

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»  
(НГТУ)**

**Образовательно-научный институт ядерной энергетики и технической физики  
им. академика Ф.М. Митенкова**

Выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»



**УТВЕРЖДАЮ:**

Директор института  
Хробостов А.Е.  
«01» июня 2020 г.

**Методические рекомендации по дисциплине  
«Специальные материалы и защищенность ядерного топливного цикла»  
ОП ВО**

**по направлению: 14.04.02 Ядерная физика и технологии**

**Направленность (программы): Ядерные реакторы и энергетические установки**

**Квалификация выпускника: магистр**

**Очная форма обучения**

г. Нижний Новгород  
2020 г

Методические указания по организации аудиторной работы по дисциплине *«Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла»* предназначены для студентов первого курса, обучающихся по специальности 14.04.02 - Ядерные физика и технологии, и содержат программу для проведения **лекционных, практических занятий** по курсу *«Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла»*.

Цель методических указаний: помочь студентам при изучении учебной программы с использованием лекционных материалов и рекомендуемой учебно-методической литературы при формировании необходимых компетенций в области специальных материалов ЯЭУ

Целью и задачами преподавания дисциплины является подготовка специалиста как высококвалифицированного магистра в области ядерных энергетических установок, ознакомившегося со штатными внутри- и вне реакторными средствами оперативных методов контроля (измерения) параметров, характеризующих состояние реакторных установок.

Аудиторная работа направлена на развитие профессиональных компетенций дисциплины: ПК-2.

При организации аудиторной работы студентов для изучения курса *«Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла»* важное место принадлежит лекциям. В них излагается общая характеристика вопросов темы. **Главной целью лекции** является привитие студентам интереса к изучаемому материалу, формирование мотивации к последующему самостоятельному анализу рассматриваемой проблематики. На лекциях студентам раскрываются наиболее сложные вопросы и теоретические положения, показывается их практическая значимость, даются рекомендации по углубленному самостоятельному изучению теории и практики.

На лекциях по дисциплине *«Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла»* используются пассивные формы проведения занятий. Такие формы организации образовательного процесса характеризуется доминированием воздействия преподавателя на обучающихся, центральная роль принадлежит преподавателю – транслятору знаний. При изучении дисциплины *«Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла»* используются следующие виды лекции. Лекция-консультация используется при изучении тем с четкой практической направленностью на выполнение задания на курсовое проектирование.

Содержание разделов дисциплины представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание разделов дисциплины

№ раздела	Наименование разделов	Содержание темы (перечисление дидактических единиц – на усмотрение составителя РУП)	Трудо- е- м- кость (час.)
1	<b>Средства контроля в ядерном реакторе Детекторы нейтронного излучения.</b>	<b>Тема 1.1.</b> Внутри- и вне реакторные средства исследований и контроля нейтронно-физических характеристик активных зон на критических стендах, исследовательских установках и действующих реакторах	1
		<b>Тема 1.2.</b> Классификация, ассортимент выпускаемых промышленностью и область использования внутри- и вне реакторных чувствительных к нейтронам первичных средств (детекторов)	2
2	<b>Исследование НФХ на критических стендах и установках. Исследование НФХ активных зон.</b>	<b>Тема 2.1.</b> Сведения о физических принципах работы, измерительных возможностях, конструкции и характеристиках детекторов нейтронного излучения	2
		<b>Тема 2.2.</b> Принципиальные особенности методик исследований НФХ, в которых используются тот или иной тип детекторов нейтронов.	2
3	<b>Средства контроля в ядерном реакторе Детекторы нейтронного излучения.</b>	<b>Тема 3.1.</b> Задачи, средства и методики проведения измерений плотности потока, переноса и спектральных параметров тепловых.	2
		<b>Тема 3.2.</b> Цель и средства проведения измерений распределения энерговыделения (плотности делений) и мощности в активных зонах (сборках) критических стендов и исследовательских реакторов.	2
4	<b>Исследование НФХ на критических стендах и установках. Исследование НФХ активных зон.</b>	<b>Тема 4.1.</b> Уравнения кинетики для точечной модели активной зоны реактора.	2
		<b>Тема 4.2.</b> Исследования эффектов реактивности, связанные с изменениями технологических параметров критических сборок и реакторов.	2
5	<b>Оперативный контроль</b>	<b>Тема 5.1.</b> Общие вопросы контроля активных зон энергетических реакторов. Типы детекторов энерговыделения.	1
		<b>Тема 5.2.</b> Особенности построения, состояние и перспективы развития систем внутриреакторного контроля (СВРК) и энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР, РБМК, БН и промышленных реакторов	2
	<b>ИТОГО</b>		<b>18</b>

**Практические занятия** – одна из форм проведения занятий, направленная на формирование учебных и профессиональных практических умений. На практических занятиях студенты овладевают первоначальными профессиональными умениями и навыками, которые в дальнейшем будут закрепляться в процессе выполнения курсовой работы, прохождения производственной (профессиональной) практики. Темы, выносимые на практических занятиях (семинарах) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Перечень практических занятий

№ раздел а	Наименование разделов	Содержание темы (перечисление дидактических единиц – на усмотрение составителя РУП)	Трудое м- кость (час.)
1	<b>Средства контроля в ядерном реакторе Детекторы нейтронного излучения.</b>	<b>Тема 1.1.</b> Внутри- и вне реакторные средства исследований и контроля нейтронно-физических характеристик активных зон на критических стендах, исследовательских установках и действующих реакторах	3
		<b>Тема 1.2.</b> Классификация, ассортимент выпускаемых промышленностью и область использования внутри- и вне реакторных чувствительных к нейтронам первичных средств (детекторов)	4
2	<b>Исследование НФХ на критических стендах и установках. Исследование НФХ активных зон.</b>	<b>Тема 2.1.</b> Сведения о физических принципах работы, измерительных возможностях, конструкции и характеристиках детекторов нейтронного излучения	3
		<b>Тема 2.2.</b> Принципиальные особенности методик исследований НФХ, в которых используются тот или иной тип детекторов нейтронов.	4
3	<b>Средства контроля в ядерном реакторе Детекторы нейтронного излучения.</b>	<b>Тема 3.1.</b> Задачи, средства и методики проведения измерений плотности потока, переноса и спектральных параметров тепловых.	4
		<b>Тема 3.2.</b> Цель и средства проведения измерений распределения энерговыделения (плотности делений) и мощности в активных зонах (сборках) критических стендов и исследовательских реакторов.	4
4	<b>Исследование НФХ на критических стендах и установках. Исследование НФХ активных зон.</b>	<b>Тема 4.1.</b> Уравнения кинетики для точечной модели активной зоны реактора.	3
		<b>Тема 4.2.</b> Исследования эффектов реактивности, связанные с изменениями технологических параметров критических сборок и реакторов.	4
5	<b>Оперативный контроль</b>	<b>Тема 5.1.</b> Общие вопросы контроля активных зон энергетических реакторов. Типы детекторов	3



	энерговыведения.	
	<b>Тема 5.2.</b> Особенности построения, состояние и перспективы развития систем внутриреакторного контроля (СВРК) и энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР, РБМК, БН и промышленных реакторов	4
	<b>ИТОГО</b>	<b>36</b>

### Методические рекомендации.

1. Методические указания к практическим занятиям по теме «Уравнения кинетики», Н.Новгород, 2011 г. (Доступны в электронном виде на кафедре «Ядерные реакторы и энергетические установки»).

