

Серия «Теплофизика атомных электростанций»

621.039.58

Т.34

**ТЕПЛОФИЗИКА НАДЕЖНОСТИ  
АКТИВНЫХ ЗОН**



Национальная академия наук Украины  
Институт проблем безопасности атомных электростанций

Серия «Теплофизика атомных электростанций»

---

**ТЕПЛОФИЗИКА НАДЕЖНОСТИ  
АКТИВНЫХ ЗОН**

Монография

Чернобыль 2015

УДК 536.2.084.86:621.039.58

ББК 31.47+22.317

Т34

Серия основана в 2010 г.

Авторы:

А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко,

Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский

Рецензенты:

чл.-кор. НАН Украины, д.т.н. А. А. Авраменко;

чл.-кор. НАН Украины, д.ф.-м.н. В. И. Слисенко

*Рекомендовано в печать ученым советом  
Института проблем безопасности АЭС НАН Украины*

Т34 **Теплофизика** надежности активных зон : монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко и др. ; НАН Украины, Ин-т проблем безопасности АЭС. – Чернобыль (Киев, обл.) : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2015. – 772 с.

ISBN 978-966-02-5763-4 (серия)

ISBN 978-966-02-7339-9 (кн. 4)

В монографии рассмотрены теплофизические, а также материаловедческие аспекты комплекса нерегламентных процессов и эксплуатационных факторов, которые способны оказать влияние на показатели надежности элементов и систем активных зон энергетических ядерных реакторов. Рассмотрены наиболее важные физические аспекты нестационарных тепловых и гидродинамических процессов, которые связаны с устойчивостью движения теплоносителя первого контура в режимах принудительной и естественной циркуляции. Особое внимание уделено теплофизическим аспектам прикладной теории надежности с позиций вероятностного анализа стохастических показателей и параметров безопасности ядерных энергоблоков. Рассмотрены пути повышения эксплуатационной надежности активных зон, а также актуальные вопросы теплофизики ядерных реакторов, связанные с проблематикой раннего автоматического обнаружения начальных фаз опасных теплогидравлических аномалий.

Предназначена для научных работников, специалистов ядерной энергетики, а также для аспирантов и студентов.

**УДК 536.2.084.86:621.039.58**

**ББК 31.47+22.317**

ISBN 978-966-02-5763-4 (серия)

ISBN 978-966-02-7339-9 (кн. 4)

© А. А. Ключников, И. Г. Шараевский,

Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин,

Г. И. Шараевский, 2015

## Оглавление

Список сокращений.....	10
Введение .....	12
<b>Глава 1. Физические особенности энерговыделения в активной зоне ядерного реактора.....</b>	<b>36</b>
1.1. Расчет поля энерговыделения в активной зоне.....	36
1.1.1. Энергетические составляющие процесса тепловыделения.....	36
1.1.2. Длина потери энергии.....	39
1.1.3. Распределение энерговыделения во времени.....	42
1.1.4. Оценка потоков энергии в материалах реактора.....	46
1.1.5. Расчет тепловыделения в материалах активной зоны.....	51
1.1.6. Связь тепловыделения в регулирующем стержне с его эффективностью.....	61
1.1.7. Тепловыделение в реакторе, свойства которого существенно изменяются при нагреве теплоносителя.....	67
1.2. Актуальные вопросы оперативного контроля активных зон.....	71
1.2.1. Прямые и косвенные способы контроля.....	72
1.2.2. СВРК энергетических реакторов.....	73
1.2.3. СВРК с фиксированными и подвижными температурными детекторами.....	74
<b>Глава 2. Актуальные проблемы радиационного материаловедения внутрикорпусных устройств.....</b>	<b>79</b>
2.1. Физические особенности радиационных эффектов.....	79
2.2. Влияние теплофизических факторов на надежность активных зон.....	90
2.3. Твердые ядерные топливные материалы.....	101
2.3.1. Основные требования к твердому ядерному топливу.....	102
2.3.2. Металлические топливные материалы.....	104
2.3.3. Окисные топливные материалы.....	107
2.3.4. Топливные материалы на основе карбидных соединений.....	117
2.3.5. Нитридные топливные материалы.....	124
2.4. Влияние облучения на твердое ядерное топливо.....	126
2.5. Конструктивные особенности ТВЭЛ для основных типов энергетических реакторов.....	132
2.5.1. ТВЭЛ для отдельных типов легководных реакторов.....	132
2.5.2. Конструктивные особенности ТВЭЛ для тяжеловодных реакторов.....	135
2.5.3. Особенности ядерного топлива для высокотемпературных реакторов с газовым охлаждением.....	137

