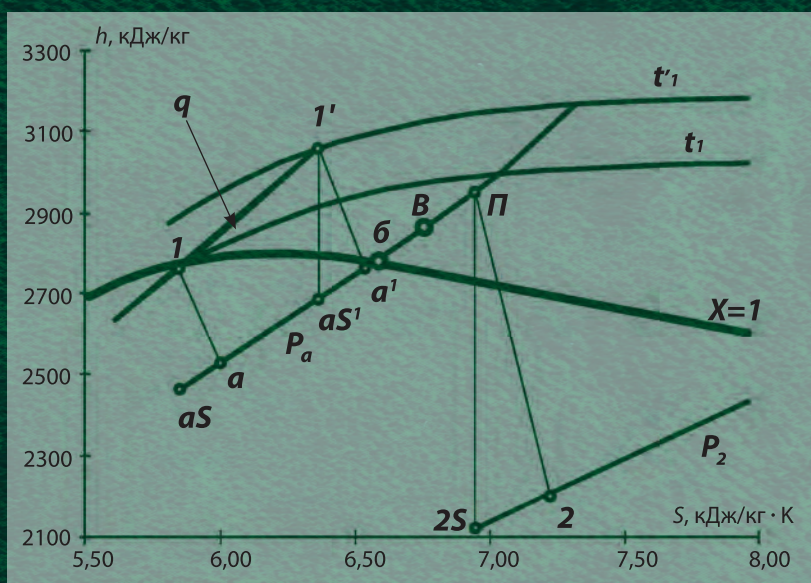


Р. З. АМИНОВ А. Н. БАЙРАМОВ

Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями



НАУКА

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИИ НАУК
САРАТОВСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР

Р. З. АМИНОВ А. Н. БАЙРАМОВ

Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями



МОСКВА НАУКА 2016

УДК 621.1+621.039
ББК 31.374+31.47
А62

Рецензенты:

член-корреспондент РАН, советник РАН *В.М. Батенин*,
доктор технических наук, профессор *Ю.Е. Николаев*

Аминов Р.З., Байрамов А.Н.

Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями / Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов ; Саратовский научный центр РАН. — М. : Наука, 2016. — 254 с. — ISBN 978-5-02-039956-3.

Показано, что в условиях растущей доли атомных электростанций в структуре генерирующих мощностей энергосистем и неравномерных графиков электропотребления становится экономически оправданным производство водорода на базе внепиковой электроэнергии. Изложены вопросы совершенствования циклов влажно-паровых АЭС при их комбинировании с водородными технологиями. Приведены результаты исследований по повышению безопасности АЭС за счет создания резервов питания собственных нужд на основе водорода в аварийных ситуациях с полным обесточиванием. Рассмотрены вопросы безопасного обращения с водородом.

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

ISBN 978-5-02-039956-3

© Аминов Р.З., Байрамов А.Н., 2016
© Саратовский научный центр РАН, 2016
© ФГУП “Издательство “Наука”,
редакционно-издательское оформление,
2016

ПРЕДИСЛОВИЕ

Программой развития атомной энергетики России предусмотрено существенное увеличение доли АЭС в энергосистемах Европейской части страны. В связи с этим вопросы повышения безопасности и эффективности их работы по условиям обеспечения базисной электрической нагрузкой, а также вопросы эффективного аккумулирования внепиковой электроэнергии в условиях неравномерных графиков электропотребления являются особо актуальными.

Данная монография посвящена изучению этой проблемы и включает в себе новое развитие возможных путей ее решения. Это относится к поиску путей эффективного комбинирования водородных циклов с атомными электростанциями, что создает предпосылки по обеспечению базисной нагрузки реакторного оборудования. При этом выработанные водород и кислород за счет внепиковой электроэнергии АЭС могут использоваться как для выработки дополнительной сверхноминальной мощности на станции, так и в качестве товарной продукции. Такой подход полностью отвечает сложившейся концепции водородной энергетики в XXI в., согласно которой получение водорода и кислорода предполагается из воды с использованием атомных или возобновляемых источников энергии. В свою очередь, при окислении водорода кислородом вновь образуется вода (водяной пар).

Изучение эффективности комбинирования водородного теплоэнергетического цикла с АЭС рассматривается также с позиции поиска наилучших путей по обеспечению общестанционного резерва собственных нужд станции на случай крупных системных аварий с обесточиванием.

Весьма важную роль играют вопросы безопасности обращения с водородом.

Кроме этого, электролизное получение водорода и кислорода сопряжено с наработкой тяжелой воды, что может рассматриваться на уровне многопродуктового энергетического производства.