2. Методические указания к практическим занятиям по теме «Измерение реактивности», Н.Новгород, 2011 г. (Доступны в электронном виде на кафедре «Ядерные реакторы и энергетические установки»).

3. Методические указания к курсовой работе по теме «Расчёт основных параметров оборудования активной зоны реактора», Н.Новгород, 2011 г. (Доступны в электронном виде на кафедре «Ядерные реакторы и энергетические установки»).

### Перечень рекомендуемой литературы Учебная литература

№ п/ п	Автор(ы)	Заглавие	Издательство, год издания	Назначение, вид издания, гриф	Кол-во экз. в библиотеке
Основная литература					
1	Скачек М.А.	Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС:	М.: Изд. дом МЭИ, 2012	Учебное пособие Рекомендовано УМО Вузов по образованию в области энергетики и электротехники	6
Дополнительная литература					
1	Скачек М.А.	Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС:	М.: Изд. дом МЭИ, 2012	Учебное пособие Рекомендовано УМО Вузов по образованию в области	6

				энергетики и электротехники	
2	Стерман Л.С.	Тепловые и атомные электрические станции	М.: Изд. дом МЭИ 2008	Учебник Рекомендован УМО Вузов России по образованию в области энергетики и электротехники	8
3	Тевлин С.А.	Атомные электрические станции с реакторами ВВЭР-1000: Учеб. пособие. - 2-е изд., доп.	М.: Изд.дом МЭИ. 2008	Учебное пособие Рекомендовано УМО Вузов России по образованию в области энергетики и электротехники	10
4	Алхутов М.С.	Теплоэнергетика и теплотехника. Справочник. Кн.3 Тепловые и атомные электростанции	М.: Изд. дом МЭИ, 2007	Справочник	2

### Периодические издания

1. Журнал «Атомная энергия »
2. Журнал «Вопросы атомной науки и техники». Серия: Физика ядерных реакторов
3. Журнал «Известия ВУЗов». Ядерная энергетика

### Интернет ресурсы

Ресурсы системы федеральных образовательных порталов:

1. Федеральный портал. Российское образование. <http://www.edu.ru/>
2. Российский образовательный портал. <http://www.school.edu.ru/default.asp>

### Электронные библиотечные системы

Электронный каталог книг <http://library.nntu.nnov.ru/>

Электронный каталог периодических изданий <http://library.nntu.nnov.ru/>

Доступ онлайн

Электронная библиотека eLIBRARY.RU <http://www.nntu.ru/RUS/biblioteka/news.html>

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы по дисциплине «Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла» предназначены для студентов пятого курса, обучающихся по направлению 14.04.02 «Ядерная физика и технологии».

Цель методических рекомендаций: помочь студентам при самостоятельном изучении учебной программы с использованием лекционных материалов и рекомендуемой учебно-методической литературы.

Самостоятельная работа направлена на развитие профессиональных компетенций дисциплины ПК-2.

Разделы изучаемой дисциплины перечислены в указанной ниже таблице.

Таблица – Самостоятельная работа студентов

№ раздела	Наименование разделов	Содержание темы (перечисление дидактических единиц – на усмотрение составителя РУП)	Трудоемкость (час.)
1	<b>Средства контроля в ядерном реакторе Детекторы нейтронного излучения.</b>	<b>Тема 1.1.</b> Внутри- и вне реакторные средства исследований и контроля нейтронно-физических характеристик активных зон на критических стендах, исследовательских установках и действующих реакторах	7
		<b>Тема 1.2.</b> Классификация, ассортимент выпускаемых промышленностью и область использования внутри- и вне реакторных чувствительных к нейтронам первичных средств (детекторов)	10
2	<b>Исследование НФХ на критических стендах и установках. Исследование НФХ активных зон.</b>	<b>Тема 2.1.</b> Сведения о физических принципах работы, измерительных возможностях, конструкции и характеристиках детекторов нейтронного излучения	8
		<b>Тема 2.2.</b> Принципиальные особенности методик исследований НФХ, в которых используются тот или иной тип детекторов нейтронов.	9
3	<b>Средства контроля в ядерном реакторе Детекторы нейтронного излучения.</b>	<b>Тема 3.1.</b> Задачи, средства и методики проведения измерений плотности потока, переноса и спектральных параметров тепловых.	8
		<b>Тема 3.2.</b> Цель и средства проведения измерений распределения энерговыделения (плотности делений) и мощности в активных зонах (сборках) критических стендов и исследовательских реакторов.	8
4	<b>Исследование НФХ на критических стендах и установках. Исследование НФХ активных зон.</b>	<b>Тема 4.1.</b> Уравнения кинетики для точечной модели активной зоны реактора.	8
		<b>Тема 4.2.</b> Исследования эффектов реактивности, связанные с изменениями технологических параметров критическихборок и реакторов.	9

5	<b>Оперативный контроль</b>	<i>Тема 5.1.</i> Общие вопросы контроля активных зон энергетических реакторов. Типы детекторов энерговыделения.	6
		<i>Тема 5.2.</i> Особенности построения, состояние и перспективы развития систем внутриреакторного контроля (СВРК) и энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР, РБМК, БН и промышленных реакторов	9
	<b>ИТОГО</b>		<b>82</b>

**1. Виды и формы самостоятельной работы студентов по дисциплине «Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла»:**

- систематическая проработка лекций, учебной и специальной технической литературы;
- подготовка к экзамену.

**2. Методические рекомендации для студентов по конкретным видам самостоятельной работы**

**1) Систематическая проработка лекций, учебной и специальной технической литературы.**

**2) Подготовка к экзамену. Методические рекомендации:**

1. Внимательно прочитайте материал лекций.
2. Постарайтесь разобраться с непонятными, в частности, новыми терминами, используя рекомендованную литературу.
3. Ответьте на контрольные вопросы для самопроверки, имеющиеся в данных методических указаниях.

**Показатели оценки результатов внеаудиторной самостоятельной работы:**

- качество уровня освоения учебного материала;
- обоснованность и четкость изложения ответа.



