

# ТЕПЛО- ЭНЕРГЕТИКА

В номере:



- *Перспективы разработки инновационного водоохлаждаемого ядерного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя*
- *Исследование влияния параметров ГТУ на ее характеристики с учетом дополнительных потерь в охлаждаемой газовой турбине*
- *Экспериментальное исследование эрозионного износа конструкционных материалов*

# 8

# 2014

ООО МАИК «НАУКА/  
ИНТЕРПЕРИОДИКА»



ЗАО "ГЕОТЕРМ-ЭМ"

Мутновская ГеоЭС (2 x 25)  
50 МВт (Камчатка)

Научно-технические разработки в атомной,  
традиционной и возобновляемой энергетике



Россия, 111250, Москва, ул. Лефортовский Вал, 24  
Тел. 8-(495) 918-0004 факс 8-(495) 918-17-89  
E-mail: [geotherm@gmail.com](mailto:geotherm@gmail.com)  
<http://www.geotherm-em.ru>

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 8, 2014

---

---

## Атомные электростанции

- Анализ причин появления непроектных термосиловых воздействий в зоне сварного соединения № 111-1 ПГВ-1000М и рекомендации по их исключению  
*Бакиров М.Б., Левчук В.И., Поваров В.П., Громов А.Ф.* 3
- Перспективы разработки инновационного водоохлаждаемого ядерного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя  
*Калякин С.Г., Кириллов П.Л., Баранев Ю.Д., Глебов А.П., Богословская Г.П., Никитенко М.П., Махин В.М., Чуркин А.Н.* 13
- Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR с перемешивающими решетками  
*Дмитриев С.М., Самойлов О.Б., Хробостов А.Е., Варенцов А.В., Добров А.А., Доронков Д.В., Сорокин В.Д.* 20
- Автоматический химический контроль в составе функций системы верхнего блочного уровня новых проектов энергоблоков АЭС  
*Денисова Л.Г., Хренников Н.Н.* 28
- 

## Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

- Исследование влияния параметров ГТУ на ее характеристики с учетом дополнительных потерь в охлаждаемой газовой турбине  
*Костюк А.Г., Карпунин А.П.* 33
- Методика бесконтактного определения средних размеров эрозионно-опасных капель в полидисперсном влажно-паровом потоке  
*Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Сорокин И.Ю., Тищенко В.А., Хомяков С.В.* 39
- 

## Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

- Теплообмен при движении в канале дисперсного пароводяного потока  
*Агафонова Н.Д., Парамонова И.Л.* 47
- Частотный анализ флуктуаций температуры нагревателя и звуковых шумов при кипении жидкости для диагностики смены режимов теплообмена  
*Деев В.И., Куценко К.В., Лаврухин А.А., Маслов Ю.А., Делов М.И.* 52
- 

## Металлы и вопросы прочности

- Экспериментальное исследование эрозионного износа конструкционных материалов  
*Рыженков В.А., Селезнев Л.И., Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б.* 56
- Учет внутрискрутурных напряжений в процессах влияния структурной неоднородности на коррозионные повреждения теплообменных труб  
*Любимова Л.Л., Макеев А.А., Заворин А.С., Тишлыков А.А., Артамонцев А.И., Лебедев Б.В., Фисенко Р.Н.* 62
- 

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

- Плазменно-циклонная технология сжигания твердых топлив  
*Карпенко Ю.Е., Мессерле В.Е., Карпенко Е.И., Басаргин А.П.* 68
-

## За рубежом

Пиролиз биотоплива – императы цилиндрической –  
в реакторе с двухшнековым питателем

*Promdee K., Vitidsant T.*

---

---

---

---

## АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

---

---

УДК 621.311.25:621.039

### Анализ причин появления непроектных термосиловых воздействий в зоне сварного соединения № 111-1 ПГВ-1000М и рекомендации по их исключению

© 2014 г. Бакиров М.Б.<sup>1</sup>, Левчук В.И.<sup>1</sup>, Поваров В.П.<sup>2</sup>, Громов А.Ф.<sup>2</sup>

