

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	13
Предисловие	17
Введение	19
Часть I. Физические процессы в ядерных реакторах	29
Глава 1. Основы ядерной и нейтронной физики	29
1.1. Основы ядерной физики	29
1.1.1. Строение атома	29
1.1.2. Строение и свойства атомного ядра	30
1.1.3. Радиоактивный распад	36
1.1.4. Особенности различных видов радиоактивного распада	38
1.1.5. Ядерные реакции	44
1.1.6. Особенности ядерных реакций разных типов	47
1.2. Основы нейтронной физики	49
1.2.1. Свойства нейтронов	49
1.2.2. Деление атомных ядер	53
1.2.3. Замедление нейтронов в средах	63
1.2.4. Диффузия нейтронов в средах	66
Литература	68
Глава 2. Основы физики ядерных реакторов	69
2.1. Жизненный цикл нейтронов	69
2.1.1. Цикл размножения нейтронов	69
2.1.2. Число быстрых нейтронов $\nu_{\text{эф}}$, образующихся при одном поглощении теплового нейтрона в топливе	75
2.1.3. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах	76
2.1.4. Вероятность избежать резонансного захвата в процессе замедления ϕ	77
2.1.5. Коэффициент использования тепловых нейтронов	79
2.2. Зависимость эффективного коэффициента размножения от водоуранового отношения и обогащения	81
2.3. Зависимость эффективного коэффициента размножения от обогащения ядерного топлива	83
2.4. Условия критичности реактора	85

2.5. Пространственное распределение потоков нейтронов в реакторе	87
Литература	90
Глава 3. Кинетика реакторов	91
3.1. Переходные процессы в реакторе в модели точечной кинетики без обратных связей	92
3.2. Характер поведения реактора в разных диапазонах нейтронной мощности	98
Литература	102
Глава 4. Эффекты реактивности в реакторе	103
4.1. Общие определения и требования к коэффициентам реактивности	103
4.2. Виды эффектов реактивности	106
4.2.1. Общие сведения	106
4.2.2. Температурный эффект реактивности	107
4.2.3. Мощностный эффект реактивности	119
Литература	124
Глава 5. Динамика нуклидного состава реактора	125
5.1. Выгорание ядерного топлива. Шлакование реактора	125
5.2. Воспроизводство ядерного топлива	130
5.3. Отравление реактора Xe и Sm	137
5.3.1. Общие сведения	137
5.3.2. Отравление в стационарных режимах	138
5.3.3. Эффект нестационарного отравления Xe и Sm	147
Глава 6. Регулирование реакторов	157
6.1. Общие сведения	157
6.2. Баланс реактивности и составляющие запаса реактивности в реакторе	159
6.3. Регулирование реактивности стержнями	160
6.4. Жидкостное регулирование реактивности. Причины введения системы борного регулирования. Ее преимущества и недостатки	164
6.5. Выгорающие поглотители	165
6.5.1. Общие сведения	165
6.5.2. Гомогенные выгорающие поглотители	167
6.5.3. Блокированные (самозранированные) выгорающие поглотители	169
6.6. Остаточное тепловыделение в топливе и кризис теплообмена	170
6.6.1. Остаточное тепловыделение в топливе	170
6.6.2. Кризис теплообмена, условия его возникновения	172
Литература	176

Часть II. Ядерное топливо реактора ВВЭР-1000

и обращение с ним	177
Глава 7. Ядерное топливо	177
7.1. Общие сведения	177
7.2. Тепловыделяющий элемент	178
7.3. Тепловыводящая сборка	186
Глава 8. Комплекс систем хранения и обращения с ядерным топливом и обеспечение его безопасности	200
8.1. Назначение комплекса и технологическая схема обращения с ядерным топливом	200
8.2. Обеспечение безопасности при работе с ядерным топ- ливом	202
8.2.1. Основные определения	202
8.2.2. Общие требования к комплексу систем хранения и обращения с ядерным топливом	203
8.2.3. Требования к комплексу систем хранения и обращения со свежим ядерным топливом	205
8.2.4. Требования к комплексу систем хранения и обращения с отработавшим ядерным топливом	207
8.3. Комплекс систем хранения и обращения со свежим ядерным топливом	210
8.3.1. Назначение и функции системы	210
8.3.2. Технологическая схема хранения и обращения со свежим ядерным топливом	211
8.3.3. Хранилище свежего ядерного топлива	212
8.3.4. Анализ системы и оценка безопасности	219
8.4. Система перегрузки активной зоны	222
8.4.1. Назначение и функции системы	222
8.4.2. Технологическая схема системы перегрузки активной зоны	222
8.4.3. Оборудование системы перегрузки	226
8.4.4. Анализ системы и оценка безопасности	227
8.5. Система приреакторного хранения отработавшего ядерного топлива	228
8.5.1. Технологическая схема хранения отработавшего ядерного топлива	228
8.5.2. Оборудование системы приреакторного хранения отработавшего ядерного топлива	230
8.5.3. Анализ системы и оценка безопасности	233
8.6. Система расхолаживания бассейна выдержки и перегрузки	234
8.6.1. Назначение и функции системы	234

