

ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

В номере:

- *Сетевые информационные атаки на системы управления энергетическими объектами*
- *Паровые турбины SST-200–SST-900 Siemens в России*
- *Оценка возможности сжигания побочных продуктов сланцепереработки в котле ТП-101*

4 **2015**

**ООО МАИК «НАУКА/
ИНТЕРПЕРИОДИКА»**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, МОНТАЖ И РЕМОНТ КОТЛОВ, ТУРБИН, СЕТЕЙ, ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ

CONSTANT™

СТАБИЛЬНОСТЬ В НАСТОЯЩЕМ,
УВЕРЕННОСТЬ В БУДУЩЕМ!

www.constant-kte.com

10 ЛЕТ НАДЕЖНОГО ПАРТНЕРСТВА!

ООО «КОМТЕХЭНЕРГО»

Россия, город Ярославль, Проспект Ленина, 7. Тел./факс: +7 (4852) 757-027. E-mail: info@constant-kte.com



**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

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2015

Электрическая часть тепловых и атомных электростанций

Сетевые информационные атаки на системы управления энергетическими объектами критической инфраструктуры

Логинов Е.Л., Райков А.Н.

3

Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

Паровые турбины SST-200–SST-900 Siemens в России

Касилов В.Ф.

10

Металлы и вопросы прочности

Длительная прочность и допускаемые напряжения хромистых жаропрочных сталей 10Х9МФБ и Х10СгМоVNb9-1 (Т91, Р91)

Скоробогатых В.Н., Данюшевский И.А., Щенкова И.А., Прудников Д.А.

17

Влияние многократной структурной перекристаллизации стали 20 на коррозионную стойкость труб поверхностей нагрева

Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И.

26

Долговечность гибов высокотемпературных паропроводов в условиях длительной эксплуатации

Катанаха Н.А., Семенов А.С., Гецов Л.Б.

32

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

Оценка возможности сжигания побочных продуктов сланцепереработки в котле ТП-101

Сидоркин В.Т., Тузов А.Н., Верещетин В.А., Мельников Д.А.

43

Влияние конструктивных решений растопочной вихревой горелки с центральным подводом среды на формирование условий стабилизации горения пылевоздушной смеси

Двойнишников В.А., Хохлов Д.А.

50

Водоподготовка и водно-химический режим

Совершенствование водоподготовки на ТЭС

Ларин Б.М., Бушуев Е.Н., Ларин А.Б., Карпычев Е.А., Жадан А.В.

58

Локальная очистка водоугольных шламов ТЭЦ с использованием коагулянтов

Сарапулова Г.И., Логунова Н.И.

65

Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

Особенности конденсации пара внутри труб и каналов

Мильман О.О., Федоров В.А., Кондратьев А.В., Птахин А.В.

71

СПРАВОЧНИК ПО ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИМ РАСЧЕТАМ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Издательство по Атомной Технике (ИздАТ) выпустило “Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике” в 3-х томах.

Первый том посвящен основам теплогидравлических процессов в ядерных энергетических установках и состоит из двух разделов: гидродинамические расчеты и расчеты теплообмена. Приведены формулы для определения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления в каналах различной формы для однофазных и двухфазных сред в разных режимах течения, а также распределений скорости и касательных напряжений.

Второй том открывается главой “Основы теплогидравлики ядерных реакторов”, где сообщаются сведения об основных физических процессах в реакторах, а также об особенностях гидродинамики и полях температуры в элементах активной зоны. Том содержит краткие описания различных типов ядерных реакторов, изложение простейших методов теплогидравлических расчетов, присущих данному типу реакторов.

Основное направление тематики третьего тома – описание процессов при нарушениях нормальной эксплуатации АЭС, разных барьеров безопасности, процессов, которые могут возникнуть в защитной оболочке.

В приложениях к третьему тому содержатся статистические данные о реакторах и АЭС в разных странах. Содержатся также краткие статьи и рефераты относительно перспектив развития атомной энергетики с изложением мнений (не всегда бесспорных) сотрудников разных институтов, КБ, давно работающих в этой отрасли. Приведены подробные сведения о теплофизических свойствах материалов ядерной техники (топлива, теплоносители, материалы оболочек твэлов и др.).

При подготовке рукописи использовались данные не только из известных трудов, справочников, но и информация, доступная из научно-технических отчетов МАГАТЭ, международных конференций (GLOBAL, ICAPP, ICONE, NURETH, и др.), научно-информационных баз данных ведущих отечественных и зарубежных организаций.

По решению руководства ОАО “Концерн Росэнергоатом” Справочник распространяется по учебным заведениям, НИИ, КБ, АЭС безвозмездно с предоставлением доверенности.