### 3. Перечень рекомендуемой литературы

№ п/ п	Автор(ы)	Заглавие	Издательство, год издания	Назначение, вид издания, гриф	Кол-во экз. в библиотеке
Основная литература					
1	Скачек М.А.	Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС:	М.: Изд. дом МЭИ, 2012	Учебное пособие Рекомендовано УМО Вузов по образованию в области энергетики и электротехники	6
Дополнительная литература					
1	Скачек М.А.	Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС:	М.: Изд. дом МЭИ, 2012	Учебное пособие Рекомендовано УМО Вузов по образованию в области энергетики и электротехники	6
2	Стерман Л.С.	Тепловые и атомные электрические станции	М.: Изд. дом МЭИ 2008	Учебник Рекомендован УМО Вузов России по образованию в области энергетики и электротехники	8
3	Тевлин С.А.	Атомные электрические станции с реакторами ВВЭР-1000: Учеб. пособие. - 2-е изд., доп.	М.: Изд.дом МЭИ. 2008	Учебное пособие Рекомендовано УМО Вузов России по образованию в области энергетики и электротехники	10
4	Алхутов М.С.	Теплоэнергетика и теплотехника. Справочник.	М.: Изд. дом МЭИ, 2007	Справочник	2

		Кн.3 Тепловые и атомные электростанции			
--	--	--	--	--	--

## Перечень контрольных вопросов по дисциплине " Специальные материалы и защищённость ядерного топливного цикла "

Перечень вопросов, выносимых на экзамен в первом семестре:

1. Уравнения кинетики для точечной модели активной зоны реактора.
2. Временное поведение мощности реакторов при введении отрицательной и положительной реактивности.
3. Особенности и вопросы безопасности первого выхода в критическое состояние. Методы и средства измерений и вычислений реактивности.
4. Измерения дифференциальной и интегральной эффективности рабочих органов компенсирующей системы реактора
5. Определение запаса реактивности активной зоны.
6. Исследования эффектов реактивности, связанные с изменениями технологических параметров критических сборок и реакторов
7. Методики исследований нейтронно-физических характеристик в период работы реакторов.
8. Общие вопросы контроля активных зон энергетических реакторов.
9. Типы детекторов энерговыделения
10. Особенности построения, состояние и перспективы развития систем внутриреакторного контроля (СВРК)
11. Особенности работы токовых детекторов нейтронов систем СВРК.
12. Модели чувствительности детекторов.
13. Методика и проблемы перехода от результатов измерений с помощью ДПЗ к распределениям энерговыделения.
14. Методики проведения и штатные системы измерений других(неядерных) параметров
15. Радиационные контрольно-измерительные и диагностические системы РУ АЭС.
16. Средства измерения нейтронно-физических характеристик.
17. Детекторы, применяемые при работе на критических сборках
18. Определение распределения делящихся материалов по твэл и твс.
19. Активационные методы измерения — преимущества и недостатки.
20. Статистические методы измерения реактивности.
21. Динамические методы измерения реактивности.
22. Обеспечение безопасности при выходе в критическое состояние.
23. Определение запаса реактивности активной зоны.
24. Системы внутриреакторного контроля энергетических ЯР.

### 4. Задания для самостоятельного выполнения по дисциплине

4.1. Решить дифференциальное уравнение

$$\frac{dN_1^T}{dt} = c_2 \alpha_1 - \lambda_1 N_1^T$$

где  $\alpha_i$  - выход радионуклида при делении  $U^{235}$

$\lambda_i$  - постоянная распада радионуклида

$N_i^T$  – число ядер

## 1. Эффективные сечения нейтронных реакций

**Задача 1.1.** Сделать оценку полных сечений взаимодействия C ( $A=12$ ) и Zr ( $A=91$ ) с нейтронами для энергий 1 эВ и 1 МэВ по приведенным формулам и сравнить полученные значения с табличными:

а) корпускулярное представление нейтрона ( $\Delta \ll R$ )

$$\sigma \approx \pi R^2,$$

где  $R = 1,35 \cdot 10^{-13} A^{1/3}$  – радиус ядра, см;

б) волновое представление нейтрона

$$\sigma \approx \pi \Delta^2 \text{ или } \sigma \approx 4\pi R^2 \text{ (рассеяние плоской волны),}$$

где  $\Delta = 0,45 \cdot 10^{-9} / \sqrt{E}$  – длина волны нейтрона, см;  $E$  – кинетическая энергия нейтрона, эВ.

**Задача 1.2.** Определить величину резонансного сечения радиационного захвата U-238 для первого уровня ( $E_r=6,8$  эВ) в его максимуме и при средней энергии тепловых нейтронов ( $E=0,025$  эВ), используя формулу Брейта-Вигнера

$$\sigma_i = \pi \Delta^2 g \frac{\Gamma_n \Gamma_i}{(E - E_r)^2 + \Gamma^2 / 4},$$

где  $g$  – статистический множитель;  $\Gamma_n$ ,  $\Gamma$ ,  $\Gamma_i$  – соответственно нейтронная, полная ширины резонанса и парциальная ширина  $i$ -го процесса.

Статистический множитель  $g=1$  для четно-четных ядер.  $\Gamma_n = \Gamma_{n0} \sqrt{E}$ ;  $\Gamma_{n0} = 0,57 \cdot 10^{-3}$  эВ (приведенная нейтронная ширина),  $\Gamma_\gamma = 25 \cdot 10^{-3}$  эВ.

**Задача 1.3.** Определить то же самое (см. задачу 1.2) для Xe-135.  $E_r=0,082$  эВ;  $\Gamma_{n0} = 88,7 \cdot 10^{-3}$  эВ;  $\Gamma_\gamma = 86 \cdot 10^{-3}$  эВ;  $g$  принимается равным 0,5.

**Задача 1.4.** Определить ядерные концентрации нуклидов в гомогенном водном растворе уранилнитрата  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Молекулярный вес уранилнитрата  $M_{\text{УН}} = 394,07$ , плотность уранилнитрата  $\gamma_{\text{УН}} = 3,35$  г/см<sup>3</sup>, объемная доля уранилнитрата в растворе  $\varepsilon_{\text{УН}} = 0,25$ .

$$\rho_i = \frac{0,6023 \gamma_j n_i}{M_j} \varepsilon_j x_{ik}, 10^{-24}, \text{ см}^{-3},$$

где  $n_i$  – число атомов  $i$ -го нуклида в молекуле  $j$ -го вещества;  $x_{ik}$  – обогащение  $i$ -го нуклида по изотопу  $k$ .

Составить таблицу для использования в дальнейших задачах.

