text{об}} = V_{\text{ТВ}} - V_{\text{гор}} - \frac{\pi \cdot (d_{\text{ВН}}^{\text{отв}})^2}{4} = 81,949 - 55,734 - \frac{\pi \cdot (0,12)^2}{4} = 24,79 \text{ см}^2.$$

Объем конструкционных материалов:

$$V_{\text{КМ}} = V_{\text{об}} + V_{\text{цт}} + V_{\text{ч}} = 24,79 + 0,018 + 7,405 = 32,212 \text{ см}^2.$$

Объем воды в ячейки:

$$V_{\text{ВОД}} = V_{\text{яч}} - V_{\text{гор}} - \frac{\pi \cdot (d_{\text{ВН}}^{\text{отв}})^2}{4} \cdot n_{\text{ТВ}} - V_{\text{КМ}} = 187,139 - 55,734 - \frac{\pi \cdot (0,12)^2}{4} \times 126 - 32,212 = 97,768 \text{ см}^2$$

Водоурановое соотношение:

$$\frac{V_{\text{ВОД}}}{V_{\text{гор}}} = \frac{97,768}{55,734} = 1,754.$$

Приведем все объемы к одному ТВЭЛУ:

$$V_{\text{вод}} = \frac{V_{\text{ВОД}}}{n_{\text{ТВ}}} = \frac{97,768}{126} = 0,776 \text{ см}^2;$$

$$V_{\text{км}} = \frac{V_{\text{КМ}}}{n_{\text{ТВ}}} = \frac{32,212}{126} = 0,256 \text{ см}^2;$$

$$V_{\text{бл}} = \frac{V_{\text{гор}}}{n_{\text{ТВ}}} = \frac{55,734}{126} = 0,442 \text{ см}^2.$$

Объем элементарной ячейки:

$$V_{\text{э}}^{\text{яч}} = V_{\text{бл}} + V_{\text{вод}} + V_{\text{км}} = 0,442 + 0,776 + 0,256 = 1,474 \text{ см}^2.$$

Радиус элементарной ячейки и блока:

$$R_{\text{э}} = \sqrt{\frac{V_{\text{э}}^{\text{яч}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,474}{\pi}} = 0,685 \text{ см};$$

$$R_{\text{бл}} = \sqrt{\frac{V_{\text{бл}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,442}{\pi}} = 0,375 \text{ см}.$$

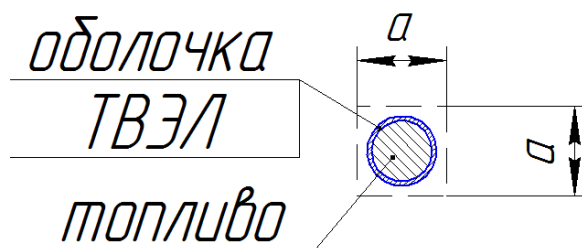


Рисунок 8 – Эквивалентная ячейка

### 3.2 Определение ядерных плотностей

Определяются ядерные и молекулярные плотности нуклидов по формуле

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

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.

Атомный вес и плотность для топлива определяем с учетом обогащения по делящемуся изотопу  $c_5$  %,:

$$A_{UO_2} = \left( \frac{C_5^{cp}}{100} \right) \cdot A_{U_5} + \left( \frac{100 - C_5^{cp}}{100} \right) \cdot A_{U_8} + 2 \cdot A_O = \left( \frac{2,3}{100} \right) \cdot 235 + \left( \frac{100 - 2,3}{100} \right) \cdot 238 + 2 \cdot 16 = 269,9 \text{ а.е.м.}$$

$$N_{UO_2} = \frac{N_A \cdot \gamma_{UO_2}}{A_{UO_2}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 10,4}{269,9} = 0,232 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{U_5} = \left( \frac{C_5^{cp}}{100} \right) \cdot N_{UO_2} = \left( \frac{2,3}{100} \right) \cdot 0,232 \cdot 10^{23} = 0,0053 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{U_8} = N_{UO_2} - N_{U_5} = (0,232 - 0,0053) \cdot 10^{23} = 0,0227 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3};$$

$$N_{Zr} = \frac{N_A \cdot \gamma_{Zr}}{A_{Zr}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 6,44}{91,22} = 0,4252 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}.$$

$\gamma_{UO_2} = 10,4 \text{ г/см}^3$  – плотность  $UO_2$ ;

$\gamma_{Zr} = 6,44 \text{ г/см}^3$  – плотность  $Zr$ .

Т.к. считается холодный реактор, то температура замедлителя – теплоносителя  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , тогда  $\gamma_{H_2O} = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ :

$$N_{H_2O} = \frac{N_A \cdot \gamma_{H_2O}}{A_{H_2O}} = \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cdot 1}{18,015} = 0,3346 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}.$$

Т.к. молекула  $UO_2$  содержит один атом  $U$  и два атома  $O_2$ :

$$N_O = 2 \cdot N_{UO_2} = 2 \cdot 0,232 \cdot 10^{23} = 0,462 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}.$$

Для расчета ядерной плотности по зонам эквивалентной ячейки, используются формулы:

$$N_i^1 = \frac{V_i}{V_{\text{бл}}} \cdot N_i,$$

где  $N_i^1$  - ядерная плотность  $i$  – го нуклида отнесённого к блоку,  $V_{\text{бл}} = V_{\text{топ}}$  - объём блока;

$$N_i^2 = \frac{V_i}{V_{\text{зам}}} \cdot N_i,$$

где  $N_i^2$  - ядерная плотность  $i$ -го нуклида отнесённого к замедлителю.

Находятся значения эффективных микроскопических сечений по [4], затем заносятся в таблицу 11.

Средней логарифмический декремент энергии для нуклидов:

$$\sigma_a^{\text{Zr}} = 6,3 \text{ барн}, \sigma_s^{\text{Zr}} = 0,19 \text{ барн}, \xi_{\text{Zr}} = \frac{2}{91,22 + \frac{2}{3}} = 0,022;$$

$$\sigma_a^{\text{U5}} = 680,9 \text{ барн}, \sigma_s^{\text{U5}} = 13,6 \text{ барн}, \xi_{\text{U5}} = \frac{2}{235 + \frac{2}{3}} = 0,0085;$$

$$\sigma_a^{\text{U8}} = 2,71 \text{ барн}, \sigma_s^{\text{U8}} = 9 \text{ барн}, \xi_{\text{U8}} = \frac{2}{238,03 + \frac{2}{3}} = 0,0084;$$

$$\sigma_a^{\text{H}_2\text{O}} = 0,66 \text{ барн}; \sigma_s^{\text{H}_2\text{O}} = 44,56 \text{ барн}.$$

$$\xi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2 \cdot \xi^{\text{H}} \cdot \sigma_s^{\text{H}} + \xi^{\text{O}} \cdot \sigma_s^{\text{O}}}{2 \cdot \sigma_s^{\text{H}} + \sigma_s^{\text{O}}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 20,4 + 0,12 \cdot 3,8}{2 \cdot 20,4 + 3,8} = 0,925.$$

$$\sigma_a^{\text{O}} = 0,0002 \text{ барн}; \sigma_s^{\text{O}} = 3,8 \text{ барн}$$

$$\xi_{\text{O}} = \frac{2}{A_0 + \frac{2}{3}} = \frac{2}{16 + \frac{2}{3}} = 0,12.$$

Таблица 11 – Таблица эффективных микроскопических сечений стандартных энергий

Элемент	$V_i$ , см <sup>3</sup>	$N_i \cdot 10^{23}$ , см <sup>-3</sup>	$\sigma_a$ , барн	$\sigma_s$ , барн	$\xi$	$\xi \sigma_s$ барн	$V N \sigma_a$ , см <sup>-1</sup>	$V N \sigma_s \xi$ , см <sup>-1</sup>
U <sub>8</sub>	0,442	0,2321	2,71	9	0,0084	0,075	0,027	0,00076
U <sub>5</sub>	0,442	0,0053	680,9	13,6	0,0085	0,115	0,161	0,00003
H <sub>2</sub> O	0,776	0,3346	0,66	44,5	0,925	42,089	0,017	1,093
Zr	0,256	0,4309	0,19	6,3	0,022	0,137	0,0021	0,00151

продолжение таблицы 11

О	0,442	0,4252	0,0002	3,8	0,12	0,456	0,000004	0,00936
---	-------	--------	--------	-----	------	-------	----------	---------

### 3.3 Определение по ячейки температуры нейтронного газа

Температуру нейтронного газа определяют по формуле для водородсодержащих сред:

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

где  $T_0$  – температура по элементарной ячейке замедлителя;  $\Sigma_a(T_0)$  – макроскопическое сечение поглощения гомогенизированной по элементарной ячейки, скорректированной на температуру среды;  $\xi \Sigma_S(1)$  – замедляющая способность;  $C$  – эмпирическая константа.

$$T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C} = 293 \text{ К.}$$

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

$$\Sigma_a(T_0) = \sum_{j=1} \frac{(VN\sigma_a(0,0253))}{V_0} = \frac{0,027 + 0,161 + 0,017 + 0,0021 + 0,000004}{1,474} \cdot \sqrt{\frac{293}{293}} = 0,141 \text{ см}^{-1};$$

$$\xi \Sigma_S(1) = \sum_{j=1} \frac{(VN\xi\sigma_S(1))}{V_0};$$

$$\xi \Sigma_S(1) = \sum_{j=1} \frac{(VN\xi\sigma_S(1))}{V_0} = \frac{0,00076 + 0,00003 + 1,093 + 0,00151 + 0,00936}{1,474} = 0,749 \text{ см}^{-1}.$$

$$T_{\text{нрг}} = 293 \cdot \left[ 1 + 1,7 \cdot \left( \frac{0,141}{0,749} \right) \cdot \sqrt{\frac{293}{293}} \right] = 390 \text{ К.}$$

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

Точка пересечения спектров Ферми и Максвелла  $E_{\text{сш}} = E_{\text{гр}}$ , для реактора на тепловых и не очень жёстких промежуточных нейтронах условно определяет верхнюю границу тепловой группы. Её определяют из следующего уравнения:

						ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			37



$$f = \frac{x^2 \cdot e^{-x}}{1 - (1+x) \cdot e^{-x}} = \frac{\sum_a(E_{гр}, E_T)}{\xi \sum_s(1)},$$

или

$$f = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot x^2 \cdot \exp(-x) = \frac{\sum_a(E_{гр}, E_T)}{\xi \sum_s(1)},$$

Процедура решения трансцендентных уравнений следующая:

1) задаются значениями  $x$ , которые обычно оно находится в пределах  $5 \div 10$  и строят график.