ООО “Научно-сертификационный учебный центр материаловедения и ресурса компонентов ядерной техники “Центр материаловедения и ресурса””<sup>1</sup> – Филиал ОАО “Концерн Росэнергоатом” Нововоронежская атомная станция<sup>2</sup>

e-mail: leavc@mail.ru

Недопустимые эксплуатационные дефекты в критических зонах тепломеханического оборудования обнаруживаются регулярно на всех энергоблоках АЭС как в России, так и за рубежом. Число таких нарушений в перспективе будет только расти, так как срок эксплуатации большинства атомных станций приближается к проектному или превышает его. В связи с этим крайне актуальными становятся установление причинно-следственных связей ускоренного образования и роста дефектов, разработка компенсирующих мероприятий по снижению эксплуатационной повреждаемости, а также организация мониторинга нарушения целостности оборудования в процессе его эксплуатации. Необходимо внедрение новых подходов к комплексной диагностике технического состояния ответственного оборудования АЭС, в том числе непрерывного мониторинга его эксплуатационной повреждаемости и нагруженности в наиболее критических зонах. Начиная с 2011 г. подобная система мониторинга успешно эксплуатируется на энергоблоке № 5 Нововоронежской АЭС в зоне сварного соединения (СС) № 111-1 ПГ-4. По итогам работы этой системы в 2011–2013 гг. в зоне СС № 111-1 в различных эксплуатационных режимах выявлены нестационарные термосиловые воздействия (периодические термоудары, температурные “аномалии”), не учтенные в проекте и оказывающие существенное влияние на эксплуатационную нагруженность данного узла. В результате анализа причинно-следственных зависимостей температурных аномалий, связанных с технологическими операциями, разработан комплекс мероприятий, направленных на снижение термосиловых нагрузок участков трубопроводов, включающий в себя корректировки технологического регламента безопасной эксплуатации и инструкций по эксплуатации (изменение алгоритмов управления запорно-регулирующей арматурой системы продувки парогенераторов).

**Ключевые слова:** парогенератор, сварное соединение № 111-1, система мониторинга, температурная “аномалия”, термосиловая нагруженность.

---

---

**АТОМНЫЕ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

---

---

УДК 621.039.54

## Перспективы разработки инновационного водоохлаждаемого ядерного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя

© 2014 г. Калякин С.Г.<sup>1</sup>, Кириллов П.Л.<sup>1</sup>, Баранаев Ю.Д.<sup>1</sup>, Глебов А.П.<sup>1</sup>, Богословская Г.П.<sup>1</sup>,  
Никитенко М.П.<sup>2</sup>, Махин В.М.<sup>2</sup>, Чуркин А.Н.<sup>2</sup>

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского<sup>1</sup> – ОКБ “Гидропресс”<sup>2</sup>

e-mail: gpbogoslov@ippe.ru

На основе краткого обзора состояния атомной энергетики на 01.02.2014 г. и выполненных разработок водоохлаждаемого реактора на сверхкритическом давлении (ВВЭР СКД) обсуждаются перспективы этого проекта. Проект опирается на опыт создания и эксплуатации стационарных водоохлаждаемых реакторных установок ВВЭР, PWR, BWR, РБМК (более 15000 реакторо-лет), многолетний мировой опыт эксплуатации тепловых электростанций, в турбинах которых используется пар сверхкритических (СКП) и суперсверхкритических параметров. Освещаются преимущества такого реактора и научно-технические проблемы, требующие решения при дальнейшей разработке подобных установок. Накопленные за последние 10 лет знания позволяют уточнить концепцию и приступить к проектированию экспериментального реактора небольшой мощности.

**Ключевые слова:** реактор, ядерная энергетическая установка (ЯЭУ), сверхкритическое давление воды, поколение IV, преимущества методологии ИНПРО.

