

Моделирование тяжелых аварий

Васильев А.Д., Стрижов В.Ф.

Излагаются различные аспекты моделирования аварийных процессов (теплофизических, термодинамических и физико-химических) при запроектных и тяжелых авариях. Рассмотрены различные фазы тяжелых аварий: потеря теплоносителя при авариях с течами и нарушением теплоотвода, фаза разрушения активной зоны и перемещения расплава на днище корпуса.

№	Тема	Содержание
1	Безопасность атомной энергетики	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обоснование безопасности работы атомных станций при различных режимах работы 2. Проектные и запроектные аварии 3. Коды для моделирования реакторных установок
2	Основные принципы обеспечения безопасности	<ol style="list-style-type: none"> 1. Концепция глубокоэшелонированной защиты 2. Барьеры безопасности: оболочка, первый контур, шахта, противоаварийная оболочка
3	Теплоотдача	<ol style="list-style-type: none"> 1. Три механизма теплоотдачи – теплопроводность, конвекция, излучение 2. Молекулярная теплопроводность 3. Конвекция в жидком и газообразном фазовых состояниях 4. Тепловое сопротивление 5. Аналогия с электрическим сопротивлением 6. Стационарные тепловые характеристики достаточно сложных систем
4	Теплопроводность	<ol style="list-style-type: none"> 1. Описание молекулярной теплопроводности посредством коэффициента теплопроводности 2. Уравнение теплопроводности 3. Решение стационарного и нестационарного уравнения теплопроводности в простейших случаях
5	Конвекция	<ol style="list-style-type: none"> 1. Число Био, число Нуссельта, число Рейнольдса, число Рэлея для задач конвективной теплопередачи 2. Описание теплообмена при конвекции числом Нуссельта
6	Теплообмен излучением	<ol style="list-style-type: none"> 1. Коэффициенты переизлучения между поверхностями 2. Зональный метод 3. Система линейных уравнений для тепловых потоков в сложных системах 4. Аналитический расчет коэффициентов переизлучения в простейших случаях
7	Пограничный слой. Тепловыделяющая жидкость	<ol style="list-style-type: none"> 1. Режимы теплопередачи при свободной конвекции 2. Энергетический баланс 3. Число Рэлея в случае тепловыделяющей жидкости 4. Толщина пограничного слоя
8	Эксперименты по конвекции. Распределение тепловых потоков	<ol style="list-style-type: none"> 1. Описание экспериментов по конвекции 2. Боковой и объемный нагрев 3. Ламинарная и турбулентная конвекция 4. Расчет распределения тепловых потоков
9	Теплообмен при кипении	<ol style="list-style-type: none"> 1. Основные режимы кипения жидкости: пузырьковый, переходный, пленочный 2. Критический тепловой поток 3. Точка Ляйденфроста.
10	Физико-химические явления. Образование корки. Модель квазистационарного роста корки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Температуры солидус и ликвидус для смесей различных веществ 2. Расчет роста толщины корки при охлаждении расплава
11	Численные коды, используемые для моделирования реакторных установок	<ol style="list-style-type: none"> 1. Основные подходы, используемые в численных кодах, по моделированию проектных и запроектных режимов работы реакторных установок 2. Современные коды улучшенной оценки 3. Российский код СОКРАТ/В5