Полученные значения занесли в таблицу 12:

Таблица 12 – Значения функции  $f(\text{лев})$  в зависимости от  $x_{гр}$

$x_{гр}$	4	5	6	7
$f(\text{лев})$	0.323	0,176	0,091	0,045

Задаёмся значением  $x_{гр} = 4, 5, 6, 7$ , после чего решаем правую часть уравнения.

Определим сечение поглощения гомогенной среды, усреднённое по спектру Максвелла:

$$\sum_a(E_{гр}, E_T) = \frac{1}{V_0} \cdot \left( \sum_i K(x_{гр}) \cdot V_i \cdot N_i \cdot \sigma_a^i + (V_i \cdot N_i \cdot \overline{\sigma}_a^i) \right), \text{ где}$$

$\overline{\sigma}_a^i(E_{гр}, E_T)$  - сечение поглощения отдельных элементов, усреднённые по спектру Максвелла. В зависимости от характера изменения  $\sigma_i(E)$  от энергии различают два подхода [4].

Для  $U^{238}$ , H, Zr и O находим по формуле:

$$\overline{\sigma}_a^i(E) = 0,886 \cdot \sigma_{a0}^i \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{нг}}} \cdot F(x_{гр}), \text{ где}$$

$$F(x_{гр}) = \frac{2 \cdot \int_0^{x_{гр}} \sqrt{x_{гр}} \cdot e^{-x_{гр}} dx}{\sqrt{\pi} \cdot (1 - (1 - x_{гр}) \cdot e^{-x_{гр}})}.$$

Для  $U^{235}$  находим по формуле:

$$\bar{\sigma}_a^5 = K(x_{гр}) \cdot \sigma_{a0}^5 \cdot g_a^5.$$

$$g_a^5 = f(T_{нг}, ^\circ\text{C}) = 0,956, [3].$$

Поправочный коэффициент, рассчитывается по формуле:

$$K(x) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{нг}}} \cdot F(x_{гр});$$

При помощи программы Mathcad определяется  $F(x_{гр})$ :

Таблица 13 – Значения функции  $F(x_{гр})$  в зависимости от  $x$

$x_{гр}$	4	5	6	7
$F(x_{гр})$	1,052	1,023	1,01	1,002
$K(x_{гр})$	0,808	0,789	0,774	0,77

После нахождения заносятся все значения в таблицы 14 и 15:

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

	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 5$	$x_{гр} = 6$	$x_{гр} = 7$
Элемент	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн	$\bar{\sigma}_a^i(E)$ , барн
$U^{238}$	2,189	2,128	2,098	2,085
$U^{235}$	525,929	511,336	504,059	500,963
$H_2O$	0,533	0,518	0,511	0,508
Zr	0,153	0,149	0,147	0,146
O	0,00016	0,000157	0,000155	0,000154

Таблица 15 – Значения  $VN\bar{\sigma}_a^i$  для различных элементов в зависимости от  $x_{гр}$

	$x_{гр} = 4$	$x_{гр} = 5$	$x_{гр} = 6$	$x_{гр} = 7$
Элемент	$VN\bar{\sigma}_a^i$ , см <sup>-1</sup>	$VN\bar{\sigma}_a^i$ , см <sup>-1</sup>	$VN\bar{\sigma}_a^i$ , см <sup>-1</sup>	$VN\bar{\sigma}_a^i$ , см <sup>-1</sup>
$U^{238}$	0,022	0,021	0,021	0,021

Продолжение таблицы 15

$U^{235}$	0,124	0,121	0,119	0,118
$H_2O$	0,014	0,013	0,013	0,013
Zr	$1,691 \cdot 10^{-3}$	$1,644 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$
O	$3,317 \cdot 10^{-6}$	$3,224 \cdot 10^{-6}$	$3,179 \cdot 10^{-6}$	$3,159 \cdot 10^{-6}$
$\Sigma_a(E_{гр}, E_T)$	0,11	0,107	0,105	0,104
$\frac{\Sigma_a(E_{гр}, E_T)}{\zeta \cdot \Sigma_s(1)}$	0,146	0,142	0,140	0,139

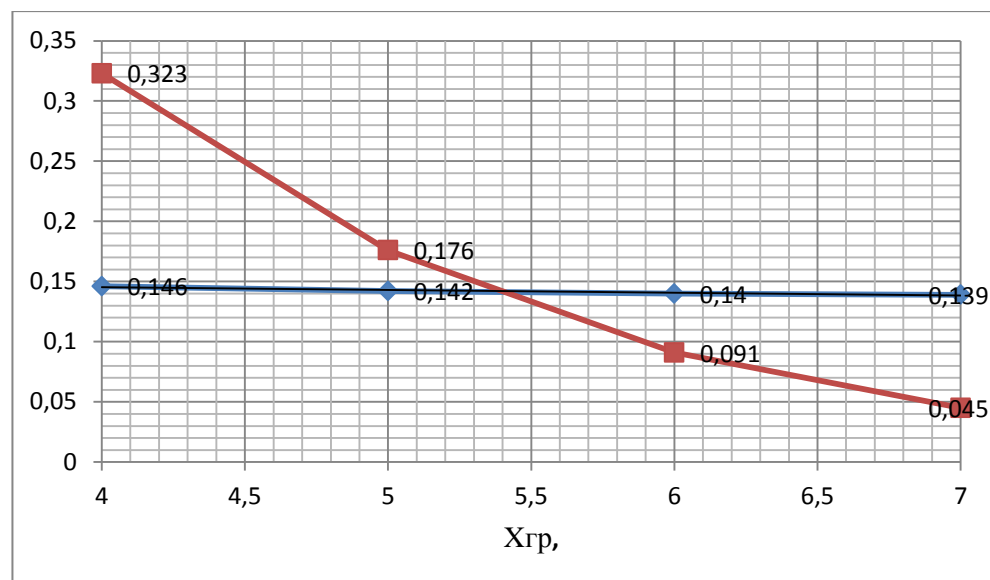


Рисунок 9 – Определение  $X_{гр}$

Из графика определяется  $X_{гр}=5,4$ .

Энергия сшивки между графиками:

$E_{гр} = x_{гр} \cdot E_T = 5,4 \cdot 0,034 = 0,182$  эВ – это и есть энергия сшивки между спектрами замедляющихся и тепловых нейтронов, где

$$E_T = k \cdot T_{нг} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,034 \text{ эВ.}$$

Сделаем проверку для  $U^{235}$ :

$$\overline{\sigma_a^{235}} = K(X_{гр}) \cdot \sigma_a^{235} \cdot g_a^5 = 0,78 \cdot 680,9 \cdot 0,956 = 507,775, \text{ барн;}$$

где  $K(x_{гр}=5,7) = 0,78$

$$F(x_{гр}=5,7)=1,016.$$

$g_i$ - фактор вычисляется по формуле:

$$g_{a5}=-1,043 \cdot 10^{-10} \cdot T_{нр}^3 + 2,446 \cdot 10^{-7} \cdot T_{нр}^2 - 2,06 \cdot 10^{-4} \cdot T_{нр} + 0,9793 = 0,958;$$

$$\overline{\sigma_a^{235}} = K(X_{гр}) \cdot \sigma_a^{235} \cdot g_{a5} = 0,78 \cdot 680,9 \cdot 0,958 = 509,038 \text{ барн.}$$

Численным методом определяется среднее сечение,  $\overline{\sigma_a^{235}} = 509,038$  барн.

Вычислим погрешность:  $\frac{509,038-507,775}{509,038} \cdot 100\% = 0,25\%$ , погрешность не

превышает 2%, значит значение получено верно.

