

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

М.А. Увакин, В.И. Савандер

Лабораторный практикум

«ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ»

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2013

УДК 621.039.51(076.5)
ББК 31.46я7
У18

Увакин М.А., Савандер В.И. Лабораторный практикум «**Физическая теория ядерных реакторов**»: М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 56 с.

Пособие включает в себя восемь лабораторных работ, каждая из которых состоит из краткого обзора теоретического материала, 20 однотипных вариантов задания и контрольных вопросов в форме качественных задач. Выполнение работ предполагается с помощью персональных компьютеров с использованием верифицированной программы расчета выгорания топлива в элементарной ячейке. В качестве примера рекомендована работа с использованием программы GETERA-93.

Предназначено для студентов, специализирующихся в области физики реакторов и энергетических установок.

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Ю.В. Волков

ISBN 978-5-7262-1729-1

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2013*

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
<i>Работа 1</i>	
Физические параметры бесконечной гомогенной среды	7
<i>Работа 2</i>	
Резонансное поглощение нейтронов в гомогенной размножающей среде	14
<i>Работа 3</i>	
Критические параметры реактора без отражателя	20
<i>Работа 4</i>	
Критические параметры реактора с отражателем	26
<i>Работа 5</i>	
Размножающие свойства решетки реактора корпусного типа	31
<i>Работа 6</i>	
Размножающие свойства решетки реактора канального типа	36
<i>Работа 7</i>	
Отравление ядерного реактора	41
<i>Работа 8</i>	
Выгорание ядерного топлива и компенсация избыточной реактивности	46
Ответы на контрольные вопросы	51
Список рекомендуемой литературы	53
Приложение	54

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для понимания физических основ, протекающих в реакторах процессов, представляется целесообразным проведение многовариантных численных расчетов совокупности физических параметров реактора при различных условиях. Такого рода работы позволяют на практических примерах исследовать основные зависимости этих параметров от материальных и геометрических характеристик реактора.

Вся область знаний о физике ядерных реакторов, как и многие другие прикладные науки, условно состоит из двух основных направлений: теории и эксперимента. В рамках курса «Физическая теория реакторов» рассматриваются именно теоретические основы физики ядерных реакторов, что делает основным инструментом различные расчетные модели реакторов, а основным практическим итогом – результаты расчетов нейтронно-физических, динамических, экономических и прочих характеристик ядерных реакторов.

Таким образом, практическая работа по специальности «Ядерные энергетические установки» тесно связана с применением расчетных моделей и методик для расчета ядерных реакторов. Рассмотрим подробнее типичную структуру любого вычислительного инструмента, которым, как правило, являются некоторый программный комплекс, программа или просто выполняемый модуль. Весь ядерный реактор целиком моделировать достаточно сложно, так как он представляет собой крупномасштабный объект с достаточно сложной гетерогенной структурой. Поэтому, в реакторных расчетах применяют программы реакторного расчета, основанные на упрощенных моделях (как правило, двухгрупповое приближение), и программы более точного расчета отдельных периодических элементов реакторов – ячеек. Отдельно отметим так называемые программы прецизионного расчета, основанные на статистических методах (в основном имеется в виду метод Монте-Карло). Такие программы обладают существенным преимуществом, заключающимся в точности расчетов, которая при должной статистике ограничивается лишь точностью константных библиотек и столь существенным же недостатком, заключающимся в огромном количестве вычислительных операций. Поэтому используются такие программы, в первую очередь, для верификационных и проверочных расчетов.

Основными элементами структуры расчета ядерного реактора являются входные данные, расчетные данные (результат), собственно выполняемый расчетный модуль и базовые данные, неизменяемые в процессе расчетов, – библиотеки ядерных констант, файлы состояний и т.д. (рис. П1).

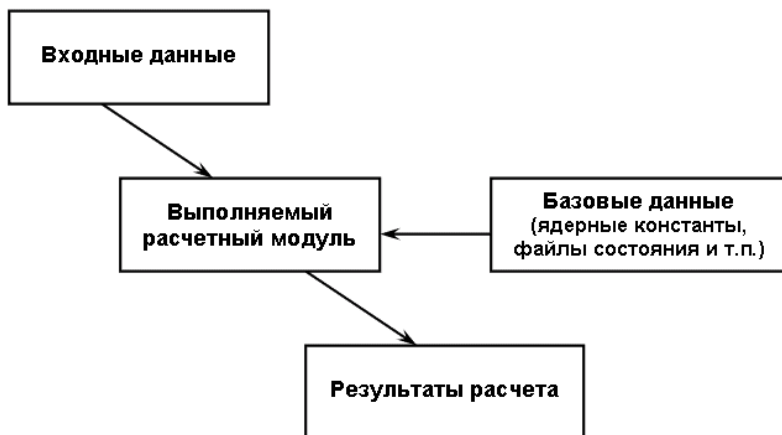


Рис. П1. Основные элементы структуры расчета ядерного реактора

Входные данные, как правило, представляют собой файл, где определены параметры, которые позволяет варьировать применяемая программа. Для программ расчета ячеек ядерных реакторов во входных файлах задаются геометрические параметры системы (геометрия, размеры), материальный состав (концентрации всех нуклидов, которыми заполнены элементы, описанные в геометрии) и задание на расчет, включающее список рассчитываемых параметров K_{∞} и его сомножителей, эффективного резонансного интеграла, глубины выгорания топлива, изменения изотопного состава активной зоны и т.д.

Выполняемый расчетный модуль представляет собой главный элемент всей рассматриваемой процедуры, потому что именно он непосредственно переводит входные данные в готовый результат, прогоняя их через определенную математическую модель ядерного реактора. Методы математического моделирования и непосред-

ственно программирования расчетов ядерных реакторов являются самостоятельным направлением, поэтому в настоящем пособии не рассматриваются.

При выполнении расчетных процедур любая модель требует определенных базовых данных, констант и прочих неизменных параметров системы. Применимо к ядерному реактору, такими данными являются, как правило, групповые ядерные сечения, или так называемые файлы состояния, содержащие информацию о текущем составе активной зоны реактора, положениях органов регулирования и т.д. Обычно константные данные подключаются к выполняемому модулю в виде структурированных файлов-библиотек.

Наконец, итоговой частью расчета реактора являются результаты расчета. Эти данные тоже, в обычном случае, представляют собой файлы, где содержится информация обо всех требуемых рассчитываемых параметрах, описанных при задании исходных данных. В некоторых случаях, когда файлы с результатами расчета содержат информацию о значительном количестве параметров и, как следствие, обладают большим размером или большим количеством, при анализе результатов используются вспомогательные программы-обработчики, позволяющие быстро представлять нужные параметры в удобном виде. Например, при помощи такого обработчика можно сразу получить график зависимости коэффициента размножения от разбавления по данным целой группы файлов расчета коэффициента размножения реактора при различном соотношении между ядерными концентрациями топлива и замедлителя.

Все работы, предлагаемые в настоящем практикуме, основаны на получении и анализе результатов расчетов реакторных ячеек, поэтому для выполнения работ необходимо соответствующее программное средство. Таковым может служить любая программа расчета ячеек ядерных реакторов с выгоранием. В качестве примеров можно привести наиболее распространенные программы такого типа – WIMS-D4/D5, GETERA-93 [1, 2], а также программы прецизионного расчета, основанные на методе Монте-Карло, MCU и MCNP [3, 4]. В качестве теоретического материала для выполнения лабораторных работ рекомендуются материалы курса «Физическая теория ядерных реакторов» [5].

Работа 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ БЕСКОНЕЧНОЙ ГОМОГЕННОЙ СРЕДЫ

Цель: ознакомление с физическими основами размножения нейтронов в бесконечной среде, вычисление разбавления среды, соответствующего максимальному коэффициенту размножения.

Введение

Наиболее простая модель реактора – бесконечная однородная размножающая среда. Такая модель используется для базового описания и анализа процесса размножения нейтронов в реакторе. Представляется, что среда из однородного вещества содержит тяжелые ядра, способные делиться нейтронами, имеет настолько большие размеры, что абсолютное большинство нейтронов в процессе жизненного цикла не долетает до границы. Таким образом, поток нейтронов в такой среде представляется как функция только энергии нейтронов и времени $\Phi(E, t)$.

Все процессы взаимодействия нейтронов с ядрами среды по некоторому каналу α (поглощение, рассеяние и т.п.) характеризуются макроскопическими сечениями взаимодействия, которые суммируются по всем типам нуклидов, входящих в состав среды:

$$\Sigma_{\alpha} = \sum_i \Sigma_{\alpha i} = \sum_i \sigma_{\alpha i} \rho_i, \quad (1.1)$$

где σ_{α} [см², барн] – микроскопическое сечение взаимодействия, являющееся характеристикой взаимодействия нейтрона определенной энергии с отдельно взятым ядром (берется из библиотек ядерных данных); ρ – ядерная плотность (или ядерная концентрация) соответствующего типа ядер в среде. Эта величина имеет прямую связь с обычной массовой плотностью молекул одного типа в смеси:

$$\rho \left[\text{яд}/\text{см}^3 \right] = \frac{\gamma \left[\text{г}/\text{см}^3 \right] N_A}{M \left[\text{г}/\text{моль} \right]}, \quad (1.2)$$

γ и M – массовая плотность и молярная масса вещества;
 $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} [\text{моль}^{-1}]$ – число Авогадро.

Очевидно, что для однозначного определения материального состава среды необходимо задать все ядерные концентрации составляющих ее нуклидов. В случае чистого вещества, формула (1.2) может быть просто применена напрямую. Концентрации отдельных нуклидов, составляющих молекулу вещества, будут кратны концентрации молекул вещества в зависимости от количества соответствующих атомов в молекуле. В случае смеси ядер различного типа их ядерные концентрации уже будут определяться с учетом массовой доли составляющих компонент.

Наиболее типичный случай для модели гомогенной бесконечной среды – смесь топлива и замедлителя. Эта смесь характеризуется отношением ядерной плотности замедлителя к ядерной плотности топлива – разбавлением. Фактически разбавление представляет собой количество ядер замедлителя на одно ядро топлива в единице объема. В смеси с заданным разбавлением C ядерные плотности топлива и замедлителя могут быть определены следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{\rho_{\text{зам}}}{\rho_{\text{топ}}}; \\ \frac{\rho_{\text{зам}}}{\rho_{\text{зам}0}} + \frac{\rho_{\text{топ}}}{\rho_{\text{топ}0}} = 1, \end{array} \right. \quad (1.3)$$

где $\rho_{\text{зам}0}$ и $\rho_{\text{топ}0}$ – ядерные плотности чистого вещества замедлителя и чистого вещества топлива.

Главным топливом в ядерных реакторах является уран. Природный уран содержит в значимых количествах два изотопа: примерно 0,7% ^{235}U и 99,3% ^{238}U . Таким образом, природный уран в металлической форме представляет собой гомогенную смесь этих изотопов в указанном количестве. Для работы большинства реакторов количество делящегося изотопа ^{235}U в природном уране мало, поэтому приходится использовать обогащенный уран, в котором искусственным путем повышено содержание ^{235}U . Обогащение – физическая величина, показывающая долю изотопа ^{235}U в уране (так как

масса изотопов различается мало, то массовая доля приблизительно равна доле ядер):

$$x = \frac{\rho_5}{\rho_8 + \rho_5}; \quad \rho_U \left[\frac{\text{яд}}{\text{см}^3} \right] = \rho_8 + \rho_5, \quad (1.4)$$

здесь ρ_5 , ρ_8 и ρ_U – ядерные концентрации ^{235}U , ^{238}U и всего урана соответственно. Таким образом, обогащение природного урана примерно 0,7 %, стандартное обогащение урана большинства существующих реакторов на тепловых нейтронах – 3–5 %.