---

---

**АТОМНЫЕ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

---

---

УДК 621.039

**Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики  
и массообмена потока теплоносителя в ТВС-Квадрат реакторов PWR  
с перемешивающими решетками**

© 2014 г. Дмитриев С.М.<sup>1</sup>, Самойлов О.Б.<sup>2</sup>, Хробостов А.Е.<sup>1</sup>, Варенцов А.В.<sup>1</sup>, Добров А.А.<sup>1</sup>,  
Доронков Д.В.<sup>1</sup>, Сорокин В.Д.<sup>1</sup>

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup> – ОАО “ОКБМ Африкантов”<sup>2</sup>  
e-mail: khrobostov@nntu.nnov.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований локальной гидродинамики и массообмена при течении теплоносителя в характерных зонах тепловыделяющих сборок реакторов PWR при использовании поясов перемешивающих дистанционирующих решеток (ПДР). Исследования проводились на аэродинамическом стенде методом диффузии примесей (метод газового трассера). В процессе экспериментов выявлены особенности течения теплоносителя в пучках твэлов ТВС-Квадрат. Результаты исследований включены в базу данных для верификации программ вычислительной гидродинамики (CFD-кодов) и детального уточнения локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя при оценке теплотехнической надежности активных зон реакторов PWR.

*Ключевые слова:* ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, межканальный массообмен, перемешивающая дистанционирующая решетка.

---

---

**АТОМНЫЕ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

---

---

УДК 621.039.58

## Автоматический химический контроль в составе функций системы верхнего блочного уровня новых проектов энергоблоков АЭС

© 2014 г. Денисова Л.Г., Хренников Н.Н.

“Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности”<sup>1</sup>

e-mail: denisova@secnrs.ru

**Представлена информация о состоянии нормативного регулирования и создания подсистемы автоматизированного химического контроля (АХК) водно-химических режимов (ВХР) I и II контуров в составе автоматической системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) АЭС новых проектов энергоблоков АЭС с ВВЭР. Для реализации стратегии создания и внедрения АСУ ТП “АЭС-2006” в части ВХР необходимо разработать нормативные документы по некоторым требованиям к подсистемам АХК ВХР в составе АСУ ТП АЭС, осуществить разработку проектных решений для систем АХК ВХР в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии.**

**Ключевые слова:** атомная электрическая станция, АСУ ТП, химический мониторинг, система верхнего блочного уровня, водно-химический режим, блочный пульт управления, нормативные документы, протокол текущих событий, подсистема автоматизированного химического контроля, нарушения водно-химического режима.



---

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

---

УДК 621.438

### Исследование влияния параметров ГТУ на ее характеристики с учетом дополнительных потерь в охлаждаемой газовой турбине

© 2014 г. Костюк А.Г., Карпунин А.П.

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”<sup>1</sup>

e-mail: APKarpunin@gmail.com

Статья посвящена исследованию влияния параметров газотурбинной установки (ГТУ) на показатели эффективности автономной парогазовой установки (ПГУ) с учетом дополнительных потерь на охлаждение газовой турбины. С использованием разработанных вычислительных программ произведены расчеты тепловых схем ГТУ и ПГУ при различных значениях начальной температуры газовой турбины и отношения давлений в компрессоре. Показано, что для любого отношения давлений в компрессоре КПД ГТУ принимает максимальное значение при некоторой начальной температуре газовой турбины. Однако электрический КПД утилизационной парогазовой установки увеличивается с ростом температуры перед газовой турбиной во всем исследованном диапазоне до 1800°С.

**Ключевые слова:** газотурбинная установка, парогазовая установка, охлаждаемая газовая турбина, коэффициент полезного действия, дополнительные потери, конвективное охлаждение, пленочное охлаждение.

---

---

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

---

---

УДК 621.165

**Методика бесконтактного определения средних размеров  
эрозионно-опасных капель в полидисперсном влажно-паровом потоке<sup>1</sup>**

© 2014 г. Гаврилов И.Ю., Попов В.В., Сорокин И.Ю., Тищенко В.А., Хомяков С.В.