Остатки тиража реализуются по заявкам.

Заявки направлять по:

тел. (48439) 98210,

эл. почте: kirillov@ippe.ru,

почтовому адресу: 249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1. ГНЦ РФ-ФЭИ. Кириллову П.Л.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Сетевые информационные атаки на системы управления энергетическими объектами критической инфраструктуры

© 2015 г. Логинов Е.Л.¹, Райков А.Н.²

Институт проблем рынка РАН¹ – Институт проблем управления РАН²

e-mail: evgenloginov@gmail.com; alexander.n.raikov@gmail.com

Приведен анализ наиболее крупных аварий, происшедших вследствие сетевых информационных атак на системы управления энергетическими объектами критической инфраструктуры США, в контексте возможностей современных систем поддержки принятия решений. Сформулированы тенденции развития технологий нанесения ущерба интеллектуальным сетям (smart grid). Построена объемная матрица характеристик нападений на объекты. Развита модель функционирования системы управления критической инфраструктуры после атаки. Рассмотрены меры и нормативные акты, принятые в последний период и нацеленные на повышение эффективности защиты критической инфраструктуры. Предложены подходы к когнитивному моделированию и сетевой экспертизе сложных ситуаций для поддержки решений, а также к формированию системы показателей предупреждающего мониторинга критической инфраструктуры.

Ключевые слова: критическая инфраструктура, поддержка решений, когнитивное моделирование, системы управления, сетевая атака, предупреждающий мониторинг, безопасность, стратегия, сетевая экспертиза.

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ, ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Паровые турбины SST-200—SST-900 Siemens в России

© 2015 г. Касилов В.Ф.¹

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”

e-mail: kasilovf@mpei.ru

Приведена хронология сотрудничества с Россией германского транснационального концерна Siemens. Представлен обзор конструкций промышленных паровых турбин серии SST-200—SST-900 электрической мощностью 10–180 МВт, установленных на тепловых электростанциях и промышленных объектах России в период 2004–2014 гг. Рассмотрены особенности конструкции паровой турбины SST-600 ПГУ-200 Юго-Западной ТЭЦ.

Ключевые слова: промышленные паровые турбины Siemens, особенности конструкций турбин малой и средней мощности, компоновка турбоагрегата, парогазовый энергоблок.

**МЕТАЛЛЫ
И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ**

Длительная прочность и допускаемые напряжения хромистых жаропрочных сталей 10X9MФБ и X10CrMoVNb9-1 (T91, P91)

© 2015 г. Скоробогатых В.Н.¹, Данюшевский И.А.², Щенкова И.А.¹, Прудников Д.А.¹

НПО ЦНИИТМаш¹ – НПО ЦКТИ им. И.И. Ползунова²

e-mail: skorobogatykh@cniitmash.ru

На сегодняшний день хромистые стали марок X10CrMoVNb9-1 (T91, P91) и 10X9MФБ (10X9MФБ-III) широко применяются при изготовлении оборудования тепловых энергоблоков в России и в мире. Проведено обобщение и сопоставление результатов испытаний на растяжение, удар и длительную прочность, накопленных за многие годы исследований зарубежной стали марок X10CrMoVNb9-1, T91, P91 и отечественной стали марки 10X9MФБ (10X9MФБ-III). Установлена идентичность свойств исследованных металлов. Подтверждены высокие прочностные и пластические свойства при работе в условиях ползучести сталей, из которых изготовлены трубы и другие изделия. Определены расчетные характеристики длительной прочности на базе испытаний более 1 млн часообразцов (σ_{10^5} и $\sigma_{2 \times 10^5}$ при температурах 500–650°C). Разработана таблица рекомендуемых допускаемых напряжений для сталей марок 10X9MФБ, 10X9MФБ-III, X10CrMoVNb9-1, T91, P91. Исследованы длительные свойства сварных соединений металла труб 10X9MФБ + 10X9MФБ, 10X9MФБ-III + 10X9MФБ-III, X10CrMoVNb9-1 + X10CrMoVNb9-1, P91 + P91, T91 + T91, 10X9MФБ (10X9MФБ-III) + X10CrMoVNb9-1(T/P91). Экспериментально установлен коэффициент ослабления сварных соединений.

Ключевые слова: хромистые, жаропрочные стали, 10X9MФБ, X10CrMoVNb9-1, P91, трубы, гиб, сварные соединения, длительная прочность, допускаемые напряжения.

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

Влияние многократной структурной перекристаллизации стали 20 на коррозионную стойкость труб поверхностей нагрева

© 2015 г. Помазова А.В., Панова Т.В., Геринг Г.И.