**Задача 1.5.** Определить ядерные концентрации нуклидов в гомогенизированной решетке ВВЭР со следующими параметрами: диаметр твэл  $d_{\text{ТВЭЛ}}=9,1$  мм, толщина оболочки  $\Delta=0,65$  мм, шаг треугольной решетки  $t=12,75$  мм, топливо –  $\text{UO}_2$  плотностью  $10 \text{ г/см}^3$ , оболочка  $\text{Zr}$   $\gamma=6,4 \text{ г/см}^3$ .

$$\varepsilon_{\text{UO}_2} = 0,907 \frac{(d-2\Delta)^2}{t^2}; \quad \varepsilon_{\text{Zr}} = 3,63 \frac{\Delta(d-\Delta)}{t^2}; \quad \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 1 - \varepsilon_{\text{UO}_2} - \varepsilon_{\text{Zr}}.$$

Составить таблицу концентраций.

**Задача 1.6.** Используя концентрации из задачи 1.4, найти макроскопические сечения деления, поглощения и рассеяния отдельных нуклидов и среды в целом, а также замедляющую способность среды  $\xi\Sigma_s$  при стандартной энергии  $E=0,025$  эВ. Расчет провести для естественного урана ( $z_{\text{ест}}=0,00714$ ), а также для урана с обогащениями  $z_1=0,05$  и  $z_2=0,20$ . Составить таблицу.

**Задача 1.6а.** Провести усреднение макроскопических сечений поглощения и деления по спектру Максвелла, используя параметр Козна  $\Delta$  и температуру нейтронного газа  $T_{\text{нг}}$  (для задачи 1.6)

$$\Delta = \frac{4\Sigma_a(kT_3)}{\xi\Sigma_s}; \quad T_{\text{нг}} = T_3(1 + 0,45\Delta),$$

где  $T_3$  – абсолютная температура замедлителя, К;  $k=8,61 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

В предположении изменения сечений деления и поглощения по закону “ $1/\nu$ ”, можно принять

$$\overline{\Sigma_a} = \Sigma_a(293 \text{ К}) \sqrt{\frac{293}{T_{\text{нг}}}} \frac{\sqrt{\pi}}{2}.$$

**Задача 1.7.** Провести аналогичные задаче 1.6 расчеты с концентрациями из задачи 1.5. Составить таблицу.

**Задача 1.7а.** Для данных задачи 1.7 провести расчеты, аналогичные задаче 1.6а.

## 2. Коэффициент размножения в нуль-мерной (бесконечной) гомогенной среде

**Задача 2.1а.** Используя результаты расчетов в задачах 1.4 и 1.6, определить зависимости от обогащения урана коэффициента использования тепловых нейтронов  $\theta(z)$ , числа испускаемых нейтронов на один акт поглощения в топливе  $\eta(z)$ , макроскопического сечения рассеяния  $\Sigma_s(z)$  для раствора уранилнитрата в воде.

**Задача 2.1б.** Используя результаты расчетов в задачах 1.5 и 1.7, проделать то же самое для гомогенизированной среды ВВЭР.

**Задача 2.2.** Сравнить результаты расчетов эффективного резонансного интеграла поглощения для U-238 по двум аппроксимационным формулам

$$I_{\text{эф}}^8 \cong 3,8 \sigma_p^{0,42}, \text{ барн};$$

$$I_{\text{эф}}^8 \cong 1,7 + \frac{280}{\sqrt{1 + 14800 / \sigma_p}}, \text{ барн}.$$

Параметр  $\sigma_p$  определять по формуле  $\sigma_p = \Sigma_s / \rho_U (1 - z)$ . Использовать результаты решения задач 1.6, 1.7. Построить зависимость  $I_{\text{эф}}(z)$ .

**Задача 2.3.** Найти зависимость вероятности избежать резонансного поглощения от обогащения урана для условий задач 1.4 и 1.5:

$$\varphi(z) = \exp [-\rho_U (1 - z) I_{\text{эф}}(z) / \xi \Sigma_s].$$

**Задача 2.4.** Найти зависимость коэффициента размножения на быстрых нейтронах в гомогенной среде от обогащения урана для условий задач 1.4 и 1.5. Использовать аппроксимационную формулу

$$\mu(z) \cong 1 + \frac{1,34(1 - z)}{6,39 + 4,86 x - 6,39 z},$$

где  $x = \rho_H / \rho_U$ .

**Задача 2.5.** Используя результаты решения предыдущих задач, построить зависимость  $K_{\text{inf}}(z) = \eta(z) \mu(z) \theta(z) \varphi(z)$  для раствора уранилнитрата в воде (задача 1.4) и для гомогенизированной активной зоны ВВЭР (задача 1.5).

**Задача 2.6.** Построить зависимость  $K_{\text{inf}}(\epsilon)$  для смеси порошков графита и естествен-



ного урана ( $z = 0,00714$ ), где  $\varepsilon$  – объемная доля металлического урана в смеси ( $\varepsilon < 0,5$ ). В чистых веществах  $\rho_U = 0,0478 \cdot 10^{-24} \text{ см}^{-3}$  ( $\gamma = 18,7 \text{ г/см}^3$ ),  $\rho_C = 0,0803 \cdot 10^{-24} \text{ см}^{-3}$  ( $\gamma = 1,6 \text{ г/см}^3$ ). Принять  $\mu \cong 1$ ,  $\eta = 1,34$ .

**Задача 2.6а.** Построить зависимость  $K_{inf}(\varepsilon)$  для смеси порошков графита и обогащенного урана ( $z = 0,02$ ;  $z = 0,03$ ). Принять  $\mu \cong 1$ .

### 3. Замедление и диффузия нейтронов в однородной среде

**Задача 3.1а.** Определить квадрат длины замедления  $\tau$  для раствора уранилнитрата в воде (см. задачу 1.4). В составе уранилнитрата при использовании формулы Галанина учитывать только уран и связанную  $\text{H}_2\text{O}$ .

**Задача 3.1б.** Определить зависимость квадрата длины замедления (возраста) нейтронов  $\tau$  в смеси  $\text{UO}_2\text{--Zr--H}_2\text{O}$  от уран-водного соотношения, используя аппроксимационную формулу Галанина

$$\frac{10^4}{\tau} = \sum_j \sum_{i \geq j} A_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j,$$

где  $\varepsilon_i$  – эквивалентные полному объему доли веществ в смеси. Коэффициенты  $A_{ij}$  – в приложении. Объемную долю циркония принять равной 0,2.

**Задача 3.2.** Определить зависимость  $\tau$  от соотношения объемов урана и замедлителя для смеси U–C.

**Задача 3.2а.** Прodelать то же самое (см. задачи 3.1 и 3.2) для смеси U–Be.

**Задача 3.3.** Определить зависимость  $\tau$  от температуры смеси  $\text{UO}_2\text{--Zr--H}_2\text{O}$ . Соотношения объемных долей компонентов смеси принять фиксированными. Коэффициенты объемного расширения  $\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$  принять следующими: для воды  $\beta = 8 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , для циркония –  $6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , для  $\text{UO}_2$  –  $6 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ . Расширение урана и циркония происходит за счет вытеснения воды. Использовать формулу из задачи 3.1б.

