

В.А. Острейковский  
Ю.В. Швыряев

# БЕЗОПАСНОСТЬ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ



## ОГЛАВЛЕНИЕ

Список основных использованных сокращений . . . . .	8
Предисловие . . . . .	12

### **Часть I. Фундаментальные основы вероятностного анализа безопасности атомных станций**

Глава 1. Основные понятия и определения теории безопасности атомных станций . . . . .	17
1.1. Актуальность проблемы безопасности АС . . . . .	17
1.2. Исторический обзор становления и развития вероятностного анализа безопасности АС . . . . .	19
1.3. Терминология вероятностного анализа безопасности АС. . . . .	26
1.3.1. Рассматриваемые элементы вероятностного анализа (26).	
1.3.2. Терминология общего характера в ядерной энергетике (33).	
1.4. Концепции и инженерные принципы обеспечения безопасности атомных станций . . . . .	39
1.4.1. Цели и задачи обеспечения безопасности АС (39).	
1.4.2. Концепция глубокоэшелонированной защиты (41).	
1.4.3. Уровни защиты АС в глубину (45). 1.4.4. Этапы осуществления глубокоэшелонированной защиты АС (46).	
1.4.5. Концепция обеспечения безопасности АС — фундаментальные функции безопасности (48). 1.4.6. Концепция обеспечения безопасности АС — концепция единичного отказа (50). 1.4.7. Инженерные принципы глубокоэшелонированной защиты АС (52).	
1.5. Выводы из первой главы . . . . .	57

Глава 2. Количественные показатели безопасности атомных станций	59
2.1. Взаимосвязь основных эксплуатационных свойств АС	59
2.2. Характеристика, выбор и обоснование критериев для количественной оценки безопасности АС	64
2.2.1. Общие (интегральные) критерии безопасности АС (65).	
2.2.2. Условные (косвенные) критерии безопасности АС (69).	
2.2.3. Относительные (нормированные) критерии безопасности АС (70).	
2.2.4. Частные критерии безопасности АС (72).	
2.3. Требования к безопасности атомных станций	73
2.3.1. Качественные требования (73).	
2.3.2. Количественные требования по обеспечению безопасности АС (77).	
2.3.3. Количественные требования к безопасности АС, вытекающие из глобально-социального критерия (78).	
2.3.4. Количественные требования к безопасности АС, вытекающие из экономико-экологического критерия (79).	
2.3.5. Количественные требования к безопасности АС, вытекающие из медико-биологического критерия (81).	
2.3.6. Количественные требования к безопасности АС, вытекающие из глобально-социального и экономико-экологического критериев (82).	
2.4. Выводы из второй главы	83
Глава 3. Математические методы и модели теории безопасности атомных станций	85
3.1. Логико-вероятностные методы в теории безопасности	85
3.1.1. Элементы алгебры логики (85).	
3.1.2. Элементы логико-вероятностного исчисления (90).	
3.1.3. Аналитические и графические зависимости представления условий работоспособности и опасного состояния системы (96).	
3.1.4. Примеры применения алгебры логики и логико-вероятностного исчисления в задачах надежности и безопасности (99).	
3.2. Построение структурных моделей систем в виде схемы функциональной целостности	105
3.3. Общий логико-вероятностный метод расчета надежности и безопасности структурно-сложных систем	108
3.3.1. Первый этап ОЛВМ (109).	
3.3.2. Второй этап ОЛВМ (109).	
3.3.3. Третий этап ОЛВМ (113).	
3.3.4. Четвертый этап ОЛВМ (114).	
3.4. Пример применения ОЛВМ и СФЦ для вероятностного анализа безопасности систем	115
3.4.1. Первый этап ОЛВМ и СФЦ ВАБ участка ж.д (116).	
3.4.2. Второй этап ОЛВМ и СФЦ ВАБ участка ж.д (119).	
3.4.3. Третий этап ОЛВМ и СФЦ ВАБ участка ж.д (121).	
3.4.4. Четвертый этап развития ОЛВМ и СВЦ участка жд (121).	
3.5. Автоматизированное структурно-логическое моделирование надежности и безопасности АС	123

3.6. Организация структурно-логического моделирования выполнения ВАБ при проектировании АС . . . . .	127
3.7. Обобщенная стохастическая модель оценки безопасности АС	136
3.8. Модели количественной оценки безопасности АС с применением метода «дерева события» . . . . .	139
3.9. Математические модели оценки безопасности АС по критериям «риск-эффективность» . . . . .	146
3.10. Выводы из третьей главы . . . . .	148

