

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	<b>3</b>
<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ</b> .....	<b>6</b>
<b>СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	<b>11</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>15</b>
<b>Глава 1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В РЕАКТОРЕ</b> .....	<b>31</b>
1.1. Откуда берется ядерная энергия? .....	31
1.2. Почему осколки деления обладают очень высокой радиоактивностью? .....	35
<b>Глава 2. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ</b> .....	<b>40</b>
<b>Глава 3. ПРИНЦИП РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА</b> .....	<b>44</b>
<b>Глава 4. КЛАССИФИКАЦИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ</b> .....	<b>53</b>
4.1. Классификация реакторов по назначению .....	53
4.1.1. Реакторы для наработки оружейного плутония .....	53
4.1.2. Реакторы атомных подводных лодок, боевых надводных кораблей и гражданских судов .....	57
4.1.3. Реакторы атомных электростанций .....	59
4.1.4. Атомные станции теплоснабжения .....	61
4.1.5. Атомные теплоэлектроцентрали .....	62
4.1.6. Высокотемпературные реакторы для производства высокопотенциального тепла .....	63
4.1.7. Атомные станции промышленного теплоснабжения .....	65
4.1.8. Реакторы ядерных ракетных двигателей и космических летательных аппаратов .....	65
4.1.9. Исследовательские реакторы .....	68
4.2. Классификация реакторов по энергетическому спектру нейтронов ....	70
4.2.1. Реакторы на тепловых нейтронах .....	70
4.2.2. Реакторы на быстрых нейтронах .....	71
4.2.3. Реакторы на промежуточных нейтронах .....	76
4.3. Классификация реакторов по типу используемого замедлителя нейтронов .....	77
4.3.1. Водный замедлитель (легкая вода) .....	77
4.3.2. Тяжелая вода .....	78
4.3.3. Замедлители из бериллия и оксида бериллия .....	79
4.3.4. Графитовый замедлитель .....	80
4.4. Классификация реакторов по типу используемого теплоносителя ....	81
4.4.1. Легкая вода .....	82
4.4.2. Тяжелая вода .....	84
4.4.3. Органические жидкости .....	85
4.4.4. Расплавленные соли (жидкосольевые реакторы) .....	85
4.4.5. Жидкие металлы .....	87
4.4.5.1. Легкий жидкометаллический теплоноситель на основе щелочных металлов .....	87

4.4.5.2. Тяжелый жидкометаллический теплоноситель . . . . .	91
4.4.6. Газовые теплоносители. . . . .	95
4.4.6.1. Углекислый газ. . . . .	95
4.4.6.2. Гелиевый теплоноситель . . . . .	95
4.4.6.3. Диссоциирующий газ $N_2O_4$ . . . . .	96
4.5. Классификация реакторов по принципу преобразования энергии. . . . .	97
4.5.1. Паротурбинное преобразование энергии . . . . .	97
4.5.2. Газотурбинное преобразование энергии. . . . .	97
4.5.3. Полупроводниковое термоэлектрическое преобразование энергии . . . . .	98
4.5.4. Термоэмиссионное преобразование энергии . . . . .	98
4.6. Классификация реакторов по количеству теплоотводящих контуров . . . . .	98
4.6.1. Одноконтурные реакторы. . . . .	98
4.6.2. Двухконтурные реакторы . . . . .	102
4.6.3. Трехконтурные реакторы . . . . .	105
4.7. Классификация реакторов по конструктивным особенностям . . . . .	106
4.7.1. Корпусные и каналные реакторы. . . . .	106
4.7.2. Гомогенные и гетерогенные реакторы . . . . .	107
4.8. Классификация реакторов по принципу действия. . . . .	109

**Глава 5. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ ПРИ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ . . . . . 111**

5.1. Микроскопические сечения . . . . .	111
5.2. Зависимость микроскопических сечений от энергии нейтронов . . . . .	121
5.3. Макроскопические сечения . . . . .	128
5.4. Средняя длина свободного пробега нейтронов . . . . .	130
5.5. Расчет ядерных концентраций в материалах . . . . .	132
5.6. Расчет гомогенизированных ядерных концентраций . . . . .	134