Глава 1 посвящена изучению состояния производства и потребления водорода в мире как на современном этапе, так и в перспективном плане. Наиболее освоенным в настоящее время является получение водорода из природных органических топлив, главным образом на основе паровой конверсии метана. Доля производства водорода методом газификации угля и из продуктов переработки нефти невелика. В перспективе предполагается значительное увеличение доли производимого водорода на базе внепиковой электроэнергии АЭС и возобновляемых источников энергии. При этом

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Список сокращений	6
Глава 1. Состояние производства и потребления водорода в мире в настоящее время и в перспективе. Варианты использования водорода в циклах теплоэнергетических установок	7
1.1. Показатели эффективности производства водорода на основе освоенных мировой практикой технологий	15
1.2. Оценка эффективности производства водорода перспективными электролизными установками повышенной мощности.....	21
1.3. Сравнение эффективности производства водорода электролизным методом с альтернативными вариантами, освоенными в мировой практике.....	30
1.4. Возможность получения тяжелой воды на базе электролиза.....	33
1.5. Варианты использования водорода в циклах теплоэнергетических установок.....	35
Глава 2. Научные основы построения водородного теплоэнергетического цикла в комбинировании с атомной электрической станцией.....	46
2.1. Предпосылки необходимости развития водородных технологий на базе внепиковой электроэнергии.....	46
2.2. Обоснование режимной целесообразности аккумулирования ночной внепиковой электроэнергии	51
2.3. Схемно-параметрические решения комбинирования водородного энергокомплекса и АЭС	60
2.4. Обоснование технических решений и способов хранения водорода и кислорода в условиях суточного цикла	68
2.5. Системы сжигания водорода в кислородной среде с образованием высокотемпературного водяного пара.....	92

2.6. Методические основы оценки и обоснования эффективности использования водорода в паротурбинном цикле атомной станции.....	102
2.7. Обоснование эффективного варианта использования подведенной теплоты водородного топлива во влажно-паровом цикле АЭС.....	125
Глава 3. Учет свойств диссоциации водяного пара в процессах окисления водорода кислородом	129
3.1. Свойства диссоциированного водяного пара.....	129
3.2. Анализ термодинамических параметров состояния диссоциированного водяного пара	139
Глава 4. Конкурентная эффективность водородного энергетического комплекса	155
4.1. Исследование конкурентной эффективности водородного энергетического комплекса с альтернативными системами аккумулирования энергии	155
4.2. Исследование эффективности и конкурентоспособности электрохимического водородного цикла.....	173
Глава 5. Разработка путей повышения безопасности АЭС за счет резервирования собственных нужд	190
5.1. Современное состояние и направления обеспечения безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР в условиях крупных системных аварий	191
5.2. Анализ работоспособности системы резервирования собственных нужд АЭС на основе водородного цикла в условиях полного обесточивания	198
5.3. Методика оценки снижения вероятности крупных аварий на АЭС при полном обесточивании.....	206
5.4. Экономическое обоснование использования резервирования собственных нужд АЭС на основе водородного цикла	210
Глава 6. Вопросы повышения безопасности обращения с водородом на АЭС	213
6.1. Взрывопожаробезопасность на АЭС с водородной надстройкой	213
6.2. Краткое описание наиболее известных взрывов на АЭС. Нормативные документы по их предотвращению.....	218
6.3. Приближенная оценка вероятности аварий и взрывопожаробезопасности элементов и узлов, расположенных вне главного корпуса АЭС с водородной надстройкой.....	220
6.4. Рекомендации по применению схем удаления радиолитического водорода на опыте АЭС с РБМК и ВВЭР.....	228

6.5. Методы и химические средства дожигания водорода на АЭС с водородными надстройками	232
6.6. Рекомбинаторы водорода РВК-500 и РВК-1000.....	235
Заключение	237
Приложение	238
Литература	241

Научное издание

**АМИНОВ Рашид Зарифович
БАЙРАМОВ Артем Николаевич**

**КОМБИНИРОВАНИЕ ВОДОРОДНЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ
С АТОМНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ**

*Утверждено к печати Ученым советом
Саратовского научного центра
Российской академии наук*

Редактор *Т.А. Николаева*
Художник *В.Ю. Яковлев*
Корректоры *А.Б. Васильев, Р.В. Молоканова,
Т.А. Печко, Е.Л. Сысоева, Т.И. Шеповалова*

Подписано к печати 05.12.2016
 Формат 70 × 100 $\frac{1}{16}$. Гарнитура Ньютон
 Печать офсетная
 Усл.печ.л. 20,8. Усл.кр.-отт. 21,5. Уч.-изд.л. 19,5
 Тип. зак.

ФГУП Издательство «Наука»
 117997, Москва, Профсоюзная ул., 90
 E-mail: secret@naukaran.com
www.naukaran.com

ФГУП Издательство «Наука»
 (Типография «Наука»)
 121099, Москва, Шубинский пер., 6