**Задача 3.4а.** Определить коэффициент диффузии  $D$  и длину диффузии  $L$  тепловых нейтронов для гомогенизированной решетки ВВЭР при обогащениях урана  $z = 0,016$ ;  $0,024$ ;  $0,036$ ;  $0,05$ . Построить зависимости  $D(z)$ ;  $L(z)$ . Использовать результаты реше-

ния задач 1.5 и 1.7.

**Задача 3.4б.** Определить коэффициент диффузии и длину диффузии тепловых нейтронов в растворе уранилнитрата (см. задачу 1.4). Построить зависимости  $D(z)$  и  $L(z)$  для этой среды.

**Задача 3.5.** Определить коэффициент диффузии  $D$  и длину диффузии  $L$  тепловых нейтронов в гомогенной смеси порошков графита и обогащенного урана (см. задачу 2.6а).

**Задача 3.6.** Построить зависимости  $D(T)$  и  $L(T)$  для фиксированного значения  $z$ . Использовать данные из задачи 3.3.

**Задача 3.7.** Определить зависимость  $L^2$  от соотношения объемных долей  $U$  и  $H_2O$  в уран-водной гомогенизированной смеси при фиксированном значении обогащения ( $z = 0,08$  и  $0,20$ ). Для упрощения вычислений микроскопические сечения принять табличными ( $E = 0,025$  эВ).

#### 4. Теория критических размеров и состава

**Задача 4.1.** В тонкостенный цилиндрический бак диаметром 1,5 м, отстоящий от стен помещения на большое расстояние, вливается ураносодержащий раствор (см. задачу 1.4). Определить критическую высоту залива. Использовать результаты решения задач 2.5, 3.1а, 3.4б. Обогащение урана принять  $z = 0,20$ .

**Задача 4.2.** Бак с ураносодержащим раствором по условиям задачи 4.1 погрузили в бассейн с водой. Как изменится величина эффективного коэффициента размножения и какова будет критическая высота залива.

Эффективную добавку отражателя найти по формуле

$$\delta = \frac{D_{A3}}{D_{отр}} M_{отр},$$

где индексы  $A3$  и  $отр$  означают ураносодержащий раствор и воду бассейна соответственно.

**Задача 4.3.** Как изменится критическая высота урансодержащего раствора (см. задачи 4.1 и 4.2), если в него ввести борную кислоту  $H_3BO_3$ , доведя концентрацию бора до  $0,5 \text{ кг/м}^3$ . Бор естественный ( $\sigma_a^B=755 \text{ барн}$ ). Считать, что добавка кислоты не меняет концентраций остальных компонентов урансодержащего раствора.

**Задача 4.4.** Урансодержащий раствор из бака диаметром  $1,5 \text{ м}$  с критической высотой залива  $H_{кр}$  (см. задачи 4.1 и 4.2) перелили в бак диаметром  $1 \text{ м}$ . Как изменится эффективный коэффициент размножения?

**Задача 4.5.** Определить минимальную критическую массу урана в гомогенной смеси графита и урана-235. Использовать решение задач 3.2 и 3.5. Полагать  $\mu=\varphi=1$ . Отражатель отсутствует.

**Задача 4.6.** Определить минимальную критическую массу урана-235 в гомогенной смеси порошков слабообогащенного урана и графита. Использовать результаты решения задач 2.6а, 3.2 и 3.5. Отражатель отсутствует.

**Задача 4.7.** Прodelать то же самое (см. задачу 4.5) для смеси бериллия и урана-235, использовать решение задач 3.2а и 3.6.

**Задача 4.8.** Определить влияние отражателя толщиной  $T=10 \text{ см}$  из графита ( $\gamma=1,67 \text{ г/см}^3$ ) на критическую толщину  $H$  бесконечного плоского реактора, состоящего из смеси обогащенного урана ( $z = 0,02$ ) и графита (см. задачу 2.6а). Использовать условие критичности

$$D_{AZ} \chi_{AZ} (\text{tg} \chi_{AZ} H/2) = D_{отр} \chi_{отр} (\text{cth} \chi_{отр} T),$$

где материальные параметры активной зоны и отражателя  $\chi_{AZ}^2 = \frac{K_{inf} - 1}{M_{AZ}^2}$ ,  $\chi_{отр}^2 = \frac{1}{L_{отр}^2}$ ;

$\text{cth } x = (\exp(x) + \exp(-x)) / (\exp(x) - \exp(-x))$ .

## 5. Размножение нейтронов в решетке топливных блоков (гетерогенный реактор)

Основные расчетные формулы приведены для двухзонной цилиндрической ячейки Вигнера-Зейца с внешними радиусами зон  $R_z$  и  $R_\Gamma$  замедлителя и горючего со-

ответственно.

### Коэффициент использования тепловых нейтронов $\theta$

$$\frac{1}{\theta} = 1 + \frac{V_3}{V_\Gamma} \frac{\Sigma_{a,3}}{\Sigma_{a,\Gamma}} d,$$

где  $d$  – коэффициент проигрыша, равный отношению средних потоков тепловых нейтронов в замедлителе и в горючем. В первом приближении можно полагать

$d \approx F = \frac{x}{2} \frac{I_0(x)}{I_1(x)}$ , где  $x = R_\Gamma \sqrt{\frac{\Sigma_{a,\Gamma}}{D_\Gamma}}$ , а  $I_0(x)$  и  $I_1(x)$  – модифицированные функции Бесселя.

Таблица  $F(x)$  приведена в приложении. Более точное значение  $d$  вычисляется с учетом избыточного поглощения по формуле  $d = F + E$ .

$$E = \frac{D_\Gamma x}{D_3 y} x \left[ K(y, z) - \frac{R_\Gamma^2}{y (R_3^2 - R_\Gamma^2)} \right],$$

где  $y = R_\Gamma \sqrt{\frac{\Sigma_{a,3}}{D_3}}$ ;  $z = R_3 \sqrt{\frac{\Sigma_{a,3}}{D_3}}$ ;

$$K(y, z) = \frac{I_0(y)K_1(z) + I_1(z)K_0(y)}{I_1(z)K_1(y) - I_1(y)K_1(z)}$$

**Задача 5.1.** Построить зависимость  $\theta$  от уран-водородного соотношения  $x = V_3/V_\Gamma$  ( $1 < x < 4$ ) при заданном размере топливного блока из  $\text{UO}_2$  ( $\gamma = 10 \text{ г/см}^3$ ) и обогащении урана. Варианты:

- 1)  $R_\Gamma = 1 \text{ см}$ ;  $z = 0,05$ ;
- 2)  $R_\Gamma = 2 \text{ см}$ ;  $z = 0,05$ ;
- 3)  $R_\Gamma = 3 \text{ см}$ ;  $z = 0,05$  и др.

**Задача 5.2.** Построить зависимость  $\theta$  от уран-графитового соотношения ( $15 < x < 40$ ) при  $z = 0,02$  и  $R_\Gamma = 6 \text{ см}$ .