2.5.4. Конструктивные особенности ТВЭЛ для реакторов на быстрых нейтронах с воспроизводством ядерного топлива.....	141
<b>Глава 3. Технологические аспекты обеспечения эксплуатационной надежности ядерного топлива в ТВЭЛ...</b>	<b>161</b>
3.1. Перспективы использования смешанного оксидного топлива в энергетических ядерных реакторах.....	161
3.2. Технологические особенности производства основных видов ядерного топлива.....	165
3.3. Технологические и теплофизические аспекты производства и эксплуатации ТВЭЛ на основе керамического топлива.....	171
3.3.1. Теплофизика ТВЭЛ на основе компактной двуокиси урана.....	171
3.3.2. Технологические и эксплуатационные особенности смешанного керамического топлива.....	189
3.3.3. ТВЭЛ на основе уплотненного порошкообразного окисного топлива.....	193
3.3.4. Технологические особенности производства ТВЭЛ на основе карбидного и нитридного топлива.....	199
<b>Глава 4. Теплофизика контактного теплообмена в элементах конструкции ТВЭЛ.....</b>	<b>206</b>
4.1. Физические особенности тепловой проводимости контактных пятен.....	206
4.2. Тепловая проводимость сплошных границ раздела конструктивных элементов ТВЭЛ.....	212
4.3. Тепловая проводимость контакта твердых поверхностей элементов ТВЭЛ.....	231
<b>Глава 5. Теплофизические расчеты параметров эксплуатации ТВЭЛ ...</b>	<b>255</b>
5.1. Конструктивные особенности каналов охлаждения активных зон	255
5.2. Температурные режимы ТВЭЛ.....	270
5.3. Особенности контактного теплообмена в ТВЭЛ.....	281
5.4. Методы контроля теплофизических параметров ТВЭЛ в переходных режимах ЯР.....	286
5.5. Термические напряжения в ТВЭЛ.....	298
<b>Глава 6. Теплогидравлическая надежность реакторных каналов.....</b>	<b>306</b>
6.1. Особенности циркуляции теплоносителя в первом контуре.....	306
6.1.1. Теплогидравлический расчет ЯР: его задачи и структура исходной информации.....	306
6.1.2. Основные виды расчетных схем циркуляционных контуров реакторных установок.....	308

6.1.3. Структура и последовательность теплогидравлического расчета.....	311
6.2. Основные показатели теплогидравлической надежности активных зон.....	314
6.2.1. Фундаментальные понятия структурной теории надежности ....	321
6.2.2. Определяющие параметры и функции надежности.....	318
6.2.3. Особенности теплогидравлических процессов в теплообменном оборудовании АЭС.....	329
6.2.4. Теплоотдача к однофазным теплоносителям.....	332
6.2.5. Гидравлическое сопротивление контура циркуляции теплоносителя.....	337
6.2.6. Оценка затрат мощности на циркуляцию теплоносителя в первом контуре .....	339
6.2.7. Взаимосвязь теплогидравлических и геометрических характеристик активной зоны.....	340
6.2.8. Структурные характеристики двухфазных потоков.....	346
6.2.9. Гидравлические сопротивления контура циркуляции с двухфазным потоком.....	353
6.2.10. Определяющие особенности теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ в двухфазных потоках.....	356
6.2.11. Факторы тепловой и гидравлической неравномерности активной зоны.....	360
<b>Глава 7. Проблемы обеспечения теплогидравлической надежности каналов водоохлаждаемых ядерных реакторов.....</b>	<b>363</b>
7.1. Теплофизика надежности ТВЭЛ в структуре тепловыделяющих сборок в штатных и аварийных режимах эксплуатации.....	363
7.2. Актуальные проблемы расчета аварийных теплогидравлических процессов в ТВС.....	393
7.3. Вибрационные характеристики ТВЭЛ в условиях поверхностного кипения теплоносителя в водоохлаждаемых реакторах некипящего типа.....	404
<b>Глава 8. Надежность циркуляции теплоносителя в активной зоне в штатных и аварийных режимах эксплуатации ЯЭУ.....</b>	<b>411</b>
8.1. Теплофизика естественной циркуляции однофазного теплоносителя .	411
8.1.1. Физические принципы естественной циркуляции.....	411
8.1.2. Теплофизика движущего напора естественной циркуляции .....	412
8.1.3. Особенности движущего напора в контурах с многоходовыми схемами участков.....	416
8.1.4. Влияние перетоков теплоты на величину движущего напора.....	417

