

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА XXI века

Б.А. Габараев
В.Г. Свиридов
Ю.Б. Смирнов
Ю.С. Черепнин

*Рекомендовано ФУМО по УГСН 14.000.00
«Ядерная энергетика и технологии»
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений,
обучающихся по направлению
«Ядерная энергетика и теплофизика»*

Издание второе, переработанное и дополненное

МЭИ
2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	10
Список основных сокращений и обозначений	13
Введение	15
Глава 1. Общие сведения о физических процессах в ядерных реакторах	17
1.1. Фундаментальные физические открытия, приведшие к возникновению атомной энергетики	17
1.2. Свойства радиоактивных излучений	20
1.3. Ядерные реакции	23
1.4. Ядерная реакция деления	27
1.5. Цепная реакция деления	31
1.6. Коэффициент размножения нейтронов	32
1.7. Энерговыведение в реакторе	35
1.8. Выгорание и воспроизводство топлива в реакторе	36
1.9. Остаточное энерговыведение после останова реактора	39
1.10. Запаздывающие нейтроны и их значение	41
1.11. Реактивность и период реактора	44
<i>Контрольные вопросы</i>	45
<i>Список литературы</i>	46
Глава 2. Основные этапы развития атомной энергетики	47
2.1. Краткий исторический обзор этапов развития ядерной энергетики	47
2.2. Рост числа АЭС в мире	52
2.3. Распределение ядерных энергоблоков по странам и регионам	54
2.4. Стратегии развития ядерной энергетики	57
2.4.1. Общее состояние ядерной энергетики мира	57
2.4.2. Стратегии развития ядерной энергетики в России и в других ведущих странах мира	61
<i>Контрольные вопросы</i>	70
<i>Список литературы</i>	71
Глава 3. Материалы и конструкции ядерных энергетических установок	72
3.1. Основные элементы ядерного реактора	72
3.2. Ядерное топливо	74
3.2.1. Топливные композиции. Требования к ядерному топливу	74
3.2.2. Влияние теплофизических свойств ядерного топлива	77
3.3. Материалы в реакторостроении	78
3.3.1. Конструкционные материалы основного оборудования ядерных энергетических установок	78
3.3.2. Материалы органов управления реактивностью	93

3.3.3. Материалы замедлителей и отражателей	94
3.3.4. Материалы и конструктивные решения биологической защиты	96
3.4. Теплоносители ядерных установок	97
3.4.1. Вода	98
3.4.2. Натрий	100
3.4.3. Сплав свинец-висмут	101
3.4.4. Свинец	101
3.4.5. Органические теплоносители	103
3.4.6. Газовые теплоносители	104
3.4.7. Влияние теплофизических свойств теплоносителя	105
3.5. Типы и конструкции тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок	106
3.5.1. Тепловыделяющие элементы	106
3.5.2. Тепловыделяющие сборки	110
3.5.3. Влияние теплофизических свойств материалов ТВС	111
3.5.4. Теплофизические подходы к улучшению характеристик ЯЭУ ..	112
3.6. Классификация ядерных реакторов	112
3.7. Типовые схемы энергоблоков АЭС с реакторами PWR, BWR, FR, CANDU, БН, VHTR	114
3.8. Основные технические характеристики энергоблоков АЭС	117
3.8.1. Атомные электростанции мира	117
3.8.2. Атомные электростанции России	122
3.9. Конструкции и характеристики отечественных реакторов	123
3.9.1. Реакторы РБМК	123
3.9.2. Реакторы ВВЭР	128
3.9.3. Реакторы БН	133
<i>Контрольные вопросы</i>	140
<i>Список литературы</i>	141
Глава 4. Ресурсная база тепловой и ядерной энергетики	143
4.1. Общемировое потребление первичной энергии и производство электроэнергии	143
4.2. Мировые ресурсы органического топлива (нефть, газ, уголь)	144
4.3. Мировые ресурсы ядерного топлива	148
4.4. Дополнительная ресурсная база ядерной энергетики	151
4.5. Роль реакторов на быстрых нейтронах в расширении ресурсной базы ядерной энергетики	153
<i>Контрольные вопросы</i>	156
<i>Список литературы</i>	156
Глава 5. Изготовление ядерного топлива	158
5.1. Характеристика урана	158
5.2. Добыча и переработка уранового сырья	160
5.3. Изготовление ядерного топлива	163
5.3.1. Обогащение природного урана по изотопу ^{235}U	163
5.3.2. Изготовление топливных таблеток, твэлов и ТВС	168