Для описания процесса размножения нейтронов могут использоваться различные модели. Все они, так или иначе, сводятся к зависимости процесса размножения нейтронов от основной величины, характеризующей изменение потока нейтронов, – коэффициенту размножения нейтронов K_∞ . Наиболее распространенным представлением K_∞ , отражающим именно физическую зависимость этой величины от параметров среды, является формула четырех сомножителей:

$$K_\infty = \mu \phi \theta v_{eff}. \quad (1.5)$$

Коэффициент размножения на быстрых нейтронах μ является отношением числа нейтронов, замедлившихся ниже порога деления ^{238}U , к числу нейтронов, рождающихся при делении тепловыми нейтронами. Сомножитель ϕ представляет собой вероятность избежать резонансного поглощения нейтрона при его замедлении из области быстрых энергий в область тепловых. Сомножитель θ – вероятность поглощения теплового нейтрона в топливе, называемая также коэффициентом использования тепловых нейтронов. Сомножитель v_{eff} представляет собой среднее число нейтронов деления на один нейтрон, поглощенный в топливе.

В самом простом случае (одногрупповое приближение) для среды из смеси топлива и замедлителя с разбавлением C и обогащением x коэффициент размножения K_∞ может быть вычислен так:

$$K_\infty = \frac{v_f \sigma_f^5 x}{\sigma_a^5 x + \sigma_a^8 (1-x) + \sigma_a^{\text{зам}} C}. \quad (1.6)$$

Очевидно, что в случае бесконечной среды процесс размножения нейтронов будет практически однозначно определяться материальным составом среды и, как следствие, обогащением топлива и разбавлением. Зависимости коэффициентов формулы (1.5) от разбавления показаны на рис. 1.1. Сомножитель v_{eff} практически не зависит от разбавления среды.

Наиболее важным фактом представляется наличие максимально-го коэффициента размножения среды при определенном разбавлении – оптимума с точки зрения создания реактора. Именно при оптимальном значении разбавления можно получить для топлива с заданным обогащением максимально возможную величину K_{∞} .

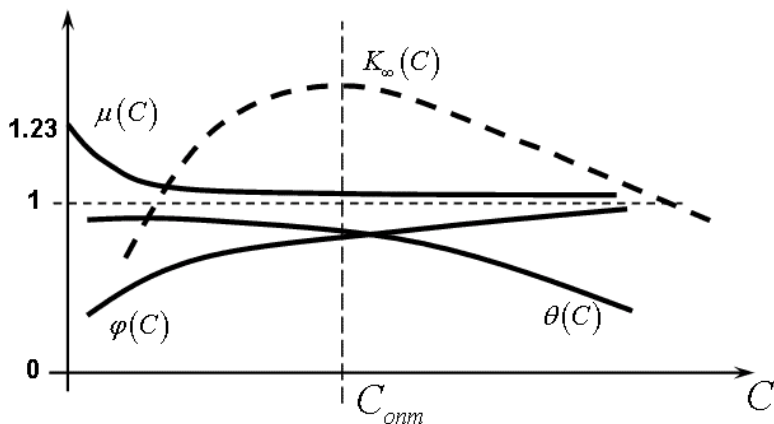


Рис. 1.1. Зависимости коэффициентов формулы четырех сомножителей от разбавления

Порядок выполнения работы

1. Определить состав бесконечной однородной размножающей среды из варианта предложенной смеси топлива с заданным обогащением и одного из трех типов замедлителя (H_2O , D_2O , C) при разбавлении, равном 1 (массовые плотности материалов указаны в приложении, ядерные плотности вычислить по формулам (1.1)–(1.4). Такая среда может представлять собой, например, шар радиусом 1 см (для программы GETERA) с условием полного отражения нейтронов на границе, что будет являться моделью бесконечной среды.

Топливо	Обогащение				
U метал.+10%Al	1	2	3	4	5
UO ₂	6	7	8	9	10
UO ₂ +0,05%Gd ¹⁵⁴	11	12	13	14	15
UO ₂ +0,5%Pu ²³⁹ O ₂	16	17	18	19	20

2. Определить оптимальное разбавление для заданной среды относительно коэффициента размножения, увеличивая разбавление. Повторить расчеты для двух других указанных в п. 1 типов замедлителя. Результаты представить в виде таблиц.

Указание. Обратит внимание на то, что для легкой воды оптимальное разбавление по величине составляет несколько единиц, а для других типов замедлителей – десятки и сотни.

Разбавление	$\rho_{\text{зам}}$, яд/см ³	$\rho_{\text{топ}}$, яд/см ³	μ	ϕ	θ	v_{eff}	K_{∞}
1							
...							
$C_{\text{опт}}^{\infty}$							
...							

3. По данным задания 2 построить графики зависимости $\mu(C)$, $\phi(C)$, $\theta(C)$ и $K_{\infty}(C)$ (на одной плоскости координат) для среды с одним выбранным типом замедлителя.

Контрольные вопросы

1. Как изменяется величина ϕ при увеличении разбавления?
2. Как изменяется величина θ при уменьшении разбавления?
3. Как изменяется величина v_{eff} при увеличении разбавления?
4. Какую зависимость имеет коэффициент μ от разбавления?
5. Какую зависимость имеет K_{∞} однородной среды от соотношения количества ядер замедлителя и топлива в единице объема?

6. Как изменится коэффициент θ смеси при замене легкой воды на тяжелую воду?
7. Как изменится коэффициент φ смеси при замене легкой воды на тяжелую воду?
8. Как изменится коэффициент μ смеси при замене легкой воды на тяжелую воду?
9. Как изменится K_∞ среды с большим разбавлением при замене легкой воды на тяжелую воду?
10. Какая среда имеет максимально возможный коэффициент размножения на быстрых нейтронах?
11. Каким параметром ограничена величина K_∞ ?
12. Какую зависимость имеет коэффициент v_{eff} от обогащения топлива?
13. Какую зависимость имеет коэффициент θ от обогащения топлива?
14. В какой среде K_∞ может быть равным нулю?
15. Каков порядок оптимального разбавления для среды, состоящей из слабообогащенного урана и легкой воды?
16. Каков порядок оптимального разбавления для среды, состоящей из слабообогащенного урана и тяжелой воды?
17. Каков порядок оптимального разбавления для среды, состоящей из слабообогащенного урана и графита?
18. Ядерная плотность кислорода в веществе Gd_2O_3 равна ρ . Чему равна ядерная плотность Gd ?
19. Найти макроскопическое сечение рассеяния карбида природного урана UC в тепловой области энергий нейтронов.
20. Найти макроскопическое сечение деления диоксида урана с обогащением 4 % в тепловой области энергий нейтронов.
21. Найти массовую долю замедлителя в однородной уран-графитовой смеси при разбавлении 200.
22. Массовая доля замедлителя в однородной уран-водной смеси равна 40 %. Найти разбавление.
23. Определить, возможно ли создание теплового уран-тяжеловодного реактора на природном уране, замедлитель – D_2O , разбавление – 200. Считать $\mu \approx 1$, $\varphi \approx 0,85$.

24. Определить вероятность избежать резонансного поглощения для критического уран-водного реактора, топливо – диоксид урана, обогащение 4 %, замедлитель – H_2O , разбавление – 10. Считать $\mu \approx 1$.

25. Определить, при каком обогащении возможно создание теплового уран-водного реактора на урановом топливе, замедлитель – H_2O , разбавление – 5. Считать $\mu \approx 1$, $\varphi \approx 0,8$.

Работа 2

РЕЗОНАНСНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ НЕЙТРОНОВ В ГОМОГЕННОЙ РАЗМНОЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

Цель: изучение особенностей спектра нейтронов в резонансной области энергий, освоение методики расчета средних макроскопических сечений.

Введение

В физике ядерных реакторов описание потока нейтронов в резонансной области энергий представляет собой особенный раздел. Основная его специфика заключается в учёте сложной зависимости сечений взаимодействия нейтронов с ядрами среды. Сложность состоит в том, что при определенных энергиях сечение поглощения нейтрона тяжелым ядром испытывает резонанс. Это происходит в случае, когда энергия нейтрона сравнивается или становится близкой к энергии одного из уровней ядра. В силу структуры уровней, резонансными поглотителями в области спектра нейтронов в реакторе являются, как правило, тяжелые нуклиды.

Характерный вид резонансной зависимости сечения от энергии изображен на рис. 2.1. Резонанс определяется энергией E_r , амплитудным сечением σ_{r0} , шириной резонанса Γ , которая есть расстояние между крыльями резонанса на высоте, равной половине амплитудного значения. Кроме того, важным физическим параметром является так называемая эффективная ширина резонанса ΔE_r , определяемая как энергетический интервал, где резонансное взаимодействие – превалирующий тип взаимодействия. Эта величина зависит от того, насколько велико сечение потенциального рассеяния, приходящееся на одно ядро резонансного поглотителя.

Главная особенность изменения потока нейтронов в области резонанса – провал потока вследствие сильного поглощения нейтронов. Спектр замедления (спектр Ферми) в области резонанса переходит в спектр Вигнера. В результате снижается количество взаимодействий в области резонанса. Однако, как следует из определения, эффективная ширина резонанса зависит от разбавления среды, поэтому при большом разбавлении спектр в области резонанса практически не будет отличаться от спектра вне этой области.

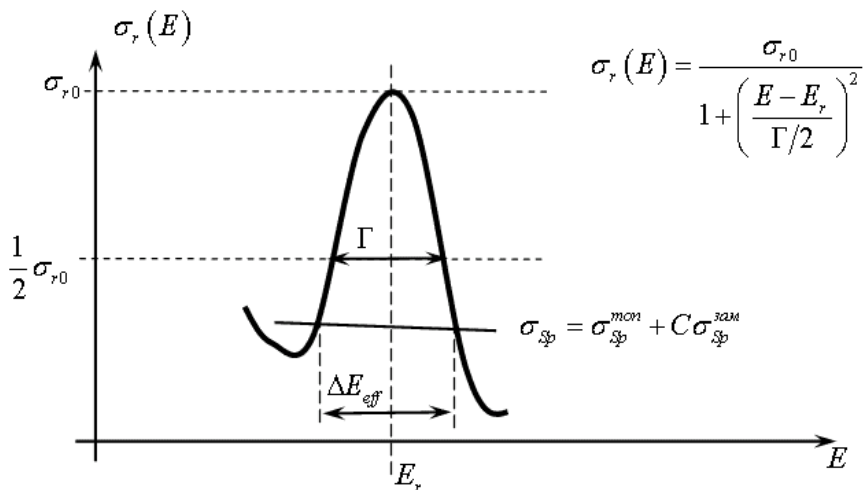


Рис. 2.1 Представление отдельно взятого резонанса

Для оценки воздействия резонансов на поток нейтронов вводится понятие интегрального сечения, оцененного по невозмущенному спектру, пропорциональному $1/E$ – истинного резонансного интеграла:

$$J_R = \int_{\Delta E} \frac{\sigma_r(E)}{E} dE ; \quad (2.1)$$

и интегрального сечения, оцененного по реальному спектру нейтронов $\Phi(E)$ – эффективного резонансного интеграла:

$$J_{eff} = \int_{\Delta E} \sigma_r(E)\Phi(E)dE. \quad (2.2)$$

Таким образом, если резонансное влияние на спектр велико, то J_{eff} будет значительно меньше J_R , а при больших разбавлениях среды или при ее сильном разогреве (эффект Доплера) $J_{eff} \rightarrow J_R$.

