

Конструирование Ядерных Реакторов

В.И. Солонин

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
РАЗДЕЛ I	
ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ	
Глава 1. Классификация и применение ядерных реакторов в энергетике	15
Глава 2. Канальные водо-графитовые реакторы	23
2.1. Общие свойства водо-графитовых реакторов	23
2.2. Реакторы с перегружаемыми каналами (с трубчатыми твэлами)	30
2.3. Реакторы с неперегружаемыми каналами	37
2.4. Секционно-блочные реакторы	46
Глава 3. Корпусные водо-водяные реакторы	56
3.1. Общая характеристика водо-водяных реакторов	56
3.2. Реакторы с водой под давлением	63
3.2.1. Принципиальная конструкция	65
3.2.2. Корпус и крышка	67
3.2.3. Внутрикорпусные устройства	71
3.2.4. Активная зона реактора	76
3.2.5. Конструкция современных реакторов	76
3.3. Реакторы с кипящей водой	82
3.4. Характерные особенности судовых водо-водяных реакторов	87
Глава 4. Тяжеловодные реакторы	89
4.1. Особенности тяжеловодных реакторов	89
4.2. Канальные реакторы с некипящей тяжелой водой	93
4.3. Канальные реакторы, охлаждаемые обычной кипящей водой	98
Глава 5. Газоохлаждаемые реакторы	102
5.1. Общая характеристика газоохлаждаемых реакторов	102
5.2. Реакторы, охлаждаемые углекислым газом	109
5.2.1. Магноксовые реакторы	109
5.2.2. Усовершенствованные газо-графитовые реакторы	114
5.3. Высокотемпературные реакторы	117
5.3.1. Реакторы с шаровыми твэлами	117
5.3.2. Реакторы с призматическими стержневыми твэлами	125
Глава 6. Реакторы на быстрых нейтронах	133
6.1. Особенности реакторов на быстрых нейтронах	133
6.2. Реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем	137
6.2.1. Общая характеристика и конструктивные исполнения	137
6.2.2. Конструкции реакторов	146
6.3. Реакторы на быстрых нейтронах с гелиевым теплоносителем	155
6.3.1. Общая характеристика и конструктивные исполнения	155
6.3.2. Конструкции реакторов	158
	395

РАЗДЕЛ 2

АКТИВНЫЕ ЗОНЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Глава 7. Конструирование твэлов	163
7.1. Основные представления о твэлах и их классификация	163
7.2. Условия работы твэлов в активной зоне и предъявляемые к ним требования	165
7.3. Материалы твэлов	167
7.3.1. Топливные материалы и топливные композиции	167
7.3.2. Конструкционные материалы	176
7.3.3. Действие реакторных излучений на материалы	178
7.4. Конструкции твэлов	179
7.4.1. Твэлы с металлическим топливом	179
7.4.2. Твэлы с двуокисью урана	183
7.4.3. Твэлы с дисперсионным топливом	185
7.5. Тепловыделяющие сборки и топливные каналы	189
Глава 8. Органы регулирования реактора	194
8.1. Способы управления цепной реакцией деления	194
8.2. Материалы органов регулирования	196
8.3. Конструкция органов регулирования ядерных реакторов	199
Глава 9. Контроль теплогидравлических параметров	205
9.1. Роль контроля основных теплогидравлических параметров	205
9.2. Основные требования к средствам контроля	208
9.3. Методические вопросы контроля теплогидравлических параметров	210
9.3.1. Методика разработки устройств контроля	210
9.3.2. Методические вопросы измерения температуры	213
9.3.3. Методические вопросы измерения расхода теплоносителя	218
9.3.4. Методические вопросы контроля уровня жидкости	221
9.3.5. Методические вопросы контроля целостности циркуляционного контура	222

РАЗДЕЛ 3

ИНЖЕНЕРНЫЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ

Введение	226
Глава 10. Теплофизика реакторов	229
10.1. Задачи теплофизики реакторов	229
10.2. Особенности теплообмена в ядерных реакторах	231
10.3. Конвективный теплообмен	237
10.3.1. Факторы, определяющие интенсивность теплоотдачи конвекцией	237
10.3.2. Коэффициенты теплоотдачи и неравномерность распределения температуры на поверхности каналов при ламинарном течении однофазного теплоносителя	241
10.3.3. Коэффициенты теплоотдачи и неравномерность распределения температуры на поверхности каналов при турбулентном течении однофазного теплоносителя	245
10.3.4. Коэффициенты теплоотдачи при кипении воды	253
10.3.5. Критические плотность теплового потока и мощность каналов, охлаждаемых водой и пароводяной смесью	255
10.4. Гидравлическое сопротивление	259
10.4.1. Коэффициенты трения и местного сопротивления однофазного потока	259
10.4.2. Коэффициенты трений и местного сопротивления двухфазного потока	263