**Глава 6. КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В БЕСКОНЕЧНОЙ СРЕДЕ . . . . . 138**

6.1. Формула четырех сомножителей . . . . .	138
6.2. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах на $^{238}\text{U}$ . . . . .	140
6.3. Коэффициент использования тепловых нейтронов . . . . .	143
6.4. Вероятность избежать резонансного захвата на $^{238}\text{U}$ в процессе замедления . . . . .	149
6.4.1. Основные понятия теории замедления нейтронов . . . . .	149
6.4.2. Расчет вероятности избежать резонансного захвата на $^{238}\text{U}$ в гомогенной среде . . . . .	156
6.4.3. Влияние гетерогенного размещения урана и замедлителя на вероятность избежать резонансного захвата . . . . .	171
6.5. Оптимальная гетерогенность активной зоны . . . . .	173

**Глава 7. ЭФФЕКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В РЕАКТОРЕ КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ . . . . . 176**

7.1. Вероятность избежать утечки в процессе замедления нейтронов . . . . .	176
7.2. Вероятность избежать утечки в процессе диффузии тепловых нейтронов . . . . .	185
7.3. Расчет критического радиуса реактора . . . . .	187

<b>Глава 8. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В РЕАКТОРЕ В ХОДЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ. . . . .</b>	<b>190</b>
8.1. Процессы, сопровождающие выгорание ядерного топлива . . . . .	191
8.1.1. Выгорание $^{235}\text{U}$ . . . . .	192
8.1.2. Накопление осколков деления . . . . .	199
8.1.3. Накопление $^{236}\text{U}$ . . . . .	200
8.1.4. Образование $^{239}\text{Pu}$ . . . . .	202
8.2. Отравление реактора . . . . .	212
8.2.1. Отравление реактора $^{135}\text{Xe}$ . . . . .	215
8.2.2. Отравление реактора $^{149}\text{Sm}$ . . . . .	236
8.3. Обратные связи в реакторе . . . . .	242
8.3.1. Роль обратных связей в обеспечении безопасности . . . . .	245
8.3.2. Коэффициенты реактивности в реакторах ВВЭР . . . . .	248
8.3.2.1. Обратная связь по температуре теплоносителя . . . . .	250
8.3.2.2. Обратная связь по температуре топлива . . . . .	259
8.3.3. Коэффициенты реактивности в реакторе РБМК . . . . .	268
8.3.4. Обратные связи в реакторах на быстрых нейтронах . . . . .	273
8.3.5. Особенности управления реактором с различными знаками мощностного коэффициента реактивности . . . . .	278
8.4. Временное поведение реактора при вводе положительной реактивности	279
8.4.1. Кинетика реактора без учета запаздывающих нейтронов. . . . .	280
8.4.2. Кинетика реактора с учетом запаздывающих нейтронов . . . . .	288
8.4.3. Динамика аварийного разгона реактора . . . . .	307
8.4.4. Вопросы пуска реактора из подкритического состояния . . . . .	313
8.4.5. Способы компенсации запаса реактивности . . . . .	329
<b>Глава 9. ТЯЖЕЛЫЕ АВАРИИ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ. . . . .</b>	<b>345</b>
9.1 Краткий анализ аварии на 4-м блоке Чернобыльской АЭС . . . . .	345
9.2 Тяжелые аварии на АЭС «Три Майл Айленд» и «Фукусима-1» . . . . .	359
<b>Глава 10. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ</b>	<b>366</b>
10.1. Реактор и источник энергии на органическом топливе: принципиальные отличия с позиций безопасности . . . . .	366
10.2. Факторы опасности реакторов АЭС. . . . .	371
10.3. Экономические аспекты безопасности. Страхование риска . . . . .	379
10.4. Физические и технические принципы обеспечения безопасности реакторов. . . . .	383
10.4.1. Первый класс аварий – реактивностные аварии . . . . .	385
10.4.2. Второй класс аварий – аварии с потерей теплоносителя . . . . .	389
10.4.3. Третий класс аварий – аварии, связанные с химическими взрывами и пожарами по внутренним причинам. . . . .	390
10.4.4. Четвертый класс аварий – аварии с потерей расхода теплоносителя через активную зону . . . . .	391
10.4.5. Пятый класс аварий – аварии с течью трубки парогенератора	392
10.4.6. Шестой класс аварий – аварии с потерей внешнего отвода тепла . . . . .	393
<b>Глава 11. МОДУЛЬНЫЕ БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ СВИНЕЦ-ВИСМУТ СВБР-100 В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ. . . . .</b>	<b>396</b>
11.1. Опыт эксплуатации реакторов с теплоносителем свинец-висмут на атомных подводных лодках . . . . .	396

