



М. Н. Зизин

# **ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕЙТРОННАЯ КИНЕТИКА**

Тестовые задачи

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕЙТРОННАЯ КИНЕТИКА.....	8
1.1. Основные нестационарные уравнения переноса нейтронов.....	8
1.2. Кинетические параметры, обращённое решение уравнения кинетики и нестационарное уравнение переноса нейтронов.....	13
1.3. Приближения, используемые для решения пространственно-временного уравнения и расчёта функционалов.....	17
1.3.1. Приближение А.....	18
1.3.2. Приближение R.....	20
1.3.3. Приближение S.....	22
1.4. О решении нестационарного уравнения переноса.....	23
1.5. Использование стационарной программы переноса нейтронов с внешним источником вместо нестационарной.....	26
1.6. Уравнения точечной кинетики.....	27
1.7. Эффективные доли запаздывающих нейтронов.....	30
1.8. Об усреднении реактивности по показаниям ионизационных камер.....	32
1.9. Упрощённый учёт пространственных эффектов для оценки эффективности аварийной защиты.....	33
1.10. Cusping effect.....	35
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММ И ОРГАНИЗАЦИИ РАСЧЁТОВ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИКИ.....	48
2.1. Пространственно-временной расчёт.....	48
2.1.1. Подготовка сечений размножения и спектров деления.....	49
2.1.1.1. Сечения размножения мгновенных и запаздывающих нейтронов.....	49
2.1.1.2. Спектры нейтронов деления.....	51
2.1.2. Стратегия пересчёта концентраций предшественников запаздывающих нейтронов.....	53
2.1.3. Предварительный расчёт стационарных и «возмущённых» плотностей потока и ценностей.....	56
2.1.4. Выбор временного шага.....	57
2.1.5. О расчёте источника нейтронов спонтанного деления.....	58
2.1.6. Нормировка плотности потоков на мощность и расчёт мощности для подстановки в ОРУК.....	59
2.2. Решение обращённого уравнения кинетики с использованием рекуррентного соотношения.....	61
2.3. Грабли, на которые наступал автор, прежде чем превратил ОРУК в тождество.....	65
3. ТЕСТОВЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ РЕАКТОРНОЙ КИНЕТИКИ.....	71
3.1. Тест TWIGL. 2D модель реактора типа LWR с вводом положительной реактивности.....	73
3.1.1. Вариант TWIGL_SP. $\Phi = 0$ на границе.....	76
3.1.2. Вариант TWIGL_SP. $\Phi = 0$ на экстраполированной границе.....	77

3.1.3. Вариант TWIGL_RP .....	78
3.1.4. Выводы по результатам расчёта теста TWIGL .....	80
3.2. Тест Фергюсона. Гомогенный куб. Ввод положительной реактивности .....	80
3.3. 6-A. 1D двугрупповая диффузионная нейтронная кинетика .....	83
3.3.1. 6-A1-1 BENCHMARK PROBLEM SOLUTION .....	85
3.3.2. Решение тестовой задачи 6-A1 в системе ShIPR .....	86
3.3.3. 6-A2-1 BENCHMARK PROBLEM SOLUTION .....	87
3.3.4. 6-A2-2 BENCHMARK PROBLEM SOLUTION .....	88
3.3.5. Решение тестовой задачи 6-A2 в системе ShIPR .....	89
3.3.6. 6-A3-1 BENCHMARK PROBLEM SOLUTION .....	90
3.3.7. Решение тестовой задачи 6-A3 в системе ShIPR .....	91
3.3.8. 6-A4-1 BENCHMARK PROBLEM SOLUTION .....	92
3.3.9. 6-A4-2 BENCHMARK PROBLEM SOLUTION .....	93
3.3.10. Решение тестовой задачи 6-A4 в системе ShIPR .....	94
3.3.11. Тесты 6-A. Расчёты изменения реактивности .....	95
3.3.12. Тесты 6-A. Выводы .....	96
3.4. Тестовая задача ВВЭР-ВН .....	97
3.5. 14-A1. 2D тест нейтронной кинетики с обратной связью по температуре .....	101
3.5.1. Решение тестовой задачи 14-A1 в системе ShIPR .....	104
3.6. Недиффузионный тест Такеды SMALL LWR в диффузионном приближении .....	111
3.7. BN600_IAEA_T – тестовая модель реактора типа БН-600 с гибридной активной зоной с моделированием движения органов регулирования .....	120
3.7.1. Результаты расчётов теста BN600_IAEA_T .....	128
3.7.1.1. Стационарные расчёты .....	129
3.7.1.2. Нестационарные расчёты. Опускание органов регулирования .....	132
3.7.1.3. Нестационарные расчёты. Подъём одиночных органов регулирования .....	138
3.7.2. Выводы по результатам создания и расчёта теста BN600_IAEA_T .....	140
3.8. MET-1000_T – тестовая модель быстрого реактора среднего размера с металлическим топливом для моделирования движения органов регулирования .....	141
3.8.1. Исходная модель MET-1000 и модель MET-1000_GEFEST .....	142
3.8.2. Модель MET-1000_T .....	144
3.8.3. Расчёты модели MET-1000_T .....	152
3.8.3.1. Стационарные расчёты .....	152
3.8.3.2. Нестационарные расчёты .....	153
3.9. Численные иллюстрации к методическим студиям нейтронной кинетики на примерах тестов BN600_IAEA_T и MET-1000_T .....	155
3.9.1. Об информативности моделирования мгновенного сброса органов регулирования на примере расчётов моделей BN600_IAEA_T и MET-1000_T .....	155
3.9.2. Влияние параметра $\beta_{\min}$ на точность расчёта реактивности с помощью ОРУК .....	158
3.9.2.1. BN600_IAEA_T. Расчёты с разными значениями параметра $\beta_{\min}$ .....	160
3.9.2.2. MET-1000_T. Расчёты с разными значениями параметра $\beta_{\min}$ .....	163
3.9.3. Переменный шаг по времени при моделировании движения органов регулирования .....	166
3.9.3.1. Удвоение шага по времени после опускания органов регулирования .....	167
3.9.3.2. Изменение шага по времени во время движения органов регулирования .....	172
3.10. Использование двух вариантов точечной кинетики .....	175
3.11. Расчётный анализ возможного расположения ионизационных камер .....	180