10.4.3.	Профилирование распределения теплоносителя по сечению сборки изменением гидравлического сопротивления ячеек	263
10.5.	Теплообмен теплопроводностью	265
10.5.1.	Особенности задач теплопроводности в ядерном реакторе	265
10.5.2.	Разность температур в конструкции при объемном тепловыделении	266
10.5.3.	Связь неравномерности температуры поверхности и плотности теплового потока для стержневого твэла	268
10.5.4.	Распределение температуры при отслоении оболочки и трещине в сердечнике стержневого твэла	271
10.5.5.	Термическое сопротивление между оболочкой и сердечником	272
10.5.6.	Расчет нестационарных распределений температуры	274
Глава 11.	Гидродинамика ядерного реактора	279
11.1.	Особенности взаимодействия теплоносителя с элементами конструкции реактора	279
11.2.	Турбулентная структура потока и пульсации давления в каналах	279
11.3.	Вибрации элементов конструкции в потоке теплоносителя	285
11.4.	Влияние угла поворота на распределение теплоносителя по параллельным каналам	290
11.5.	Вход потока в ТВС	292
11.6.	Гидродинамическая структура потока в кольцевой полости с экраном	294
Глава 12.	Тепловые и гидравлические расчеты	299
12.1.	Задачи теплового и гидравлического расчетов	299
12.2.	Методика поискового теплогидравлического расчета	301
12.2.1.	Исходные данные	301
12.2.2.	Выбор схемы движения теплоносителя	303
12.2.3.	Расчет энтальпии теплоносителя, температуры поверхности и конструкции	306
12.3.	Гидравлическое профилирование	309
12.4.	Расчет гидравлического сопротивления	311
12.4.1.	Потери давления	313
12.4.2.	Теплогидравлическая устойчивость парогенерирующих каналов	314
12.5.	Поверочный теплогидравлический расчет по средним параметрам теплоносителя	317
12.6.	Влияние тепло- и массообмена между ячейками на распределение температур в сборке	324
Глава 13.	Прочностные расчеты элементов ядерных реакторов	328
13.1.	Основы расчета на прочность	328
13.1.1.	Основные расчетные нагрузки	328
13.1.2.	Цикл изменения напряжений. Режимы нагружения	329
13.1.3.	Влияние облучения на свойства материалов	330
13.1.4.	Оценка прочности	331
13.2.	Выбор основных размеров элементов конструкции	336
13.2.1.	Цилиндрические и сферические сосуды под внутренним давлением	337
13.2.2.	Цилиндрические коллекторы, штуцера и трубы под внутренним давлением	337
13.2.3.	Конические переходные участки под внутренним давлением	338
13.2.4.	Выпуклые днища	338
13.2.5.	Коэффициенты прочности	339
13.2.6.	Круглые плоские днища и крышки	340
13.2.7.	Гладкие цилиндрические и конические оболочки под наружным давлением	340
13.2.8.	Цилиндрические оболочки в условиях осевого сжатия	342
		397

13.3. Определение напряжений и деформаций	342
13.3.1. Нормативный метод	342
13.3.2. Учет пластичности и ползучести	344
Глава 14. Общие вопросы надежности ядерных реакторов	350
14.1. Основные понятия и определения	350
14.2. Случайный характер отказов реактора и математический аппарат для их исследования	354
14.3. Количественные показатели надежности реактора	356
14.4. Дополнительные сведения о показателях безотказности и законах надежности	360
Глава 15. Оценка надежности по данным эксплуатации и на этапе проектирования. Типовые задачи конструктора	366
15.1. Расчет показателей надежности по данным эксплуатации	366
15.2. Расчет структурной надежности реактора на этапе проектирования (прогнозирование надежности реактора)	367
15.3. Определение количества испытываемых образцов и продолжительности испытаний на надежность	374
15.4. Оценка теплотехнической надежности реактора	376
Глава 16. Безопасность ядерных реакторов	378
16.1. Задачи обеспечения безопасности	378
16.2. Ядерная безопасность	383
16.3. Безопасность при отказах оборудования и разгерметизации контура теплоносителя	385
Список рекомендуемой литературы	390