### 3.5 Вычисление микроскопических сечений реакций усредненных по спектру максвелла и приведенных к температуре нейтронного газа

При  $x_{гр} = 5,4$  определяются  $\overline{\sigma_a^i}$  для каждого элемента:

$$\overline{\sigma_a^i}(E) = 0,886 \cdot \sigma_{a0}^i \cdot \sqrt{\frac{293}{T_{нр}}} \cdot F(x_{гр});$$

$$F(x_{гр}=5,4) = 0,8779 \cdot x^{-1} + 0,01471 \cdot x + 0,7735 = 1,016;$$

$$U^{238}: \overline{\sigma_a^8} = 2,11 \text{ барн;}$$

$$Zr: \overline{\sigma_a^8} = 0,148 \text{ барн;}$$

$$H_2O: \overline{\sigma_a^8} = 0,515 \text{ барн;}$$

Микроскопическое сечение деления для  $U^{235}$ :

$$\overline{\sigma_f^{235}} = K(X_{гр}=5,7) \cdot \sigma_f^{235} \cdot g_f^5 = 0,78 \cdot 583,5 \cdot 0,952 = 433,319 \text{ барн;}$$

$$g_f^5 = 0,952 \text{ [3];}$$

$$\sigma_f^{235} = 583,5 \text{ барн, [3].}$$

Транспортное сечение определяется по формуле:

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

где  $(1 - \mu_i) = \left(1 - \frac{2}{3A_i}\right)$ ,  $\mu$  – косинус угла рассеяния.

$$U^{238}: (1 - \mu_i) = 0,997;$$

$$Zr: (1 - \mu_i) = 0,9927;$$

$$U^{235}: (1-\mu_i)=0,997;$$

$$O: (1-\mu_i)=0,958;$$

$$\overline{\sigma_{tr}^8} = \overline{\sigma_a^8} + \sigma_s^8 \cdot (1-\mu_i) = 2,11 + 9 \cdot 0,997 = 11,088 \text{ барн.}$$

$$\overline{\sigma_{tr}^5} = \overline{\sigma_a^5} + \sigma_s^5 \cdot (1-\mu_i) = 507,775 + 13,6 \cdot 0,997 = 521,336 \text{ барн.}$$

$$\overline{\sigma_{tr}^{Zr}} = \overline{\sigma_a^{Zr}} + \sigma_s^{Zr} \times (1-\mu_i) = 0,148 + 6,3 \cdot 0,9927 = 6,402 \text{ барн.}$$

$$\overline{\sigma_{tr}^O} = \overline{\sigma_a^O} + \sigma_s^O \times (1-\mu_i) = 0,00015 + 3,8 \cdot 0,958 = 3,642 \text{ барн.}$$

Для воды вычисляются по следующей формуле:

$$\overline{\sigma_{tr}^{H_2O}} = 69 \cdot \left( \frac{293}{T_{нр}} \right)^{0,5} = 69 \cdot \left( \frac{293}{293} \right)^{0,5} = 59,807 \text{ барн.}$$

Таблица №16 – Усреднённые сечения тепловой группы

Элемент	$V_i, \text{ см}^3$	$N_i \cdot 10^{-24}, \text{ см}^{-3}$	$\overline{\sigma_a}, \text{ барн}$	$\overline{\sigma_f}, \text{ барн}$	$\overline{\sigma_{tr}}, \text{ барн}$	$VN\overline{\sigma_a}, \text{ см}^{-1}$	$VN\overline{\sigma_f}, \text{ см}^{-1}$	$VN\overline{\sigma_{tr}}, \text{ см}^{-1}$	$\zeta VN\overline{\sigma_s}, \text{ см}^{-1}$
$U^{238}$	0,442	0,2321	2,11	–	11,088	0,021	–	0,111	$7,563 \cdot 10^{-4}$
$U^{235}$	0,442	0,0053	507,77 5	433,31 9	521,33 6	0,12	0,102	0,123	$2,725 \cdot 10^{-5}$
$H_2O$	0,776	0,3346	0,515	–	59,807	0,013	–	1,553	1,093
Zr	0,256	0,4309	0,148	–	6,402	$1,63 \cdot 10^{-3}$	–	0,071	$1,514 \cdot 10^{-3}$
O	0,442	0,4252	0,0001 5	–	3,642	$3,2 \cdot 10^{-6}$	–	0,075	$9,361 \cdot 10^{-3}$

Макроскопические сечения поглощения:

По гомогенизированной элементарной ячейке:

$$\sum_a^{яч} = \frac{1}{V_0} \cdot \sum_{i=1} (VN\overline{\sigma_a}) = \frac{0,12 + 0,021 + 1,632 \cdot 10^{-3} + 0,013 + 3,202 \cdot 10^{-6}}{1,474} = 0,106 \text{ см}^{-1};$$

по зонам эквивалентного блока:

$$\sum_a^{бл} = \frac{1}{V_{БЛ}} \cdot \sum_{i=1} (VN\overline{\sigma_a}) = \frac{0,12 + 0,021 + 3,202 \cdot 10^{-6}}{0,442} = 0,319 \text{ см}^{-1};$$

по замедлителю:

										Лист
										42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 693100. 001 ПЗ					

$$\Sigma_a^{\text{зам}} = \frac{1}{V_{3AM}} \cdot \sum_{i=1} (VN\bar{\sigma}_a) = \frac{0,013 + 1,632 \cdot 10^{-3}}{1,032} = 0,016 \text{ см}^{-1}.$$

Замедляющие способности сред:

по гомогенизированной элементарной ячейке:

$$\xi \Sigma_S^{\text{яч}} = \frac{1}{V_0} \cdot \sum_{i=1} (VN\xi\bar{\sigma}_s) = \frac{2,725 \cdot 10^{-5} + 7,563 \cdot 10^{-4} + 1,093 + 1,514 \cdot 10^{-3} + 9,361 \cdot 10^{-3}}{1,474} = 0,749 \text{ см}^{-1}.$$

по зонам эквивалентного блока:

$$\xi \Sigma_S^{\text{бл}} = \frac{1}{V_{БЛ}} \cdot \sum_{i=1} (VN\xi\bar{\sigma}_s) = \frac{2,725 \cdot 10^{-5} + 7,563 \cdot 10^{-4} + 9,361 \cdot 10^{-3}}{0,442} = 0,023 \text{ см}^{-1}.$$

по замедлителю:

$$\xi \Sigma_S^{\text{зам}} = \frac{1}{V_{\text{зам}}} \cdot \sum_{i=1} (VN\xi\bar{\sigma}_s) = \frac{1,093 + 1,514 \cdot 10^{-3}}{1,032} = 1,062 \text{ см}^{-1}.$$

Макроскопические транспортные сечения рассеяния:

по гомогенизированной элементарной ячейке:

$$\Sigma_{tr}^{\text{яч}} = \frac{1}{V_0} \cdot \sum_{i=1} (VN\bar{\sigma}_{tr}) = \frac{0,123 + 0,111 + 0,075 + 0,071 + 1,553}{1,474} = 1,311 \text{ см}^{-1}.$$

по зонам эквивалентного блока:

$$\Sigma_{tr}^{\text{бл}} = \frac{1}{V_{БЛ}} \cdot \sum_{i=1} (VN\bar{\sigma}_{tr}) = \frac{0,123 + 0,111 + 0,075}{0,442} = 0,699 \text{ см}^{-1}.$$

по замедлителю:

$$\Sigma_{tr}^{\text{зам}} = \frac{1}{V_{3AM}} \cdot \sum_{i=1} (VN\bar{\sigma}_{tr}) = \frac{1,553 + 0,071}{1,032} = 1,624 \text{ см}^{-1}.$$

Макроскопические сечения деления:

по гомогенизированной элементарной ячейке:

$$\Sigma_f^{\text{яч}} = \frac{1}{V_0} \cdot \sum_{i=1} (VN\bar{\sigma}_f) = \frac{0,102}{1,474} = 0,069 \text{ см}^{-1}.$$

по зонам эквивалентного блока:

						Лист
					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Sigma_f^{\text{бл}} = \frac{1}{V_{\text{БЛ}}} \cdot \sum_{i=1} (VN\bar{\sigma}_f) = \frac{0,102}{0,442} = 0,231 \text{ см}^{-1}.$$

по замедлителю:

$$\Sigma_f^{\text{зам}} = \frac{1}{V_{\text{ЗАМ}}} \cdot \sum_{i=1} (VN\bar{\sigma}_f) = 0 \text{ см}^{-1}.$$

Далее будут рассчитаны средние микроскопические сечения для горячего реактора 260 °С и реактора на МКУ 260 °С, в которых температура замедлителя – теплоносителя 260 °С и 264 °С соответственно. Температуру конструкционных материалов принимается такая же как и температура среды, а температуру топлива на мощности 100% 720 °С.

Особенности этих расчетов будут заключаться в изменении плотности сред в зависимости от их температуры. Приведем таблицу плотностей материалов от режимов работы реактора, плотность воды определим с помощью WaterSteamPro, а топлива и циркония из [5]:

Таблица 17 – Плотности сред в зависимости от режима работы реактора

	Холодный реактор	Горячий реактор	Реактор на мощности 100%
$\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$ , Г/см <sup>3</sup>	1	0,8	0,78
$\gamma_{\text{UO}_2}$ , Г/см <sup>3</sup>	10,4	10,4	10,36
$\gamma_{\text{Zr}}$ , Г/см <sup>3</sup>	6,51	6,48	6,48

Расчет оставшихся состояний реактора будет идентичен расчету холодного реактора, поэтому, для экономии времени и бумаги, составляются таблицы полученных результатов необходимых для определения коэффициентов размножения топливной загрузки на каждый режим работы реактора.

