

ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

В номере:



- *Расчетная оценка выхода водорода для РУ ВВЭР-1000*
- *Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием ПАВ*
- *Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии*

11 2014

ООО МАИК «НАУКА/
ИНТЕРПЕРИОДИКА»

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 11, 2014

Атомные электростанции

Расчетная оценка выхода водорода для РУ ВВЭР-1000
при учете реакции бетона с растекающимся кориумом

*Лукьянов А.А., Зайцев А.А., Казанцев А.А.,
Попова Т.В., Ефанов А.Д.* 3

Испытания модели парогенератора с витыми трубами, обогреваемыми свинцом

Грабежная В.А., Михеев А.С., Калякин С.Г., Сорокин А.П. 9

Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин
с использованием поверхностно-активных веществ

*Куршаков А.В., Рыженков А.В., Бодров А.А., Рыженков О.В.,
Патакин А.А., Чернов Е.Ф.* 16

Электризация влажно-парового потока и ее влияние на надежность
и эффективность турбин

Тарелин А.А. 21

Металлы и вопросы прочности

Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического
оборудования от каплеударной эрозии

*Варавка В.Н., Кудряков О.В., Рыженков А.В.,
Качалин Г.В., Зилова О.С.* 29

Паровые котлы, энергетическое топливо, горелочные устройства и вспомогательное оборудование котлов

Исследование граничных режимов движения твердых материалов
в циркуляционных контурах энергоустановок

Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Санкин Д.А., Мельников Д.А. 36

Закономерности теплообмена в газовых слоях факела топков паровых котлов.
Часть III. Примеры расчета теплообмена в факельных печах и топках паровых котлов

Макаров А.Н. 46

Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

Расчет калорических свойств диссоциированного водяного пара
при высоких температурах

Аминов Р.З., Гудым А.А. 55

Теплофикация и тепловые сети

Оценка потенциала энергосбережения от проведения наладочных мероприятий в системах
теплоснабжения на основе моделирования теплогидравлических режимов

Шалагинова З.И. 62

Разработка метода расчета тепловых сетей большой размерности

Волков В.Ю., Крутиков А.А., Николаева А.В., Скибин А.П.