Средние сечения взаимодействия нейтронов с ядрами среды $\overline{\sigma_\alpha}$ по некоторому типу процесса α также определяются в заданном

энергетическом диапазоне ΔE с учетом фактического спектра нейтронов:

$$\overline{\sigma}_\alpha = \frac{\int \sigma_\alpha(E) \Phi(E) dE}{\int_{\Delta E} \Phi(E) dE}. \quad (2.3)$$

Средние макроскопические сечения процесса $\overline{\Sigma}_\alpha$ являются суммарными средними сечениями по всем типам нуклидов в среде:

$$\overline{\Sigma}_\alpha = \sum_{k=1}^N \overline{\sigma}_{\alpha k} \rho_k. \quad (2.4)$$

Таким образом, величина сечений взаимодействия нейтронов с ядрами среды в пределах заданного интервала энергий (группы) напрямую определяется спектром нейтронов и непосредственно зависимостью микроскопических сечений от энергии.

Порядок выполнения работы

1. Аналогично заданию 1 работы 1 задать бесконечную однородную среду из варианта предложенной смеси топлива с заданным обогащением и одного из трех типов замедлителя (H_2O , D_2O , C) при разбавлении, равном 5, и температуре 300 К. Сформировать входной файл для расчета микро и макро сечений в такой среде (для программы GETERA-93 команды MICRO и MACRO). Расчет сечений необходимо задать по двум энергетическим группам: от 2,1 эВ и выше («резонансная» группа, обозначим индексом «1») и меньше 2,1 эВ («тепловая» группа, обозначим индексом «2»).

Тип топлива	Обогащение				
	0,71 %	2,4 %	4,4 %	7,5 %	10,0 %
UN	1	2	3	4	5
UC	6	7	8	9	10
UO ₂	11	12	13	14	15
U металл	16	17	18	19	20

2. Произвести расчет следующих средних групповых сечений: σ_{a1}^5 , σ_{a2}^5 , σ_{a1}^8 , σ_{a2}^8 , Σ_a^1 , Σ_a^2 , $\Sigma^{2\leftarrow 1}$ при разбавлениях, указанных в таблице для всех трех типов замедлителя. Повторить расчеты при температуре 750 К для одного выбранного типа замедлителя.

T = 300 К, 750 К

Разбавление	σ_{a1}^5 $\sigma_{a1}^5, б$	$\sigma_{a2}^5, б$	$\sigma_{a1}^8, б$	$\sigma_{a2}^8, б$	Σ_a^1 , см-1	Σ_a^2 , см-1	$\Sigma^{2\leftarrow 1}, c$ м-1
5							
20							
100							
500							
1000							

3. По данным задания 2 для среды с одним из замедлителей изобразить графики зависимости $\sigma_{a1}^8(C)$ и $\sigma_{a2}^8(C)$ при двух различных температурах (в одной плоскости координат), $\Sigma_a^1(C)$ и $\Sigma_a^2(C)$ при двух температурах (в другой плоскости координат).

Контрольные вопросы

1. Как изменяется эффективная ширина резонанса при увеличении разбавления?
2. Как изменяется эффективный резонансный интеграл при уменьшении разбавления?
3. Как изменяется истинный резонансный интеграл при уменьшении разбавления?
4. Что происходит с величиной J_{eff} при замене легкой воды на графит?
5. Что происходит с величиной J_{eff} при замене легкой воды на тяжелую?
6. Что происходит с величиной J_{eff} при замене графита тяжелой водой?
7. Как изменится вероятность избежать резонансного поглощения при уменьшении концентрации тяжелых ядер в смеси?
8. Как изменится вероятность избежать резонансного поглощения при увеличении эффективного резонансного интеграла?

9. Как изменится вероятность избежать резонансного поглощения при повышении температуры среды?

10. Как изменится макроскопическое сечение поглощения в резонансной группе, если разбавление среды будет физически бесконечным?

11. Как изменится микроскопическое сечение поглощения ^{238}U в резонансной группе, если разбавление среды будет физически бесконечным?

12. Какова размерность эффективного резонансного интеграла?

13. Возможно ли создание реактора, в котором $J_{\text{eff}} \approx J_R$?

14. При каком замедлителе равенство $J_{\text{eff}} \approx J_R$ выполнится при меньшем разбавлении, чем с легкой водой?

15. При каком замедлителе равенство $J_{\text{eff}} \approx J_R$ выполнится при большем разбавлении, чем с тяжелой водой?

16. Какова зависимость J_{eff} от температуры среды?

17. Какова зависимость J_R от температуры среды?

18. Какова зависимость J_{eff} от сечения потенциального рассеяния среды, приходящегося на одно ядро резонансного поглотителя?

19. Какова зависимость J_{eff} от концентрации ядер резонансного поглотителя?

20. Вычислить эффективную ширину 1-го резонанса ^{238}U , не смешанного с замедлителем.

21. Вычислить эффективную ширину 1-го резонанса ^{238}U , смешанного с графитом при разбавлении 300.

22. Определить, при каком разбавлении легкой водой эффективная ширина 2-го резонанса ^{238}U уменьшается вдвое.

23. Считая среднее групповое сечение резонансного поглощения равным $\bar{\sigma}$, определить величину истинного резонансного интеграла. Энергия группы $E \in [E_1, E_2]$.

24. Резонансная область энергий разбита на две группы, причем групповое сечение поглощения во второй группе σ_{a2} оказалось в два раза меньше, чем в первой, а отношение интегральных потоков по первой и по второй группе равно α . Группы объединяются. Найти среднее сечение поглощения по резонансной области энергий.

25. Известно, что при попадании в среду тяжелых ядер поглотителя спектр Вигнера, сформировавшийся на резонансе, меньше спектра Ферми на величину $\frac{\alpha}{(E - E_r)^2}$. Ширина резонанса Γ .

Определить, на сколько уменьшилось количество нейтронов в области резонанса при появлении поглотителя.

Работа 3

КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКТОРА БЕЗ ОТРАЖАТЕЛЯ

Цель: расчетное определение критических параметров гомогенного реактора без отражателя, оценка вероятности избежать утечки в различных геометриях.

Введение

Следующая упрощенная модель для анализа в физической теории реакторов – модель однородного реактора конечных размеров. Наличие границы реактора, в отличие от модели бесконечной среды, позволяет учесть утечку нейтронов за его пределы.

Утечка нейтронов с точки зрения нейтронного баланса представляет собой отрицательный фактор для работы реактора, так как приводит к фактической нерезультативной потере нейтронов. Очевидно, что утечка будет в первую очередь зависеть от геометрии реактора, а вернее, от соотношения объема активной зоны реактора (генерация нейтронов) и площади поверхности активной зоны (утечка через поверхность).

Уравнение диффузии потока нейтронов в одноструйном диффузионном приближении имеет вид

$$\begin{aligned}\Delta\Phi(\vec{r}) + \kappa^2\Phi(\vec{r}) &= 0; \\ \Phi(R) &= 0,\end{aligned}\tag{3.1}$$

где параметр $\kappa^2 = \frac{K_\infty - 1}{L^2}$ носит название материального параметра среды и определяется множащими свойствами этой среды и квадратом длины диффузии L^2 . Уравнение (3.1) с нулевыми граничными условиями для потока нейтронов представляет собой задачу на определение собственных функций и собственных значений оператора Лапласа. Поскольку поток нейтронов, по определению, является неотрицательной функцией, то задача (3.1) имеет одно решение, отвечающее наименьшему собственному числу оператора Лапласа α_0 :

$$\kappa^2 = \alpha_0^2.\tag{3.2}$$

Уравнение (3.2) представляет собой условие критичности реактора, то есть фактически равенство, означающее, что в заданной геометрии, наполненной заданным материалом, возможна самоподдерживающаяся цепная реакция.

Если материальный параметр больше геометрического, это означает, что реактор заданной геометрии будет надкритическим, если меньше, то подкритическим. Ниже приведены значения первого собственного числа оператора Лапласа для различных геометрий.

Геометрия	Сфера радиуса R	Цилиндр с радиусом основания R и высотой H	Прямоугольная призма размерами $a \times b \times c$
α_0^2	$\left(\frac{\pi}{R}\right)^2$	$\left(\frac{\xi_0}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{H}\right)^2$ $\xi_0 = 2,405$, первый корень функции Бесселя $J_0(x)$	$\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{c}\right)^2$

Для реактора конечных размеров вводится понятие эффективно-го коэффициента размножения K_{eff} нейтронов, описывающего размножение нейтронов с учетом утечки. Можно показать, что K_{eff} связан с K_∞ через вероятность нейтрона избежать утечки из активной зоны реактора P_a (фактически, вероятность быть поглощенным):

$$K_{eff} = K_\infty P_a = \frac{K_\infty}{1 + \alpha_0^2 L^2} \dots \quad (3.3)$$

Таким образом, реактор конечных размеров критичен, если $K_{eff} = 1$, что требует от среднего состава среды, заполняющей реактор, топлива, замедлителя и т.д., выполнения условия $K_\infty > 1$. Если реактор обладает очень большими размерами, по сравнению со средней длиной диффузии нейтрона в нем, то $K_\infty \approx K_{eff}$ и вероятность утечки нейтрона близка к нулю.

Отдельно следует отметить, что величина L^2 зависит от разбавления среды, поэтому оптимальное разбавление для конечной сре-

ды $C_{\text{опт}}$, соответствующее максимуму K_{eff} будет отличаться от оптимального разбавления бесконечной среды $C_{\text{опт}}^{\infty}$, соответствующее максимуму K_{∞} .

Порядок выполнения работы

1. Задать сферическую ячейку радиусом 1 см, заполненную предложенным вариантом однородной смеси топлива UO_2 и замедлителя с разбавлением, близким к оптимальному.

Замедлитель	Обогащение				
	1,5 %	2,0 %	2,4 %	3,6 %	4,4 %
H_2O	1	2	3	4	5
C	6	7	8	9	10
D_2O	11	12	13	14	15
$\text{D}_2\text{O}+0,25\% \text{H}_2\text{O}$	16	17	18	19	20

2. Путем последовательных расчетов коэффициента размножения K_{∞} и квадрата длины диффузии $L^2 = D/\Sigma_a$ при различных разбавлениях определить величину разбавления, соответствующую минимальному критическому размеру, т.е. фактически определить $C_{\text{опт}}$, при котором величина $\frac{K_{\infty} - 1}{L^2}$ достигает своего максимума. Вычислить критический размер $R_{\text{кр}}$ и вероятность избежать утечки нейтронов для нескольких разбавлений. Повторить расчеты для цилиндрического реактора бесконечной высоты и реактора в виде куба (материальный состав оставить неизменным). Результаты представить в виде таблицы.

Сфера, цилиндр, куб

$$K_{eff} = 1$$

Разбавление	$R_{кр}$, см	α_0^2 , см ⁻²	L^2 , см ²	K_∞	P_a
0,5 $C_{опт}$					
$C_{опт}$					
2 $C_{опт}$					

3. Построить графики зависимости вероятности утечки нейтрона из активной зоны от разбавления (для трех геометрий на одной координатной плоскости).