8.1.5. Расход теплоносителя в режиме естественной циркуляции.....	418
8.1.6. Особенности распределения расхода теплоносителя по каналам ядерного реактора.....	420
8.1.7. Внутриконтурные перетоки теплоносителя.....	427
8.1.8. Реализация естественной циркуляции теплоносителя в ГЦК при независимой работе теплообменного оборудования ЯЭУ.....	432
8.1.9. Пути форсирования тепловой мощности, отводимой в режиме естественной циркуляции.....	438
8.2. Теплофизика циркуляции двухфазной парожидкостной смеси.....	442
8.2.1. Движущий напор естественной циркуляции двухфазного теплоносителя.....	442
8.2.2. Методика расчета естественной циркуляции теплоносителя в кипящих ЯР.....	446
8.2.3. Критерии надежности естественной циркуляции теплоносителя.....	450
8.2.4. Кавитационные явления в опускной системе контура естественной циркуляции.....	459
8.2.5. Генерация пара в обогреваемой опускной системе контура естественной циркуляции.....	461
8.2.6. Захват пара в опускную систему контура естественной циркуляции.....	464
8.2.7. Факторы расслоения потока пароводяной смеси.....	465
8.2.8. Функционирование контура естественной циркуляции при аварийном снижении давления.....	467
<b>Глава 9. Стохастическая гидродинамика пульсационных режимов движения теплоносителя в активной зоне.....</b>	<b>471</b>
9.1. Пульсации однофазного теплоносителя в реакторных каналах.....	471
9.1.1. Теплофизика турбулентности внутренних течений.....	471
9.1.2. Методические особенности физического моделирования пульсационных режимов в турбулентных однофазных потоках.....	481
9.1.3. Методы экспериментального анализа структуры и пульсационности течений.....	488
9.2. Физические особенности и характеристики колебательной неустойчивости в парогенерирующих каналах.....	503
9.2.1. Основные виды гидродинамической неустойчивости двухфазного потока.....	503
9.2.2. Неустойчивость контура циркуляции при наличии сжимаемого объема.....	506

