

В.А. Халимончук

БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

ДИНАМИКА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЕРЕХОДНЫХ
РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ВВЭР и РБМК



В.А. Халимончук

БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИИ

ДИНАМИКА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА
С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ
В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЕРЕХОДНЫХ
РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ВВЭР и РБМК

Киев
«Основа»
2008

УДК 621.039

Серия основана в 2004 г.

Рекомендовано к печати научно-техническим советом Государственного научно-технического центра по ядерной и радиационной безопасности, протокол № 08-3 от 18.11.2008 г.

Рецензенты:

А. В. *Краюшкин*, д-р техн. наук, начальник отдела Отделения канальных реакторов ИЯР РНЦ «Курчатовский институт»; Т. *Летч*, канд. техн. наук, руководитель департамента «Международные проекты» TUV SUD Industrie Service Energy und Technology (München, Deutschland)

Халимончук В. А.

Динамика реактора с распределенными параметрами в исследованиях переходных режимов эксплуатации ВВЭР и РБМК. — К.: Основа, 2008.— 228 с.— (Серия «Безопасность атомных станций»).

ISBN 966-02-41-49 (серия)

ISBN 978-966-699-433-5

Монография одного из ведущих украинских специалистов в области физики ядерных реакторов, работы которого по исследованию динамических режимов РБМК внесли значительный вклад в обоснование мероприятий по повышению их безопасности, посвящена разработке и использованию пространственных моделей динамических процессов в ВВЭР и РБМК. Помимо вопросов расчета быстрых переходных процессов в РБМК и ВВЭР, рассматриваются вопросы моделирования ксеноновых переходных процессов в РБМК и ВВЭР. Для реактора ВВЭР обсуждается проблема ксеноновых колебаний, включая их моделирование с помощью программы DYN3D, разработанной в исследовательском центре Германии «Rossendorf». Приводятся результаты расчетных исследований ряда проектных аварий на реакторе РБМК полученные с помощью первой трехмерной динамической программы ТРЕП, разработанной автором. Даются описания моделей для расчета полей температур в твэлах и графитовой кладке РБМК. излагаются вопросы моделирования аварии на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС.

Книга основана на результатах работ автора в течение 30-летнего периода и рассчитана на специалистов АЭС, научных работников и инженеров, занимающихся исследованиями переходных режимов эксплуатации энергетических реакторов. Будет также полезна студентам и аспирантам по специальности «Ядерные энергетические установки».

Монографія одного з провідних українських фахівців у галузі фізики ядерних реакторів, роботи якого з дослідження динамічних режимів РБМК внесли значний вклад в обґрунтування заходів з підвищення їх безпеки, присвячена розробці та використанню просторових моделей динамічних процесів у ВВЕР та РБМК. Крім питань розрахунку швидких перехідних процесів у РБМК та ВВЕР, розглядаються питання моделювання ксенонових перехідних процесів на РБМК та ВВЕР. Для реактора ВВЕР обговорюється проблема ксенонових коливань, включаючи їх моделювання за допомогою програми DYN3D, розробленої в дослідному центрі Німеччини «Rossendorf». Наводяться результати розрахункових досліджень низки проектних аварій на реакторі РБМК-1000, що отримані за допомогою першої тривимірної динамічної програми ТРЕП, розробленої автором. Описуються моделі дія розрахунку поля температури в твелах та графітійвій кладці РБМК, викладаються питання моделювання аварії на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС.

Книгу побудовано на результатах робіт автора протягом 30-літнього періоду і розраховано на фахівців АЕС, наукових співробітників та інженерів, що займаються дослідженнями перехідних режимів експлуатації енергетичних реакторів. Буде корисною студентам та аспірантам зі спеціальності «Ядерні енергетичні установки».

ISBN 966-02-41-49 (серия)

ISBN 978-966-699-433-5

© В. А. Халимончук, 2008

Оглавление

Перечень сокращений.....	6
Введение.....	7
Глава 1. ДИНАМИКА РЕАКТОРА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	9
1.1. Уравнение переноса нейтронов.....	9
1.2. Диффузионное приближение.....	15
1.2.1. Многогрупповое диффузионное приближение.....	16
1.2.2. Двухгрупповое диффузионное приближение.....	18
1.2.3. Одногрупповое диффузионное приближение.....	21
1.2.4. Точечное приближение. Эффективная доля запаздывающих нейтронов...24	
1.3. Определение реактивности. Пространственные эффекты реактивности. Распределенная (локальная) реактивность.....	29
1.4. Локальные (распределенные) значения коэффициентов реактивности.....	32
Глава 2. ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	34
2.1. Классификация переходных режимов.....	34
2.2. Быстрые переходные процессы	35
2.2.1. Расчет пространственного распределения поля нейтронов в стационарном состоянии активной зоны.....	35
2.2.2. Восстановление поля нейтронов в исходном состоянии переходного процесса.....	45
2.2.3. Расчет пространственно–временного распределения поля нейтронов в переходном процессе.....	48
2.2.4. Учет обратных связей.....	50
2.2.4.1. Температура топлива.....	51
2.2.4.2. Плотность и температура теплоносителя.....	62
2.2.4.3. Температура графитовой кладки в РБМК.....	65
2.3. Последовательность выполнения расчета быстрого переходного процесса.....	67
2.4. Медленные переходные процессы.....	68
Глава 3. ИСЛЕДОВАНИЯ МЕДЛЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ ВВЭР–1 000 И РБМК–1 000	74
3.1. Устойчивость реактора к ксеноновым колебаниям мощности.....	74
3.1.1. Линеаризация уравнений.....	74
3.1.2. Исследование устойчивости к ксеноновым колебаниям мощности в радиально–азимутальной геометрии.....	76
3.1.3. Исследование устойчивости к ксеноновым колебаниям мощности в аксиальной геометрии.....	81
3.1.4. Учет прямого выхода Xe^{135} в результате деления.....	82
3.1.5. Учет мощностного коэффициента реактивности.....	83