Контрольные вопросы

1. Как изменяется вероятность утечки нейтрона при уменьшении размеров реактора?

2. Как изменяется величина K_{eff} при уменьшении размеров реактора?

3. Как изменяется материальный параметр при увеличении размера реактора?

4. Как изменяется геометрический параметр при увеличении размера реактора?

5. Что произойдет с вероятностью избежать утечки нейтрона в реакторе, если заменить замедлитель – легкую воду на тяжелую?

6. Что произойдет с вероятностью утечки нейтрона в реакторе, если заменить замедлитель – графит на тяжелую воду?

7. В какой геометрии реактор обладает наименьшей вероятностью утечки нейтрона?

8. Каково соотношение между радиусом основания и высотой критического цилиндрического реактора наименьшего возможного объема?

9. Два одинаковых критических цилиндрических реактора ставят друг на друга торцами. В каком состоянии будет находиться такой новый реактор?

10. Совпадает ли оптимальное разбавление для бесконечной среды и реактора конечных размеров?

11. Высоту критического кубического реактора увеличивают в два раза без изменения объема. В каком состоянии будет находиться реактор?

12. Края критического реактора в виде плоского слоя совмещают между собой, образуя цилиндрический реактор с аксиальной полостью. Как изменится критичность реактора?

13. Из активных зон двух одинаковых критических реакторов собирают третий реактор, площадь поверхности которого в два раза больше. В каком состоянии будет находиться третий реактор?

14. Топливо из критического реактора с легкой водой перемещают в реактор с кипящей легкой водой. Как необходимо изменить обогащение топлива, чтобы реактор с кипящей водой также был критичен?

15. Как изменится вероятность утечки нейтрона в сферическом реакторе, если его равномерно сжимают так, что радиус уменьшается вдвое?

16. Определить соотношение между размером и длиной диффузии сферического реактора, если вероятность утечки нейтрона 5 %.

17. Определить длину диффузии цилиндрического реактора радиусом R и высотой $2R$, если вероятность избежать утечки нейтрона равна 90 %.

18. Определить, какая геометрия лучше для создания критической системы: полусфера или цилиндрическая шайба. Объем одинаков.

19. Где эффективнее размещать поглотитель нейтронов: в центре реактора или на периферии?

20. Сферический реактор из уранового материала с $K_{\infty} = 1,3$ имеет эффективный коэффициент размножения $K_{eff} = 0,9$. Определить, как необходимо изменить размер реактора, чтобы достичь критического состояния.

21. Сферический реактор из уранового материала с $K_{\infty} = 1,2$ имеет эффективный коэффициент размножения $K_{eff} = 0,95$. Определить, как необходимо изменить длину диффузии материала, чтобы достичь критичности.

22. Цилиндрический сосуд с радиусом основания R заполняется урановым материалом с известным K_{∞} и длиной диффузии L . Определить до какой высоты возможно заполнение сосуда, при условии сохранения ядерной безопасности.

23. Сферический реактор радиуса R_2 разделен на две части сферической оболочкой радиуса R_1 из «черного» поглотителя. Опреде-

лить соотношение между объемами полученных частей при условии, что обе части находятся в критическом состоянии.

24. Реактор в виде призмы $a \times a \times 2a$ заполнен урановым материалом с длиной диффузии $a/9$. Определить величину K_∞ материала, при которой реактор достигнет критического состояния.

25. Определить максимально допустимую толщину ядерного материала с известным K_∞ и длиной диффузии L на конвейере шириной a .

Работа 4 КРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ РЕАКТОРА С ОТРАЖАТЕЛЕМ

Цель: изучение физических эффектов отражателя, вычисление эффективной добавки отражателя и коэффициента неравномерности поля нейтронов.

Введение

Очередной этап усложнения модели ядерного реактора состоит в введении в активную зону пространственно разделенных областей с различными нейтронно-физическими свойствами. Самая простая модель такого типа является реактор с отражателем. Во-первых, отражатель имеет простую физическую функцию, состоящую в рассеянии вылетающих из активной зоны нейтронов в обратном направлении, что положительно влияет на размножающие свойства реактора. Во-вторых, по нейтронно-физическим свойствам отражатель принципиально отличается от активной зоны отсутствием делющихся ядер, что требует для расчета реакторов с отражателем использовать, как минимум, модель из двух пространственно выделенных зон.

Таким образом, наличие отражателя в реакторе позволяет сохранить часть вылетающих нейтронов и снизить вероятность их утечки из активной зоны реактора, что приводит к уменьшению критического размера. Поэтому основными характеристиками отражателя являются альбеда (доля нейтронов, возвращенных в активную зону) и так называемая эффективная добавка отражателя, равная разнице критического размера реактора без отражателя R_0 и критического размера реактора с отражателем R

$$\delta = R_0 - R. \quad (4.1)$$

Как следствие снижения критического размера, уменьшаются объем и масса загрузки топливом реактора в положении критичности.

Второй немаловажный эффект отражателя – снижение пространственной неравномерности поля энерговыделения реактора. Оно возникает вследствие снижения разницы между потоком нейтронов в центре (где, как правило, поток наибольший) и на границе активной зоны реактора, так как там появляются нейтроны, вернувшиеся

из отражателя. Характеризуется этот эффект изменением коэффициента неравномерности поля нейтронов K_V , который по определению равен отношению максимального потока в активной зоне к среднему потоку по активной зоне:

$$K_V = \frac{\Phi_{\max}}{\bar{\Phi}}. \quad (4.2)$$

Отметим, что в случае, когда сечение деления нейтронов примерно одинаково по реактору, коэффициент пространственной неравномерности поля нейтронов совпадает с коэффициентом пространственной неравномерности поля энерговыделения.

Так как поле нейтронов в общем случае трехмерное, то общий коэффициент неравномерности является произведением коэффициентов неравномерности по всем координатам. В качестве упрощенной модели используется, как правило, радиальный коэффициент пространственной неравномерности поля энерговыделения K_r .

Порядок выполнения работы

1. Задать цилиндрический реактор, заполненный предложенным вариантом однородной смеси топлива UO_2 и замедлителя. Радиус основания и разбавление реактора выбрать оптимальными в соответствии с результатами работы 3. Разбить заданную систему по радиусу на три равнообъемные пространственные зоны.

Замедлитель	Обогащение				
	1,5 %	2,0 %	2,4 %	3,6 %	4,4 %
H ₂ O	1	2	3	4	5
C	6	7	8	9	10
D ₂ O	11	12	13	14	15
D ₂ O+0,25% H ₂ O	16	17	18	19	20

2. Провести расчет среднего потока тепловых нейтронов в каждой зоне реактора $\Phi_{1,2,3}$ при нулевой толщине отражателя. Добавить четвертую зону – отражатель нейтронов, состоящий из материала замедлителя. Толщину отражателя Δ_∞ выбрать равной трем длинам диффузии замедлителя (минимальная толщина, соответствующая физически бесконечному отражателю, когда увеличение толщины отражателя не приводит к значимому снижению размера активной зоны). Уменьшить величину активной зоны до прежнего уровня величины K_∞ (без отражателя) и оценить эффективную добавку отражателя. Произвести расчет средних потоков тепловых нейтронов по активной зоне для различной толщины отражателя. Результаты представить в виде таблицы.

Толщина отражателя, см	$R_{аз}$, см	Φ_1	Φ_2	Φ_3	$\Phi_1 / \Sigma\Phi$
0					
$0,5 \Delta_\infty =$					
$\Delta_\infty =$					

3. В одной координатной плоскости построить гистограммы средних потоков нейтронов в активной зоне реактора без отражателя и с отражателем толщиной Δ_∞ .

Контрольные вопросы

1. Как изменяется вероятность утечки нейтрона из активной зоны реактора при появлении отражателя?
2. Как изменяется вероятность утечки нейтрона из активной зоны реактора при увеличении толщины отражателя?
3. Как зависит альбеда от атомной массы ядер отражателя?
4. Как изменится Δ_∞ отражателя из легкой воды при замене на тяжелую?
5. Как изменится Δ_∞ легководного отражателя, если в качестве замедлителя использовать тяжелую воду вместо легкой?
6. Как зависит эффективная добавка отражателя от k^2 активной зоны?

7. В реакторах каких размеров использование отражателя приносит больший эффект?

8. Чему приближенно равна эффективная добавка тонкого отражателя?

9. Чему приближенно равна эффективная добавка бесконечно толстого отражателя?

10. Как зависит материальный параметр активной зоны от толщины отражателя?

11. Как изменяется поток нейтронов в центре активной зоны при появлении отражателя у реактора больших размеров?

12. Как изменяется среднее энерговыделение в реакторе при появлении отражателя?

13. Коэффициент неравномерности поля нейтронов при появлении отражателя снизился на 20 %. Как изменился средний поток нейтронов в реакторе?

14. Какой отражатель при одинаковой толщине имеет большее альbedo в цилиндрическом реакторе: боковой или торцевой?

15. От какой физической величины зависит Δ_{∞} ?

16. К двум реакторам, активные зоны которых имеют одинаковый объем и представляют собой сферу и половину сферы, добавляют отражатель фиксированной толщины. В каком реакторе K_{eff} изменится сильнее?

17. В цилиндрический реактор помещается стальной стержень на различном расстоянии от центра. Где должен находиться стержень, чтобы достичь максимально возможного K_{eff} реактора?

18. В цилиндрический реактор помещается стержень из ^{235}U на различном расстоянии от центра. Где должен находиться стержень, чтобы достичь максимально возможного K_{eff} реактора?

19. Где выше поток тепловых нейтронов вблизи границы между активной зоной и отражателем: в активной зоне или отражателе?

20. Где выше поток быстрых нейтронов вблизи границы между активной зоной и отражателем: в активной зоне или отражателе?

21. Размер активной зоны реактора без отражателя составляет четыре длины диффузии отражателя. Чему равен размер активной зоны реактора с отражателем, если отражатель толстый, а его длина диффузии равна L ?

22. Толщина отражателя составляет три длины диффузии его материала. Что экономически более выгодно для повышения K_{eff} : утолщение отражателя или увеличение обогащения топлива?

23. Размер активной зоны составляет 20 длин диффузии ее материала. Что экономически более выгодно для повышения K_{eff} : создание отражателя или увеличение обогащения топлива?

24. В каком месте по высоте бокового отражателя цилиндрического реактора эффективнее сделать съемную часть для воздействия на критичность реактора?

25. Для каких сторон призматического реактора с размерами $a \times 2a \times 3a$ создание отражателя наиболее эффективно?

Работа 5

РАЗМНОЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА РЕШЕТКИ РЕАКТОРА КОРПУСНОГО ТИПА

Цель: ознакомление с особенностями нейтронно-физического расчета решеток реакторов корпусного типа, вычисление оптимального шага решетки и средних макроскопических сечений.

Введение

подавляющее большинство существующих реакторов имеют гетерогенную структуру активной зоны. Это связано как с нейтронно-физическими аспектами (возможностью улучшения размножающих свойств за счет гетерогенного размещения топлива, замедлителя, теплоносителя и конструкционных материалов), так и с материально-техническими (изготовление тепловыделяющих элементов, теплофизическими возможностями конструкции, стержневой регуляции и т.п.). Таким образом, наиболее распространенные модели активных зон ядерных реакторов связаны с описанием гетерогенных структур.