**Задача 5.3.** Построить зависимость  $\theta$  от радиуса топливного блока из  $\text{UO}_2$  ( $0,5 \text{ см} \leq R_\Gamma \leq 3 \text{ см}$ ) при заданном уран-водном соотношении и заданном обогащении урана. Варианты:

- 1)  $x = 2,5$ ;  $z = 0,03$ ;
- 2)  $x = 2,5$ ;  $z = 0,05$ ;

3)  $x = 4$ ;  $z = 0,05$  и др.

### Вероятность избежать резонансного поглощения в $^{238}\text{U}$

$$\varphi = \exp \left[ - \frac{\rho_{8\Gamma} V_{\Gamma}}{(\xi \Sigma_s)_3 V_3} I_{a\text{эф}} \right],$$

$$I_{a\text{эф}} = A + B \sqrt{\frac{S}{M}}, \quad \frac{S}{M} = \frac{2}{R_{\Gamma} \gamma_{8\Gamma}},$$

где  $\gamma_{8\Gamma}$  – плотность  $^{238}\text{U}$  в блоке, г/см<sup>3</sup>; коэффициенты  $A$  и  $B$  соответственно равны  
 $A = 4,05$ ;  $B = 25,8$  – для металлического урана;  
 $A = 5,55$ ;  $B = 26,6$  – для  $\text{UO}_2$ .

**Задача 5.4.** Построить зависимость  $\varphi(x)$  для условий задачи 5.1.

**Задача 5.5.** Построить зависимость  $\varphi(x)$  для условий задачи 5.2.

**Задача 5.6.** Построить зависимость  $\varphi(x)$  для условий задачи 5.3.

### Коэффициент размножения на быстрых нейтронах

$$\mu = 1 + \frac{\left[ (v-1) - \frac{\sigma_{\gamma}}{\sigma_f} \right] \frac{\sigma_f}{\sigma} P_1}{1 - \left( \frac{v\sigma_f + \sigma_{el}}{\sigma} \right) P_2},$$

где  $P_1$  – вероятность первого столкновения нейтрона в том блоке, где он возник;  
 $P_2$  – вероятность второго столкновения нейтрона в том же блоке, где он возник и испытал первое столкновение.

Ядерные константы, входящие в приведенную формулу для  $\mu$ , усреднены по спектру деления. Можно использовать следующие значения:  $v=2,5$ ;  $\sigma_{\gamma}=0,04$ ;  $\sigma_f=0,29$ . Кроме того, для блоков из  $\text{UO}_2$   $\sigma_{el}=2,5$ ;  $\sigma=5,3$ ; для блоков из  $\text{U}$   $\sigma_{el}=1,5$ ;  $\sigma=4,3$ . Для расчета  $P_2$  можно воспользоваться рациональным приближением Вигнера

$$P_2 = 2 R_{\Gamma} \Sigma / 3$$

или формулой



$$P_2 = \frac{R_\Gamma \Sigma}{0,75 + R_\Gamma \Sigma},$$

где полное макроскопическое сечение  $\Sigma = \sigma \rho_{8\Gamma}$ .

Для оценочных расчетов можно также принять  $P_1 \approx 0,75 P_2$ .

**Задачи 5.7–5.9.** Построить зависимости  $\mu(x)$  в соответствии с условиями задач 5.1–5.3.

**Задачи 5.10–5.12.** Построить зависимости  $K_{inf}(x)$  в соответствии с условиями предыдущих задач.

**Задача 5.13.** Определить критические размеры гетерогенного уран-водного реактора с параметрами решетки по одному из вариантов задачи 5.1. Форма реактора – цилиндр с оптимальным соотношением высоты и диаметра. Эффективную добавку отражателя принять  $\delta_{отр}=7,5$  см. Квадрат длины замедления  $\tau$  вычислять по формуле Галанина (см. задачу 3.1). Квадрат длины диффузии – по формуле

$$L^2 = L_3^2(1-\theta) + L_\Gamma^2 \theta.$$

**Задача 5.14.** Определить критические размеры гетерогенного уран-графитового реактора с параметрами решетки по одному из вариантов задачи 5.2. Форма реактора – цилиндр. Эффективная добавка отражателя  $\delta_{отр}=50$  см. Возраст нейтронов вычислять по формуле

$$\tau = [\tau_1 P_{in} + \tau_2(1-P_{in})] (R_3/R_\Gamma)^2,$$

где  $\tau_1=230$  см<sup>2</sup>;  $\tau_2=364$  см<sup>2</sup>;  $P_{in}=0,6 P_1$ .

Квадрат длины диффузии вычислять по формуле  $L^2 = L_3^2(1-\theta) (R_3/R_\Gamma)^2$ .

## 6. Температурные эффекты реактивности

В гомогенном реакторе изотермический температурный коэффициент реактивности может быть вычислен по формуле

$$\alpha_T = \frac{1}{K_{\text{эф}}} \frac{dK_{\text{эф}}}{dT} \cong \frac{1}{K_{\text{эф}}} \frac{d}{dT} \left( \frac{K_{\infty} \exp(-\chi_{\Gamma}^2 \tau)}{1 + \chi_{\Gamma}^2 L^2} \right) \approx -\frac{\rho_8}{\xi \Sigma_s} \frac{dI_{8\text{эф}}}{dT} - (\tau + L^2) (2\beta \chi_{\Gamma}^2 + \frac{d\chi_{\Gamma}^2}{dT}) - \frac{L^2 \chi_{\Gamma}^2}{2T},$$

где  $\beta \approx \beta_3$  – коэффициент объемного расширения замедлителя,  $1/K$ ;  $T \approx T_3$  – абсолютная температура замедлителя.

Для воды  $\beta_3 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}$ , для графита  $\beta_3 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$

Для оценок можно принять, что

$$\frac{1}{I_{\text{эф}}} \frac{dI_{\text{эф}}}{dT} = \begin{cases} 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град если } z < 0,02 \\ 0 & \text{если } z \geq 0,02. \end{cases}$$

**Задача 6.1.** По условиям задачи 4.1 или 4.2 определить изотермический температурный коэффициент реактивности  $\alpha_T$  и эффект реактивности  $\Delta K/K_{\text{эф}}$  при разогреве раствора от 20 °С до 100 °С и найти критический уровень раствора в горячем реакторе.

**Задача 6.2.** По условиям задачи 6.1 и 3.1 определить критический уровень раствора в баке, если за счет циркуляции раствора через внешний теплообменник снимается мощность 100 МВт при подогреве раствора в активной зоне 80 °С. Определить среднюю и максимальную плотности потока нейтронов в баке.

