

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/352762830>

ВВЭР-1200 Эволюция классики Физические основы эксплуатации, системы и элементы, ядерное топливо, безопасность

Book · June 2021

CITATION

1

READS

2,085

7 authors, including:



s. A. Andrushechko

3 PUBLICATIONS 1 CITATION

SEE PROFILE



Vladimir F Ukraintsev

Rosatom technical academy

31 PUBLICATIONS 34 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Handbook for NPP VVER-1200 personnel [View project](#)



Statistical analysis of uncertainties [View project](#)

С.А. Андрушечко, Б.Ю. Васильев,
К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, А.Ю. Кучумов,
В.Ф. Украинцев, Б.Ю. Фаворов

ВВЭР-1200

ЭВОЛЮЦИЯ КЛАССИКИ

Физические основы эксплуатации,
системы и элементы,
ядерное топливо, безопасность



Содержание

Список использованных сокращений.....	10
От авторов.	14
ВВЕДЕНИЕ.....	18
Часть I. Основы физических процессов в ядерных реакторах.....	31
Глава 1. Основы ядерной и нейтронной физики	31
1.1. Основы ядерной физики.....	31
1.1.1. Строение и свойства атомного ядра.....	31
1.1.2. Радиоактивный распад.....	36
1.1.3. Особенности различных видов радиоактивного распада	37
1.1.4. Ядерные реакции.....	42
1.1.5. Особенности ядерных реакций разных типов.....	44
1.2. Основы нейтронной физики	46
1.2.1. Свойства нейтронов	46
1.2.2. Деление атомных ядер.....	49
1.2.3. Замедление нейтронов в средах.....	58
1.2.4. Диффузия нейтронов в средах.....	60
Литература к Главе 1.....	63
Глава 2 Основы физики ядерных реакторов	64
2.1 Цикл размножения нейтронов.....	64
2.1.1. Число быстрых нейтронов $\nu_{эф}$ образующихся при одном поглощении теплового нейтрона в топливе,.....	69
2.1.2. Коэффициент размножения на быстрых нейтронах μ	70
2.1.3. Вероятность избежать резонансного захвата в процессе замедления ϕ	71
2.1.4. Коэффициент использования тепловых нейтронов Θ	73
2.2. Зависимость $K_{эф}$ от водо-уранового отношения и обогащения... ..	76
2.3. Зависимость эффективного коэффициента размножения от обогащения ядерного топлива.....	77
2.4. Условия критичности реактора.....	79
2.5. Пространственное распределение потоков нейтронов в реакторе	81
Литература к гл.2.....	84
Глава 3. Кинетика реакторов	85
3.1 Общие понятия	85
3.2. Переходные процессы в реакторе в модели точечной кинетики без обратных связей	86
3.3. Характер поведения реактора в разных диапазонах нейтронной мощности	91
Глава 4. Эффекты реактивности в реакторе.....	95
4.1 Общие определения и требования к коэффициентам реактивности.	95
4.2. Виды эффектов реактивности.	97
4.2.1. Температурный эффект реактивности	98

4.2.2 Плотностной эффект реактивности.....	103
4.2.3 Мощностной эффект реактивности.....	107
Глава 5. Динамика нуклидного состава реактора.....	113
5.1. Выгорание ядерного топлива. Шлакование реактора.	113
5.2. Воспроизводство ядерного топлива	117
5.3 Отравление реактора Хе	123
5.3.1. Отравление в стационарных режимах.	123
5.3.1.1 Стационарное отравление ксеноном	123
5.3.1.2 Стационарное отравление самарием	128
5.3.2. Эффект нестационарного отравления Хе и Sm.....	132
5.3.2.1 Нестационарное отравление реактора Хе при сбросе мощности со 100% $W_{ном}$ до нуля. Йодная яма.....	132
5.3.2.1 Эффекты нестационарного отравления Sm	139
Глава 6. Регулирование реакторов	143
6.1 Баланс реактивности, составляющие запаса реактивности в реакторе.....	144
6.2 Регулирование реактивности стержнями.....	146
6.2.1 Зависимость интегральной эффективности стержня от места погружения стержня.	147
6.2.2 Дифференциальная характеристика эффективности стержня	148
6.2.3 Зависимость интегральной эффективности стержня от глубины его погружения.....	148
6.2.4 Эффект интерференции стержней	149
6.2.5 Изменение эффективности стержней при выгорании топлива	149
6.3 Жидкостное регулирование реактивности	149
6.4 Выгорающие поглотители	151
6.5. Остаточное тепловыделение в топливе и кризис теплообмена.	155
6.5.1. Остаточное тепловыделение в топливе	155
6.5.2 Кризис теплообмена, условия его возникновения.....	157
Литература к гл.6	159
Часть 2. Ядерное топливо реактора ВВЭР-1200 и обращение с ним.	160
Глава 7. Ядерное топливо.....	160
7.1. Ядерное топливо для реактора ВВЭР-1200.	160
7.1.1 Тепловыделяющий элемент	161
7.1.2 Тепловыделяющая сборка.....	164
Литература к главе 7.....	180
Глава 8. Комплекс систем хранения и обращения с ядерным топливом и обеспечение его безопасности	181
8.1 Обеспечение безопасности при работе с ядерным топливом.....	181
8.2 Комплекс систем хранения и обращения со свежим ядерным топливом	182
8.2.1 Описание и характеристики ХСТ.....	182
8.2.2 Описание схемы и технологического оборудования ХСТ ...	183
8.2.3 Функционирование системы при нормальной эксплуатации	190