5.4. Смешанное ядерное топливо	171
5.4.1. Смешанное уран-плутониевое оксидное топливо	172
5.4.2. Нитридное топливо для быстрых реакторов	174
5.4.3. РЕМИКС-топливо	176
5.4.4. Уран-ториевое топливо	177
5.5. Особенности ядерного топлива	178
<i>Контрольные вопросы</i>	180
<i>Список литературы</i>	180
Глава 6. Эксплуатация ядерного топлива	181
6.1. Эксплуатация ядерного топлива в реакторе	181
6.2. Плутоний и его свойства	184
6.3. Накопление ОЯТ при эксплуатации различных реакторов	188
6.4. Обращение с отработавшим ядерным топливом	190
6.5. Методы переработки ОЯТ	199
<i>Контрольные вопросы</i>	201
<i>Список литературы</i>	201
Глава 7. Обращение с радиоактивными отходами	203
7.1. Источники РАО	203
7.2. Классификация РАО	204
7.3. Этапы обращения с РАО	209
7.4. Способы концентрирования РАО	210
7.5. Хранение и захоронение РАО	212
7.6. Обращение с РАО в России	215
7.7. Международный опыт обращения с ОЯТ и РАО	222
7.8. Базовые принципы МАГАТЭ обращения с РАО	227
7.9. Природный ядерный реактор в Окло	229
<i>Контрольные вопросы</i>	231
<i>Список литературы</i>	232
Глава 8. Экономика ядерной энергетики	233
8.1. Вопросы конкурентоспособности ядерной энергетики	233
8.2. Пути повышения экономичности АЭС	238
8.3. Базовый экономический принцип развития ядерной энергетики	241
<i>Контрольные вопросы</i>	244
<i>Список литературы</i>	244
Глава 9. Российские эволюционные и инновационные проекты мощных реакторов	246
9.1. Эволюционные и инновационные реакторы	246
9.2. Канальные реакторы	247
9.2.1. Реакторная установка МКЭР — эволюционное развитие РБМК	247
9.2.2. Инновационные канальные реакторы со сверхкритическими параметрами теплоносителя	251

9.3. Корпусные реакторы	256
9.3.1. Эволюционные реакторы ВВЭР-ТОИ	256
9.3.2. Инновационный реактор ВВЭР-СКД.....	260
9.4. Инновационная ядерная энерготехнология БРЕСТ	262
9.4.1 Основные технические решения	263
9.4.2. Влияние термогравитационной конвекции на теплообмен в жидкометаллических теплоносителях	271
<i>Контрольные вопросы</i>	274
<i>Список литературы</i>	274

Глава 10. Реакторы средней и малой мощности

для комбинированной выработки электрической и тепловой энергии	277
10.1. Дополнительные направления использования ядерной энергии.....	277
10.2. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы ГТ-МГР и МГР-Т	279
10.3. АТЭС с реакторной установкой ВК-300	284
10.4. АТЭС с реакторной установкой ВВЭР-300	286
10.5. АТЭС с реакторной установкой СВБР-75/100.....	289
10.6. Плавающий энергоблок (ПЭБ) с реакторной установкой КЛТ-40С	292
10.7. Атомная станция малой мощности с реакторной установкой «УниTERM».....	297
10.8. Атомная станция малой мощности с реакторной установкой типа АБВ.....	301
<i>Контрольные вопросы</i>	305
<i>Список литературы</i>	305

Глава 11. Тяжелые аварии на АЭС

11.1. Международная шкала ядерных событий INES	307
11.2. Аварии на АЭС «Уиндскейл» и «Три-Майл-Айленд».....	311
11.2.1. Авария на АЭС «Уиндскейл».....	311
11.2.2. Авария на АЭС «Три-Майл-Айленд».....	311
11.3. Чернобыльская авария.....	315
11.3.1. Хронология развития аварии	315
11.3.2. Причины аварии	318
11.3.3. Последствия аварии.....	320
11.3.4. Устранение причин, могущих вызвать аварии типа чернобыльской	322
11.4. Фукусимская авария	323
11.4.1. Возникновение и развитие аварии	323
11.4.2. Причины аварии	325
11.4.3. Последствия аварии.....	326
11.4.4. Ликвидация последствий аварии.....	330
<i>Контрольные вопросы</i>	335
<i>Список литературы</i>	336

Глава 12. Безопасность АЭС: основные понятия и подходы

12.1. Концепция глубокоэшелонированной защиты	337
12.2. Общие принципы обеспечения безопасности в современной ядерной энергетике.....	340

12.3. Базовые принципы безопасности по методологии ИНПРО	340
12.4. Проектные аварии.....	342
12.5. Запроектные аварии.....	342
12.6. Вероятностный анализ безопасности.....	344
12.7. Программные комплексы для моделирования тяжелых аварий и их последствий	346
<i>Контрольные вопросы</i>	351
<i>Список литературы</i>	351
Глава 13. Ядерная энергия для космоса	352
13.1. Преимущества применения ядерной энергии в космосе	352
13.2. Космические ядерные энергетические установки для летательных аппаратов	355
13.3. Ядерные ракетные двигатели.....	360
13.4. Ядерные энергодвигательные установки	368
<i>Контрольные вопросы</i>	371
<i>Список литературы</i>	371
Глава 14. Реакторные концепции. Поколение IV	372
14.1. Классификация ядерных реакторов по поколениям.....	372
14.2. Международный проект «Поколение IV».....	374
<i>Контрольные вопросы</i>	385
<i>Список литературы</i>	386
Приложение 1. Твэлы ядерных энергетических реакторов	387
Приложение 2. ТВС ядерных энергетических реакторов	390
Приложение 3. Типы конструкций ядерных реакторов и технологические схемы энергоблоков	393