

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 7, 2014

---

---

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

Исследование естественной циркуляции в испарителе котла-утилизатора с горизонтальными трубами <i>Росляков П.В., Плешанов К.А., Стерхов К.В.</i>	3
Технические и организационные решения по улучшению технико-экономических показателей работы котла ТПЕ-216 с мельницами-вентиляторами МВ-3300/800/490 <i>Кириллов М.В., Сафронов П.Г.</i>	11
Сжигание твердых биотоплив в циклонно-слоевой топочной камере <i>Пищуха Е.А., Теплицкий Ю.С., Бородуля В.А.</i>	18
Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности <i>Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Лазарев С.И., Лапин Д.А.</i>	25
Трансформация углей в электрическую и тепловую энергию <i>Дубинин А.М., Маврин С.П.</i>	30
Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из белорусских бурых углей <i>Бородуля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М.</i>	36

---

## Водоподготовка и водно-химический режим

Ведение водно-химического режима II контура АЭС с ВВЭР на энергоблоках с отсутствием медьсодержащих сплавов <i>Тяпков В.Ф.</i>	42
Алгоритмические возможности снижения времени измерения в анализаторах растворенного кислорода <i>Родионов А.К., Маркичев П.Н.</i>	47

---

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

Исследование развития асинхронного обката ротора по статору в условиях разного быстродействия систем защиты турбоагрегата <i>Шатохин В.Ф.</i>	53
--	----

---

## Автоматизация и тепловой контроль в энергетике

Оптимальная настройка системы управления для объекта второго порядка с запаздыванием <i>Голинко И.М.</i>	63
---	----

---

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

Некоторые методы повышения эффективности тепловыделяющих сборок <i>Болтенко Э.А.</i>	72
Поправка к статье “Оптимальные уровни тепловой защиты жилых зданий для климатических условий России” <i>Филиппов С.П., Дильман М.Д., Ионов М.С.</i>	79

Поправка к статье “Концепция продления срока эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС”

*Асмолов В.Г., Поваров В.П., Федоров А.И., Витковский С.Л.,  
Беркович В.Я., Четвериков А.Е., Мозуль И.А., Семченков Ю.М., Суслов А.И.*

---

---

---

---

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

---

---

УДК 621.181.7

Исследование естественной циркуляции в испарителе котла-утилизатора  
с горизонтальными трубами

© 2014 г. Росляков П.В., Плешанов К.А., Стерхов К.В.

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

e-mail: sterkhovkv@gmail.com

Приведены результаты исследований устойчивой естественной циркуляции в сложном циркуляционном контуре с горизонтальным расположением труб испарительной поверхности, имеющей отрицательный полезный напор. Оценена возможность перехода от многократной принудительной циркуляции с использованием циркуляционного насоса к естественной в вертикальных котлах-утилизаторах. Предложены критерии надежности и эффективности работы горизонтального испарителя с отрицательным полезным напором. Рассмотрено влияние различных конструкторских решений на надежность циркуляции. С учетом оптимальных параметров определены наиболее эффективные и наименее затратные способы повышения устойчивости циркуляции в вертикальном котле-утилизаторе при переходе от многократной принудительной циркуляции к естественной. Разработаны методика расчета циркуляции и алгоритм проверки надежности работы испарителя, даны рекомендации по конструкции котла-утилизатора, необогреваемых участков контура естественной циркуляции и испарительной поверхности.

**Ключевые слова:** естественная циркуляция (ЕЦ), вертикальный котел-утилизатор (КУ), испаритель, кризис теплообмена, кратность циркуляции, скорость циркуляции, массовое паросодержание.

---

---

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

---

---

УДК 621.181

Технические и организационные решения по улучшению  
технико-экономических показателей работы котла ТПЕ-216  
с мельницами-вентиляторами МВ-3300/800/490

© 2014 г. Кириллов М.В., Сафронов П.Г.