8.2.4	Функционирование системы при отказах	191
8.3	Система перегрузки активной зоны	192
8.3.1	Назначение и классификация системы	192
8.3.2	Описание системы перегрузки активной зоны	194
8.3.2.1	Перегрузка ядерного топлива в активной зоне реактора	195
8.3.2.2	Вывоз выдержанного отработавшего ядерного топлива	206
8.3.2.3	Условия безопасной эксплуатации системы	209
8.4	Комплекс систем обращения с отработавшим топливом.....	211
8.4.1	Система приреакторного хранения ОЯТ	211
8.4.1.1	Назначение и классификация.....	211
8.4.1.2	Обеспечение безопасности.....	211
8.4.1.3	Описание системы.....	215
8.4.1.4	Описание технологической схемы	217
8.4.2	Система охлаждения бассейна выдержки	221
8.4.2.2	Режимы работы системы	222
8.4.2.3	Описание технологической схемы	225
8.4.2.4	Заключение по системе охлаждения бассейна выдержки.....	228
8.4.3	Система контроля герметичности оболочек	229
	Заключение к гл 8	229
	Литература к гл. 8.	230
	Часть 3 Оборудование реакторной установки	231
	Глава 9 Реактор ВВЭР-1200.....	231
9.1.	Назначение и функции реактора.....	231
9.2	Общие характеристики реактора.	232
9.3	Реактор и его элементы.....	232
9.3.1	Корпус реактора и внутрикорпусные устройства	234
9.3.1.1.	Корпус реактора	234
9.3.1.2	Блок верхний.....	235
9.3.1.3	Внутрикорпусные устройства.....	239
9.3.2	Активная зона реактора.....	247
9.3.2.1	Активная зона реактора, назначение и компоновка	247
9.3.2.2	Активная зона, основные нейтронно-физические характеристики	253
	
	Заключение к гл 9	267
	Литература к гл. 9.	267
	Глава 10. Управление и контроль реактора	269
10.1	Перечень контролируемых параметров	269
10.2	Система внутрореакторного контроля	270
10.2.1	Назначение системы и размещение датчиков СВРК.....	270
10.3	Измерение нейтронного потока.....	274
10.4	Управление реактивностью	275
10.4.1	Система группового и индивидуального управления	276
10.4.2	Исполнительные органы воздействия на реактивность.....	276
10.4.3	Системы регулирования, ограничения мощности и АЗ.....	279
10.4.4	Борное регулирование	281

10.4.4.1	Водообмен, эффективность водообмена в контуре.....	282
10.5	Пуск реактора ВВЭР-1200.....	285
10.5.1	Ощип подход.....	285
10.5.2	Контроль за реактивностью, реактиметры.....	290
10.6	Контроль тепловой мощности активной зоны.....	291
10.6.1	Тепловая мощность, рассчитанная по сигналам ДПЗ (эмиссионных датчиков).....	291
10.6.2	Тепловая мощность петель первого контура.....	292
10.6.3	Тепловая мощность, рассчитанная по параметрам парогенераторов.....	292
10.6.4	Тепловая мощности реактора, рассчитанная по сигналам ионизационных камер.....	293
	Заключение к гл 10.....	293
	Литература к гл. 10.....	293
	Глава 11. Основное оборудование реакторного отделения энергоблока АЭС-2006 и режимы нормальной эксплуатации.....	295
11.1	Общая компоновка и характеристики энергоблока АЭС-2006	295
11.2.	Общее описание систем реакторного отделения.....	309
11.2.1	Первый контур.....	309
11.2.1.1	Система теплоносителя первого контура.....	309
	- остальными трубопроводами систем, подключенных к оборудованию и трубопроводам системы теплоносителя реактора, до второй нормально закрытой во время эксплуатации арматуры, считая от места врезки;.....	313
11.2.1.2	Парогенератор.....	313
11.2.1.3	Главный циркуляционный насосный агрегат.....	318
11.2.1.4	Компенсатор давления.....	320
11.5	Вспомогательные технологические системы реакторного отделения.....	322
11.5.1	Система продувки-подпитки (1 КВА).....	322
11.5.1.1	Назначение и функции системы.....	322
11.5.1.2	Проектные режимы.....	323
11.5.1.3	Описание технологической схемы.....	325
11.6	Режимы нормальной эксплуатации.....	329
	Литература к гл. 11.....	334
	Заключение к части 3.....	335
	Глава 12 Системы безопасности АЭС-2006.....	336
12.1	Цели, принципы и схема устройства систем безопасности АЭС-2006.....	336
12.2	Структура систем безопасности АЭС 2006.....	337
12.3	Система аварийного и планового расхолаживания 1 контура и охлаждения бассейна выдержки (1 JNA).....	339
12.4	Система аварийного ввода бора (JND).....	352
12.5	Пассивная часть системы аварийного охлаждения зоны.....	358
12.5.1	Система гидроемкостей первой ступени GE-1 (JNG50-80)	360
12.5.2	Система гидроемкостей второй ступени GE-2 (JNG10-40)	362