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского¹

e-mail: pomazova@yandex.ru

Необходимость улучшения эксплуатационных характеристик котельных сталей связана с непрерывным увеличением коррозионных повреждений труб поверхностей нагрева, поэтому актуальной задачей остается разработка способов повышения коррозионной стойкости труб из стали 20, используемых в теплоэнергетике в качестве тепловоспринимающих элементов. Изучено влияние циклических режимов нормализации (многократной структурной перекристаллизации) на микроструктурные характеристики, механические и коррозионные свойства стали 20 в соответствии с регламентирующими требованиями, предъявляемыми к изделиям такого рода. Установлено, что для углеродистой стали 20 двукратная нормализация является оптимальным режимом термообработки для выравнивания размеров зерен феррита и снижения скорости коррозии. Обнаружено, что при этом режиме термообработки фактор разнородности увеличивается в 3 раза по сравнению с исходным значением. Последующие циклы нормализации приводят к образованию браковочных микроструктур и снижению механических свойств металла. Благодаря повышению степени однородности микроструктуры при двукратной нормализации скорость коррозии снижается на 38–51% от исходного значения. Полученные результаты могут быть использованы для продления срока эксплуатации путем снижения скорости коррозии металла труб, прошедших двойную нормализацию, а также для расчета остаточного ресурса поверхностей нагрева котлов ТЭЦ.

Ключевые слова: структурная перекристаллизация, разнородность микроструктуры, коррозионная стойкость, ресурс котельных труб.

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

Долговечность гибов высокотемпературных паропроводов в условиях длительной эксплуатации¹

© 2015 г. Катанаха Н.А., Семенов А.С., Гецов Л.Б.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет²

e-mail: katanaha@mail.ru

Представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния и долговечности гнутых и крутоизогнутых отводов высокотемпературных паропроводов, полученные на основе использования метода конечных элементов (КЭ) с применением модифицированной формулы Содерберга для описания процессов неустановившейся ползучести с учетом накопления повреждений. Расчеты проведены для гибов, выполненных из наиболее распространенных при изготовлении паропроводов марок сталей (12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 10Х9МФБ) при различных уровнях внутреннего давления и температурах эксплуатации. Проведено сравнение решений, полученных с использованием разработанной модели ползучести, с широко применяемыми на практике моделями.

Ключевые слова: гиб паропровода, прочность, ползучесть, релаксация напряжений, допускаемые напряжения, овальность, стали.

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

Оценка возможности сжигания побочных продуктов сланцепереработки в котле ТП-101¹

© 2015 г. Сидоркин В.Т.², Тугов А.Н.³, Верещетин В.А.³, Мельников Д.А.³

ENTEN Engineering AS² – ОАО “Всероссийский теплотехнический институт”³

e-mail: vti-boiler@mail.ru

Наиболее экономически целесообразным способом энергетической утилизации продуктов сланцепереработки (ретортного газа и сланцевого бензина) является их сжигание в энергетических сланцевых котлах. Расчетными исследованиями показано, что на Эстонской электростанции (г. Нарва), входящей в состав EESTI ENERGIA, рециркуляция газообразных продуктов сгорания в топку котлов ТП-101 позволяет увеличить долю сжигаемых в этом котле побочных продуктов сланцепереработки с 7 до 40%. Рециркуляция дымовых газов производится в целях поддержания температур в топке на уровне, характерном для сжигания сланца, и снижения концентрации оксидов азота в факеле горелок ретортного газа. Степень рециркуляции дымовых газов зависит от доли сжигаемых продуктов сланцепереработки в общем тепловыделении и повышается с ее увеличением. Для предельного значения этой доли (40%) в номинальном режиме рециркуляция дымовых газов составляет 10%. Полный перевод котла на сжигание только ретортного газа вместо сланца не представляется возможным, поскольку потребуются существенная реконструкция поверхностей нагрева котла ТП-101. С учетом полученных результатов выполнена в качестве пилотного проекта реконструкция одного корпуса котла с установкой шести горелок ретортного газа и системы рециркуляции дымовых газов.

Ключевые слова: котел, сланец, продукты сланцепереработки, ретортный газ, рециркуляция продуктов сгорания.