11.1.1. Обоснование выбора сплава свинец-висмут в качестве теплоносителя . . . . .	399
11.1.2. Краткое описание схемы и конструкции РУ с СВТ . . . . .	400
11.1.3. Основные научно-технические проблемы, решенные в ходе освоения РУ с СВТ . . . . .	401
11.1.3.1. Технология свинцово-висмутового теплоносителя . . . . .	401
11.1.3.2. Обеспечение радиационной безопасности при работах, связанных с загрязнением воздуха и поверхностей оборудования полонием-210. . . . .	402
11.1.3.3. «Замораживание-размораживание» СВТ в РУ . . . . .	403
11.1.3.4. Обеспечение высокой надежности парогенератора . . . . .	404
11.1.4. Анализ аварий . . . . .	405
11.1.4.1. Аварии и инциденты на стенде 27/VT (ФЭИ, г. Обнинск) . . . . .	405
11.1.4.2. Авария на РУ левого борта АПЛ проекта «645» . . . . .	406
11.1.4.3. Аварии на РУ опытной атомной подводной лодки проекта «705». . . . .	410
11.1.4.4. Авария на РУ головной АПЛ проекта «705К» . . . . .	411
11.1.4.5. Аварии на стенде КМ-1 (НИТИ, г. Сосновый Бор) . . . . .	413
11.1.5. Трудности базового обслуживания РУ АПЛ. . . . .	413
11.1.6. Основные итоги эксплуатации РУ с СВТ . . . . .	414
11.2. Основные положения концепции РУ СВБР-100 . . . . .	417
11.2.1. Общие принципы. . . . .	417
11.2.2. Характерные особенности РУ СВБР-100 . . . . .	418
11.2.3. Обоснование выбора уровня мощности . . . . .	420
11.2.4. Внутренняя самозащищенность и пассивная безопасность РУ . . . . .	421
11.2.5. Топливный цикл и потребление природного урана . . . . .	424
11.2.6. Концепция обращения с ОЯТ и РАО . . . . .	427
11.2.7. Снижение риска распространения ядерных делящихся материалов . . . . .	429
11.2.8. Модульная структура ядерной паропроизводящей установки энергоблока . . . . .	429
11.2.9. Обеспечение конкурентоспособности ядерной энергетики в условиях рыночной экономики . . . . .	430
11.2.10. Возможности многоцелевого применения . . . . .	433
11.2.11. Соответствие основным требованиям к инновационным ядерным энергетическим системам IV-го поколения . . . . .	434
11.2.12. Концепция коммерциализации . . . . .	434
<b>ПОСЛЕСЛОВИЕ . . . . .</b>	<b>438</b>
<b>Приложение 1. Г. И. Тошинский. А. И. Лейпунский. Каким я его помню . . . . .</b>	<b>442</b>
<b>Приложение 2. Г. И. Тошинский. Ядерные энергетические установки с теплоносителем свинец-висмут для атомных подводных лодок (фрагменты). . . . .</b>	<b>446</b>
<b>Приложение 3. М. П. Грабовский. Второй Иван. Совершенно секретно (глава 26). . . . .</b>	<b>455</b>
<b>Приложение 4. А. Н. Румянцев. Пророк (фрагмент) . . . . .</b>	<b>462</b>
<b>Приложение 5. Парадигмы адмирала РикOVERA . . . . .</b>	<b>465</b>
<b>Об авторе . . . . .</b>	<b>471</b>