12.6 Система защиты контуров от превышения давления	365
12.6.1 Система защиты первого контура от превышения давления	365
12.6.2 Система защиты второго контура от превышения давления	366
12.7 Система аварийного газоудаления (КТР)	369
12.8 Система аварийного расхолаживания парогенераторов (JNB10-40)	370
12.8.1 Функционирование системы в различных режимах	373
12.9 Система пассивного отвода тепла (СПОТ)	373
12.10 Система отсечения главных паропроводов	377
12.11 Другие системы безопасности и важные для безопасности ...	380
12.11.1 Контейнмент	380
12.11.2 Устройство локализации и удержания расплава активной зоны	381
12.11.3 Спринклерная система (JMN)	383
12.11.4 Система паропроводов свежего пара (LBA)	384
12.11.5 Система контроля концентрации и аварийного удаления водорода под защитной оболочкой (JMT-JMU)	385
12.11.6 Система промконтура ответственных потребителей здания реактора	385
12.11.7 Система охлаждающей воды ответственных потребителей (PE)	386
12.11.8 Система аварийного электроснабжения	387
12.11.9 Обеспечивающие системы вентиляции и кондиционирования помещений	388
Литература к гл. 12.	388
Часть 4. Обеспечение безопасности	390
Глава 13 Безопасность атомных станций	392
13.1 Цели и принципы безопасности	392
13.1.1 Основополагающие принципы управления	396
13.1.2 Принцип глубоко эшелонированной защиты	398
13.1.3. Конкретные принципы	404
I. Функция «контроль и управление реактивностью»	405
II. Функция «охлаждение активной зоны реактора»	405
III. Функция «локализация и надежное удержание радиоактивных продуктов»	405
13.2 Системы безопасности	410
13.3 Безопасность при эксплуатации АС	411
13.3.1 Режимы и уровни безопасности при эксплуатации АС	413
13.4 Классификация систем АЭС по влиянию на безопасность	420
13.5 Аварийные ситуации на АС.	422
13.6. Человеческий фактор в обеспечении безопасности	427
13.6.1 Подготовка персонала АС	427
13.7. Обеспечение качества и культура безопасности	429

13.7.1. Деятельность по обеспечению качества	429
13.7.2. Общая система обеспечения качества в атомной энергетике	429
13.7.3. Понятие «культура безопасности»	430
13.7.4. Показатели культуры безопасности	431
Литература к главе 13	431
Глава 14. Основы концепции радиационной безопасности на АЭС с ВВЭР	433
14.1. Стратегия обеспечения радиационной безопасности.....	433
14.1.1. Радиационный мониторинг и контроль	436
14.1.2 Современная система дозиметрических величин.....	440
14.1.2.1 Дозиметрические величины, используемые при радиационном контроле	440
А. Физические дозиметрические величины	441
В. Нормируемые величины	442
С. Операционные величины	446
14.2 Зональная планировка АЭС и территории вокруг нее	448
14.2.1 Разделение планировки АЭС на зоны.....	448
14.2.1.1. Требования к характеристикам помещений АЭС.....	449
14.2.2 Краткая характеристика района размещения АЭС	451
14.2.3. Специальные зоны вокруг АЭС	451
14.2.3.1. Общие положения	451
14.2.3.2 Определение границ санитарно-защитной зоны.....	452
14.2.3.3. Определение размеров зоны наблюдения вокруг АЭС.....	453
14.3 Подходы к нормированию радиационного воздействия АЭС на персонал, население и окружающую среду	455
14.3.1 Ограничение облучаемости персонала	455
14.3.2 Основные положения.....	455
14.3.3 Организация работ в соответствии с ALARA.....	456
14.3.4 Инструментарий принципа ALARA	457
14.4. Ограничение газовых и аэрозольных выбросов АЭС, содержащих радиоактивные вещества.....	458
14.4.1 Современные подходы к ограничению радиационного воздействия на население при нормальной эксплуатации АЭС	458
14.4.2. Ограничение радиоактивных газоаэрозольных выбросов АЭС с ВВЭР в атмосферу	460
14.5 Ограничение жидких сбросов АЭС, содержащих радиоактивные вещества.....	461
14.6. Система радиационного мониторинга на АЭС	462
14.6.1. Автоматизированная система радиационного контроля ..	463
14.6.2. Автоматизированная система контроля радиационной обстановки.....	466
Заключение к гл. 14.....	469
Литература к гл 14.	469
Глава 15 Анализ условий отказов и аварий	470