8.6.2. Технологическая схема системы расхолаживания бассейна выдержки	235
8.6.3. Анализ системы и оценка безопасности	237
Литература	239
Часть III. Оборудование реакторной установки	240
Глава 9. Конструкция реактора типа ВВЭР-1000	241
9.1. Общие характеристики и компоновка реактора	241
9.2. Корпус реактора	244
9.3. Верхний блок и внутрикорпусные устройства	247
9.3.1. Верхний блок	247
9.3.2. Шахта внутрикорпусная	249
9.3.3. Блок защитных труб	249
9.3.4. Выгородка реактора	252
Глава 10. Контроль и регулирование реактора типа ВВЭР	255
10.1. Общие сведения	255
10.2. Система управления и защиты	256
10.2.1. Аппаратура контроля нейтронного потока	257
10.2.2. Рабочие органы системы управления и защиты	262
10.3. Борное регулирование реактора типа ВВЭР-1000	269
10.4. Пуск реактора типа ВВЭР-1000	272
10.4.1. Общий подход	272
10.4.2. Расчет пусковой концентрации борной кислоты	276
10.4.3. Возможности несанкционированного выхода реактора в критическое состояние	278
10.5. Контроль тепловой мощности и распределения энерговыделения в активной зоне	282
10.5.1. Система внутриреакторного контроля	282
10.5.2. Контроль тепловой мощности активной зоны	288
10.5.3. Управление параметрами реактора	291
10.6. Ксеноновые колебания в реакторе типа ВВЭР-1000	291
Литература	298
Глава 11. Основное оборудование реакторного отделения энергоблока ВВЭР-1000	299
11.1. Общая компоновка и характеристики энергоблока ВВЭР-1000	299
11.2. Системы реакторного отделения	301
11.3. Компоновка реакторного отделения	306
11.4. Основное оборудование реакторного отделения	308
11.4.1. Компоновка оборудования в гермооболочке	308

11.4.2. Оборудование первого контура	309
11.5. Вспомогательные технологические системы реакторного отделения	335
11.5.1. Система подпитки-продувки	335
11.5.2. Другие вспомогательные системы	346
Глава 12. Системы безопасности реакторного отделения ...	358
12.1. Общие сведения	358
12.2. Система аварийно-планового расхолаживания	362
12.2.1. Назначение системы	362
12.2.2. Описание системы	363
12.2.3. Работа системы	365
12.2.4. Оборудование системы	367
12.3. Пассивная часть системы аварийного охлаждения активной зоны	370
12.3.1. Назначение пассивной части	370
12.3.2. Система гидроемкостей САОЗ	373
12.4. Спринклерная система	375
12.4.1. Назначение системы	375
12.4.2. Описание системы	376
12.4.3. Оборудование системы	377
12.4.4. Эксплуатация системы	378
12.5. Системы аварийного ввода и впрыска бора	379
12.5.1. Назначение систем	379
12.5.2. Система аварийного ввода бора	380
12.5.3. Система аварийного впрыска бора	385
12.6. Система аварийного парогазоудаления	389
12.6.1. Назначение системы	389
12.6.2. Общее устройство системы	392
12.6.3. Эксплуатация системы	394
12.7. Система аварийной подпитки парогенераторов	395
12.7.1. Назначение системы	395
12.7.2. Описание системы	397
12.7.3. Оборудование системы	399
12.7.4. Эксплуатация системы	401
12.8. Система технического водоснабжения потребителей группы «А»	403
Часть IV. Обеспечение безопасности	405
Глава 13. Безопасность атомных станций	408
13.1. Цели и принципы безопасности	408
13.1.1. Общие сведения	408

13.1.2. Принципы ответственности управления	412
13.1.3. Принцип глубокоэшелонированной защиты	413
13.1.4. Конкретные принципы безопасности	418
13.1.5. Принцип единичного отказа	422
13.2. Системы безопасности	425
13.3. Безопасность при эксплуатации АЭС	427
13.3.1. Общие сведения	427
13.3.2. Режимы и уровни безопасности при эксплуатации АЭС	429
13.4. Классификация систем АЭС по влиянию на безопасность	434
13.5. Аварийные ситуации на АЭС	437
13.6. Человеческий фактор в обеспечении безопасности.	
Подготовка персонала АЭС	444
13.7. Обеспечение качества и культура безопасности	446
13.7.1. Деятельность по обеспечению качества	446
13.7.2. Общая система обеспечения качества	447
13.7.3. Понятие «культура безопасности»	448
Литература	450