## Часть II. Методология разработки и использования результатов ВАБ АС

Глава 4. Методология вероятностного анализа безопасности АС . . . . .	153
4.1. Общая вероятностная модель безопасности АС . . . . .	156
4.2. Содержание методологии ВАБ . . . . .	160
4.3. Отбор и группировка инициирующих событий . . . . .	163
4.3.1. Определение понятия и классификация инициирующих событий (163). 4.3.2. Составление полного перечня внутренних ИС (164). 4.3.3. Группирование ИС (167).	
4.4. Разработка деревьев событий . . . . .	168
4.4.1. Основные понятия и порядок построения ДС (168). 4.4.2. Основные принципы разработки ДС (171).	
4.5. Методология анализа надежности СБ . . . . .	172
4.5.1. Общие положения (172). 4.5.2. Классификация отказов элементов (176). 4.5.3. Построение моделей надежности систем (178).	
4.6. Количественный анализ надежности СБ . . . . .	184
4.6.1. Показатели надежности элементов (184). 4.6.2. Вероятность невыполнения функций безопасности (188). 4.6.3. ВНФ для элементов со скрытыми отказами (189). 4.6.4. Определение ВНФ периодически контролируемых элементов (194). 4.6.5. Определение составляющей $AK_i(\tau)$ ВНФ непрерывно контролируемых элементов и вероятности реализации МС с отказами элементов такого типа (202). 4.6.6. Определение вероятности реализации МС с отказами $p$ -, $k$ - и $n$ -типов (204). 4.6.7. Определение вероятности реализации МС с отказами, возникающими при выполнении СБ заданных функций безопасности (205). 4.6.8. Определение вероятности реализации минимальных сечений с отказами, возникающими в режиме ожидания и при работе во время аварии (207). 4.6.9. Определение вероятностей реализации МС с отказами, возникающими при выполнении СБ заданных функций безопасности. Вероятностные модели отказов СБ в режиме работы (207). 4.6.10. Оценка вероятностей реализации сечений типа «R» или «SR» для стратегии параллельного восстановления (210).	

4.6.11. Оценка вероятности реализации минимальных сечений типа «R» и «SR» для стратегии последовательного восстановления СЗ (214).	
4.6.12. Моделирования резерва времени на выполнение функции СБ (216).	
4.7. Методика анализа зависимых отказов . . . . .	218
4.7.1. Виды зависимых отказов (218).	
4.7.2. Анализ зависимостей при построении деревьев событий (221).	
4.7.3. Анализ зависимостей при разработке моделей надежности систем (224).	
4.7.4. Качественный анализ отказов общего вида (225).	
4.8. Анализ надежности персонала . . . . .	233
4.8.1. Общие положения (233).	
4.8.2. Основные этапы выполнения анализа надежности персонала (235).	
4.9. Формирование баз данных для ВАБ . . . . .	241
4.9.1. Общие положения (241).	
4.9.2. Термины и определения используемые при анализе данных (241).	
4.9.3. Определение групп компонентов для задачи анализа данных (243).	
4.9.4. Используемые источники данных (244).	
4.9.5. Определение границ компонентов (244).	
4.9.6. Определение видов отказов элементов (245).	
4.9.7. Классификация событий по условиям обнаружения и восстановления (247).	
4.9.8. Номенклатура показателей надежности (247).	
4.9.9. Моделирование отказов элементов на деревьях отказов (248).	
4.9.10. Методы применяемые для задачи оценки параметров надежности (249).	
4.10. Выводы из четвертой главы . . . . .	252
Глава 5. Подход к оценке и обоснованию безопасности АС на основе результатов ВАБ . . . . .	253
5.1. Общие положения . . . . .	253
5.2. Качественная оценка безопасности на основе результатов ВАБ . . . . .	254
5.2.1. Основные задачи качественного анализа (254).	
5.2.2. Обеспечение необходимого уровня надежности (255).	
5.3. Количественная оценка безопасности на основе результатов ВАБ . . . . .	261
5.4. Выводы из пятой главы . . . . .	267
Глава 6. Применение ВАБ при проектировании АЭС с реакторами ВВЭР нового поколения . . . . .	268
6.1. Концепция безопасности АЭС с ВВЭР нового поколения . . . . .	268
6.1.1. Реакторная установка В-392 (271).	
6.1.2. Системы безопасности АЭС-92 (272).	
6.2. Оценка эффективности проектных решений для АЭС-92 на основе результатов ВАБ . . . . .	277
6.2.1. Краткая характеристика ВАБ уровня 1 (277).	
6.2.2. Результаты ВАБ уровня 1 (278).	
6.2.3. Анализы значимости (282).	
6.2.4. Анализ чувствительности (282).	
6.2.5. Анализ неопределенностей значений частоты ПАЗ (285).	
6.2.6. Оценка	

---

уровня безопасности АЭС «Куданкулам» на основе результатов ВАБ (285).	
6.3. Проектные решения по повышению экономичности . . . . .	288
6.3.1. Снижение затрат на сооружение АЭС (289). 6.3.2. Повышение показателей надежности выработки энергии (291).	
6.4. Краткая характеристика концепции безопасности проекта АЭС «Бушер-1» . . . . .	292
6.5. Оценка уровня безопасности АЭС «Бушер» на основе результатов ВАБ уровня 1 . . . . .	293
6.5.1. Краткая характеристика ВАБ уровня 1 (293). 6.5.2. Исходные данные и предположения при проведении количественных оценок значений частот ПАЗ (294). 6.5.3. Устранение логических петель (295). 6.5.4. Результаты оценки частоты повреждения активной зоны (297).	
6.6. Оценка уровня безопасности АЭС «Бушер-1» на основе результатов ВАБ . . . . .	299
6.7. Выводы из шестой главы. . . . .	301
Глава 7. Применение ВАБ для действующих АЭС с реакторами ВВЭР	303
7.1. Применение ВАБ для энергоблоков 3, 4 Нововоронежской АЭС	303
7.2. Разработка стратегии технического обслуживания СБ для АЭС с реакторами В-320 . . . . .	311
7.3. Применение ВАБ для оптимизации регламентов технического обслуживания и ремонтов СБ АЭС с реактором В-320. . . . .	315
7.3.1. Применение ВАБ для АЭС с В-320 (315). 7.3.2. Определение эксплуатационных состояний (318). 7.3.3. Количественная оценка (322).	
7.4. Выводы из седьмой главы . . . . .	328
Заключение. Перспективы развития вероятностного анализа безопасности АС . . . . .	329
Список литературы . . . . .	335