Общие положения.....	470
15.1 Проектные аварии.....	471
15.1.1 Классификация и перечень исходных событий.....	471
15.1.2 Начальные и граничные условия, используемые обычно для качественного анализа	480
15.1.2.1 Начальные условия.....	480
15.1.2.2 Граничные условия	482
15.1.3 Режимы с увеличением отвода тепла вторым контуром ...	484
15.1.3.1 Снижение температуры питательной воды	484
15.1.3.2 Непредусмотренное открытие предохранительного клапана парогенератора, сбросного клапана (БРУ-А) или байпасного клапана турбины (БРУ-К) с их последующей непосадкой	487
15.1.3.3 Спектр разрывов паропровода внутри и вне защитной оболочки	493
15.1.4 Режимы с уменьшением отвода тепла вторым контуром..	497
15.1.4.1 Закрытие стопорных клапанов турбины или потеря внешней электрической нагрузки.....	497
15.1.4.2 Разрыв трубопровода питательной воды парогенератора	500
15.1.4.3 Ложное закрытие быстродействующего запорного отсечного клапана (БЗОК).....	504
15.1.4.4 Потеря неаварийного питания переменным током вспомогательного стационарного оборудования (обесточивание АЭС).....	507
15.1.5 Уменьшение расхода теплоносителя первого контура	511
15.1.5.1 Отключение различного числа главных циркуляционных насосных агрегатов	511
15.1.5.2 Мгновенное заклинивание или разрыв вала одного главного циркуляционного насосного агрегата	514
15.1.6 Аномалии реактивности и распределения мощности	518
15.1.6.1 Неуправляемое извлечение группы органов регулирования на МКУ	518
15.1.6.2 Неуправляемое извлечение органов регулирования на мощности	522
15.1.6.3 Непреднамеренное разбавление борной кислоты в теплоносителе первого контура.....	526
15.1.6.4 Выброс органов регулирования системы управления и защиты при разрыве чехла привода	536
15.1.6.5 Падение ПС СУЗ	541
15.1.6.6 Подключение неработающей петли без предварительного снижения мощности.....	542
15.1.7 Увеличение количества теплоносителя первого контура... 547	
15.1.7.1 Нарушения в системе подпитки –продувки, приводящие к увеличению запаса теплоносителя первого контура.....	547
15.1.7.2 Ложный впрыск в компенсатор давления из системы подпитки- продувки.....	548
15.1.8 Уменьшение количества теплоносителя первого контура	550

15.1.8.1 Непредусмотренное открытие предохранительного клапана компенсатора давления с последующей непосадкой	550
15.1.8.2 Малые течи теплоносителя в результате разрыва трубопровода первого контура эквивалентным диаметром менее 100 мм	553
15.1.8.3 Большие течи теплоносителя в результате разрыва трубопровода первого контура эквивалентным диаметром более 100 мм, включая разрыв главного циркуляционного трубопровода.....	560
15.1.8.4 Разрыв теплообменной трубки ПГ с последующим расхолаживанием со скоростью 60 ⁰ С/ч.	568
15.1.8.5 Компенсируемая течь первого контура внутри контейнента	572
15.1.8.6 Течь из первого контура во второй при отрыве крышки коллектора парогенератора	573
15.1.9 Нарушения при обращении с ядерным топливом	583
15.1.9.1 Уменьшение концентрации гомогенного поглотителя в воде бассейна выдержки	583
15.1.10 Отказы внутри защитной оболочки	583
15.1.10.1 Течь из бассейна выдержки или разрыв трубопровода, приводящие к снижению уровня воды в бассейне выдержки.....	583
15.1.10.2 Повреждение системы охлаждения бассейна выдержки	589
15.1.11 Ложная работа систем	591
15.2 Запроектные аварии без плавления топлива, общая информация	592
15.2.1. Классификация исходных событий.....	593
15.2.2 Приемочные критерии	594
15.2.3 Начальные, граничные и другие условия для запроектных аварий	595
15.3 Запроектные аварии с плавлением топлива, общая информация	596
Заключение к главе 15.....	599
Литература к гл. 15.....	599
Заключение	600