



А. П. Еперин А. М. Панкин

ОСНОВЫ ФИЗИКИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

**Санкт-Петербург
2019**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	3
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.....	8
1.1. Природа вещества.....	8
1.2. Строение атомов.....	11
1.3. Энергия связи ядра.....	17
1.4. Радиоактивные превращения ядер.....	20
1.4.1. β -распад.....	21
1.4.2. α -распад.....	21
1.4.3. К – захват.....	21
1.4.4. Характеристики радиоактивного распада.....	22
1.5. Естественный ядерный реактор.....	24
ГЛАВА 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ.....	27
2.1. Взаимодействие нейтронов с ядрами вещества.....	27
2.2. Взаимодействие γ -квантов с веществом.....	35
2.2.1. Характеристики γ -излучения.....	35
2.2.2. Фотоэффект.....	37
2.2.3. Эффект Комптона.....	38
2.2.4. Образование электрон-позитронных пар.....	40
ГЛАВА 3. ОСНОВЫ РЕАКТОРНОЙ И НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ.....	41
3.1. Физические основы ядерных реакторов.....	41
3.2. Основные типы реакций, идущие в ядерном реакторе.....	42
3.3. Деление тяжелых ядер, энергия деления, продукты деления.....	44
3.4. Типы ядерных реакторов.....	48
3.5. Цепная реакция деления ядер.....	53
3.6. Коэффициент размножения и нейтронный цикл в реакторе на тепловых нейтронах.....	54

3.7. Закономерности формирования пространственно-энергетического распределения нейтронов.....	57
3.8. Основы теории нестационарных процессов в ядерных реакторах. 59	
3.8.1. Отравление ядерного реактора, йодная яма.....	60
3.8.2. О роли запаздывающих нейтронов.....	62
3.9. Основные характеристики ядерных и термоядерных реакторов...63	
3.9.1. Классификация ядерных реакторов.....	63
3.9.2. Тепловые реакторы.....	64
3.9.3. Реакторы на быстрых нейтронах.....	67
3.9.4. Термоядерные реакторы.....	69
3.10. Состав и материалы ядерного реактора.....	75
3.10.1. Топливо.....	75
3.10.2. Замедлитель.....	77
3.10.3. Теплоносители.....	79
3.10.4. Защита.....	80
ГЛАВА 4. УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД К ФИЗИЧЕСКОМУ РАСЧЕТУ ТЕПЛОВОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.....	83
4.1. Макросечение взаимодействия	83
4.2. Спектр нейтронов в тепловом реакторе.....	83
4.3. Жизнь нейтрона в тепловом реакторе.....	85
4.4. Формула 4 –х сомножителей.....	92
4.5. Расчет макропараметров активной зоны.....	95
4.6. Задаваемые и определяемые параметры при расчете ядерных реакторов.....	97
ГЛАВА 5. ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМИ РЕАКТОРАМИ...99	
5.1. О пуске и снятии с эксплуатации реакторов различных типов...99	
5.1.1. О первом физическом пуске ядерного реактора.....	99
5.1.2. О проблемах снятия с эксплуатации АЭС.....	99
5.2. Определение энерговыделения и его профилирование по объему активной зоны.....	100
5.3. Особенности процессов выгорания и воспроизводства	

ядерного топлива в различных топливных циклах.....	104
5.4. Особенности нейтронно-физических процессов в активной зоне реактора.....	108
5.4.1. Физика процессов в активной зоне теплового реактора....	108
5.4.2. Нейтронный поток в реакторе.....	111
5.5. Физический и энергетический пуск и остановка энергоблоков..	114
5.5.1. Физический пуск реактора.....	114
5.5.2. Энергетический пуск реактора.....	115
5.5.3. Остановка реактора.....	116
5.6. Техничко-экономические показатели АЭС.....	116
5.7. Источники ионизирующего излучения и безопасность АЭС.....	118
5.7.1. Виды ионизирующего излучения.....	118
5.7.2. Радиоактивность.....	119
5.7.3. Воздействие ионизирующего излучения на объекты.....	123
5.7.4. Нормы допустимого воздействия (облучения) на персонал и население.....	128
5.7.5. Средства и методы обеспечения безопасности АЭС.....	130
5.7.6. Безопасность ЯЭУ.....	132
5.7.7. Классификация событий и аварий по шкале МАГАТЭ.....	134
ГЛАВА 6. ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЯЭУ.....	136
6.1. Основные понятия теории надежности.....	137
6.1.1. Основные понятия и определения теории надежности.....	137
6.1.2. Количественные показатели надежности.....	140
6.1.3. Надежность сложных объектов.....	147
6.1.4. Методы повышения безотказности технических объектов.....	150
6.2. Основные положения технической диагностики.....	151
6.2.1. Основные определения и задачи технической диагностики.....	152
6.2.2. Особенности диагностирования сложных систем и	

объектов.....	157
6.2.3. Диагностирование в жизненном цикле ЯЭУ.....	159
6.2.4. Характеристика методов и режимов диагностирования....	160
6.2.5. Тестовые сигналы.....	162
6.3. Контроль работоспособности сложных систем.....	165
6.3.1. Область и условия работоспособности.....	165
6.3.2. Запас и степень работоспособности.....	170
6.3.3. Методы контроля работоспособности непрерывных объектов.....	172
6.4. Поиск дефектов в блоках и системах ЯЭУ.....	175
6.4.1. Признаки наличия дефектов.....	175
6.4.2. Методы обнаружения дефектов.....	175
6.4.3. Алгоритмы поиска дефектов.....	176
6.4.4. Методы построения алгоритмов поиска дефектов.....	177
6.5. Прогнозирование технического состояния.....	178
6.6. Система диагностирования.....	180
ГЛАВА 7. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ЯЭУ.....	187
7.1. Диагностическое моделирование датчика прямого заряда СВРК.....	187
7.1.1. Основной режим измерительной цепи ДПЗ.....	190
7.1.2. Диагностический режим измерительной цепи ДПЗ.....	192
7.1.3. Идентификация диагностических признаков ДПЗ.....	194
7.1.4. Контроль технического состояния объекта датчика прямого заряда.....	195
7.2. Определение плотности теплоносителя в канале ядерного реактора с помощью БСД.....	197
7.2.1. Принцип работы детектора кипения и варианты возможных конструкций.....	198

7.2.2. Моделирование процессов прохождения электронов в бета-сборных датчиках.....	200
7.3. Диагностическое моделирование токовой ионизационной камеры СУЗ ядерного реактора.....	202
7.3.1. Построение математической модели ионизационной камеры.....	204
7.3.2. Способы диагностирования токовых ионизационных камер.....	208
7.4. Мобильная система диагностирования непрерывных объектов...	214
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Схема баланса радиоактивности на Земле (замкнутый топливный цикл).....	218
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Схема атомной станции с реактором типа ВВЭР.....	219
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Схема атомной станции с реактором типа РБМК.....	220
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Схема атомной станции с реактором типа ЭГП.....	221
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Схема атомной станции с реактором типа БН.....	222
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Дополнительные требования по безопасности АС с наиболее распространенными в РФ типами реакторных установок.....	223
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Вероятностный анализ безопасности.....	226
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Основная структура шкалы аварий на АЭС.....	227
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Международная шкала ядерных событий.....	228
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	229
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	230