3.12. Общие выводы по результатам создания и расчёта тестов, обчисланных в системе ShIPR .....	195
3.13. Две проблемные задачи .....	197
3.13.1. Пересчёт сопряжённого уравнения переноса на каждом шаге по времени .....	197
3.13.1.1. Моделирование перекомпенсации симметрично расположенных органов регулирования в быстром реакторе .....	200
<b>4. ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕЙТРОННОЙ КИНЕТИКИ .....</b>	<b>204</b>
4.1. Оценка эффективности органов регулирования .....	204
4.2. Моделирование движения органов регулирования в трёхмерных моделях реактора .....	205
4.3. Пространственно-временные программы .....	206
4.4. Пространственно-временные расчёты .....	208
4.5. Теория .....	210
4.6. Эксперимент .....	210
<b>5. Приложение 1</b>	
<b>НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ТЕСТЫ .....</b>	<b>212</b>
5.1. Тест PHWR .....	212
5.2. Модифицированный тест 8-A1 .....	212
5.3. Бенчмарк C5G7-TD .....	214
5.4. Двухгрупповая тестовая задача K3_1_T для моделирования опускания органов регулирования реактора типа ВВЭР-1000 .....	216
<b>6. Приложение 2</b>	
<b>КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ТЕСТОВ MET-1000_T И VN600_IAEA_T .....</b>	<b>232</b>
6.1. VNAV_93, шесть групп запаздывающих нейтронов .....	232
6.2. VNAV_RF-2010, восемь групп запаздывающих нейтронов .....	235
6.3. Полные выходы нейтронов при спонтанном делении актинидов (В. Г. Проняев) .....	237
<b>7. Приложение 3</b>	
<b>СВОДНЫЕ ТАБЛИЦЫ ФОРМУЛ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ РАСЧЁТАХ .....</b>	<b>239</b>
7.1. Спектры нейтронов деления и сечения размножения мгновенных и запаздывающих нейтронов .....	240
7.2. Диффузионные уравнения условно-критической задачи .....	241
7.3. Нестационарное диффузионное уравнение переноса нейтронов .....	242
7.4. Обращённое решение уравнения кинетики .....	244
7.5. Список основных идентификаторов .....	245
<b>8. Интеллектуальная программная система ShIPR для математического моделирования ядерных реакторов. Краткое описание .....</b>	<b>248</b>
8.1. Система накопления знаний и структура знаний об отдельных объектах .....	250
8.1.1. Стандартные величины .....	251
8.1.2. Группы объектов базы знаний .....	252
8.1.3. Наборы данных .....	252
8.1.4. Стандартный путь расчёта .....	253
8.1.5. Правила .....	254
8.2. Программа генерации текста стандартного пути расчёта .....	255
8.2.1. Генерация текста стандартного пути расчёта .....	255

8.2.2. Вычислительные модули .....	256
8.2.3. Задание исходных данных для расчёта.....	257
8.3. Тестовые задачи.....	258
8.4. ShIPR и верификация программ .....	259
8.5. Состав библиотеки вычислительных модулей для нейтронно-физических расчётов реакторов.....	260
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	<b>262</b>
<b>БЛАГОДАРЕНИЯ</b> .....	<b>263</b>
<b>СПИСОК ИСТОЧНИКОВ</b> .....	<b>265</b>