Самым простейшим случаем такой структуры (элементарной ячейкой) является одиночный топливный стержень (ТВЭЛ) в оболочке, окруженный водой, которая выполняет функции замедлителя и теплоносителя, как это имеет место в корпусных реакторах (ВВЭР, PWR, BWR). Разумеется, активная зона корпусного реактора набирается из тепловыделяющих сборок (ТВС), каждая из которых содержит сотни таких ТВЭЛов, органов управления, регулирования и т.д. Пример ТВС с набором характерных размеров показан на рис. 5.1.

Однако в силу того, что вода – достаточно сильный поглотитель тепловых нейтронов, размножающие свойства корпусного реактора можно рассматривать на моделях одиночной элементарной ячейки с определенными граничными условиями.

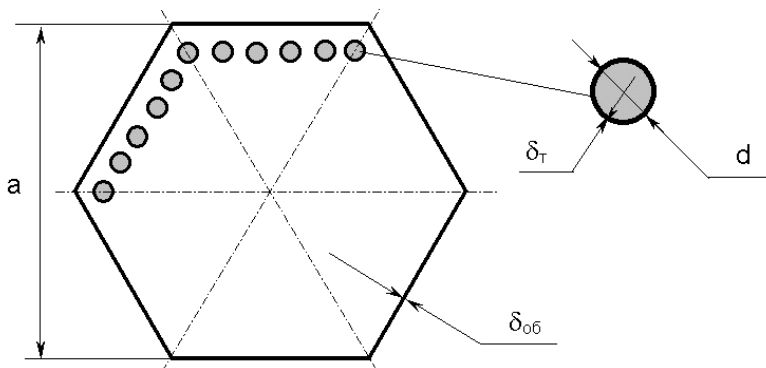


Рис. 5.1. Схема ТВС корпусного реактора ВВЭР с необходимыми размерами

Самая простая модель – одиночный твэл, окруженный водой. Таким образом, в качестве расчетной модели для данной работы предлагается ячейка, изображенная на рис. 5.2.

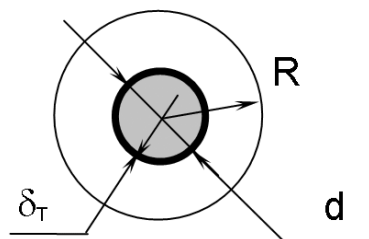


Рис. 5.2. Элементарная ячейка решетки водо-водяного реактора

Задачи, касающиеся работы реактора на мощности, выгорания, отравления, нестационарных процессов и т.п., рассматриваются в последующих работах, а данная работа посвящена выбору оптимальных параметров элементарной ячейки. Диаметр твэла и толщина его оболочки определяются, в основном, теплофизическими параметрами, поэтому с точки зрения подбора размножающих свойств основным изменяемым параметром является шаг решетки, определяющий количество воды, приходящееся на один твэл. Очевидно, что главная цель – определение такого шага решетки (фак-

тически, величины R), при котором коэффициент размножения будет наибольшим.

Порядок выполнения работы

1. Задать свой вариант (см. таблицу с диаметром твэла и толщиной оболочки) ячейки водо-водяного реактора (рис.5.2) со следующими параметрами: радиус ячейки 5 мм, топливо – UO_2 с обогащением 3.6 %, материал оболочки – цирконий, замедлитель – вода с плотностью 0.7 г/см^3 . Граничные условия – полное отражение нейтронов на границе ячейки.

Толщина оболочки δ_T , мм	Диаметр твэла d , мм				
	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
0.4	1	2	3	4	5
0.5	6	7	8	9	10
0.6	11	12	13	14	15
0.7	16	17	18	19	20

2. Произвести ряд расчетов коэффициента размножения ячейки и необходимых макроскопических сечений при различном радиусе ячейки (шаге решетки), определить оптимальный шаг решетки. Повторить расчеты для обогащения топлива 4.4 %. Результаты представить в виде таблицы.

Обогащение 3.6 %, 4.4 %						
Шаг решетки, мм	K_∞	ν	Φ	$\Sigma_a^{\text{зам}}, \text{см}^{-1}$	$\Sigma_a^{\text{топ}}, \text{см}^{-1}$	$(\nu_f \Sigma_f)_{\text{топ}}, \text{см}^{-1}$
10						
...						
$d_{\text{опт}}$						
...						

3. В одной координатной плоскости изобразить графики зависимости коэффициента размножения ячейки от шага решетки для двух значений обогащения топлива.

Контрольные вопросы

1. Почему решетка корпусного водяного реактора является тесной?

2. Какова зависимость K_{∞} решетки корпусного водяного реактора от толщины твэла?

3. Какова зависимость K_{∞} решетки корпусного водяного реактора от толщины оболочки твэла?

4. Какова зависимость K_{∞} решетки корпусного водяного реактора от шага решетки?

5. Как изменится K_{∞} решетки корпусного водяного реактора с толстыми твэлами, если топливо UO_2 заменить на металлический уран при том же обогащении?

6. Как изменится K_{∞} решетки корпусного водяного реактора, если вместо воды будет водород с такой же ядерной концентрацией?

7. Что происходит с коэффициентами формулы четырех сомножителей, если вода в решетке корпусного реактора закипит?

8. Что произойдет с K_{∞} тесной решетки водяного реактора, если вместо легкой воды окажется тяжелая вода?

9. Как изменится макросечение поглощения замедлителя в решетке корпусного водяного реактора при увеличении шага решетки?

10. Твэл решетки корпусного водяного реактора круглого сечения переделали в твэл с квадратным сечением с сохранением объема. Как изменятся все коэффициенты формулы четырех сомножителей?

11. Оказывает ли чехол ТВС значимое влияние на K_{∞} центральных твэлов ТВС?

12. Твэл решетки корпусного водяного реактора разделили на три таких же твэла с сохранением объема. Как изменятся все коэффициенты формулы четырех сомножителей?

13. В ячейку к твэлу решетки корпусного водяного реактора поместили еще два таких же твэла. Как изменятся все коэффициенты формулы четырех сомножителей?

14. В центре тонкого твэла корпусного водяного реактора сделали сквозное отверстие, не повлиявшее на объем топлива. Как изменился K_{∞} ячейки с этим твэлом?

15. В ячейке корпусного водяного реактора с оптимальным шагом решетки вдвое уменьшили шаг решетки и вдвое увеличили диаметр твэла. Как изменился K_{∞} ?

16. В ячейке корпусного водяного реактора с оптимальным диаметром твэла вдвое увеличили шаг решетки и вдвое увеличили диаметр твэла. Как изменился K_{∞} ?

17. Каково разбавление ячейки водяного корпусного реактора с твэлом диаметром 8 мм, оболочкой 0,5 мм, шагом решетки 12 мм?

18. Какова объемная доля топлива ячейки водяного корпусного реактора с твэлом диаметром 8 мм, оболочкой 0,5 мм, шагом решетки 12 мм?

19. Какова объемная доля замедлителя ячейки водяного корпусного реактора с твэлом диаметром 8 мм, оболочкой 0,5 мм, шагом решетки 12 мм?

20. Каков должен быть шаг решетки водяного корпусного реактора, если диаметр твэла 8 мм, толщина оболочки 0,5 мм, а необходимое разбавление равно 5?

21. Каков должен быть диаметр твэла водяного корпусного реактора, если шаг решетки 15 мм, толщина оболочки 0,5 мм, а необходимое разбавление равно 5?

22. Сколько твэлов с диаметром 8 мм должна содержать гексагональная ТВС размером «под ключ» 300 мм, если шаг решетки равен 15 мм?

23. Каков должен быть размер «под ключ» гексагональной ТВС, если она содержит 330 твэлов диаметром по 7,5 мм каждый с шагом решетки 12 мм?

24. Сколько твэлов с диаметром 8 мм должна содержать квадратная ТВС размером 300 мм, если шаг решетки равен 15 мм?

25. Каков должен быть размер «под ключ» квадратной ТВС, если она содержит 200 твэлов диаметром по 7 мм каждый с шагом решетки 10 мм?

Работа 6

РАЗМНОЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА РЕШЕТКИ РЕАКТОРА КАНАЛЬНОГО ТИПА

Цель: ознакомление с особенностями нейтронно-физического расчета решеток реакторов канального типа, вычисление оптимального шага решетки и средних макроскопических сечений.

Введение

Активная зона канального реактора представляет собой совокупность топливных каналов – пространственно разделенных труб, где течет теплоноситель и размещается ТВС. Эта конструкция применяется, как правило, в случае использования тяжелой воды или графита в качестве замедлителя (РБМК, CanDU). Давление в таком реакторе несет не корпус, а отдельные каналы, что дает данной конструкции ряд преимуществ, заключающихся, главным образом в возможности проведения перегрузок топлива и замены негерметичных ТВС без остановки реактора.

Геометрия же ячеек канальных реакторов несколько сложнее, чем корпусных, где можно свести задачу к отдельно взятому твэлу. Ячейка канального реактора является структурой с двойной гетерогенностью: первый уровень – твэлы, омываемые теплоносителем, второй уровень – каналы с ТВС, размещенные в блоках замедлителя, причем, как правило, квадратное размещение блоков требует определения диаметра эквивалентного кругового сечения из условия сохранения площади сечения. Схема ячейки канального реактора с набором характерных размеров показана на рис. 6.1

Необходимо отметить, что сборка канального реактора может иметь различное число рядов твэлов (на рис. 6.1 показано 2 ряда) и диаметры этих топливных «колец» также необходимо знать. В программном описании такая геометрия носит название кластера, и описывается по-разному. Среди основных способов выделяются два. Первый основан на преобразовании всей ячейки в набор концентрических колец, заполненных топливом, теплоносителем и замедлителем в зависимости от конструкции конкретной сборки. То есть каждый ряд твэлов превращается в кольцо. Однако такой способ недостаточно точен, поскольку изменяет реальную геометрию системы и, что самое важное, в расчетной модели некорректно представляется эффект экранировки внутреннего ряда твэлов.

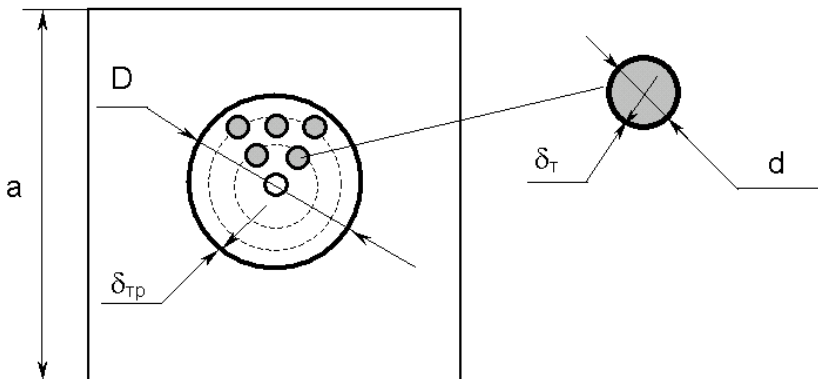


Рис. 6.1. Схема ячейки канального реактора с характерными размерами

Другой способ основан на задании поля ячейки, набранной из элементарных ячеек различных типов. Эти элементарные ячейки представляют собой отдельно взятый твэл и канал с блоком, заполненным теплоносителем. Затем задается так называемая матрица перетечек, показывающая, какова доля нейтронов, переходящая из элементарных ячеек одного типа в ячейки другого, то есть задается принцип обмена нейтронами между ячейками.