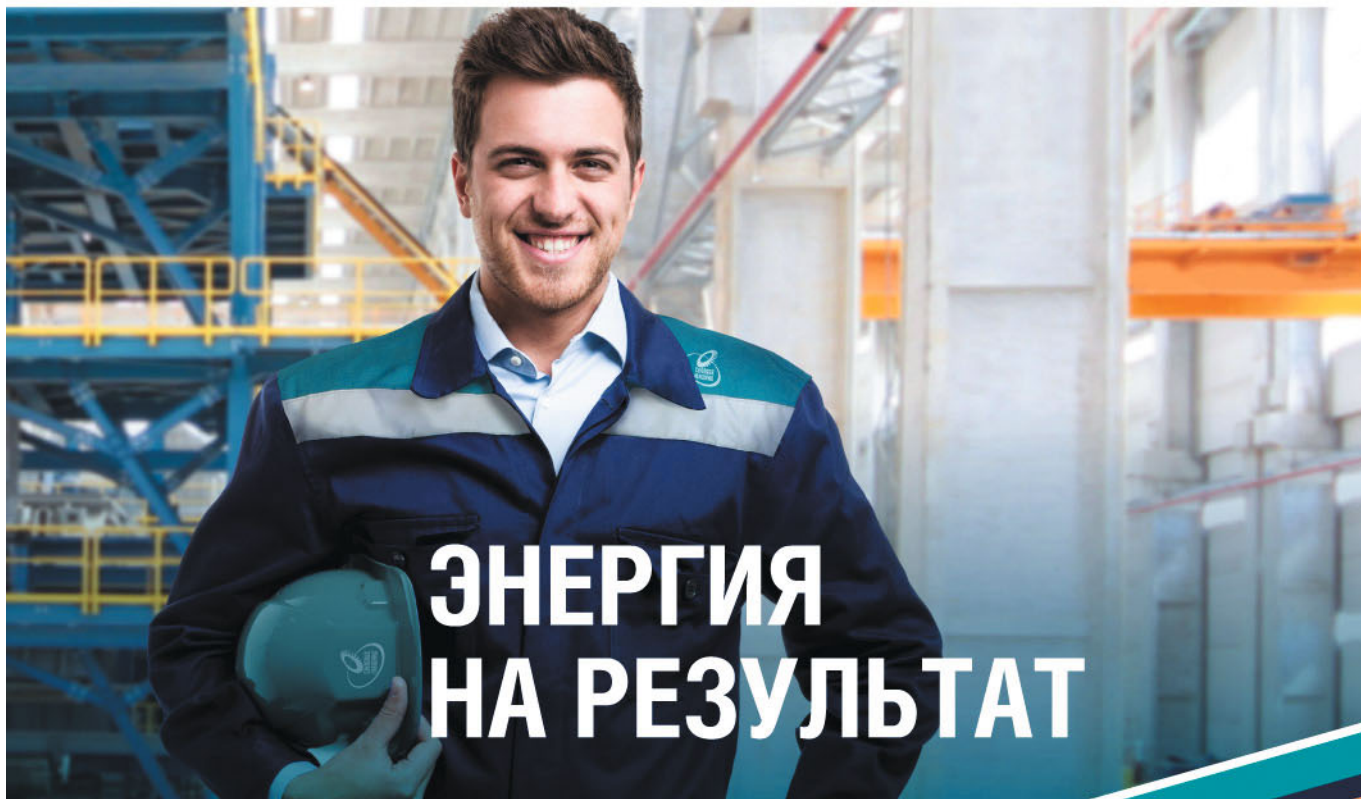
69

Водоподготовка и водно-химический режим

Повышение эффективности регенерации анионитного фильтра второй ступени

Фейзиев Г.К., Гусейнова Г.Г.

77



ЭНЕРГИЯ НА РЕЗУЛЬТАТ



МЫ ЗНАЕМ, КАК СДЕЛАТЬ ТАК, ЧТОБЫ ЭНЕРГИЯ РАБОТАЛА НА ВАС, И ПРЕДЛАГАЕМ МАКСИМАЛЬНО НАДЕЖНЫЕ И ВЫГОДНЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ СЕРВИСА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

«Силовые машины» обладают уникальным опытом комплексного сервисного обслуживания: диагностики и контроля технического состояния действующих энергоустановок, их эксплуатации, ремонта, реконструкции и модернизации. Передовые конструкторские решения и современные технологии производства позволяют нам быть эффективным партнером. Мы – команда профессионалов, которые знают и любят свое дело.

- // более 300 000 МВт установленной мощности в 57 странах;
- // 4-е место в мире по объему установленного оборудования;
- // крупнейший в России инженерно-конструкторский центр в области энергомашиностроения;
- // все виды сервисных услуг – от единичных ремонтов до долгосрочных соглашений по техническому обслуживанию (LTSA).

www.power-m.ru



**Быстродействующие распределенные
системы ответственного управления**

САРГОН®
www.nvtav.ru

Программные средства

- Полнофункциональность исполнительных систем АРМ и контроллеров
- Объектность и компонентность программ
- Независимость технологических программ и видеопрограмм от размещения их в ПТК
- Возможность имитационной отладки АСУТП
- Библиотеки готовых решений для приложений и типовых ЛСУ

Системные решения

- Шкаф ИРТЗО
- Шкаф температурного контроля
- Шкаф удаленных модулей УСО
- Шкаф управления горелкой
- Интеллектуальная СК "СКИД"
- Открытость решений
- Возможность использования в системе на базе любого современного ПТК

Технические средства

- Приспособленность для работы в жестких условиях эксплуатации
- Наличие резервированной сети Ethernet
- Компактная конструкция
- Большое количество высокоскоростных последовательных интерфейсов
- Большая вычислительная мощность
- Система Plug&play
- Открытость интерфейсов

Россия, 111250, Москва,
проезд завода "Серп и молот", д.6
Тел.: (495)361-2334, 362-1771
Факс: (495)361-6807
mail@nvtav.ru, www.nvtav.ru

НВТ
АВТОМАТИКА

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

УДК 621.039.51:536(03);621.31

Расчетная оценка выхода водорода для РУ ВВЭР-1000 при учете реакции бетона с растекающимся кориумом

© 2014 г. Лукьянов А.А., Зайцев А.А., Казанцев А.А., Попова Т.В., Ефанов А.Д.