Таблица 18 – К определению нейтронно-физических параметров на каждый режим работы реактора

Параметр	Холодный реактор	Горячий реактор	Реактор на мощности 100%
$T_{\text{нг}}$ , К	390	690	1209
$X_{\text{гр}}$	5,4	5,5	5,95
$\bar{\sigma}_a^8$ , барн	2,11	1,587	1,193

продолжение таблицы 18

$\overline{\sigma_a^8}$ , барн	2,11	1,587	1,193
$\overline{\sigma_a^5}$ , барн	507,775	370,174	274,357
$\overline{\sigma_a^0}$ , барн	0,00015	0,00012	0,00009
$\overline{\sigma_a^{Zr}}$ , барн	0,148	0,111	0,084
$\overline{\sigma_a^{H2O}}$ , барн	0,515	0,386	0,29
$\overline{\sigma_{tr}^8}$ , барн	11,088	10,561	10,168
$\overline{\sigma_{tr}^5}$ , барн	521,336	383,388	289,493
$\overline{\sigma_{tr}^0}$ , барн	3,642	3,642	3,642
$\overline{\sigma_{tr}^{Zr}}$ , барн	6,402	6,365	3,642
$\overline{\sigma_{tr}^{H2O}}$ , барн	59,807	44,963	33,968
$\overline{\sigma_s^8}$ , барн	0,075	0,075	0,075
$\overline{\sigma_s^5}$ , барн	0,115	0,115	0,115
$\overline{\sigma_s^0}$ , барн	0,456	0,456	0,456
$\overline{\sigma_s^{Zr}}$ , барн	0,137	0,137	0,137
$\overline{\sigma_s^{H2O}}$ , барн	42,089	42,089	42,089
$\overline{\sigma_f^5}$ , барн	433,319	313,577	249,176
$\Sigma_a^{яч}$ , см <sup>-1</sup>	0,106	0,076	0,057
$\Sigma_a^{бл}$ , см <sup>-1</sup>	0,319	0,233	0,174
$\Sigma_a^{зам}$ , см <sup>-1</sup>	0,016	0,01	0,007
$\zeta \Sigma_s^{яч}$ , см <sup>-1</sup>	0,749	0,594	0,586
$\zeta \Sigma_s^{бл}$ , см <sup>-1</sup>	0,023	0,023	0,23
$\zeta \Sigma_s^{зам}$ , см <sup>-1</sup>	1,062	0,839	0,829
$\Sigma_{tr}^{яч}$ , см <sup>-1</sup>	1,311	0,857	0,680
$\Sigma_{tr}^{бл}$ , см <sup>-1</sup>	0,699	0,613	0,553
$\Sigma_{tr}^{зам}$ , см <sup>-1</sup>	1,624	1,011	0,783
$\Sigma_f^{яч}$ , см <sup>-1</sup>	0,069	0,05	0,04
$\Sigma_f^{бл}$ , см <sup>-1</sup>	0,231	0,167	0,133
$\Sigma_f^{зам}$ , см <sup>-1</sup>	0	0	0



продолжение таблицы 18

$\sum_{tr}^{яч}, см^{-1}$	1,311	0,857	0,680
$\sum_{tr}^{бл}, см^{-1}$	0,699	0,613	0,553
$\sum_{tr}^{зам}, см^{-1}$	1,624	1,011	0,783
$\sum_f^{яч}, см^{-1}$	0,069	0,05	0,04
$\sum_f^{бл}, см^{-1}$	0,231	0,167	0,133
$\sum_f^{зам}, см^{-1}$	0	0	0

## 4 НЕЙТРОННО – ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ РЕАКТИВНОСТИ

Цель расчета в этом разделе будет, определение эффективного коэффициента размножения для каждого режима работы реактора и определение коэффициентов реактивности: температурного и мощностного.

Физический коэффициент размножения характеризует отношение числа нейтронов в данном поколении к числу нейтронов в предыдущем. Коэффициент размножения бесконечной среды  $K_{\infty}$  является очень важным параметром активной зоны реактора и даёт вероятностное описание цепной реакции без учёта утечек нейтронов. Расчет производится по формуле четырёх сомножителей, которая не учитывает деления в промежуточной области энергий [3]:

$$K_{\infty} = \nu_a \cdot \mu \cdot \varphi \cdot \Theta,$$

где  $\nu_a$  – среднее число вторичных быстрых нейтронов, рождающихся в результате захвата теплового нейтрона в  $U^{235}$ ;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий увеличение числа замедлившихся нейтронов за счёт размножения на быстрых в результате деления ядер  $U^{238}$ ;  $\varphi$  – вероятность избежать резонансного захвата при замедлении в тепловую группу;  $\Theta$  – коэффициент использования тепловых нейтронов.

### 4.1 Коэффициент размножения

Число вторичных быстрых нейтронов :

$$\nu_a = \nu_f^5 \cdot \frac{\overline{\sigma_f^5}}{\sigma_a^5} = 2,416 \cdot \frac{433,319}{507,775} = 2,062,$$

где  $\nu_f^5 = 2,416$  - среднее число вторичных быстрых нейтронов, рождающихся при делении одного ядра [3] .

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах [3]:

$$\mu = 1 + 0,19 \cdot \frac{V_U^0}{V_U^0 + V_{\text{вод}}^0} = 1 + 0,19 \cdot \frac{0,253}{0,253 + 0,776} = 1,047,$$

$$\text{где } V_U^0 = V_{\text{бл}} \cdot \frac{\gamma^8}{\gamma_{\text{мет } U}^8} = 0,442 \cdot \frac{10,4}{18,7} = 0,253, \text{ см}^3;$$

									Лист
									47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

$V_{H_2O}, V_U$  - объемы замедлителя-теплоносителя и горючего в эквивалентной ячейке.

Находим коэффициент проигрыша, согласно [3]:

$$f = 1 + \frac{(0,818 \cdot 0,375)^2}{8} - \frac{(0,818 \cdot 0,375)^4}{192} = 1,012,$$

где  $\alpha' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{БЛ}}{D}}$  - по блоку;  $D = \frac{1}{3 \cdot \Sigma_{tr}^{БЛ}}$ , тогда

$$\alpha' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{БЛ}}{D}} = \sqrt{\Sigma_a^{БЛ} \cdot 3 \cdot \Sigma_{tr}^{БЛ}} = \sqrt{0,319 \cdot 3 \cdot 0,699} = 0,818 \text{ см}^{-1};$$

Для расчета поправки на внешний блок – эффект, используется следующая формула:

$\alpha'' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{H_2O}}{D}}$  - по замедлителю;

$$\alpha'' = \sqrt{\frac{\Sigma_a^{ЗМ}}{D}} = \sqrt{\Sigma_a^{ЗМ} \cdot 3 \cdot \Sigma_{tr}^{ЗМ}} = \sqrt{0,016 \cdot 3 \cdot 1,624} = 0,276 \text{ см}^{-1};$$

$$E-1 = \frac{(\alpha'' \cdot R_{БЛ})^2}{2} \left( \ln \frac{R_9}{R_{БЛ}} - 0,75 \right) = \frac{(0,276 \cdot 0,375)^2}{2} \left( \ln \frac{0,685}{0,375} - 0,75 \right) = -0,0008;$$

$$\Sigma_a^5 = N_{U5} \cdot \bar{\sigma}_a^5 = 0,0053 \cdot 10^{23} \cdot 507,775 \cdot 10^{-24} = 0,271 \text{ см}^{-1};$$

Коэффициент использования тепловых нейтронов равен в [3]:

$$\Theta = \frac{\Sigma_a^5}{\Sigma_a^5 + f \cdot \Sigma_a^{ЗМ} + \Sigma_a^5 \cdot (E-1)} = \frac{0,271}{0,271 + 1,012 \cdot 0,016 + 0,271 \cdot (-0,0008)} = 0,945;$$

Вероятность избежать резонансного захвата :

$$\begin{aligned} \varphi &= \exp\left(-\frac{1}{\zeta \Sigma_S^{ЗМ}} \cdot \frac{K_T \cdot \sqrt{k_S} \cdot R_U^{3/2} + 0,73 \cdot k_S \cdot R_U^2}{V_{ЗМ}}\right) = \\ &= \exp\left(-\frac{1}{1,062} \cdot \frac{0,981 \cdot \sqrt{0,977} \cdot 0,38^{3/2} + 0,73 \times 0,977 \times 0,38^2}{1,032}\right) = 0,74, \end{aligned}$$

где  $K_T$  – температурная поправка М.Б. Егиазарова, учитывающая эффект Доплера,

$$K_T = 0,755 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{T_0}) = 0,755 \cdot (1 + 17,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{293}) = 0,981;$$

					Лист
					48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 693100. 001 ПЗ

Поправка на пористость:

$$k_{\varepsilon}=0,95;$$

Квадрат длины диффузии тепловых нейтронов:

$$L_{\text{реш}}^2=L_{\text{зм}}^2 \cdot (1-\Theta)+L_{\text{бл}}^2 \cdot \Theta=13,084 \cdot (1-0,945)+1,496 \cdot 0,945=2,129 \text{ см}^2;$$

$$L_{\text{зм}}^2=\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{зм}} \cdot \Sigma_{\text{тр}}^{\text{зм}}}=\frac{1}{3 \cdot 0,016 \cdot 1,624}=13,084, \text{ см}^2;$$

$$L_{\text{бл}}^2=\frac{1}{3 \cdot \Sigma_a^{\text{бл}} \cdot \Sigma_{\text{тр}}^{\text{бл}}}=\frac{1}{3 \cdot 0,319 \cdot 0,699}=1,496, \text{ см}^2.$$

Возраст нейтронов [3]:

$$\tau_p = \frac{\tau_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \left(1 + \frac{V_{\text{бл}}}{V_{\text{вод}}} + \frac{V_{\text{км}}}{V_{\text{вод}}}\right)^2}{\left(\gamma_{\text{H}_2\text{O}} + 0,82 \cdot \frac{V_{\text{бл}}}{V_{\text{вод}}} + 0,4 \cdot \frac{V_{\text{км}}}{V_{\text{вод}}}\right)^2} = \frac{27 \cdot \left(1 + \frac{0,422}{0,776} + \frac{0,256}{0,776}\right)^2}{\left(1 + 0,82 \cdot \frac{0,422}{0,776} + 0,4 \cdot \frac{0,256}{0,776}\right)^2} = 38,09 \text{ см}^2;$$

где  $\tau_{\text{H}_2\text{O}}=27 \text{ см}^2$  – возраст в чистой воде при  $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}=1 \text{ г/см}^3$  [5];  $V_{\text{бл}}, V_{\text{вод}},$

$V_{\text{км}}$  – объёмы  $\text{H}_2\text{O}, \text{UO}_2$  и  $\text{Zr}$  соответственно.