3.2. Моделирование ксеноновых переходных процессов на ВВЭР-1000	86
3.2.1. Характеристика <i>расчетного кода</i>	86
3.2.2. Тестирование расчетного кода на экспериментальных данных.....	87
3.2.2.1. Стационарные состояния эксплуатации ВВЭР-1000	88
3.2.2.2. Тестирование программы DYN3D на данных медленных переходных процессов эксплуатации ВВЭР-1000	93
3.2.3. Применение DYN3D в изучении устойчивости ВВЭР-1000 к аксиальным ксеноновым колебаниям мощности.....	96
3.2.4. Исследование с помощью DYN3D алгоритмов подавления ксеноновых колебаний мощности в ВВЭР-1000	97
3.2.5. Возможность эксплуатации реактора ВВЭР-1000 в маневренном режиме.....	105
3.2.5.1. Общие подходы к моделированию переходных процессов в обоснование испытаний по маневрированию мощностью.....	106
3.2.5.2. Регулирование с использованием 10-й группы ОР СУЗ.....	107
3.2.5.3. Регулирование с использованием 10-й группы и центрального стержня ОР СУЗ.....	112
3.3. Моделирование ксеноновых переходных процессов на РБМК-1000	115
3.3.1. Характеристика расчетного кода	116
3.3.2. Тестирование расчетного кода.....	119
3.3.3. Применение программы ТРЕП к исследованию переходного процесса снижения мощности на РБМК-1000 со 100 до 50 % номинального значения.	125

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРЫХ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ

ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000..... 129

4.1. Моделирование быстрых переходных процессов на ВВЭР-1000	129
4.2. Краткая характеристика расчетного кода.....	131
4.3. Выброс кластера	132
4.3.1. Исследование аварийного режима выброса кластера в условиях срабатывания аварийной защиты при различных скоростях погружения и частичном невведении ОР СУЗ в активную зону.....	132
4.3.1.1. Выброс кластера в начале кампании на номинальном уровне мощности при различных скоростях погружения ОР СУЗ....	133
4.3.1.2. Оценка подкритичности реактора в проектной аварии, связанной с выбросом кластера, при частичном невведении ОР СУЗ по сигналу аварийной защиты в начале кампании.....	139
4.3.1.3. Оценка подкритичности реактора в проектной аварии, связанной с выбросом кластера, при частичном невведении ОР СУЗ по сигналу аварийной защиты в конце кампании.....	141
4.3.2. Консервативный подход к исследованию аварийного режима выброса кластера ОР СУЗ на номинальном уровне мощности с использованием трехмерного кинетического кода.....	144
4.3.2.1. Выбор консервативных параметров и характеристик реактора в зависимости от оценки выполнения отдельного критерия приемлемости.....	144
4.3.2.2. Результаты расчетного моделирования.....	147

4.4. Исследование переходного процесса, связанного с самоходом кластера ВВЭР-1000 с учетом и без учета работы автоматического регулятора мощности.....	155
4.5. Ложное подключение холодной (ранее не работавшей) петли охлаждения активной зоны ВВЭР-1000.....	165
Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЯ БЫСТРЫХ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕАКТОРОВ РБМК-1000.....	173
5.1. Краткая характеристика расчетного кода.....	173
5.2. Тестирование расчетного кода на экспериментальных данных.....	176
5.3. Нейтронно-физические исследования максимальной проектной аварии на РБМК-1000	180
5.3.1. Обоснование выбора расчетной модели для исследования нейтронно-физических характеристик РБМК-1000 в МПА.....	181
5.3.1.1. Расчетные исследования МПА с применением одноклассовой диффузионной модели с постоянным коэффициентом диффузии и без учета пространственно-временной зависимости плотностного коэффициента реактивности.....	182
5.3.1.2. Учет влияния пространственно-временной зависимости местного плотностного коэффициента реактивности на результаты расчета МПА.....	186
5.3.2. Исследование МПА на РБМК-1000 после внедрения мероприятий по его модернизации.....	190
5.3.2.1. Оценка изменения в МПА нейтронной мощности и реактивности .	190
5.3.2.2. Оценка в МПА максимальных температур топлива и оболочки твэла.....	197
5.3.2.3. Оценка влияния на выбеги нейтронной мощности и реактивности в МПА работы системы локального автоматического регулирования пространственного распределения энерговыделения РБМК.....	197
5.4. Моделирование аварии, связанной с разрывом раздаточного группового коллектора.....	198
5.5. Расчетные исследования «самоходов» стержней СУЗ в реакторах РБМК-1000....	199
5.6. Исследование аварийного режима потери воды в контуре охлаждения СУЗ.....	201
Глава 6. НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРВОЙ ФАЗЫ АВАРИИ НА ЭНЕРГОБЛОКЕ № 4 ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС.....	204
Моделирование ксенонового переходного процесса, предшествовавшего проведению запланированного электротехнического эксперимента	206
6.1.1. Расчет ксенонового переходного процесса в одномерной (аксиальной) геометрии.....	207
6.1.2. Расчет ксенонового переходного процесса в двухмерной геометрии.....	211
6.2. Оценка эффективности стержней СУЗ РБМК-1000 в состоянии энергоблока № 4 Чернобыльской АЭС перед аварией.....	214
6.2.1. СУЗ до модернизации.....	214
6.2.2. Модернизированные стержни СУЗ.....	219
6.3. Расчетная оценка выбегов реактивности и нейтронной мощности в первой фазе Чернобыльской аварии с учетом парового коэффициента реактивности.....	220
Список использованной литературы.....	225