Глава 14. Основы концепции радиационной безопасности на АЭС с ВВЭР

14.1. Общие сведения	451
14.2. Стратегия обеспечения радиационной безопасности	452
14.2.1. Цели и принципы	452
14.2.2. Радиационный мониторинг и контроль	455
14.2.3. Современная система дозиметрических величин	460
14.3. Зональная планировка АЭС и территории вокруг нее	469
14.3.1. Разделение АЭС на зоны	470
14.3.2. Краткая характеристика района размещения АЭС	473
14.3.3. Специальные зоны вокруг АЭС	473
14.4. Подходы к нормированию радиационного воздействия АЭС на персонал, население и окружающую среду	477
14.4.1. Ограничение облучаемости персонала	477
14.4.2. Организация работ в соответствии с принципами ALARA ...	479
14.5. Ограничение газовых и аэрозольных выбросов АЭС, содержащих радиоактивные вещества	482
14.5.1. Современные подходы к ограничению радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации АЭС	482
14.5.2. Ограничение радиоактивных газоаэрозольных выбросов АЭС с ВВЭР в атмосферу	484
14.6. Ограничение жидких сбросов АЭС, содержащих радиоактивные вещества	486

14.7. Система радиационного мониторинга на АЭС	488
14.7.1. Общие сведения	488
14.7.2. Автоматизированная система радиационного контроля ...	491
14.7.3. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки (АСКРО)	493
Литература	495

Глава 15. Основы безопасности ВВЭР при нарушениях нормальных условий эксплуатации и проектных авариях

15.1. Общие сведения	496
15.2. Режимы, влияющие на изменение реактивности	498
15.2.1. Неуправляемое извлечение группы органов регулирования ...	498
15.2.2. Выброс органа регулирования	499
15.2.3. Несанкционированное снижение концентрации борной кислоты	500
15.3. Динамика режимов с разуплотнением первого контура	501
15.3.1. Разрыв трубопровода первого контура с образованием малой течи	502
15.3.2. Непредусмотренное срабатывание предохранительного клапана компенсатора давления	503
15.3.3. Режимы большой течи	503
15.4. Режимы с нарушением расхода теплоносителя	506
15.4.1. Общие сведения	506
15.4.2. Заклинивание одного главного циркулярного насоса	507
15.4.3. Обесточивание одного главного циркулярного насоса	509
15.4.4. Обесточивание всех главных циркулярных насосов	511
15.4.5. Полное обесточивание собственных нужд АЭС	513
15.5. Режимы с нарушением условий охлаждения реакторной установки со стороны второго контура	514
15.5.1. Общие сведения	514
15.5.2. Отключение турбогенератора от системы	515
15.5.3. Закрытие отсечных клапанов парогенераторов	516
15.5.4. Прекращение подачи питательной воды	518
15.5.5. Отключение подогревателя высокого давления	520
15.6. Режимы с разуплотнением второго контура	520
15.6.1. Общие сведения	520
15.6.2. Разрыв паропровода	521
15.6.3. Непредусмотренное открытие предохранительного клапана парогенератора	522
15.6.4. Непредусмотренное открытие БРУ-К	523
15.6.5. Разрыв трубопровода питательной воды парогенератора	523
15.7. Режим включения главного циркулярного насоса	524

Часть V. АЭС-2006 — новый шаг в эволюции атомных станций с реакторами ВВЭР	528
Глава 16. Проект АЭС-2006	528
16.1. Общие цели проекта	528
16.2. Описание энергоблока АЭС-2006	533
16.3. Реакторная установка и ее элементы	536
16.4. Ядерное топливо и активная зона реактора типа ВВЭР-1200	540
16.4.1. Топливо и ТВЭЛ	540
16.4.2. Тепловыводящая сборка АЭС-2006	541
16.4.3. Активная зона ВВЭР-1200	547
16.5. Корпус реактора типа ВВЭР-1200	550
16.6. Главный циркуляционный насосный агрегат	553
16.7. Парогенератор ПГВ-1000МКП	556
Литература	558
Глава 17. Системы безопасности АЭС-2006	559
17.1. Цели, принципы и схема устройства систем безопасности АЭС-2006	559
17.2. Структура систем безопасности АЭС-2006	560
17.3. Контейнмент	561
17.4. Система пассивного отвода тепла (СПОТ)	563
17.5. Система гидроемкостей	565
17.6. Система пассивной фильтрации межблочного пространства	568
17.7. Устройство локализации и удержания расплава активной зоны	571
17.8. Система аварийного и планового расхолаживания первого контура и охлаждения бассейна выдержки	574
17.9. Системы безопасности АЭС-2006, аналогичные ВВЭР-1000	576
17.10. Сравнение проектов реакторной установки с ВВЭР-1200 типа В-392М и В-491 по параметрам безопасности	586
Глава 18. Комплекс систем обращения с ядерным топливом на АЭС-2006 с ВВЭР-1200	590
18.1. Хранение свежего топлива	590
18.2. Перегрузка ядерного топлива	591
18.3. Обращение с отработавшим ядерным топливом	596
Глава 19. Система внутриреакторного контроля на АЭС-2006	599
Литература	603