Площадь миграции равна:

$$M^2=L_{\text{реш}}^2+\tau_p=2,129+38,09=40,22, \text{ см}^2;$$

Для железо-водных отражателей величина эффективной добавки вычисляется по формуле [3]:

$$\delta_{\text{эф}}=7,2+0,1 \cdot (M^2-40)=7,2+0,1 \cdot (40,22^2-40)=7,22, \text{ см};$$

Коэффициент размножения бесконечной среды:

$$K_{\infty}=v_a \cdot \mu \cdot \phi \cdot \Theta=2,062 \cdot 1,047 \cdot 0,74 \cdot 0,945=1,509.$$

По определению эффективный коэффициент размножения учитывает процессы размножения и поглощения, а также утечки быстрых и тепловых нейтронов в среде конечных размеров:

$$K_{\text{эф}}=K_{\infty} \cdot P_{\text{зам}} \cdot P_{\text{диф}},$$

где  $P_{\text{зам}}, P_{\text{диф}}$  – вероятности того, что нейтрон избежит утечки из реактора в процессе замедления и диффузии. В возрастно-диффузионном приближении эти вероятности имеют вид:

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	49

$$P_{\text{зам}} = \exp(-B^2 \tau_p) = \exp(-0,0004^2 \cdot 38,09) = 0,985;$$

$$P_{\text{диф}} = (1 + B^2 L_{\text{реш}}^2)^{-1} = (1 + 0,0004^2 \cdot 2,129^2)^{-1} = 0,999;$$

Материальный параметр  $B^2$  определяется следующей формулой:

$$B^2 = \left( \frac{3,14}{H + 2 \cdot \delta_{\text{эф}}} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{R + \delta_{\text{эф}}} \right)^2 = \left( \frac{3,14}{2,5 + 2 \cdot 7,22} \right)^2 + \left( \frac{2,405}{1,44 + 7,22} \right)^2 = 0,0004.$$

Эффективный коэффициент размножения:

$$K_{\text{эф}} = 1,509 \cdot 0,985 \cdot 0,999 = 1,486.$$

Далее проведем расчет эффективного коэффициента размножения для горячего реактора и реактора на МКУ, т.к. методы расчета идентичны расчету представленного выше, то составим таблицу результатов, в которую занесем все полученные значения:

Таблица 19 – К определению эффективного коэффициента размножения

	Холодный реактор	Горячий реактор	Реактор на МКУ
Число вторичных быстрых нейтронов, $\nu_a$	2,062	2,047	2,047
Коэффициент размножения на быстрых нейтронах, $\mu$	1,047	1,047	1,047
Вероятность избежать резонансного захвата, $\phi$	0,74	0,715	0,651
Вероятность избежать резонансного захвата, $\phi$	0,74	0,715	0,651
Квадрат длины диффузии тепловых нейтронов, $L_{\text{реш}}^2$ см <sup>2</sup>	2,129	3,812	6,051
Возраст нейтронов, $\tau_p$ см	38,09	50,48	51,21
Площадь миграции, $M^2$ см <sup>2</sup>	40,22	54,29	57,26
Величина эффективной добавки, $\delta_{\text{эф}}$	7,22	8,63	8,93

продолжение таблицы 19

Коэффициент размножения, $K_{\infty}$	1,509	1,461	1,416
Вероятность избежать утечки в процессе замедления, $P_{зам}$	0,985	0,981	0,98
Вероятность избежать утечки в процессе диффузии, $P_{диф}$	0,999	0,999	0,998
Материальный параметр, $B^2$	0,0004	0,00038	0,00038
Эффективный коэффициент размножения, $K_{эф}$	1,486	1,431	1,385

#### 4.2 Определение коэффициентов реактивности

Проводится определение температурных эффектов согласно с [3].

Запас реактивности холодного реактора на начало кампании:

$$\rho_{ХР} = \frac{\Delta k_{эф}^{ХР}}{k_{эф}^{ХР}} = \frac{k_{эф}^{ХР} - 1}{k_{эф}^{ХР}} = \frac{1,486 - 1}{1,486} = 0,327;$$

Запас реактивности горячего реактора:

$$\rho_{ГР} = \frac{\Delta k_{эф}^{ГР}}{k_{эф}^{ГР}} = \frac{k_{эф}^{ГР} - 1}{k_{эф}^{ГР}} = \frac{1,431 - 1}{1,431} = 0,301;$$

Запас реактивности горячего реактора на мощности 100%:

$$\rho_{ГР}^{100\%} = \frac{\Delta k_{ГР}^{100\%}}{k_{ГР}^{100\%}} = \frac{k_{ГР}^{100\%} - 1}{k_{ГР}^{100\%}} = \frac{1,425 - 1}{1,425} = 0,278;$$

Мощностной эффект реактивности равен:

$$\Delta \rho_M = \rho_{ГР}^{100\%} - \rho_{ГР} = 0,278 - 0,301 = - 0,023;$$

Эффект реактивности обусловленный нагревом реактора до средней температуры теплоносителя равен:

$$\Delta \rho_{ТН} = \rho_{ГР} - \rho_{ХР} = 0,301 - 0,327 = - 0,026;$$

Полный температурный эффект реактивности [3]:

$$\Delta \rho_{ТК} = \rho_{ГР}^{100\%} - \rho_{ХР} = 0,278 - 0,327 = - 0,049.$$

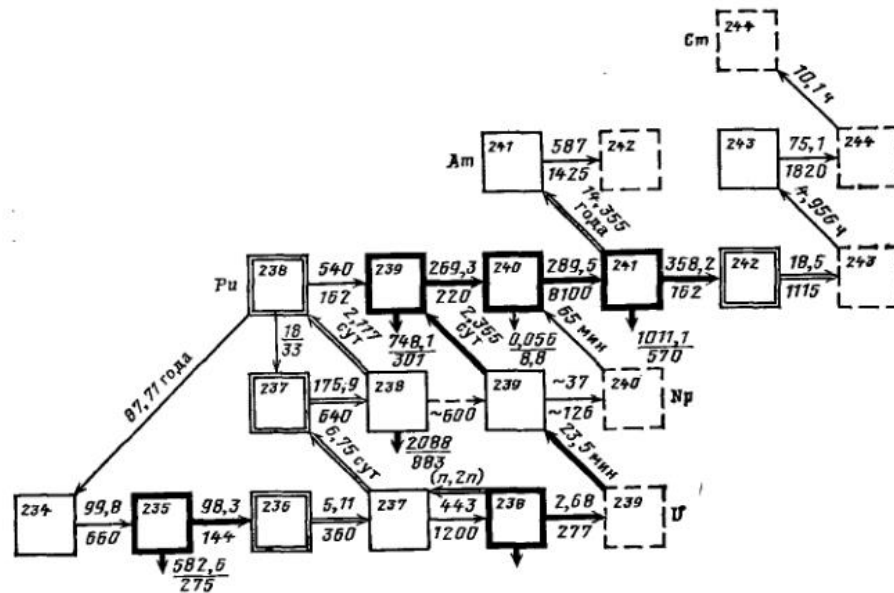
Получив отрицательные коэффициенты реактивности делается вывод, что реактор устойчив к работе т.к. увеличение температуры (мощности) приведет к уменьшению реактивности, и наоборот. По другому можно сказать, что реактор готов к саморегулированию. Тем самым расчет нейтронно-физических параметров загрузки на начало кампании можем считать окончанным и переходить к расчету изменения нуклидного состава топлива.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

# 5 РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ НУКЛИДНОГО СОСТАВА ТОПЛИВА В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ РЕАКТОРА

Цель расчета в этом разделе, является определение изменения нуклидного состава топлива.

Во время работы в реакторе непрерывно протекают процессы, приводящее к изменению нуклидного состава топлива рисунок 10 [2],



Квадраты выделенные жирными линиями, относятся к основным нуклидам, дающим вклад в реактивность более 1%; двойными линиями – от 0,1 до 1%; тонкими сплошными линиями – от 0,01 – 0,1 %; штриховыми - линиями к нуклидам и реакциям не дающим вклад реактивности.

Рисунок 10 – Схема превращения нуклидов в процессе выгорания

В представленном расчете будет предложена попытка определения концентрации, в течении одной кампании загрузки реактора, основных нуклидов, остальными пренебрежем.