9.2.3. Физические проявления теплогидравлической неустойчивости в парогенерирующих каналах. Статическая неустойчивость.....	508
9.2.4. Факторы динамической теплогидравлической неустойчивости.....	512
9.2.5. Эффекты гидродинамической связи параллельных парогенерирующих каналов.....	528
<b>Глава 10. Математические модели устойчивости контуров естественной циркуляции однофазного теплоносителя .....</b>	<b>533</b>
10.1. Устойчивость стационарной естественной циркуляции.....	533
10.1.1. Задача о стабилизации колебательно неустойчивых однофазных циркуляционных систем.....	533
10.1.2. Влияние геометрических характеристик контура циркуляции на устойчивость его линеаризованной модели ...	540
10.1.3. Обобщение результатов анализа для случая нелинейной задачи.....	547
10.1.4. Результаты анализа устойчивости некоторых контуров естественной циркуляции.....	553
10.2. Вопросы обеспечения устойчивости естественной циркуляции в первом контуре реакторной установки.....	558
10.2.1. Контур с заданным распределением теплового потока и фиксированной температурой охлаждающей среды.....	558
10.2.2. Контур циркуляции с переменным коэффициентом теплопередачи.....	568
10.2.3. Устойчивость естественной циркуляции в условиях двухфазности.....	570
<b>Глава 11. Модели теплогидравлической неустойчивости кипящего теплоносителя в реакторных каналах.....</b>	<b>575</b>
11.1. Теплофизика основных видов колебательной неустойчивости двухфазных потоков.....	575
11.2. Модельные подходы к анализу неустойчивости Лединегга.....	577
11.3. Математические модели колебаний волн плотности.....	584
11.4. Колебательные процессы в парогенерирующих каналах, не связанные с неустойчивостью Лединегга.....	604
11.5. Проблемы обеспечения эксплуатационной надежности в режимах колебательной неустойчивости ядерных реакторов .....	612
<b>Глава 12. Показатели теплогидравлической надежности активных зон.....</b>	<b>620</b>
12.1. Основные определения характеристик надежности и безопасности ядерного реактора.....	620



12.1.1. Надежность теплоотвода в активной зоне.....	620
12.1.2. Определяющие параметры и функции активной зоны.....	622
12.2. Статистика функций, определяющих надежность активной зоны ....	625
12.2.1. Вероятностные характеристики определяющей функции	625
12.2.2. Подходы к выбору вида определяющей функции надежности.....	629
12.3. Количественные показатели теплогидравлической надежности.....	632
12.3.1. Общая характеристика показателей надежности.....	632
12.3.2. Вероятность реализации штатного теплоотвода в активной зоне.....	634
12.3.3. Вероятность сохранения штатного теплоотвода.....	640
12.3.4. Статистические характеристики выбросов определяющей функции.....	642
12.3.5. Уровень теплогидравлической надежности активной зоны.....	643
<b>Глава 13. Методологический подход к оценке теплогидравлической надежности активных зон.....</b>	<b>648</b>
13.1. Концепции оценки теплогидравлической надежности активных зон.	648
13.2. Структура расчета показателей теплогидравлической надежности активной зоны.....	663
13.2.1. Основное содержание расчета.....	663
13.2.2. Исходные данные для расчета.....	665
13.2.3. Алгоритмы и вычислительные процедуры для расчета надежности.....	669
13.3. Флуктуации теплосъема в каналах активной зоны.....	677
13.3.1. Систематизация причин случайных отклонений теплогидравлических параметров от их номинальных значений.....	677
13.3.2. Статистические распределения технологических отклонений конструктивных параметров.....	681
13.3.3. Статистический анализ погрешностей измерения режимных параметров активной зоны.....	688
13.3.4. Методические особенности статистического анализа реакторных шумов.....	691
13.3.5. Методика обработки статистических данных по флуктуациям режимных параметров активной зоны.....	702
13.3.6. Подходы к выбору статистических характеристик отклонений параметров реактора в условиях информационных ограничений.....	710

<b>Глава 14. Основные направления повышения</b>	
<b>теплогидравлической надежности активных зон.....</b>	<b>713</b>
14.1. Методология повышения надежности.....	713
14.1.1. Принципы совершенствования активных зон.....	713
14.1.2. Методы повышения средних значений	
определяющей функции реакторного канала.....	715
14.1.3. Методы и средства снижения	
дисперсии определяющей функции.....	719
14.2. Особенности гидравлического профилирования активных зон.....	725
14.2.1. Принципы гидравлического профилирования.....	725
14.2.2. Оптимизация гидравлического профилирования	
в динамическом поле энерговыделения.....	728
14.2.3. Оптимальное гидравлическое профилирование активной	
зоны при фиксированном поле тепловыделения.....	734
14.2.4. Алгоритмы расчета оптимального распределения	
расходов в каналах активной зоны	
при фиксированном поле энерговыделения.....	742
Список литературы.....	750