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского¹

e-mail: akazancev@ippe.ru

Рассматривается подход к моделированию распространения кориума на внекорпусной стадии гипотетической запроектной аварии. Для анализа безопасности аварийных режимов работы АЭС важно уметь рассчитывать количественные характеристики внутри- и вне реакторных источников поступления водорода в объем помещений АЭС с ВВЭР-1000. Использована методика расчета образования водорода в результате реакции бетон–кориум при растекании расплава кориума по помещениям гермооболочки. Сделан вывод о существенной зависимости оценок по водородной взрывобезопасности от точности методики расчета источников водорода, в частности от выхода водорода в реакции кориум–бетон.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, запроектная авария, реакция кориум–бетон, водородная безопасность, гермооболочка, код СОКРАТ.

DOI: 10.1134/S0040363614110046

АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

УДК 536.24.621.039.526

Испытания модели парогенератора с витыми трубами, обогреваемыми свинцом

© 2014 г. Грабежная В.А., Михеев А.С., Калякин С.Г., Сорокин А.П.

ГНЦ РФ—Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского¹

e-mail: gva@ippe.ru

Приводятся результаты испытаний модели витого парогенератора (ПГ), обогреваемой свинцом, с продольным течением теплоносителей и состоящей из двух идентичных трехтрубных модулей. Программа исследований модели парогенератора при работе одного модуля, а также при совместной работе двух модулей была направлена на изучение теплообмена и, в большей степени, теплогидравлической устойчивости парогенерирующих труб, обусловленных параллельной (совместной) работой двух модулей при параметрах частичных и пусковых режимов. При параметрах номинального режима работы температура пара на выходе из модуля соответствовала проектным значениям несмотря на продольное течение теплоносителей. Во всем диапазоне изменения режимных параметров при работе как на частичных, так и на пусковых режимах в условиях данного свинцового контура стенда СПРУТ не выявлено пульсационных режимов с опрокидыванием циркуляции во II контуре. Данные, которые получены в процессе испытаний на этой модели ПГ, будут являться консервативными в части теплообмена в закризисной зоне, термодинамической неравновесности пароводяного потока для ПГ РУ БРЕСТ-ОД-300, разрабатываемой в ОАО НИКИЭТ. Эти данные следует использовать для верификации расчетных кодов.

Ключевые слова: модель парогенератора, тяжелый теплоноситель, свинец, вода, параллельные каналы, гидродинамическая неустойчивость, температурные поля, пусковые режимы.

DOI: 10.1134/S0040363614110010

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ
УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.165

Интенсификация теплообменных процессов в конденсаторах паровых турбин с использованием поверхностно-активных веществ

© 2014 г. Куршаков А.В.¹, Рыженков А.В.¹, Бодров А.А.¹, Рыженков О.В.¹, Патакин А.А.², Чернов Е.Ф.²

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”¹ – ТЭЦ-23 ОАО “Мосэнерго”²

e-mail: info@src-w.ru

Предложена технология повышения энергоэффективности паротурбинных установок путем обработки поверхностей трубной системы конденсаторов по паровой и водяной сторонам с использованием поверхностно-активных веществ (ПАВ). При переводе пленочной конденсации в капельную благодаря гидрофобизации наружных поверхностей паровой стороны коэффициент теплопередачи увеличивается на 50–70%, что приводит к углублению вакуума при минимальных эксплуатационных затратах. Полученные результаты подтверждены лабораторными исследованиями, а также натурными испытаниями. Скорость накопления термобарьерных отложений по водяной стороне снижается в 6–8 раз, и соответственно увеличивается межремонтный период, связанный с очисткой трубок конденсатора. Поддержание гидрофобной пленки ПАВ на внешней поверхности трубок конденсатора может быть обеспечено как в период кратковременных остановов, так и в процессе эксплуатации паротурбинных установок (ПТУ) периодической инъекцией ПАВ на вход цилиндра низкого давления (ЦНД) турбины. При этом за счет дополнительного дробления жидкой фазы снижается скорость каплеударной эрозии лопаточного аппарата на 30%.

Ключевые слова: паротурбинная установка, конденсатор, интенсификация теплообмена, гидрофобизация поверхности трубок, поверхностно-активные вещества.

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ
УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

УДК 621.165

**Электризация влажно-парового потока и ее влияние на надежность
и эффективность турбин**

© 2014 г. Тарелин А.А.

e-mail: tarelin@ipmach.kharkov.ua

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного Национальной академии наук Украины¹

Представлены результаты исследований электризации парового потока. Рассмотрены основные механизмы образования электрических зарядов и их влияние на надежность и экономичность турбины. Проанализированы причины, вызывающие электрохимическую коррозию лопаток. Разработаны методы управления тепловыми процессами за счет активации (искусственной) и деактивации плотности зарядов в потоке. Предложен новый способ диагностики крупнодисперсной влаги, представлены практические рекомендации по повышению надежности и КПД турбоустановок.