Отметим, что при расчетах целой ТВС или групп ТВС для корпусных реакторов также применяется поляячеечный метод. Важно то, что для программ расчета, основанных на методе вероятностей первых столкновений, протяженные области, заполненные одним типом материала (графитовый блок), рекомендуется разбивать на несколько зон с целью повышения точности расчета.

Начальная цель расчетных исследований ячейки канального реактора такая же, как и для корпусного реактора: для различных начальных параметров ячейки найти оптимальный шаг решетки, соответствующий максимальному коэффициенту размножения.

Порядок выполнения работы

1. Задать вариант (см. таблицу с диаметром твэла и толщиной оболочки) ячейки канального реактора, как это показано на примере, со следующими параметрами: 18 твэлов, радиус ТВС 50 мм, толщина оболочки ТВС 2,5 мм, топливо – UO_2 с обогащением

2,0 %, шаг решетки 12 см, материал оболочек – цирконий, замедлитель – графит, теплоноситель – легкая вода с плотностью $0,7 \text{ г/см}^3$. Граничные условия – полное отражение нейтронов на границе ячейки.

Толщина оболочки δ_r , мм	Диаметр блока d , мм				
	10,0	11,0	12,0	12,5	13,0
0,5	1	2	3	4	5
0,6	6	7	8	9	10
0,7	11	12	13	14	15
0,8	16	17	18	19	20

2. Произвести ряд расчетов коэффициента размножения ячейки и необходимых макроскопических сечений при различном радиусе ячейки (шаге решетки), определить оптимальный шаг решетки. Повторить расчеты, заменив замедлитель и теплоноситель на тяжелую воду и топливо с обогащением 0,71 %. Результаты представить в виде таблицы.

Замедлитель – графит, тяжелая вода

Шаг решетки, см	K_∞	J	Φ	$\Sigma_a^{\text{зам}}$, см^{-1}	$\Sigma_a^{\text{топ}}$, см^{-1}	$(\nu_f \Sigma_f)_{\text{топ}}$, см^{-1}
12						
...						
$d_{\text{опт}}$						
...						

3. В одной координатной плоскости изобразить графики зависимости коэффициента размножения ячейки от шага решетки для двух рассматриваемых типов замедлителей.

Контрольные вопросы

1. Почему решетка канального реактора с графитовым или тяжеловодным замедлителем является широкой?

2. Зачем в канальных тяжеловодных реакторах замедлитель и теплоноситель (тяжелая вода) разделяются между собой?

3. Как изменится коэффициент размножения решетки канального графитового реактора, если графит заменить тяжелой водой?

4. Почему в тяжеловодных реакторах в качестве теплоносителя не используют легкую воду?

5. Имеется два канальных реактора с оптимальным шагом решетки – тяжеловодный и графитовый. В каком из них уменьшение шага решетки приведет к более существенному изменению реактивности?

6. Имеется два канальных реактора с оптимальным шагом решетки – тяжеловодный и графитовый. В каком из них увеличение шага решетки приведет к более существенному изменению реактивности?

7. Как изменится коэффициент размножения ячейки канального графитового реактора, если вместо теплоносителя использовать тяжелую воду вместо легкой?

8. В ячейке канального графитового реактора, имеющей оптимальный шаг, вместо 18 твэлов поставили 36 с сохранением объемной доли топлива. Как изменится коэффициент размножения ячейки?

9. Как изменяется оптимальный шаг решетки канального реактора при увеличении обогащения топлива?

10. Как изменится коэффициент размножения канального реактора, если вместо UO_2 использовать металлический уран того же обогащения?

11. Из сборки канального графитового реактора, содержащей 18 твэлов, симметрично убирают три, из сборки корпусного водяного реактора, содержащей 300 твэлов, также симметрично, убирают 50. В каком случае изменение коэффициента размножения будет больше?

12. Из ТВС канального графитового реактора и канального тяжеловодного реактора, содержащих по 18 твэлов, симметрично убирают три. В каком случае изменение коэффициента размножения будет больше?

13. Как изменится коэффициент размножения решетки канального графитового реактора при закипании теплоносителя – легкой воды?

14. Где процесс закипания теплоносителя (легкой воды) окажет более существенное влияние на реактивность – в решетке канального реактора или корпусного?

15. Как изменится коэффициент размножения ячейки тяжеловодного реактора, если теплоноситель и чехол ТВС равномерно гомогенизировать по замедлителю?

16. Как изменится коэффициент размножения ячейки графитового реактора, если теплоноситель и чехол ТВС равномерно гомогенизировать по замедлителю?

17. Как изменится коэффициент размножения ячейки графитового реактора, если 18 твэлов в сборке разместить не кольцами, а рядами?

18. В каком случае потеря теплоносителя из ячейки окажет большее влияние на реактивность – при тяжеловодном замедлителе или при графитовом?

19. Почему в ТВС РБМК нет твэла в центре?

20. Почему в реакторах CANDU целесообразно использовать три ряда твэлов вместо двух, как в РБМК?

21. Как изменяется коэффициент пространственной неравномерности поля энерговыделения канального реактора при увеличении обогащения топлива?

22. Какова объемная доля топлива в канальном графитовом реакторе с шагом решетки 25 см, имеющем сборку с 18 твэлами диаметром 13 мм (толщина оболочки 0,7 мм)?

23. Какова объемная доля D_2O в канальном тяжеловодном реакторе с шагом решетки 28 см, имеющем сборку диаметром 14 см (толщина оболочки сборки 2,0 мм) с 36 твэлами диаметром 10 мм?

24. Каков должен быть шаг решетки канального графитового реактора, имеющего сборку (толщина оболочки сборки 2,0 мм) с 18 твэлами диаметром 13 мм (толщина оболочки 0,7 мм) и стержнем в центре такого же размера, чтобы разбавление активной зоны равнялось 250?

25. Каков должен быть шаг решетки канального тяжеловодного реактора, имеющего сборку (толщина оболочки сборки 2,0 мм) с 36 твэлами диаметром 13 мм (толщина оболочки 0,7 мм), чтобы разбавление активной зоны равнялось 200?

Работа 7 ОТРАВЛЕНИЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Цель: освоение навыков расчета отравления ядерного реактора, вычисление концентрации ксенона и реактивности в медленных нестационарных процессах.

Введение

Выбор геометрии и начальных параметров реактора – только один из этапов полномасштабных исследований в практике реакторных расчетов. Одной из наиболее важных частей этих исследований является анализ нестационарных процессов в ядерных реакторах, возникающих в процессе работы на мощности. К этим процессам в первую очередь относится отравление ядерного реактора.

Отравлением ядерного реактора в самом общем случае называется накопление нестабильных продуктов деления, обладающих большим сечением поглощения нейтронов в тепловой области энергий. К таким продуктам деления в первую очередь относится изотоп Xe^{135} , сечение поглощения которого для тепловых нейтронов достигает нескольких миллионов барн. Цепочки ядерных реакций ксеноновых процессов представлены на рис.7.1. Отметим, что эффект отравления ^{135}Xe имеет существенное значение именно для тепловых реакторов.

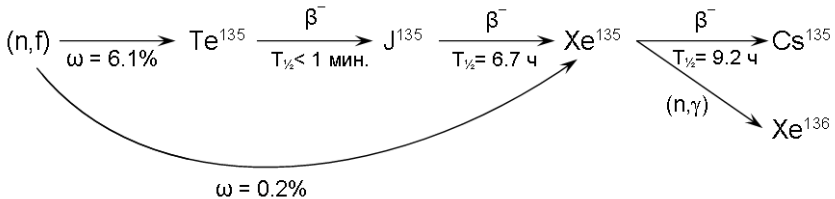


Рис. 7.1. Цепочки образования ^{135}Xe

При делении нейтронами ядра ^{235}U с 6,1 % долей образуется ^{135}Te , который обладает малым периодом полураспада и служит источником накопления изотопа ^{135}I . Иод в свою очередь также испытывает β – распад и превращается в ^{135}Xe , причем характерное время этого процесса уже более значительно и составляет порядка нескольких часов. Обычно звено с ^{135}Te в ксеноновых процессах

пропускают вследствие малого времени распада, и считается, что ^{135}I образуется практически мгновенно при делении с соответствующей долей выхода. Изотоп ^{135}Xe может получаться и непосредственно в реакции деления, но со сравнительно меньшей долей – 0,2 %. Исчезает ^{135}Xe по двум каналам: радиоактивный распад и взаимодействие с нейтронами, приводящее к захвату нейтрона и образованию изотопа ^{136}Xe .

Таким образом, в случае стационарной работы реактора, в активной зоне устанавливается баланс между накоплением и распадом ксенона. Установившаяся равновесная концентрация ксенона связывает некоторую величину реактивности реактора и в стационарном случае не оказывает существенных препятствий для работы реактора. Однако, как видно по величине периодов полураспада иода и ксенона, концентрация ^{135}Xe может увеличиваться в случае перевода реактора на другой уровень мощности, при полном останове или других нестационарных процессах. Соответствующие изменения плотности потока тепловых нейтронов могут привести к росту концентрации ^{135}Xe и существенно снизить коэффициент размножения.

Наиболее значительным эффектом отравления является так называемая «иодная яма», возникающая вследствие увеличения концентрации ^{135}Xe в первые несколько часов после полной остановки реактора, работающего на мощности. Такое увеличение становится возможным из-за распада ^{135}I . Изменение концентрации ^{135}Xe при «иодной яме», показано на рис. 7.2.

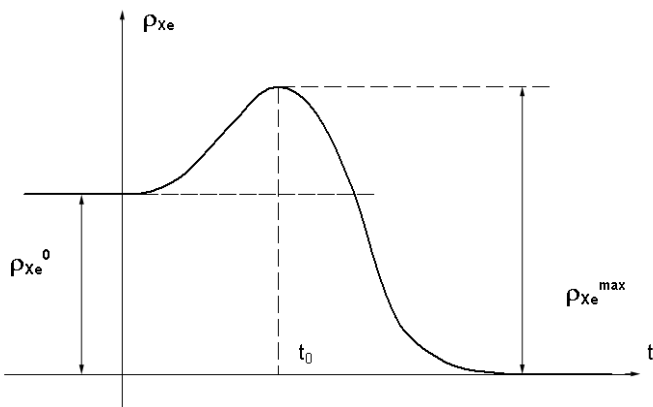


Рис. 7.2. Изменение концентрации Xe^{135} при остановке реактора

Масштаб эффекта «иодной ямы» (по величине максимальной концентрации ксенона) напрямую зависит от концентрации ^{135}I в реакторе на момент останова. В свою очередь количество иода прямо пропорционально потоку нейтронов, на котором работал реактор в течение времени, достаточного для установления равновесного значения концентрации ^{135}I . Поэтому для снижения эффекта «иодной ямы» при возможности используется ступенчатая остановка реактора – с поэтапным снижением мощности. Основной целью данной лабораторной работы является численное исследование процесса отравления реактора и эффекта «иодной ямы» при различном уровне мощности, на которой работал реактор.

Порядок выполнения работы

1. Задать ячейку водо-водяного реактора с параметрами, использованными в работе 5 (топливо – UO_2 с обогащением 4,4 %). Задать ячейку канального графитового реактора с параметрами, использованными в работе 6 (топливо – UO_2 с обогащением 2,4 %). Граничные условия – полное отражение нейтронов. Предусмотреть проведение расчетов с выгоранием, для чего внести в перечень рассчитываемых изотопов полный список продуктов деления и задать 20 циклов расчета выгорания по 0,25 сут (в программе GETERA-93 «:burn &vvod qv=***.,dtim=0.5., &end»). Для водяного реактора задать энергонапряженность (qv) 110 кВт/л, для уран-графитовой системы – 4,5 кВт/л.