12	Моделирование теплогидравлики в численных кодах	<ol style="list-style-type: none"> 1. Система уравнений неразрывности, момента импульса и энергии для каждой из фаз 2. Замыкающие соотношения 3. Модели основных элементов оборудования
13	Моделирование разрушения активной зоны в численных кодах	<p>Основные модели разрушения материалов АЗ:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Окисление циркония и железа 2. Плавление 3. Образование эвтектик 4. Стеkanie расплавленных материалов 5. Деформационное поведение 6. Современные модели окисления структур, содержащих цирконий, в смесях пар-азот и кислород-азот (воздух)
14	Моделирование генерации водорода при аварии с потерей теплоносителя в бассейне выдержки (БВ) отработанного топлива	<p>Основные модели поведения БВ при аварии:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Нагрев воды БВ 2. Снижения уровня воды 3. Оголение тепловыделяющих кассет 4. Выход водорода при реакции циркониевых и стальных конструкций со смесью, содержащей пар, кислород, азот
15	Аварии на АЭС с потерей теплоносителя	<ol style="list-style-type: none"> 1. Аварии типа "большая" и "малая течь" 2. Основные особенности данных аварий
16	Нагрев и разрушение активной зоны	<ol style="list-style-type: none"> 1. Теплопроводность в ТВЭЛах и стальных конструкциях 2. Конвекция и излучение в конструкциях ректора 3. Пароциркониевая реакция 4. Окисление и разрушение стальных конструкций 5. Осыпание топливных таблеток 6. Окисление структур, содержащих цирконий, в смесях пар-азот и кислород-азот (воздух)
17	Взаимодействие расплава с корпусом реактора	<ol style="list-style-type: none"> 1. Задача конвекции для расплава 2. Распределение тепловых потоков 3. Разрушение корпуса реактора
18	Взаимодействие расплава с бетоном	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уравнение энергетического баланса для расплава 2. Осевое и радиальное проплавление бетона
19	Рост температуры и давления противоаварийной оболочки при тяжелой аварии	<ol style="list-style-type: none"> 1. Уравнение энергии атмосферы противоаварийной оболочки 2. Динамика давления под оболочкой
20	Концепция ловушки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ловушка как пассивная система безопасности реактора 2. Жертвенные слои 3. Охлаждение водой
21	Пассивные системы безопасности вне реактора	<ol style="list-style-type: none"> 1. Спринклеры 2. Ледовые конденсаторы 3. Фильтры 4. Тепловые трубы 5. Ограничение давления под противоаварийной оболочкой 6. Водородная безопасность 7. Рекомбинаторы
22	Интегральные эксперименты по моделированию явлений, протекающих при тяжелых авариях	<p>Описание интегральных экспериментов различных серий:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. CORA 2. QUENCH 3. PARAMETER.

Вопросы по курсу

1. Безопасность атомной энергетики
2. Основные принципы обеспечения безопасности
3. Теплоотдача
4. Теплопроводность
5. Конвекция
6. Теплообмен излучением.
7. Пограничный слой. Тепловыделяющая жидкость.
8. Эксперименты по конвекции. Распределение тепловых потоков.
9. Теплообмен при кипении.
10. Физико-химические явления. Образование корки. Модель квазистационарного роста корки.
11. Численные коды, используемые для моделирования реакторных установок

12. Моделирование теплогидравлики в численных кодах
13. Моделирование разрушения активной зоны в численных кодах
14. Аварии на АЭС с потерей теплоносителя
15. Нагрев и разрушение активной зоны
16. Взаимодействие расплава с корпусом реактора
17. Взаимодействие расплава с бетоном
18. Рост температуры и давления противоаварийной оболочки при тяжелой аварии
19. Концепция ловушки
20. Пассивные системы безопасности вне реактора

Литература

1. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д., Стрижов В.Ф. Физические модели тяжелых аварий на АЭС. Москва, Наука, 264 с. 1992.
2. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д. Интегральная теплофизическая модель динамики тяжелой аварии на АЭС с противоаварийной оболочкой // Доклады АН СССР, 1990. т. 313, N 5, с. 1114-1117.
3. Арутюнян Р.В., Большов Л.А., Васильев А.Д. и др. Исследования удержания топлива при тяжелых авариях на АЭС // Доклады АН СССР, 1991, т. 316, N 1, с. 104-107.
4. Васильев А.Д., Кобелев Г.В. Результаты разработки численного модуля для расчета теплообмена излучением между структурами АЗ и ВКУ реактора при тяжелой аварии на АЭС (модуль МРАД) / Препринт ИБРАЭ -2003-09, ИБРАЭ РАН, Москва, 2003, 56 с.
5. Vasiliev A.D., Stuckert J. Application of Thermal Hydraulic and Severe Accident Code SOCRAT/V3 to Bottom Water Reflood Experiment QUENCH-LOCA-0 // Nuclear Engineering and Design, 261, 2013, pp. 352-361.
6. Vasiliev A.D. Role of Zirconium Nitride Formation under Zirconium-Based Claddings Oxidation in Air during NPP Beyond-Design-Basis Accidents // Proc. 22nd International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-22), Prague, Czech Republic, July 7-11, 2014. ICONE22-31186.