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

Влияние конструктивных решений растопочной вихревой горелки
с центральным подводом среды на формирование условий стабилизации
горения пылевоздушной смеси

© 2015 г. Двойнишников В.А.¹, Хохлов Д.А.¹

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”

e-mail: Khokhlov.D@hotmail.com

Статья посвящена изучению воздействия конструкции и режимных параметров работы растопочной вихревой горелки на формирование закрученной струи, а также ее характеристики. Для исследования характеристик потока проводилось его математическое моделирование с помощью программного пакета ANSYS CFX. В результате исследований установлена степень влияния параметра закрутки n , соотношения диаметров каналов m и расходов в них сред при двухканальном исполнении вихревой горелки, а также коэффициента стесненности $K_{ст}$ на аэродинамическую картину течения, в том числе зону обратного течения, и ее характеристики. Определена область значений m и n , при которых обеспечиваются необходимые аэродинамические условия устойчивого горения. Рассмотрены также вопросы эффективности работы аксиального закручивающего аппарата. Представлена зависимость для определения коэффициента потерь на закрутку потока. Показано, что потери давления в кольцевом канале с закручивающим аппаратом зависят не только от угла установки лопаток, но и от соотношения диаметров кольцевого канала.

Ключевые слова: топка, вихревая растопочная пылеугольная горелка, горелочное устройство, закрутка потока, зона обратных токов, вихревое течение, аксиальный лопаточный закручивающий аппарат, математическое моделирование.

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Совершенствование водоподготовки на ТЭС¹

© 2015 г. Ларин Б.М.², Бушуев Е.Н.², Ларин А.Б.², Карпычев Е.А.², Жадан А.В.³

ФГБОУ ВПО “Ивановский государственный энергетический университет”² –
ЗАО “Научно-производственная компания Медиана-фильтр”³

e-mail: admin@xxte.ispu.ru

Рассмотрены перспективные и существующие технологии обработки воды на ТЭС, включая предварительную очистку, ионный обмен, мембранный метод. Представлены результаты лабораторных исследований и промышленных испытаний предложенных технологий на различных ТЭС. Показаны возможности технологического и экологического совершенствования водоподготовительных установок.

Ключевые слова: коагуляция, предварительная очистка, ультрафильтрация, обратный осмос, ионитные фильтры, утилизация стоков.

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Локальная очистка водоугольных шламов ТЭЦ с использованием коагулянтов

© 2015 г. Сарапулова Г.И., Логунова Н.И.

Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет¹

e-mail: ego-ist1989@yandex.ru

Изучены процессы коагуляции угольных частиц в водоугольной пульпе Ново-Иркутской ТЭЦ. Показана целесообразность применения высокоосновного гидроксохлорида алюминия марки Б для очистки загрязненной воды с содержанием взвешенных частиц 30 г/дм^3 . Проведен гранулометрический анализ угольных частиц. Выявлено, что применение реагента эффективно для коагуляции как крупных частиц, так и мелкодисперсной фракции. Показано, что для загрязненной воды цеха топливоподдачи характерны значения карбонатной жесткости до $1.5 \text{ ммоль-экв/дм}^3$ и $\text{pH} \leq 7.8$. Эти параметры наиболее оптимальны для гидролиза, эффективного хлопьеобразования, при этом не требуется дополнительное введение бикарбоната натрия и флокулянтов. Разработана схема раздельной очистки водоугольной пульпы для цеха топливоподдачи. Достоинством способа очистки является возврат воды достаточно высокой степени очистки для нужд ТЭЦ, а также получение дополнительного топлива в виде извлеченных угольных частиц. Продукт обладает улучшенными технологическими параметрами по сравнению с исходным топливом – более высокой теплотой сгорания и низким содержанием серы. Очищенная вода соответствует нормативным требованиям по содержанию остаточного алюминия. Технология очистки является ресурсосберегающей, экологичной и экономически выгодной.

Ключевые слова: ТЭЦ, очистка воды, водоугольный шлам, коагулянт, технологическая схема, экологический и экономический эффект.

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

Особенности конденсации пара внутри труб и каналов¹

© 2015 г. Мильман О.О., Федоров В.А., Кондратьев А.В., Птахин А.В.

Закрытое акционерное общество “Научно-производственное внедренческое предприятие “Турбокон”²

e-mail: turbocon@kaluga.ru

Теоретические и экспериментальные исследования выявили зависимость параметров процесса конденсации пара в трубах и каналах от схемы движения охлаждающего теплоносителя: противотока, прямотока, перекрестного тока. Потери полного давления пара при противотоке больше, чем при прямотоке или перекрестном токе. При конденсации перегретый пар сохраняет перегрев по всей длине трубы, если паросодержание на выходе $x_1 > 0$, а температура перегрева зависит от схемы движения теплоносителей. Разработан метод расчета соотношения потерь давления и температуры пара в зависимости от схемы движения, который подтвержден экспериментальными данными. Основным параметром при обобщении данных следует считать $\frac{kF}{cG}$ или его модификации, где c , G – удельная теплоемкость и расход теплоносителя.

Ключевые слова: пар, конденсация, труба, перегрев, переохлаждение, скорость, потеря давления, трение, паросодержание.