2. Для ячеек обоих типов провести расчеты выгорания топлива и концентрации ксенона для следующих режимов: подъем сначала на 50 %, а затем (через сутки) на 100 %, подъем на 100 % и последующим через четверо суток спуском на 50 %. В момент времени 5 сут производится остановка реактора.

Концентрацию ксенона нормировать на равновесное значение для мощности 100 %, а после остановки реактора рассчитать по аналитической зависимости (момент $t=0$ начинать с отметки в 5 сут):

$$\rho_{\text{Xe}}^*(t) = e^{-\lambda_{\text{Xe}}t} + \frac{\lambda_{\text{Xe}} + \sigma_a^{\text{Xe}} \Phi}{\lambda_{\text{Xe}} - \lambda_{\text{I}}} \left(e^{-\lambda_{\text{I}}t} - e^{-\lambda_{\text{Xe}}t} \right).$$

Результаты представить в виде таблицы.

Время, сут	Мощность, % ном.	Корпусной реактор		Канальный реактор	
		$\rho_{Xe}^*(t)$	K_{∞}	$\rho_{Xe}^*(t)$	K_{∞}
0	50				
1	100				
...	...				
5	100→0				
...	...		0		0
7	0		0		0
0	100				
...	...				
4	50				
5	50→0				
...	...		0		0
7	0		0		0

3. Изобразить две пары графиков зависимости нормированной концентрации ксенона от времени и мощности от времени для двух типов рассматриваемых ячеек.

Контрольные вопросы

1. Почему появление изотопа ^{135}Xe важно именно в тепловых реакторах?
2. Почему не учитывается выгорание ^{135}I ?
3. Как изменяется эффект отравления ядерного реактора при уменьшении разбавления?
4. Каков порядок сечения поглощения ^{135}Xe тепловых нейтронов?
5. От чего зависит время достижения равновесной концентрации иода и ксенона в реакторе?
6. Что происходит с равновесной концентрацией ^{135}I при увеличении мощности реактора?
7. Что произойдет с равновесной концентрацией ^{135}Xe при увеличении мощности в высокопоточном реакторе?
8. Каков порядок времени для поэтапной остановки реактора, выполняемой для блокирования «иодной ямы»?
9. Почему ^{135}Te не оказывает существенного воздействия на процессы отравления реактора?
10. Как изменяется концентрация ^{135}I при остановке реактора?
11. Как изменяется концентрация ^{135}Xe при остановке реактора?
12. Какой способ позволяет избежать эффекта «иодной ямы» в случае запланированного останова реактора?

13. Какой способ позволяет избежать эффекта «иодной ямы» сразу же после останова реактора, если останов не планировался?

14. Каков порядок времени выхода реактора из «иодной ямы»?

15. Каков должен быть порядок среднего потока тепловых нейтронов в реакторе, чтобы эффект «иодной ямы» был несущественен?

16. Как изменится эффект отравления реактора при увеличении обогащения топлива?

17. Как изменится эффект отравления реактора при уменьшении количества твэлов в сборке (с сохранением объемной доли топлива)?

18. Где эффект отравления изменится сильнее при увеличении разбавления – в решетке канального реактора с графитовым замедлителем или в решетке корпусного реактора с водным замедлителем?

19. Два одинаковых реактора останавливают: один с номинальной мощности, другой – с 50 % уровня. В каком из реакторов эффект «иодной ямы» закончится быстрее?

20. В момент остановки реактора концентрации ^{135}I и ^{135}Xe были равны. Каков минимальный, гарантировано не достижимый уровень увеличения концентрации ^{135}Xe «иодной яме» в этом случае?

21. Концентрация ^{135}Xe в «иодной яме» увеличилась вдвое по отношению к равновесной концентрации на момент остановки реактора. Каков был в момент остановки уровень равновесной концентрации ^{135}I по отношению к ^{135}Xe , если известно, что к моменту достижения «ямы» распалось 20 % ядер ^{135}Xe ?

22. Как изменяется концентрация ксенона в реакторе, который запускается из «иодной ямы»?

23. Как изменяется концентрация ксенона в реакторе, который запускается спустя сутки после «иодной ямы»?

24. Реактор работал на мощности W , в момент времени $t = 0$ его перевели на мощность $2W$, затем в момент времени $t_1 < T_{1/2\text{Xe}}$ снизили мощность до $1/2W$, а в момент t_2 полностью остановили. Какова (показать на графике) будет зависимость $\rho_{\text{Xe}}(t)$ и соответствующего изменения реактивности $\delta\rho(t)$?

25. Реактор работал на мощности W , в момент времени $t = 0$ его остановили, а затем, в момент времени $t_1 > T_{1/2\text{Xe}}$ запустили на мощность до $1/4W$, а в момент времени t_2 остановили окончательно. Какова (показать на графике) будет зависимость $\rho_{\text{Xe}}(t)$ и соответствующего изменения реактивности $\delta\rho(t)$?

Работа 8

ВЫГОРАНИЕ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА И КОМПЕНСАЦИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ РЕАКТИВНОСТИ

Цель: моделирование кампании ядерного реактора на основе ячеечных расчетов, вычисление максимальной глубины выгорания для различных способов компенсации реактивности.

Введение

Одна из основных задач эксплуатации ядерного реактора – получение тепловой энергии. Таким образом, эффективность работы реактора определяется возможностью получения максимальной энерговыработки с единицы массы загружаемого ядерного топлива. Эта эффективность характеризуется глубиной выгорания ядерного топлива – МВт·сут/кг.

Однако для обеспечения продолжительной работы реактора необходимо создать запас реактивности и средства компенсации этого запаса в течение работы реактора для поддержания коэффициента размножения равным единице. Таким образом, эффективность работы реактора напрямую зависит от того, как именно компенсируется избыточная реактивность.

Наиболее очевидный способ заключается в размещении в реакторе поглотителей, которые постепенно выводятся в процессе работы. Такой способ прост, но крайне неэффективен, поскольку приводит к большому паразитному поглощению нейтронов. Опуская поправку на утечку нейтронов, составляющую разницу между K_∞ и K_{eff} , максимальная глубина выгорания PT_{max} при такой однократной кампании определяется из условия

$$K_\infty (PT_{max}) = 1. \quad (8.1)$$

Существенным преимуществом по сравнению с размещением поглотителей обладают перегрузки ядерного топлива, так как в этом случае поглотителем служит частично выгоревшее топливо с $K_\infty < 1$, что позволяет получить дополнительное выгорание. Так, например, реактор с 3-кратными частичными перегрузками имеет при останове на перегрузку три типа топлива: отстоявшее одну

кампанию до глубины выгорания PT , отстоявшее две кампании до глубины выгорания $2PT$ и перегружаемое, отстоявшее три кампании до глубины выгорания $PT_{\max} = 3PT$. Условием определения максимальной глубины выгорания в этом случае, в простейшем приближении является соотношение

$$\frac{K_{\infty}(PT) + K_{\infty}(2PT) + K_{\infty}(3PT)}{3} = 1. \quad (8.2)$$

С целью компенсации избыточной реактивности и понижения температурных нагрузок на твэлы зачастую применяются различного рода выгорающие поглотители – ^{157}Gd , ^{166}Er и прочие. Концентрация таких поглотителей при выгорании топлива уменьшается, высвобождая запас реактивности, что приводит к росту K_{eff} реактора на начальном этапе кампании. Начальная концентрация выгорающего поглотителя может быть подобрана, например, из условия полной компенсации на начало кампании:

$$K_{\infty}(PT = 0, \rho_{\text{пог}}^0) = 1. \quad (8.3)$$

Наиболее же эффективный способ компенсации реактивности из применяемых в практической эксплуатации – непрерывные перегрузки ядерного топлива, имеющие место в канальных реакторах. Этот способ позволяет эксплуатировать реактор при практически нулевом запасе реактивности без использования дополнительных поглотителей. Максимальная глубина выгорания в этом случае определяется из условия:

$$\frac{1}{PT_{\max}} \int_0^{PT_{\max}} K_{\infty}(PT) dPT = 1. \quad (8.4)$$

Основная задача работы – расчетное исследование выгорания топлива, изменения концентрации различных нуклидов, а также анализ различных способов компенсации избыточной реактивности.

Порядок выполнения работы

1. Задать ячейку водо-водяного реактора с параметрами, использованными в работе 5 и ячейку канального графитового реактора с параметрами из работы 6 (в обоих случаях топливо – UO_2 с обогащением 3,0 %). Граничные условия – полное отражение нейтронов. Предусмотреть проведение расчетов с выгоранием, для чего внести в список рассчитываемых изотопов полный перечень продуктов деления, задать 20 циклов расчета выгорания по 50 сут и первый цикл длиной 5 сут (для учета отравления). Для водяного реактора задать энергонапряженность (qv) 110 кВт/л, для уран-графитовой системы – 4,5 кВт/л.

2. Для ячеек обоих типов провести расчеты выгорания и определить максимальную глубину выгорания. В водяной ячейке рассмотреть случай однократной кампании (8.1), трехкратных перегрузок (8.2) и провести дополнительный расчет однократной кампании, добавив в топливо ^{157}Gdc концентрацией, отвечающей условию (8.3). Для графитовой ячейки определить максимальную глубину выгорания согласно условию (8.4). Результаты представить в виде таблицы и четырех графиков зависимости коэффициента размножения от глубины выгорания топлива, выполненных в одной координатной плоскости.

Способ работы реактора	PT_{max} , МВт·сут/кг	$K_{\infty}(0)$	$\max K_{\infty}$
Однократная кампания			
Трехкратные перегрузки			
Кампания с выгорающим поглотителем			
Непрерывные перегрузки			

3. На трех координатных плоскостях изобразить по четыре графика (в зависимости от способа компенсации реактивности) зависимости концентраций ^{235}U , ^{239}Pu и ^{240}Pu от глубины выгорания топлива. Концентрации нормировать на конечное значение.

Контрольные вопросы

1. Как определяется запас реактивности в самом простом приближении?

2. Как изменяется концентрация поглотителя при компенсации реактивности однократной кампании реактора?

3. Как изменяется глубина выгорания топлива при повышении кратности перегрузок?

4. Как изменяется концентрация выгорающего поглотителя в начальный момент кампании реактора?

5. Чему равен запас реактивности при схеме непрерывных перегрузок?

6. За каждые 1 МВт·сут/кг запас реактивности реактора с однократной кампанией уменьшается на 5 %. Какова максимальная глубина выгорания в таком реакторе?

7. Чему равен коэффициент размножения реактора в начале кампании, если в течение кампании он изменяется по закону $K_0 - 0.005 PT$ [МВт·сут/кг], а максимальная глубина выгорания составила 40 МВт·сут/кг?

8. Выгодно ли увеличение количества перегрузок с 3 до 4, если при этом глубина выгорания топлива вырастает в 1,2 раза, а затраты на все перегрузки одинаковы?

9. Свежее топливо реактора (с 4-кратной схемой перегрузок) имеет коэффициент размножения 1,25, топливо, при первой перегрузке – 1,15. Чему равен начальный запас реактивности реактора, если известно, что изменение K_∞ носит линейный характер?