Ключевые слова: паровая турбина, электризация, надежность, КПД, электрохимическая коррозия, переохлаждение, диагностика.

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

УДК 620.193.1:621.165.51:669.018

Применение нанокompозитных покрытий для защиты энергетического оборудования от каплеударной эрозии

© 2014 г. Варавка В.Н.¹, Кудряков О.В.¹, Рыженков А.В.², Качалин Г.В.², Зилова О.С.²

Донской государственный технический университет¹ – Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”²

e-mail: kudryakov@mail.ru

Приводятся результаты исследований, направленных на повышение износостойкости лопаточного аппарата последних ступеней мощных паровых турбин, работающих в условиях каплеударного воздействия, благодаря применению ионно-плазменных слоистых нанокompозитных покрытий. Изучены структура и свойства различных металлических и керамических (нитридных) систем. Методами индентирования и склерометрии получены данные об их прочностных характеристиках. По результатам стеновых испытаний определена стойкость покрытий к каплеударной эрозии. Установлена корреляционная связь между комплексом прочностных свойств покрытия и его эрозионной стойкостью, на основе которой сделан вывод о возможности прогнозирования поведения покрытий в условиях каплеударной эрозии по их предварительно определенным прочностным характеристикам.

Ключевые слова: лопатки паровых турбин, каплеударная эрозия, износостойкие покрытия, структура и свойства покрытий, нанокompозитные материалы, индентирование, склерометрия.

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

УДК 658.567.1

**Исследование граничных режимов движения твердых материалов
в циркуляционных контурах энергоустановок¹**

© 2014 г. Рябов Г.А., Фоломеев О.М., Санкин Д.А., Мельников Д.А.

ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”²

e-mail: georgy.ryabov@gmail.com

Рассмотрены граничные режимы при опускном движении материала в стояках и пневматических затворах циркуляционных контуров котлов с циркулирующим кипящим слоем и системах со связанными между собой реакторами (полигенерирующие системы для получения электроэнергии, тепла и полезных продуктов и установок с химическими циклами сжигания и газификации топлив). Разработана расчетная модель для определения показателей оживления при начале движения материала в L-клапанах и петлевых затворах. На экспериментальной установке исследованы условия начала и прекращения движения материала в L-клапане. Определены границы перехода к поршневому режиму.

Ключевые слова: котлы с циркулирующим кипящим слоем, связанные между собой реакторы, опускное движение материала, стояки и пневмозатворы, граничные режимы при опускном движении.

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

УДК 621.186:536.3

**Закономерности теплообмена в газовых слоях факела топок паровых котлов.
Часть III. Примеры расчета теплообмена в факельных печах
и топках паровых котлов**

© 2014 г. Макаров А.Н.

Тверской государственный технический университет¹

e-mail: tgtu_kafedra_ese@mail.ru

На основе научного открытия законов излучения газовых слоев факела разработана методика расчета теплообмена в топках паровых котлов, которая позволяет определить распределение плотностей тепловых потоков как по высоте, так и по периметру всех экранных поверхностей топок, рассчитать максимальные значения плотностей падающих тепловых потоков. Приведены примеры расчета теплообмена в факельной печи и топке парового котла по разработанной на основе открытия методике. Результаты расчетов удовлетворительно совпадают с результатами измерений теплообмена в факельной печи и топке парового котла. Различие расчетных данных и результатов измерений не превышает 12%.

Ключевые слова: теплообмен, излучение, открытие, факел, печь, топка, котел.

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

УДК 536.7+621.1

Расчет калорических свойств диссоциированного водяного пара
при высоких температурах

© 2014 г. Аминов Р.З., Гудым А.А.