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”<sup>2</sup>

e-mail: ticsh2001@yandex.ru

**Представлен новый расчетно-экспериментальный подход к определению средних размеров капель влажно-паровых потоков, основанный на применении систем лазерной диагностики. Рассмотрены основные аспекты реализации методики в статических условиях на экспериментальном пародинамическом стенде. Приведены первичные результаты апробации метода при движении влажно-парового потока в суживающемся плоском сопле.**

**Ключевые слова:** влажный пар, полидисперсный поток, системы лазерной диагностики, метод PIV (particle image velocimetry), паровые турбины.

---

---

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

---

---

УДК 621.039.524:536.24

## Теплообмен при движении в канале дисперсного пароводяного потока

© 2014 г. Агафонова Н.Д., Парамонова И.Л.

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет<sup>1</sup>

e-mail: a-n-d-2011@mail.ru

**Предложена модификация модели Хейна–Кёле для теплоотдачи в области дисперсного режима течения, основанная на введении поправки при расчете степени неравновесности паракапельного потока. Поправка учитывает уменьшение суммарной поверхности капель при их испарении в перегретом паре. При сравнении расчетной максимальной температуры стенки канала с экспериментальными данными относительная погрешность составила не более 5%. Результаты расчетов могут послужить основой для получения необходимых соотношений для замыкания двухжидкостных моделей двухфазного потока, используемых в компьютерных программах.**

**Ключевые слова:** модификация модели Хейна–Кёле, дисперсный режим течения, неравновесный паракапельный поток, теплоотдача, поправка на испарение капель.

---

---

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

---

---

УДК 536.248.2

**Частотный анализ флуктуаций температуры нагревателя и звуковых шумов  
при кипении жидкости для диагностики смены режимов теплообмена**

© 2014 г. Деев В.И., Куценко К.В., Лаврухин А.А., Маслов Ю.А., Делов М.И.

Национальный исследовательский ядерный университет “Московский инженерно-физический институт”<sup>1</sup>

e-mail: DelovMI@yandex.ru

**Приводятся результаты экспериментального исследования плотности распределения температурных и звуковых шумов при кипении жидкости на теплоотдающей поверхности. Опыт проводился с нагревателем в большом объеме воды, недогретой до температуры насыщения при атмосферном давлении. Установлена корреляция между спектральными характеристиками температурных флуктуаций и сопутствующими звуковыми шумами при кипении. На основе анализа спектральных характеристик и плотности распределения температурных флуктуаций предложен метод классификации режимов кипения.**

**Ключевые слова:** пузырьковое кипение, диагностика режимов теплообмена, температурные флуктуации, звуковые явления при кипении.

---

---

**МЕТАЛЛЫ  
И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ**

---

---

УДК 621.165.620.193.1

**Экспериментальное исследование эрозионного износа  
конструкционных материалов<sup>1</sup>**

© 2014 г. Рыженков В.А., Селезнев Л.И., Медников А.Ф., Тхабисимов А.Б.

Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”<sup>2</sup>

e-mail: mednalex@mail.ru

**Рассматриваются результаты изучения процесса эрозионного износа стали 20Х13 при скорости соударения вращающихся образцов  $C_{уд} = 250$  м/с с частицами монодисперсного эродента  $d_k = 800$  мкм. Показаны существенные различия в развитии эрозионного процесса стали одной и той же марки, подвергаемой воздействию эродента с одними и теми же характеристиками, обусловленными случайными (неустановленными) обстоятельствами.**

**Ключевые слова:** сталь 20Х13, эрозионный износ, физико-технические свойства, стационарный этап, скорость износа.

**DOI:** 10.1134/S0040363614080116

---

---

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ  
ПРОЧНОСТИ

---

---

УДК 621/620.19

## Учет внутрискруктурных напряжений в процессах влияния структурной неоднородности на коррозионные повреждения теплообменных труб<sup>1</sup>

© 2014 г. Любимова Л.Л., Макеев А.А., Заворин А.С., Ташлыков А.А., Артамонцев А.И.,  
Лебедев Б.В., Фисенко Р.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет<sup>2</sup>

e-mail: tashlykov@tpu.ru

С учетом экспериментальных данных о структуре материала (микротвердости, функции распределения кристаллитов по размерам, внутренних структурных напряжений I и II рода в зависимости от плотности структурных дефектов и температуры), полученных методом высокотемпературной рентгенографии, приводятся сведения о локальных структурных неоднородностях металла стенки трубы, создающих различную восприимчивость ее отдельных участков к процессам коррозионных повреждений. По условиям релаксации внутренних структурных напряжений I и II рода для образца из стали 20 экспериментально обоснован и определен температурный диапазон (350–370°C) пассивации поверхности трещины оксидной пленкой, которая блокирует концентрацию напряжений на острие кромки трещины и ее продвижение.