Методика расчета взята из [3], в ней предполагаются несколько условий:

- Отсутствует пространственная зависимость потока нейтронов  $\Phi$ ;
- Отсутствует временная зависимость потока нейтронов  $\Phi$ ;
- Считается неизменной во времени мощность реактора  $Q_{тр}$ ;
- Концентрация  $U^{238} = const$ ;



- Микроскопические сечения от начала до конца кампании загрузки постоянны.

Имеется реактор ВВЭР-440 тепловой мощностью  $Q_{тр} = 1471$  МВт, с длиной кампании 306 эфф. сут [1].

Поток нейтронов для  $t=0$  эфф. сут [3], нуклиды Pu отсутствуют:

$$\Phi_0 = \frac{3,1 \cdot 10^{10} \cdot Q_{тЭ}}{\bar{\sigma}_f^5 \cdot N_5^0 \cdot V_{бл}};$$

$Q_{тЭ}$  - тепловая мощность выделяемая эквивалентной ячейкой, Вт;

$N_5^0$  - начальная концентрация  $U^{235}$ ;

$\bar{\sigma}_f^5$  - усредненное микроскопическое сечение деления определяемое в главе 2;

Поток нейтронов принимается по паспортным значения для реактора на тепловых нейтронах:

$$\Phi_0 = 2,67 \cdot 10^{13} \frac{\text{нейтрон}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}.$$

Система дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени  $t$  плотностей изотопов урана и плутония:

$$\begin{cases} \frac{dN_5}{dt} = -\Phi \cdot \sigma_a^5 \cdot N_5; \\ \frac{dN_9}{dt} = -\Phi \cdot \sigma_a^9 \cdot N_9 + \Phi \cdot \sigma_c^8 \cdot N_8 + \\ + \mu \cdot (1-\phi) \cdot (v_{эф}^5 \cdot \sigma_a^5 \cdot N_5 + v_{эф}^9 \cdot \sigma_a^9 \cdot N_9) \Phi; \\ \frac{dN_0}{dt} = -\Phi \cdot \sigma_c^0 \cdot N_0 + \Phi \cdot \sigma_c^9 \cdot N_9; \\ \frac{dN_1}{dt} = -\Phi \cdot \sigma_c^1 \cdot N_1 + \Phi \cdot \sigma_c^0 \cdot N_0. \end{cases}$$

$N_5$  - концентрация  $U_{235}$ ;

$N_9$  - концентрация  $Pu_{239}$ ;

$N_0$  - концентрация  $Pu_{240}$ ;

$N_1$  - концентрация  $Pu_{241}$ .

Первая часть каждого из уравнений системы представляет собой алгебраическую сумму скоростей убыли ядер нуклида вследствие поглощения и прибыли ядер этого же нуклида в результате радиационного захвата нейтронов ядрами предыдущего нуклида в цепочке. Последним слагаемым в

уравнении для  $N_9$  описывается прибыль  $Pu^{239}$  за счет резонансного захвата нейтронов ядрами  $U^{238}$ .

Рассмотрим упрощенный подход к решению данной системы, основанный на использовании факта относительно слабого изменения за время работы реактора скорости образования нейтронов деления при единичном потоке нейтронов  $(v_{эф}^5 \cdot \sigma_a^5 \cdot N_5 + v_{эф}^9 \cdot \sigma_a^9 \cdot N_9)$ .

Если считать неизменной во времени  $(v_{эф}^5 \cdot \sigma_a^5 \cdot N_5 + v_{эф}^9 \cdot \sigma_a^9 \cdot N_9)$ , то система упрощается и принимает вид:

$$\begin{cases} c_5 = c_5^0 \cdot \exp(-z); \\ c_9 = \frac{\overline{\sigma_c^8}}{\sigma_a^9} \cdot (1 - \exp(-\overline{\sigma_a^9} \cdot z)); \\ c_0 = \overline{\sigma_c^9} \cdot \left( \frac{\overline{\sigma_c^8}}{\sigma_a^9 \cdot \sigma_c^0} \cdot (1 - \exp(-\overline{\sigma_a^9} \cdot z)) - \frac{\overline{\sigma_c^8}}{\sigma_a^9 \cdot (\sigma_c^0 - \sigma_a^9)} \cdot (\exp(-\overline{\sigma_a^9} \cdot z) - \exp(-\overline{\sigma_c^0} \cdot z)) \right); \\ c_1 = \overline{\sigma_c^9} \cdot \overline{\sigma_c^0} \cdot \left( \frac{\overline{\sigma_c^8}}{\sigma_a^9 \cdot \sigma_c^0} \cdot \left( \frac{1}{\sigma_a^1} \cdot (1 - \exp(-\overline{\sigma_a^1} \cdot z)) - \frac{1}{\sigma_a^1 - \sigma_c^0} \cdot (\exp(-\overline{\sigma_c^0} \cdot z) - \exp(-\overline{\sigma_a^1} \cdot z)) \right) - \right. \\ \left. - \frac{\overline{\sigma_c^8}}{\sigma_a^9 \cdot (\sigma_c^0 - \sigma_a^9)} \cdot \left( \frac{1}{\sigma_a^1 - \sigma_c^0} \cdot (\exp(-\overline{\sigma_a^9} \cdot z) - \exp(-\overline{\sigma_a^1} \cdot z)) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{\sigma_a^1 - \sigma_c^0} \cdot (\exp(-\overline{\sigma_c^0} \cdot z) - \exp(-\overline{\sigma_a^1} \cdot z)) \right) \right) \end{cases}$$

где  $c_i = \frac{N_i}{N_8}$  - отношение ядерных плотностей  $i$ -го нуклида и  $U^{238}$ ,  $c_5^0 = \frac{N_5^0}{N_8}$ ;  $N_5^0$  - начальное значение  $N_5$ ;  $z$  - эффективное время, связанное с временем соотношением

$$dz = \Phi \cdot \sigma_a^5 dt,$$

$$\overline{\sigma_c^i} = \frac{\sigma_c^i}{\sigma_a^5}, \quad \overline{\sigma_a^i} = \frac{\sigma_a^i}{\sigma_a^5}, \quad \overline{\sigma_c^8}^* = \overline{\sigma_c^8} + \mu \cdot (1 - \phi) \cdot v_{эф}^5 \cdot c_5^0.$$

Т.к. сечение деления  $Pu^{239}$  и  $Pu^{241}$  заметно отклоняются от закона  $1/v$ , тогда для этих элементов это сечение найдется следующим образом:

$$\overline{\sigma_{ai}} = \sigma_{ai} \cdot K(x_{гр} = 5,95) \cdot g_a^i;$$

$g$  – фактор для  $\text{Pu}^{239}$  находится по эмпирической формуле [4], где температура нейтронного газа  $T_{\text{нг}}$  в  $^{\circ}\text{C}$ :

$$g_a^9 = -1,951 \cdot 10^{-9} \cdot T_{\text{нг}}^3 + 3,312 \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{нг}}^2 + 1,203 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{нг}} + 1,006 ;$$

$$g_a^9 = -1,951 \cdot 10^{-9} \cdot 936^3 + 3,312 \cdot 10^{-6} \cdot 936^2 + 1,203 \cdot 10^{-3} \cdot 936 + 1,006 = 3,433.$$

$g$  – фактор для  $\text{Pu}^{241}$  находится по эмпирической формуле [4], где температура нейтронного газа  $T_{\text{нг}}$  в  $^{\circ}\text{C}$ :

$$g_a^1 = -4,851 \cdot 10^{-10} \cdot T_{\text{нг}}^3 + 4,615 \cdot 10^{-7} \cdot T_{\text{нг}}^2 + 9,099 \cdot 10^{-4} \cdot T_{\text{нг}} + 1 ;$$

$$g_a^1 = -4,851 \cdot 10^{-10} \cdot 936^3 + 4,615 \cdot 10^{-7} \cdot 936^2 + 9,099 \cdot 10^{-4} \cdot 936 + 1 = 1,858.$$

Сечения деления для  $\text{Pu}^{239}$  и  $\text{Pu}^{241}$ :

$$\overline{\sigma}_{a9} = \sigma_{a9} \cdot K(x_{\text{гр}} = 5,95) \cdot g_a^9 = 1026 \cdot 0,44 \cdot 3,433 = 1551 \text{ барн},$$

$$\sigma_{a9} = 1026 \text{ барн [4];}$$

$$\overline{\sigma}_{a1} = \sigma_{a1} \cdot K(x_{\text{гр}} = 5,95) \cdot g_a^1 = 1400 \cdot 0,44 \cdot 1,858 = 1145 \text{ барн},$$

$$\sigma_{a1} = 1400 \text{ барн [4].}$$

Рассмотрим варианты расчетов для 10 эфф. сут и 20 эфф. сут. Результаты для остальных вариантов будут записываться в таблицу 20.