10. Свежее топливо реактора (с 3-кратной схемой перегрузок) имеет коэффициент размножения 1,3, топливо, выгружаемое в хранилище, – 0,85. Чему равен начальный запас реактивности реактора?

11. Выгодно ли снижение числа перегрузок в реакторе ВВЭР с трех до двух?

12. Выгодно ли изменить число перегрузок в реакторе ВВЭР с трех до десяти?

13. Коэффициент размножения на свежем топливе для реактора с непрерывными перегрузками равен 1,3. Каков коэффициент размножения на выгружаемом топливе, если известно, что в процессе кампании он изменяется линейно?

14. Коэффициент размножения реактора с непрерывными перегрузками становится равным единице на топливе с глубиной выгорания B . Чему равна максимальная глубина выгорания реактора?

15. Коэффициент размножения для топливной загрузки канального реактора изменяется по закону $1,27 - \alpha^2 \cdot PT^2$. Чему равна максимальная глубина выгорания?

16. Как изменяется концентрация ^{235}U в процессе кампании реактора?

17. Как изменяется концентрация ^{233}U в процессе кампании реактора на топливе $^{238}\text{U} + ^{233}\text{U}$?

18. Как изменяется концентрация ^{233}U в процессе кампании реактора на топливе $^{232}\text{Th} + ^{235}\text{U}$?

19. Каково должно быть обогащение топлива по ^{235}U , чтобы ^{239}Pu практически не образовывался?

20. Каков должен быть нуклидный состав ядерного топлива, чтобы основным делящимся нуклидом был ^{239}Pu , а накапливался ^{233}U ?

21. В реакторе в конце кампании образовался 1 кг ^{236}U . Сколько было загружено ^{235}U , если его осталось 4 кг, а вероятность деления в процессе кампании составляла 0,75?

22. Какова вероятность деления ядер Pu^{239} , если из 1 кг, загруженного в реактор, получается в итоге 200 г ^{240}Pu ?

23. Сколько нейтронов должно поглотиться, чтобы из ядра ^{235}U образовалось ядро ^{238}Pu ?

24. Сколько радиоактивных распадов должно произойти, чтобы из ядра ^{233}Th образовалось ядро ^{233}U ?

25. Может ли в реакторе, использующем уран-плутониевый топливный цикл образоваться ядро ^{232}Th ?

ОТВЕТЫ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Работа 1	Работа 2	Работа 3	Работа 4
1. Увеличивается 2. Увеличивается 3. Не изменяется 4. Убывающую 5. С максимумом 6. Увеличится 7. Уменьшится 8. Увеличится 9. Увеличится 10. У металл 11. v_{eff} 12. Возрастающую 13. Возрастающую 14. Неразмнжающей 15. Единицы 16. Сотни 17. Сотни 18. $\frac{2}{3}\rho$ 19. $\sim 0,4 \text{ см}^{-1}$ 20. $\sim 0,5 \text{ см}^{-1}$ 21. $\sim 90 \%$ 22. ~ 9 23. Возможно 24. $\sim 0,7$ 25. $\sim 1,4 \%$	1. Уменьшается 2. Уменьшается 3. Не изменится 4. Уменьшится 5. Уменьшится 6. Увеличивается 7. Увеличится 8. Увеличится 9. Уменьшится 10. Уменьшится 11. Устремится к нулю 12. Барн 13. Нет 14. Водород 15. Графит 16. Возрастающая 17. Отсутствует 18. Возрастающая 19. Убывающая 20. $\sim 1 \text{ эВ}$ 21. $\sim 0,1 \text{ эВ}$ 22. ~ 5 23. $\bar{\sigma} \ln \left(\frac{E_2}{E_1} \right)$ 24. $\bar{\sigma}_{a2} \frac{2\alpha + 1}{\alpha + 1}$ 25. $\frac{8\alpha}{\Gamma}$	1. Увеличивается 2. Уменьшается 3. Не изменяется 4. Уменьшается 5. Увеличится 6. Увеличится 7. В сферической 8. 0,54 9. В надкритическом 10. Не совпадает 11. В надкритическом 12. Станет надкритическим 13. В критическом 14. Увеличить 15. Увеличится 16. $\pi\sqrt{19}$ 17. $\frac{R}{\sqrt{0.9(\xi_0^2 + 0.25\pi^2)}}$ 18. Полусфера 19. В центре 20. Увеличится в $\sqrt{\frac{4}{3}}$ раз 21. Уменьшится в $\sqrt{1.25}$ раз 22. $\pi \left(\frac{K_\infty - 1}{L^2} - \left(\frac{\xi_0}{R} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}$ 23. 7 24. $1 + \pi^2/36$ 25. $\pi \left(\frac{K_\infty - 1}{L^2} - \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}$	1. Уменьшается 2. Уменьшается 3. Прямо пропорционально 4. Увеличится 5. Уменьшится 6. не зависит 7. малых 8. Толщине отражателя 9. L отражателя 10. Не зависит 11. Не изменяется 12. Возрастет 13. Увеличится на 20 % 14. Торцевой 15. L отражателя 16. $\frac{1}{2}$ сферы 17. На границе 18. В центре 19. В отражателе 20. В активной зоне 21. $3L$ отражателя 22. Увеличить обогащение 23. Создание отражателя 24. В середине 25. Для стороны a

Работа 5	Работа 6	Работа 7	Работа 8
<ol style="list-style-type: none"> 1. $\lambda > R_{\text{яч}}$ 2. Имеет 3. Убывающая 4. Имеет 5. Уменьшится 6. Увеличится 7. $\mu \uparrow \varphi \downarrow \theta \uparrow$ 8. Уменьшится 9. Увеличится 10. $\mu \downarrow \varphi \downarrow \theta \uparrow$ 11. Не оказывает 12. $\mu \downarrow \varphi \downarrow \theta \uparrow$ 13. $\mu \uparrow \varphi \downarrow \theta \uparrow$ 14. Увеличился 15. Уменьшится 16. Увеличится 17. ~ 5 18. $\sim 40\%$ 19. $\sim 60\%$ 20. ~ 12 мм 21. ~ 8 мм 22. ~ 330 23. ~ 30 см 24. ~ 250 25. ~ 25 см 	<ol style="list-style-type: none"> 1. $\lambda < R_{\text{яч}}$ 2. Большие раз- бавления 3. Увеличится 4. Вырастет по- глощение 5. В тяжеловод- ном 6. В графитовом 7. Увеличится 8. Уменьшится 9. Увеличится 10. Увеличится 11. В легководном 12. В тяжеловод- ном 13. Увеличится 14. Канального 15. Уменьшится 16. Уменьшится 17. Уменьшится 18. При графите 19. Экранировка 20. Теплоноситель D_2O 21. Увеличится 22. $\sim 8\%$ 23. $\sim 90\%$ 24. ~ 25 см 25. ~ 30 см 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сильный поглоти- тель нейтронов 2. Малое сечение поглощения 3. Увеличивается 4. 10^6 барн 5. От периода полу- распада 6. Увеличивается 7. Не изменяется 8. Несколько часов 9. Малый период полураспада 10. Уменьшается 11. Увеличивается 12. Ступенчатый останов 13. Быстрый подъем 14. несколько суток 15. 10^{12} 16. Уменьшится 17. Увеличится 18. В корпусном реакторе 19. С 50 % 20. два равновесных значения 21. $1.2 \cdot \tilde{\rho}_{\text{Xe}}$ 22. Уменьшается 23. увеличивается 24. $\downarrow \uparrow \uparrow$ 25. $\uparrow \downarrow \uparrow$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. $K_{\text{eff}}(0) - 1$ 2. Уменьшается 3. Увеличивается 4. Уменьшается 5. Равно нулю 6. 20 МВт·сут/кг 7. 1.2 8. Не выгодно 9. 0,1 10. 0,15 11. Не выгодно 12. Не выгодно 13. 0,7. 14. 2В 15. $0.9/\alpha$ 16. Уменьшается 17. Уменьшается 18. Увеличивается 19. 100 % 20. $^{239}\text{Pu} + ^{232}\text{Th}$ 21. 8 кг 22. 0,8 23. 3 24. 2 25. ^{240}Pu (2 α)

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программа нейтронно-физического расчета ячеек реакторов WIMS-D4 Winfrith Improved Multigroup Scheme, version D4, отчет ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1979.

2. Белоусов Н.И., Савандер В.И. и др. Программа GETERA, описание пользователя. Отчет МИФИ, 1993.

3. Гуревич М.И., Майоров Л.В., Шкаровский Д.А., Юдкевич М.С. Описание применения и инструкция пользователя MSU-REA/1.0. Отчет РНЦ КИ. М., 2003.

4. MCNPTM – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4A. LA-12625-M., 1993.

5. Савандер В.И., Увакин М.А. Физическая теория ядерных реакторов ч.І. Однородная размножающая среда и теория гетерогенных структур. М.: Тривант, 2007.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Значения констант делящихся и сырьевых ядер при $v = 2200$ м/с

Изотоп	σ_f барн	σ_c барн	σ_a барн	σ_s барн	ν_f	ν_{eff}
²³³ U	530,6	47,0	577,6	10,7	2,49	2,28
²³⁵ U	580,2	98,3	678,5	17,6	2,42	2,07
²³⁹ Pu	741,6	271,3	1012,9	8,5	2,88	2,11
²⁴¹ Pu	1007,3	368,1	1375,4	12,0	2,93	2,15

Ядерные концентрации некоторых веществ

Изотоп	10^{-24} г/см ³	σ_c , (барн)	σ_s , (барн)
²³⁸ U	0,0473	2,71	9,0
²³² Th	0,0293	7,56	12,0
UC	0,032	-	-
UO ₂	0,022	-	-

Значения констант изотопов замедлителей, теплоносителей и
конструкционных материалов при $v = 2200$ м/с

Вещество	γ , г/см ³	σ_c , барн	σ_s , барн	ξ	σ_s^* , барн
H ₂ O	1,0	0,66	63	0,948	44
H	-	0,33	38	1,000	20
O	-	~ 0	3,8	0,120	3,8
D ₂ O	1,1	0,001	13,6	0,570	10,5
C (12)	1,67	0,004	4,8	0,158	4,8
Be (9)	1,85	0,006	6,0	0,209	6,0
B (10)	2,45	75	4,0	0,171	-
Zr (91)	6,5	0,185	8,0	0,0218	6,2
Fe (56)	7,8	2,62	11,4	0,0353	11,4

* Относится к области замедления

Параметры резонансных уровней ^{238}U

E_0 , эВ	σ_{r0} , барн	Γ , эВ	Γ_r/Γ
6,7	20575	0,027	0,055
20,9	24100	0,034	0,258
36,8	17600	0,057	0,560
66,2	9870	0,048	0,541
80,7	2488	0,024	0,083

Длина диффузии и возраст тепловых нейтронов для замедлителей

Замедлитель	$\rho/\text{г/см}^3$	L , см	τ , см^2
H_2O	1,0	2,7	27,3
C	1,6	52,5	352
D_2O	1,1	150	120
$\text{D}_2\text{O}+0.25\% \text{H}_2\text{O}$	1,1	107	123

*Максим Александрович Увакин
Владимир Игоревич Савандер*

Лабораторный практикум

«ФИЗИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ»

Редактор Е.Г. Станкевич

Подписано в печать 15.11.2012 Формат 60×84 1/16
Печ. л. 3,5. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 120 экз.
Изд. №22/1 Заказ № 4.

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*

*ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский»
144 000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42*