**Задача 6.3.** Определить температуру урансодержащего водного раствора объемом 1 м<sup>3</sup> с параметрами, полученными из решения задач 3.1, 3.4, после перелива его из бака диаметром 80 см, где он имел  $K_{\text{эф}} = 0,95$ , в термоизолированный бак диаметром 1 м. Известно, что  $\alpha_T = -0,3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$ ;  $\delta_{\text{отр}} = 7,5 \text{ см}$ .

**Задача 6.4.** Определить изотермический температурный коэффициент реактивности для условий из задач 5.13 и 5.1.

**Задача 6.4а.** Прodelать то же самое исходя из условий задачи 5.14.

Для гетерогенного реактора при расчете  $\alpha_T$  можно использовать приведенную выше формулу, добавив к ней  $\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dT}$  и изменив расчет  $\frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dT}$ . Для двухзонной цилиндрической ячейки

$$\frac{1}{\theta} \frac{d\theta}{dT} \cong \frac{\theta}{4T} [X + Y]; \quad X = y_{\Gamma}^2 R_{\Gamma}^2 \left[ \frac{V_{\Gamma}}{V_3} \ln \frac{R_3}{R_{\Gamma}} - \frac{3}{4} + \frac{R_3^2}{4R_{\Gamma}^2} \right];$$

$$Y \cong \frac{\Sigma_{a,\Gamma} V_{\Gamma}}{\Sigma_{a,3} V_3} \left[ \frac{y_3^2 R_3^2}{4} - \frac{1}{48} y_3^4 R_3^4 + K \right],$$

где  $y_{\Gamma} = \Sigma_{tr,\Gamma} \Sigma_{a,\Gamma}$ ;  $y_3 = \Sigma_{tr,3} \Sigma_{a,3}$ .

$$\frac{1}{\varphi} \frac{d\varphi}{dT} = -\frac{1}{2\sqrt{T_\Gamma}} \frac{\rho_{8\Gamma} V_\Gamma}{\xi \Sigma_{s,3} V_3} f; \quad f = (0,54 + 0,47\lambda) \cdot 10^{-2};$$

$$\lambda = \frac{S_\Gamma}{M_\Gamma} \left( 1 + \frac{R_\Gamma \Sigma_{s,3}}{1,27} \right).$$

## 7. Выгорание топлива, шлакование и отравление

**Задача 7.1.** Определить выгорание урана-235 и накопление продуктов деления за время  $t=10$  суток работы реактора на постоянной мощности со средним удельным энерговыделением в активной зоне  $\overline{q_v} = 50$  МВт/м<sup>3</sup>. Начальные концентрации нуклидов использовать из предыдущих задач (4.2, 4.3 и др.).

Концентрация продуктов деления (“шлаков”) определяется по энерговыработке  $\overline{\Delta\rho_{\text{шл},5}} = \overline{\rho_{\text{шл}}} (1 + \varphi - \mu)$ . Выгорание урана-235  $\overline{\Delta\rho_5} = -\frac{\Delta\rho_{\text{шл}}}{1 + \alpha_5}$ ;  $\alpha_5 = \sigma_{\gamma 5} / \sigma_{f5}$ .

**Задача 7.1а.** Оценить изменение плотности потока нейтронов за кампанию  $t=300$  эф. суток. Накоплением и делением плутония пренебречь. Средняя плотность потока нейтронов оценивается по формуле

$$\overline{\Phi} = \frac{q_v K}{\rho_5 \sigma_{f5} (1 + \varphi - \mu)}; K = 3,1 \cdot 10^{10} \text{ 1/Вт с.}$$

**Задача 7.2.** Определить скорость изменения реактивности  $\Delta K / K_{\text{эф}}$  за счет выгорания урана-235 и шлакования. Использовать данные предыдущих задач.  $\sigma_{a, \text{шл}} = 60$  барн,  $I_{a, \text{шл}} = 200$  барн.

**Задача 7.2а.** Определить необходимую скорость увеличения концентрации урана-235 или увеличения высоты активной зоны для сохранения условия  $K_{\text{эф}} = 1$ . Необходимые данные взять из предыдущих задач.

**Задача 7.3.** Определить стационарное отравление реактора ксеноном-135 при средней плотности потока нейтронов  $\Phi_0 = 10^{11}$  н/см<sup>2</sup>·с. Как изменится это отравление, если реактор будет работать при  $\Phi_0 = 10^{12}, 10^{13}, 10^{14}$  н/см<sup>2</sup>·с? Поглощением нейтронов в J-135 пренебречь.

$$\text{Равновесная концентрация ксенона-135 } \rho_{\text{Xe},0} = \frac{\gamma \Sigma_f \Phi_0}{\lambda + \sigma_{a,\text{Xe}} \Phi_0},$$

где  $\gamma=0,063$  – выход Xe-135 и J-135 на одно деление;  $\lambda=2,1 \cdot 10^{-5}$ ,  $\text{с}^{-1}$  – постоянная распада Xe-135;  $\sigma_a=3,6 \cdot 10^6$  барн – сечение поглощения Xe-135.

**Задача 7.4.** Определить стационарное отравление Sm-149. Константы для самария:  $\gamma = 0,012$ ;  $\lambda = 3,6 \cdot 10^{-6}$ ,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\sigma_a = 4 \cdot 10^4$  барн.

**Задача 7.5.** Определить изменение относительного поглощения нейтронов ксеноном-135 через  $t$  сек после останова реактора, работавшего длительное время при постоянной плотности потока нейтронов  $\Phi_0 = 3 \cdot 10^{13}$   $1/\text{см}^2 \text{ с}$ .

$$\frac{\Sigma_{a,\text{Xe}}}{\Sigma_{a,\text{T}}} = \Phi_0 \exp(-0,208 \cdot 10^4 t) \left[ \frac{2900}{1 + 1,7 \cdot 10^{13} \Phi_0} + 7500 (1 - \exp(-0,08 \cdot 10^4 t)) \right]$$

## 8. Эффективность органов управления реактивностью

**Задача 8.1.** Определить полную эффективность “черного” поглощающего стержня радиусом  $r_{\text{ст}}=1$  см в центре реактора. Необходимые дополнительные данные о реакторе взять из предыдущих задач:

$$\left( \frac{\Delta K_{\text{эф}}}{K_{\text{эф}}} \right)_{\text{Ц}} = - \frac{7,5 L^2}{R_{\text{Э}}^2 \left( \ln \frac{R_{\text{Э}}}{r_{\text{ст}}} - 0,77 + \frac{d}{r_{\text{ст}}} \right)}, \quad d = 4/3 \lambda_{tr} r_{\text{ст}} G(r_{\text{ст}}/\lambda_{tr}).$$

Функция  $G(x)$  аппроксимируется соотношением  $G(x) = 1,25/(2x+0,81)$ .  $R_{\text{Э}} = R + \delta_R$ , где  $R$  и  $\delta_R$  соответственно радиус активной зоны и экстраполированная добавка отражателя.