Вариант расчета для 10 эфф. сут

Время работы реактора

$$t = 10 \text{ эфф. сут} \cdot 24 \cdot 3600 = 8,64 \cdot 10^5 \text{ с.}$$

Эффективное время

$$z = \Phi_0 \cdot \overline{\sigma}_a^5 \cdot t = 2,67 \cdot 10^{13} \cdot 275,931 \cdot 10^{-24} \cdot 8,64 \cdot 10^5 = 0,185.$$

Отношение ядерных плотностей:

$$c_5^0 = \frac{N_5^0}{N_8} = \frac{0,0053 \cdot 10^{23}}{0,2267 \cdot 10^{23}} = 0,023.$$

Отношения микроскопических сечений:

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

$$\overline{\sigma_c^9} = \frac{\sigma_c^9}{\sigma_a^5} = \frac{267,2}{275,931} = 0,968;$$

$$\overline{\sigma_c^0} = \frac{\sigma_c^0}{\sigma_a^5} = \frac{289,5}{275,931} = 1,049;$$

$$\overline{\sigma_a^9} = \frac{\sigma_a^9}{\sigma_a^5} = \frac{1551}{275,931} = 5,62;$$

$$\overline{\sigma_a^1} = \frac{\sigma_a^1}{\sigma_a^5} = \frac{1145}{275,931} = 4,15;$$

$$\overline{\sigma_c^8} = \frac{\sigma_c^8}{\sigma_a^5} = \frac{2,71}{275,931} = 9,82 \times 10^{-3};$$

$$\overline{\sigma_c^8}^* = \overline{\sigma_c^8} + \mu \cdot (1-\varphi) \cdot v_{\text{эф}}^5 \cdot c_5^0 = 9,82 \cdot 10^{-3} + 1,047 \cdot (1-0,651) \cdot 2,047 \cdot 0,023 = 0,029.$$

Все полученные величины подставляются в систему. Эта система в данном расчете решается в программе Mathcad 14.

$$\left\{ \begin{array}{l} c_5 = 0,023 \cdot \exp(-0,185); \\ c_9 = \frac{0,029}{5,62} \cdot (1 - \exp(-5,62 \cdot 0,185)); \\ c_0 = 0,968 \cdot \left( \begin{array}{l} \frac{0,029}{5,62 \cdot 1,049} \cdot (1 - \exp(-5,62 \cdot 0,185)) - \\ - \frac{0,029}{5,62 \cdot (1,049 - 5,62)} \cdot (\exp(-5,62 \cdot 0,185) - \exp(-1,049 \cdot 0,185)) \end{array} \right); \\ c_1 = 0,968 \cdot 1,049 \cdot \left( \begin{array}{l} \frac{0,029}{5,62 \cdot 1,049} \cdot \left( \begin{array}{l} \frac{1}{4,15} \cdot (1 - \exp(-4,15 \cdot 0,185)) - \\ - \frac{1}{4,15 - 1,049} \cdot \left( \frac{\exp(-1,049 \cdot 0,185)}{-\exp(-3,179 \cdot 0,185)} \right) \end{array} \right) - \\ - \frac{0,029}{3,201 \cdot (1,049 - 5,62)} \cdot \left( \begin{array}{l} \frac{1}{4,15 - 1,049} \cdot \left( \frac{\exp(-5,62 \cdot 0,185)}{-\exp(-4,15 \cdot 0,185)} \right) - \\ - \frac{1}{4,15 - 1,049} \cdot \left( \frac{\exp(-1,049 \cdot 0,185)}{-\exp(-4,15 \cdot 0,185)} \right) \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right.$$

Решая систему получается:

$$c_5 = \frac{N_5}{N_8} = 0,0285 \Rightarrow N_5 = N_8 \cdot 0,0285 = 0,2267 \cdot 10^{23} \cdot 0,0285 = 6,461 \cdot 10^{20} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$c_9 = \frac{N_9}{N_8} = 0,00018 \Rightarrow N_9 = N_8 \cdot 0,00018 = 0,2267 \cdot 10^{23} \cdot 0,00018 = 4,056 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$c_0 = \frac{N_0}{N_8} = 5,5337 \cdot 10^{-7} \Rightarrow N_0 = N_8 \cdot 5,5337 \cdot 10^{-7} = 0,2267 \cdot 10^{23} \cdot 5,5337 \cdot 10^{-7} =$$

$$= 5,438 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{см}^3};$$

$$c_1 = \frac{N_1}{N_8} = 1,2281 \cdot 10^{-9} \Rightarrow N_1 = N_8 \cdot 1,2281 \cdot 10^{-9} = 0,2267 \cdot 10^{23} \cdot 1,2281 \cdot 10^{-9} =$$

$$= 2,784 \cdot 10^{13} \frac{1}{\text{см}^3}.$$

Для остальных значений эфф. сут. методика расчета будет такая же, результаты расчетов записываются в таблицу 20.

Таблица 20 – Концентрации нуклидов в процессе выгорания топлива

Эфф. сут	$N_5, \text{см}^{-3}$	$N_9, \text{см}^{-3}$	$N_0, \text{см}^{-3}$	$N_1, \text{см}^{-3}$
10	$6,451 \cdot 10^{20}$	$4,056 \cdot 10^{18}$	$1,225 \cdot 10^{16}$	$2,784 \cdot 10^{13}$
20	$5,174 \cdot 10^{20}$	$7,969 \cdot 10^{18}$	$4,948 \cdot 10^{16}$	$2,190 \cdot 10^{14}$
30	$5,113 \cdot 10^{20}$	$1,174 \cdot 10^{19}$	$1,098 \cdot 10^{17}$	$7,264 \cdot 10^{14}$
40	$5,079 \cdot 10^{20}$	$1,539 \cdot 10^{19}$	$1,925 \cdot 10^{17}$	$1,963 \cdot 10^{15}$
50	$5,044 \cdot 10^{20}$	$1,890 \cdot 10^{19}$	$2,966 \cdot 10^{17}$	$3,250 \cdot 10^{15}$
60	$5,010 \cdot 10^{20}$	$2,229 \cdot 10^{19}$	$4,212 \cdot 10^{17}$	$5,522 \cdot 10^{15}$
70	$4,976 \cdot 10^{20}$	$2,557 \cdot 10^{19}$	$5,655 \cdot 10^{17}$	$8,621 \cdot 10^{15}$
80	$4,942 \cdot 10^{20}$	$2,872 \cdot 10^{19}$	$7,286 \cdot 10^{17}$	$1,265 \cdot 10^{16}$
90	$4,908 \cdot 10^{20}$	$3,177 \cdot 10^{19}$	$9,096 \cdot 10^{17}$	$1,772 \cdot 10^{16}$
100	$4,874 \cdot 10^{20}$	$3,471 \cdot 10^{19}$	$1,108 \cdot 10^{18}$	$2,390 \cdot 10^{16}$
110	$4,840 \cdot 10^{20}$	$3,754 \cdot 10^{19}$	$1,322 \cdot 10^{18}$	$3,128 \cdot 10^{16}$
120	$4,806 \cdot 10^{20}$	$4,028 \cdot 10^{19}$	$1,553 \cdot 10^{18}$	$3,993 \cdot 10^{16}$
130	$4,772 \cdot 10^{20}$	$4,292 \cdot 10^{19}$	$1,798 \cdot 10^{18}$	$4,993 \cdot 10^{16}$
140	$4,738 \cdot 10^{20}$	$4,547 \cdot 10^{19}$	$2,058 \cdot 10^{18}$	$6,133 \cdot 10^{16}$
150	$4,704 \cdot 10^{20}$	$4,792 \cdot 10^{19}$	$2,331 \cdot 10^{18}$	$7,419 \cdot 10^{16}$
160	$4,670 \cdot 10^{20}$	$5,030 \cdot 10^{19}$	$2,617 \cdot 10^{18}$	$8,565 \cdot 10^{16}$
170	$4,636 \cdot 10^{20}$	$5,258 \cdot 10^{19}$	$2,916 \cdot 10^{18}$	$1,045 \cdot 10^{17}$
180	$4,602 \cdot 10^{20}$	$5,479 \cdot 10^{19}$	$3,226 \cdot 10^{18}$	$1,220 \cdot 10^{17}$
190	$4,568 \cdot 10^{20}$	$5,692 \cdot 10^{19}$	$3,548 \cdot 10^{18}$	$1,411 \cdot 10^{17}$
200	$4,534 \cdot 10^{20}$	$5,898 \cdot 10^{19}$	$3,880 \cdot 10^{18}$	$1,619 \cdot 10^{17}$
210	$4,500 \cdot 10^{20}$	$6,096 \cdot 10^{19}$	$4,223 \cdot 10^{18}$	$1,844 \cdot 10^{17}$
220	$4,489 \cdot 10^{20}$	$6,287 \cdot 10^{19}$	$4,575 \cdot 10^{18}$	$2,086 \cdot 10^{17}$
230	$4,455 \cdot 10^{20}$	$6,472 \cdot 10^{19}$	$4,937 \cdot 10^{18}$	$2,354 \cdot 10^{17}$

Продолжение таблицы 20

240	$4,421 \cdot 10^{20}$	$6,650 \cdot 10^{19}$	$5,307 \cdot 10^{18}$	$2,622 \cdot 10^{17}$
250	$4,387 \cdot 10^{20}$	$6,822 \cdot 10^{19}$	$5,686 \cdot 10^{18}$	$2,915 \cdot 10^{17}$
260	$4,353 \cdot 10^{20}$	$6,988 \cdot 10^{19}$	$6,072 \cdot 10^{18}$	$3,227 \cdot 10^{17}$
270	$4,319 \cdot 10^{20}$	$7,148 \cdot 10^{19}$	$6,466 \cdot 10^{18}$	$3,556 \cdot 10^{17}$
280	$4,285 \cdot 10^{20}$	$7,302 \cdot 10^{19}$	$6,867 \cdot 10^{18}$	$3,903 \cdot 10^{17}$
290	$4,251 \cdot 10^{20}$	$7,451 \cdot 10^{19}$	$7,274 \cdot 10^{18}$	$4,267 \cdot 10^{17}$
300	$4,217 \cdot 10^{20}$	$7,595 \cdot 10^{19}$	$7,688 \cdot 10^{18}$	$4,649 \cdot 10^{17}$
306	$4,194 \cdot 10^{20}$	$7,678 \cdot 10^{19}$	$7,939 \cdot 10^{18}$	$4,886 \cdot 10^{17}$