Филиал ОАО “ИНТЕР РАО – Электрогенерация” “Харанорская ГРЭС”<sup>1</sup>

e-mail: safronovpg@mail.ru

Эффективность пылеугольных котлов во многом определяется тем, насколько оптимально работают системы пылеприготовления, в которых все чаще используются мельницы-вентиляторы. На примере реконструкции мельниц-вентиляторов МВ-3300/800/490 проанализировано влияние различных факторов на эффективность и экономичность работы пылесистем, а также рассмотрен опыт реконструкции МВ-3300/800/490 с применением внутренней рециркуляции и лопаточного аппарата сепаратора путем внедрения трехмельничного режима работы котла ТПЕ-216. Проведена оптимизация режима работы котла при переходе с четырехмельничного на трехмельничный, что значительно улучшило технико-экономические показатели.

**Ключевые слова:** мельница-вентилятор, котел, турбоустановка, пылеприготовление, пылесистема, вентиляция, уходящие газы, лопаточный аппарат, сепаратор, угольная пыль, трубопровод внутренней рециркуляции, топка котла, экономический эффект.

---

---

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

---

---

УДК 536.529

**Сжигание твердых биотоплив в циклонно-слоевой топочной камере**

© 2014 г. Пицуха Е.А.<sup>1</sup>, Теплицкий Ю.С.<sup>2</sup>, Бородуля В.А.<sup>2</sup>

ОАО “Белоозерский энергомеханический завод”<sup>1</sup> – Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси<sup>2</sup>

e-mail: 696mal@hmti.ac.by

Экспериментально исследован процесс сжигания твердых биотоплив (древесной щепы, фрезерного торфа и дробленого торфобрикета) в циклонно-слоевой топке котла-воздухоподогревателя мощностью 16.5 кВт. Установлено, что радиальное распределение температуры в камере сгорания характеризуется значительной неизотермичностью, которая несколько уменьшается при увеличении в топливе количества мелких фракций. Показано влияние коэффициента избытка воздуха на концентрации CO и NO в отходящих дымовых газах. В исследованном интервале опытных условий зависимость концентрации NO от коэффициента избытка воздуха имеет экстремум. Сравнение установленных концентраций CO и NO с нормативами свидетельствует о том, что при сжигании древесного топлива и торфобрикета по циклонно-слоевой технологии избыток воздуха на выходе из топки можно снизить до 1.07 (в зависимости от мощности котельного агрегата), добившись при этом предельной концентрации CO, что позволяет увеличить КПД котла по сравнению с КПД котлов со слоевыми топками (коэффициент избытка воздуха 1.3–1.6) на 2–4%.

**Ключевые слова:** биотопливо, горение, циклонно-слоевая топка, концентрации оксидов углерода и азота, распределение температур в топке.

---

---

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

---

---

УДК 662.9

**Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии  
в котлах малой мощности**

© 2014 г. Мальцев Л.И.<sup>1</sup>, Кравченко И.В.<sup>2</sup>, Лазарев С.И.<sup>3</sup>, Лапин Д.А.<sup>3</sup>

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН<sup>1</sup> – ООО ПРОТЭН<sup>2</sup> – ОАО СКЭК<sup>3</sup>

e-mail: maltzev@itp.nsc.ru

Рассмотрены примеры опытно-промышленной реализации технологий факельно-капельного сжигания водоугольной смеси в топках над слоем горящего угля и в вихревой топочной камере. Для приготовления водоугольного топлива (ВУТ) использованы кузнечки угли марок Г и Д, а также отходы обогащения коксующихся углей. Показана перспективность обеих технологий сжигания угля как с экономической, так и с экологической точки зрения.

**Ключевые слова:** водоугольное топливо, факельно-капельное сжигание ВУТ, слоёвое сжигание угля, совместное сжигание ВУТ и угля.

---

---

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

---

---

УДК 697.34

**Трансформация углей в электрическую и тепловую энергию**

© 2014 г. Дубинин А.М., Маврин С.П.

