

Р. З. АМИНОВ В. Е. ЮРИН
А. Н. ЕГОРОВ

Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками



НАУКА

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
САРАТОВСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

Р.З. АМИНОВ В.Е. ЮРИН
А.Н. ЕГОРОВ

Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками



МОСКВА НАУКА 2018

УДК 621.039+62–622+697.328

ББК 31.47+31.374

А62



*Издание осуществлено при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
по проекту № 18-18-00052, не подлежит продаже*

Рецензенты:

доктор технических наук *С. Т. Лескин*,
доктор технических наук *В. А. Хрусталева*

Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н.

Комбинирование АЭС с многофункциональными энергетическими установками / Р.З. Аминов, В.Е. Юрин, А.Н. Егоров; Саратовский научный центр РАН. — М.: Наука, 2018. — 238 с.

ISBN 978-5-02-040146-4

В работе предложен новый взгляд на повышение безопасности АЭС. Разработаны и исследованы многофункциональные системы, включающие такие установки, как дополнительная паровая турбина, тепловые аккумуляторы, водородный комплекс и газотурбинные установки, позволяющие обеспечить надежное электроснабжение собственных нужд АЭС в аварийных ситуациях с обесточиванием. Исследован способ использования остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР для генерации электроэнергии, необходимой для отвода остаточного тепловыделения в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Разработана система уравнений и построены скелетные таблицы свойств диссоциированного водяного пара, которые позволяют проводить промышленные термодинамические расчеты параметров рабочего тела водородных циклов. Исследованы процессы сжигания водорода в кислородной среде, а также определены ресурсные показатели основного оборудования водородного энергокомплекса, работающего в циклических режимах.

Для научных работников, специалистов, аспирантов, студентов старших курсов теплоэнергетических специальностей.

ISBN 978-5-02-040146-4

© Аминов Р.З., Юрин В.Е., Егоров А.Н., 2018

© Саратовский научный центр РАН, 2018

© ФГУП Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список сокращений	6
Глава 1. Современный уровень и перспективные пути повышения безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР	8
1.1. Классификация и анализ аварийных ситуаций на АЭС с ВВЭР ..	8
1.2. Краткий обзор современных и перспективных систем отвода остаточного тепловыделения из активной зоны реакторов типа ВВЭР	13
1.3. Система активного отвода остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР на базе дополнительных многофункциональных паротурбинных установок	26
1.4. Экономический эффект от введения САОТ с дополнительной ПТУ	35
1.5. Комбинирование систем активного и пассивного отвода остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР	37
Глава 2. Комбинирование АЭС с многофункциональным водородным энергокомплексом	46
2.1. Состояние вопроса по получению и сжиганию водорода в кислородной среде	46
2.1.1. Получение водорода для нужд водородного энергокомплекса на АЭС	47
2.1.2. Экспериментальное изучение глубины окисления водорода в кислороде	53
2.1.3. Методы измерения полноты окисления водорода	60
2.1.4. Уравнения для вычисления свойств диссоциированного водяного пара в промышленных расчетах в интервале температур 1250–2300 К, давлений 0,01–10,00 МПа	62
2.1.5. Скелетные таблицы свойств диссоциированного водяного пара при высоких температурах	74
2.2. Пути совершенствования способов сжигания водорода в кислородной среде и горелочных устройств	82
2.2.1. Анализ опытных данных по сжиганию водорода в кислородной среде	83
2.2.2. Оценка граничных условий охлаждения водород-кислородной камеры сгорания	94
2.2.3. Влияние параметров камеры сгорания на эффективность сжигания водорода в кислородной среде	100
2.2.4. Исследование влияния водородной коррозии на металл водород-кислородной камеры сгорания	103
2.2.5. Оценка термических напряжений и рабочего ресурса водород-кислородного парогенератора	108

2.2.6. Разработка двухступенчатой водород-кислородной камеры сгорания	114
2.3. Система активного отвода остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР на базе дополнительных многофункциональных ПТУ и водородного комплекса	124
2.4. Экономический эффект от установки дополнительных многофункциональных ПТУ при комбинировании с водородным комплексом	127
2.5. Системный анализ напряженно-циклического режима работы основного оборудования водородного энергетического комплекса	131
2.5.1. Основные методические положения усталостного разрушения металлических материалов в результате циклического нагружения	134
2.5.2. Оценка основных показателей рабочего ресурса электролизных установок	145
2.5.3. Оценка основных показателей рабочего ресурса системы хранения водорода и кислорода	151
2.5.4. Оценка основных показателей рабочего ресурса водород-кислородной камеры сгорания	160
2.5.5. Оценка рабочего ресурса наиболее нагруженного элемента ротора дополнительной паровой турбины с паро-водородным перегревом рабочего тела в составе АЭС [175]	164
Глава 3. Комбинирование АЭС с многофункциональными системами теплового аккумулярования	178
3.1. Состояние вопроса развития систем теплового аккумулярования	178
3.2. Новые схемные решения многофункционального комбинирования АЭС с тепловыми аккумуляторами	187
3.3. Исследование системы повышения маневренности энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР на основе теплового аккумулярования	191
Глава 4. Комбинирование АЭС с многофункциональными установками, работающими на природном газе	197
4.1. Система активного отвода остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР на базе газотурбинной установки	197
4.2. Системы активного отвода остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР на базе парогазовой установки	200
4.3. Оптимизация режима работы оборудования многофункционального резерва собственных нужд АЭС на базе ПГУ	203
Глава 5. Обоснование эффективности систем отвода остаточного тепловыделения реакторов типа ВВЭР на основе вероятностного анализа	209
5.1. Методика предварительного вероятностного анализа на примере трехканальной системы аварийного электроснабжения с дизель-генераторами	209
5.2. Методика предварительного вероятностного анализа с учетом нестационарных процессов на примере трехканальной системы аварийного электроснабжения с дополнительной маломощной ПТУ и дизель-генераторами	214
5.3. Вероятностный анализ разработанных многофункциональных систем	220
Заключение	224
Литература	225