**Ключевые слова:** микротвердость, внутренние структурные напряжения I и II рода, плотность дислокаций, кристаллиты, профиль рентгеновской дифракционной линии, релаксация, пассивация.

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

УДК 662.61

Плазменно-циклонная технология сжигания твердых топлив

© 2014 г. Карпенко Ю.Е.<sup>1</sup>, Мессерле В.Е.<sup>2,3</sup>, Карпенко Е.И.<sup>4</sup>, Басаргин А.П.<sup>5</sup>

ОЦПЭТ РАО ЕЭС<sup>1</sup> – Институт проблем горения<sup>2</sup> – НИИ экспериментальной и теоретической физики КазНУ им. Аль-Фараби<sup>3</sup> –  
Институт физического материаловедения СО РАН<sup>4</sup> – Забайкальский государственный университет<sup>5</sup>

e-mail: antonbasar@mail.ru

Описывается новая технология сжигания угля, заключающаяся в электротермохимической подготовке топлива к этому процессу и последующем вихревом сжигании пылеугольного топлива в циклонной камере, а также в удалении расплавленной минеральной части топлива. Представлена методика ступенчатого расчета плазменно-циклонного процесса, включающая в себя поэтапное определение параметров состояния газового потока, минеральной части топлива и геометрических характеристик камеры. Приводятся результаты экспериментальных исследований, подтверждающие основные теоретические положения. На основании результатов исследования получена область применения плазменно-циклонной технологии сжигания твердых топлив, включающая энергетическое и энерготехнологическое направления.

*Ключевые слова:* уголь, плазма, циклон, горение, эффективность, экология.

УДК 662.76

## Пиролиз биотоплива — императы цилиндрической — в реакторе с двухшнековым питателем<sup>1</sup>

© 2014 г. Promdee K.<sup>2,3</sup>, Vitidsant T.<sup>2,4</sup>

Центр видов топлива и энергии из биомассы, Университет им. Чулалонгкона<sup>2</sup> –  
Королевская военная академия им. Чулачомклао<sup>3</sup> – Кафедра химической технологии, Университет им. Чулалонгкона<sup>4</sup>  
e-mail: numensci@hotmail.com

Описывается процесс пиролиза (термического разложения) биомассы в реакторе новейшей конструкции, предназначенном для производства биомасла из биотоплива — императы цилиндрической — с регулированием температуры исходного сырья. Регулирование температуры основывалось на моделировании процесса теплопередачи в двухшнековом питателе, которым снабжен реактор. В настоящем исследовании показано, что биомасса из императы цилиндрической характеризуется высоким выходом продуктов пиролиза и, напротив, низким выходом твердых и газообразных продуктов [выход продуктов пиролиза выражен в процентах сухой массы сырья (% по массе)]. Пиролиз осуществлялся при температуре от 400 до 500 °С. Согласно расчетам в результате пиролиза императы цилиндрической выход жидких продуктов (биомасла) превышает выход твердых и газообразных продуктов. Действительно, его максимальное значение при температуре 500 °С составило 52.62% (по массе), а при 400 и 450 °С — 40.56 и 46.45% (по массе). Соединения, обнаруженные в биомасле, которое было получено в результате пиролиза императы цилиндрической, содержали в основном фенол, 2,5-диметилфенол, 1-этил-4-метоксифенол, 2-циклопентен-1-он-2,3-диметилбензол, 1-этил-3-метилбензол.

**Ключевые слова:** пиролиз, двухшнековый питатель, выход продуктов, императа цилиндрическая, химические соединения.