**Задача 8.1а.** Определить, как изменится  $\left( \frac{\Delta K_{\text{эф}}}{K_{\text{эф}}} \right)_{\text{Ц}}$ , если  $r_{\text{ст}} = 0,5$  см; 2 см; 3 см.

**Задача 8.1б.** Как изменится  $\left( \frac{\Delta K_{\text{эф}}}{K_{\text{эф}}} \right)_{\text{Ц}}$ , если стержень не “черный”, а “серый” и изготовлен из железа. В этом случае  $d$  заменяется на  $d_c$ :

$$d_c = \frac{d + (1 - W_c) r_{ct} G\left(\frac{r_{ct}}{\lambda_{tr}}\right)}{W_c},$$

где  $W_c$  – вероятность поглощения нейтрона, попадающего в стержень. В первом приближении  $W_c \cong 2\Sigma_a r_{ct}$ .

**Задача 8.2.** Определить изменение реактивности при перемещении поглощающего стержня (см. задачу 8.1) на 1 см в случаях:

- а) стержень погружен в активную зону наполовину;
- б) стержень погружен в активную зону на 3/4;
- в) стержень погружен в активную зону полностью.

Полагать, что высота активной зоны  $H=R$ , экстраполированная добавка  $\delta_H = \delta_R = 10$  см.

**Задача 8.3.** Какое количество “черных” стержней, расположенных произвольно в активной зоне, но не ближе друг к другу, чем на  $0,3R$ , необходимо, чтобы скомпенсировать избыточную реактивность  $\left(\frac{\Delta K_{эф}}{K_{эф}}\right)_{изб} = 0,01$ ? Интерференцию стержней и воз-

мущение распределения плотности потока нейтронов не учитывать. Использовать данные задач 8.1 и 8.1а.

Эффективность стержня на радиусе  $R_{ct}$  равна

$$\left(\frac{\Delta K_{эф}}{K_{эф}}\right)_{R_{ct}} = \left(\frac{\Delta K_{эф}}{K_{эф}}\right)_{\Pi} J_0^2\left(\frac{2,405}{R_{\Phi}} R_{ct}\right).$$

Использовать аппроксимацию:  $J_0(x) = 1 - 0,25x^2 + 0,0156x^4 - 0,00043x^6$ .

## 9. Другие задачи

**Задача 9.1.** В условиях, приведенных в задаче 4.1, измеряется плотность потока нейтронов двумя камерами деления. Камеры расположены на некотором расстоянии от малогабаритного источника нейтронов, подвешенного в центре бака. Показания камер (в произвольных единицах) при некоторых уровнях раствора приведены в таблице.

Показания камер деления

Уровень раствора, см	0	20	40	80	100	110
----------------------	---	----	----	----	-----	-----



Показания камеры № 1	1	1,26	1,69	3,01	5,04	7,60
Показания камеры № 2	0,5	0,51	0,52	0,63	0,87	1,19

Сделать оценку критической высоты залива раствора, предлагать, какое количество раствора целесообразно добавлять в очередной раз и какую выдержку следует делать между моментами вливания. Относительная погрешность измерения  $\sim 5\%$ .

**Задача 9.2.** Призма из смеси урана и замедлителя (графита) имеет форму прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $a=25$  см,  $b=40$  см,  $c=250$  см. На одном из торцов  $25 \times 40$  см размещен источник нейтронов. Измеряется распределение плотности потока нейтронов по оси призмы. Результаты измерений аппроксимируются функцией  $\Phi = \Phi_0 e^{-\chi \lambda}$ ,  $20 < x < 230$  см. Определить, можно ли сделать из указанной смеси критическую сборку и если можно, то каков будет ее минимальный объем. Рассмотреть случаи  $\lambda^{-1} = 5$  см, 10 см, 20 см. Связь между материальным параметром  $\chi_m^2$ , показателем  $\lambda$  и размерами призмы определяется по формуле

$$\lambda^2 = \left( \frac{\pi}{a_{\text{э}}} \right)^2 + \left( \frac{\pi}{b_{\text{э}}} \right)^2 - \chi_m^2.$$

**Задача 9.2а.** Призма имеет вид цилиндрического тонкостенного бака диаметром 0,7 м, заполненного водным раствором уранилнитрата. Рассмотреть случаи  $\lambda = 7$  см, 15 см, 30 см.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глесстон С., Эдлунд М. Основы теории ядерных реакторов. Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1954.
2. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов (Под ред. проф. Г.А. Батя). М.: Энергоатомиздат, 1982.
3. Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.В. Ядерно-физические константы. М.: Госатомиздат, 1963.
4. Галанин А.Д. Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Атомиздат, 1959.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Значения коэффициентов  $A_{ij}$  для расчета квадрата длины замедления нейтронов  $\tau$  [см<sup>2</sup>]

плотность при $\varepsilon=1$ , г/см <sup>3</sup>	$i$ $j$	H <sub>2</sub> O	Be	C	Fe	Zr	U
1	H <sub>2</sub> O	323					
1,85	Be	730	116				
1,67	C	440	120	32			
7,8	Fe	1400	230	120	61		
6,5	Zr	340	63	29	27	2,8	
18,7	U	500	89	42	31	5,8	2,4

Таблица П2

Некоторые физические константы для расчетов реактора  
Сечения даны для тепловых нейтронов ( $E=0,025$  эВ)

элемент	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho 10^{-24}$ , 1/см <sup>2</sup>	$\sigma_a$ ( $\sigma_f$ ), барн	$\sigma_s$ , барн	$1 - \overline{\cos\theta}$	$\xi$	$\Sigma_a$ ( $\Sigma_f$ )	$\Sigma_s$
H <sub>2</sub> O	1	0,0335	—	—	0,676	0,948	0,022	2,68
Be	1,85	0,1236	0,010	7,0	0,926	0,209	0,001	0,87
C	1,67	0,0838	0,003	4,8	0,944	0,158	0,0003	0,402
Fe	7,8	0,0848	2,53	11,0	0,988	0,035	0,215	0,933
Zr	6,5	0,0430	0,18	8,0	0,993	0,022	0,008	0,344
<sup>235</sup> U	18,5	0,0478	694 (590)	10,0	0,997	0,0084	33,17 (28,2)	0,478
<sup>238</sup> U	18,7	0,0478	2,71	11,2	0,997	0,0084	0,130	0,535
<sup>235</sup> UO <sub>2</sub>	10	0,0223	—	—	0,978	0,036	15,47 (13,16)	0,410
<sup>238</sup> UO <sub>2</sub>	10	0,0223	—	—	0,978	0,036	0,0604	0,437

Таблица ПЗ

Функция  $F(x)$  для расчета коэффициента проигрыша  $d$ 

$x$	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
$F=x \frac{I_0(x)}{I_1(x)}$	2,003	2,062	2,240	2,516	2,867	2,328	3,704	4,161	4,632