Саратовский научный центр Российской академии наук¹

e-mail: oepran@inbox.ru

Составлены скелетные таблицы и hs -диаграмма калорических параметров диссоциированного водяного пара в интервале температур 1250–4000 К, давлений 0.1–10 МПа для расчета процессов в теплоэнергетических установках, использующих диссоциированный пар в качестве рабочего тела. В представленных таблицах в отличие от существующих таблиц теплофизических свойств диссоциированного пара энтальпия во всем диапазоне рассматриваемых параметров является положительной величиной. Энтальпия смеси включает в себя всю энергию, затраченную в химической реакции диссоциации на разрыв связей молекул водяного пара. Калорические параметры определены от температуры отсчета 0°С, принятой в расчетах параметров недиссоциированного пара, что позволяет выполнять согласованные расчеты процессов в теплоэнергетических установках. Разработаны дополнения к существующим таблицам для расчета указанных калорических параметров. Проведены расчеты процессов расширения диссоциированного пара с рекомбинацией и без рекомбинации продуктов диссоциации при одинаковых значениях начальных параметров и конечного давления. Установлено, что в процессе расширения без рекомбинации изменение энтальпии и работа меньше, чем в процессе с рекомбинацией продуктов диссоциации. Погрешность выполненных расчетов калорических параметров составляет менее 0.1%.

Ключевые слова: диссоциированный пар, энтальпия, энтропия, теплота образования, температура отсчета, теплоэнергетические установки.

ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

УДК 620.91:662.6

Оценка потенциала энергосбережения от проведения наладочных мероприятий в системах теплоснабжения на основе моделирования теплогидравлических режимов

© 2014 г. Шалагинова З.И.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения РАН¹

e-mail: shalaginova@isem.sei.irk.ru

Приводится пример определения экономической эффективности наладочных мероприятий по результатам расчета теплогидравлических режимов теплоснабжающих систем (ТСС) с помощью математических моделей, реализованных в информационно-вычислительном комплексе “Ангара”. Модели позволяют учитывать динамику режимов, изменение метеоусловий, возмущающие и управляющие воздействия на систему, реальную стоимость выработки и распределения потоков энергии. Показано, что значительные резервы экономии энергоресурсов заключены в рациональном распределении тепловых потоков по системе, а грамотная организация режимов работы ТСС и разработка наладочных мероприятий возможны лишь на основе проведения предварительных расчетов.

Ключевые слова: теплоснабжающие системы, математические модели, динамические теплогидравлические режимы, наладочные мероприятия, экономическая эффективность.

DOI: 10.1134/S0040363614090100

ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

УДК 536.2(075)

Разработка метода расчета тепловых сетей большой размерности

© 2014 г. Волков В.Ю., Крутиков А.А., Николаева А.В., Скибин А.П.

ОАО ОКБ “Гидропресс”¹

e-mail: vasya-volkov@yandex.ru

Для описания гидравлической сети выполнен переход от уравнений массового баланса, основанных на первом и втором законах Кирхгофа, к моделированию с помощью дискретизации уравнения неразрывности. Разработан метод расчета гидравлических и тепловых сетей большой размерности, основанный на численном конечно-разностном методе контрольного объема. В отличие от существующих подходов, предложенный метод не требует определения гидравлических контуров и сводится к решению задачи получения единого поля давления для всей расчетной области. Данное преимущество предложенного метода позволяет применять его для решения задач большой размерности – более миллиона гидравлических связей. Предложенный численный метод устойчив для гидравлических сетей, в которых коэффициенты гидравлического сопротивления в соседних связях различаются более чем на 10 порядков, а реализуемый в стандартном программном обеспечении EPANET глобальный градиентный алгоритм малоприменим для использования. При этом скорость сходимости предлагаемого метода близка к скорости сходимости градиентного алгоритма Тодина и практически не зависит от размерности задачи.

Ключевые слова: метод расчета, метод контрольного объема, сети большой размерности, давление, расход, скорость сходимости.

**ВОДОПОДГОТОВКА
И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ**

УДК 621.311.2.22

**Повышение эффективности регенерации анионитного фильтра
второй ступени**

© 2014 г. Фейзиев Г.К., Гусейнова Г.Г.

Азербайджанский архитектурно-строительный университет¹

e-mail: gulnar0903@gmail.com

В лабораторных условиях исследован оптимальный режим работы анионитного фильтра второй ступени, загруженного высокоосновным анионитом АВ-17-8, в схеме химического обессоливания воды. Рассмотрен характер нарастания концентрации кремнекислоты в отработанном регенерационном растворе. Определена зависимость рабочей обменной емкости анионита от основных показателей при работе в режиме по двухпоточно-противоточной технологии регенерации, показаны существенные ее преимущества по сравнению с прямоточной технологией.

Ключевые слова: анионитный фильтр, катионитный фильтр, обескремнивание, двухпоточно-противоточный фильтр, сорбция, десорбция, прямоток, противоток.