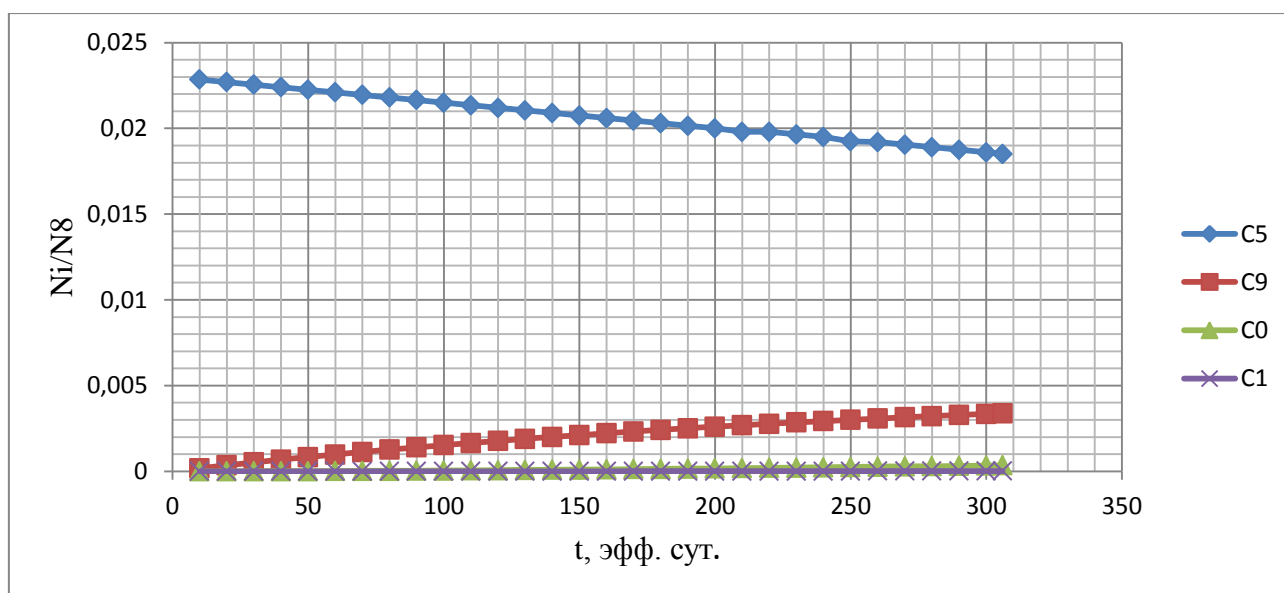


Рисунок 11 – Изменение изотопного состава топлива в течении одной микрокампании

В рисунке 11 приводится изменение изотопного состава топлива в течении микрокампании. Это есть средние величины т.к расчет проводился на среднюю величину обогащение полученную во второй главе. Все результаты полученные с учетом нескольких допущений, поэтому проведем попытку сравнения с данными из [2] на рисунке 12. В этом рисунке приводится зависимость экспериментальных (точки) и теоретических (кривые) концентраций делящихся нуклидов от глубины выгорания. Видно что они отличаются ненамного, поэтому этот график можно использовать в качестве источника для сравнения.

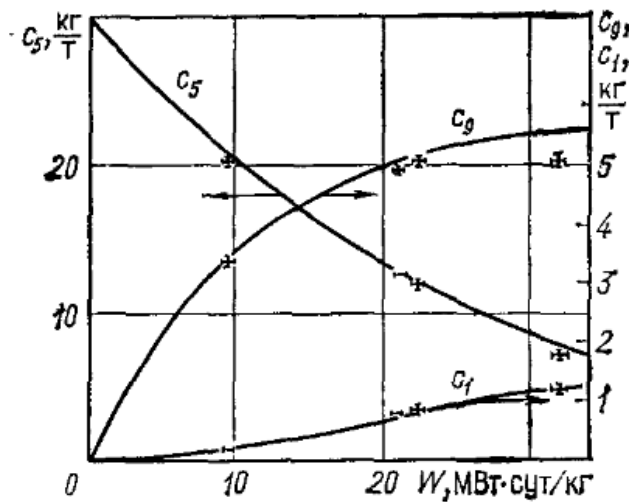


Рисунок 12 – Зависимость экспериментальных (точки) и теоретических (кривые) концентраций делящихся нуклидов от глубины выгорания  
 На конец кампании получены следующие отношения и концентрации:

$$c_5 = \frac{N_5}{N_8} = 0,0185 \Rightarrow N_5 = 4,194 \cdot 10^{20};$$

$$c_9 = \frac{N_9}{N_8} = 0,003387 \Rightarrow N_9 = 7,678 \cdot 10^{19};$$

$$c_0 = \frac{N_0}{N_8} = 0,00035 \Rightarrow N_0 = 7,939 \cdot 10^{18};$$

$$c_1 = \frac{N_1}{N_8} = 0,000021 \Rightarrow N_1 = 4,886 \cdot 10^{17}.$$

Процентные составляющие нуклидов в топливе:

$$c_5 = \frac{N_5}{N_8} \cdot 100\% = 0,0185 \cdot 100\% = 1,85\%;$$

$$c_9 = \frac{N_9}{N_8} \cdot 100\% = 0,003387 \cdot 100\% = 0,3387\%;$$

$$c_0 = \frac{N_0}{N_8} \cdot 100\% = 0,00035 \cdot 100\% = 0,035\%;$$

$$c_1 = \frac{N_1}{N_8} \cdot 100\% = 0,000021 \cdot 100\% = 0,021\%.$$

Масса образовавшегося Рu в эквивалентной ячейки:

В рисунке 12 приведены значение для делящихся нуклидов в килограммах на одну тонну топлива, переведем процентные составляющие нуклидов в килограммы на одну тонну топлива:

$$m_5 = \frac{c_5}{100\%} \cdot 1000 = 0,0185 \cdot 1000 = 18,5 \frac{\text{кг}}{\text{т}};$$

$$m_9 = \frac{c_9}{100\%} \cdot 1000 = 0,003387 \cdot 1000 = 3,387 \frac{\text{КГ}}{\text{Т}};$$

$$m_0 = \frac{c_0}{100\%} \cdot 1000 = 0,00035 \cdot 1000 = 0,35 \frac{\text{КГ}}{\text{Т}};$$

$$m_1 = \frac{c_1}{100\%} \cdot 1000 = 0,00021 \cdot 1000 = 0,21 \frac{\text{КГ}}{\text{Т}}.$$

где  $m_5$ ,  $m_9$ ,  $m_0$ ,  $m_1$ , масса  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $Pu^{240}$ ,  $Pu^{241}$  на конец микрокампании соответственно.

Сравнивая полученные данные с рисунком 12 получаем, что для  $U^{235}$  глубина выгорания топлива лежит около 11 МВт·сут/кг, а для  $Pu^{239}$  и  $Pu^{241}$  эта величина лежит около 10 МВт·сут/кг. Это несоответствие объясняется следующим образом. Перед расчетом выгорания принималось, что поток постоянен во времени, т.е. при деление нуклидов  $Pu^{239}$  и  $Pu^{241}$  вклада в усиление потока нет. Поэтому и массы образовавшихся нуклидов на конец микрокампании имеют чуть запазданное значение относительно  $U^{235}$ .

Разница полученных результатов, с результатами в главе 2 из рисунка 3 : Согласно рисунку 3 одному году эксплуатации средняя глубина выгорания, соответствует 12,32 МВт·сут/кг

$$\frac{11-12,32}{11} \cdot 100\% = 11,2\%.$$

Это расхождение объясняется постоянством микроскопических сечений и плотности потока во времени.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основной части дипломной работы была проведена попытка расчета выгорания топлива и расчет коэффициентов реактивности методом двух групп. Этот метод дал неплохие результаты для коэффициентов реактивности вполне приемлемые для реакторов типа ВВЭР. Все коэффициенты реактивности получились отрицательными и близкие по величине с реакторами на тепловых нейтронах. Также был проведен расчет изменения изотопного состава топлива в течении микрокампании, который дал погрешность с изначальным результатом глубины выгорания 11,2 %, с учетом всех принятых в работе допущений, этот результат можно считать приемлемым. Таким образом зная что характеристика топлива изменяется с изменением концентраций в нем нуклидов, с помощью построенного графика можем знать их концентрацию в любой момент микрокампании, тем самым знать состояние топлива на каждый момент времени.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. АЛЬБОМ нейтронно-физических характеристик 26 топливной загрузки блока 4 (для оперативного персонала)
2. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах: Учеб. пособие для вузов/ Галанин А.Д. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.
3. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Учеб. пособие для вузов/ Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать, В.Д. Бабайков, М.С. Алхутов. – 2 – е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 512 с.
4. Подготовка параметров к нейтронно – физическому расчету реактора на тепловых нейтронах: для студентов, обучающихся по специальности 140404 “Атомные электрической станции и установки” направления 140400 “Техническая физика”/ сост. А.В. Кузьмин. – Томск: Изд – во Томского политехнического университета, 2009. – 61 с.

					ФЮРА. 693100. 001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63