ФГАОУ “Уральский федеральный университет”<sup>1</sup>

e-mail: mspfr@mail.ru

На основании системы уравнений материальных и тепловых балансов моделируются оптимальные параметры процесса превращения твердого топлива в электрическую и тепловую энергию. Теоретические выкладки сопровождаются экспериментом. Расход угля Кузнецкого месторождения на получение 1 тыс. м<sup>3</sup> продуктов газификации составляет 639 кг, на выработку электрической энергии – 0.197 кг/(кВт · ч) (54.7 кг/ГДж), тепла – 55.4 кг/ГДж.

*Ключевые слова:* газогенератор, водяной пар, уголь, воздух, псевдоожиженный слой.

---

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

---

УДК 662.65+662.61

**Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива  
из белорусских бурых углей**

© 2014 г. Бородуля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М.

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси<sup>1</sup>

e-mail: ebuchilko@gmail.com

Рассмотрены особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива (ВУТ) на основе белорусских бурых углей и антрацитового штыба (Украина). Экспериментально подтверждены последовательность и рассчитанная по предложенной модели продолжительность стадий горения ВУТ в зависимости от вида исходного твердого топлива и температуры слоя. Изучены температурные и временные зависимости содержания оксидов серы, азота и углерода в дымовых газах.

**Ключевые слова:** водоугольное топливо, кипящий слой, сжигание, кавитационно-вихревая технология, выбросы оксидов серы, азота, углерода.



---

---

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

---

---

УДК 621.311.25:621.039

### Ведение водно-химического режима II контура АЭС с ВВЭР на энергоблоках с отсутствием медьсодержащих сплавов

© 2014 г. Тяпков В.Ф.

ОАО ВНИИАЭС<sup>1</sup>

e-mail: vladimirtyapkov@yandex.ru

Внедрение водно-химического режима (ВХР) II контура с дозированием аминов началось в России в 2005 г., и за прошедшие семь лет на этот режим были переведены все энергоблоки АЭС с ВВЭР-1000. Внедрение ВХР с дозированием аминов позволило снизить поступление продуктов коррозии конструкционных материалов в объем парогенераторов и уменьшить скорость коррозионно-эрозионного износа трубопроводов и оборудования. В статье приведены данные по ведению водно-химического режима на энергоблоках АЭС с ВВЭР-1000 при отсутствии во II контуре оборудования, выполненного из медьсодержащих сплавов. Представлены статистические данные по ведению аммиачно-морфолинового и аммиачно-этаноламинового ВХР на действующих энергоблоках ВВЭР-1000 нового поколения с повышенным значением водородного показателя рН. Приведены значения протечек охлаждающей воды в конденсаторах турбин, трубная система которых изготавливается из нержавеющей стали или титанового сплава.

**Ключевые слова:** коррозионно-эрозионный износ, водно-химический режим, показатель рН, питательная вода.

---

---

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

---

---

УДК 543.07

### Алгоритмические возможности снижения времени измерения в анализаторах растворенного кислорода

© 2014 г. Родионов А.К., Маркичев П.Н.

ООО “Взор”<sup>1</sup>

e-mail: marka8888@yandex.ru

Рассматривается возможность использования алгоритмов прогнозирования временных процессов в измерительных приборах, в частности в анализаторах растворенного кислорода, осуществляющих измерения в микрограммовом диапазоне массовых концентраций. Ставится задача уменьшения времени получения оценки концентрации кислорода при работе в условиях переходного процесса: большие концентрации – малые концентрации. Предложен алгоритм обработки сигналов, позволяющий сформировать новый временной процесс получения текущих значений концентраций кислорода, которые быстрее сходятся к установившемуся значению. Эффективность предложенного алгоритма исследуется на примере трех типичных датчиков, значительно различающихся по быстродействию. Показано, что для относительно медленных датчиков, переходный процесс которых может продолжаться сотни секунд, возможно существенное (до 2 раз) сокращение длительности процедуры измерения.

**Ключевые слова:** анализатор растворенного кислорода, алгоритм прогнозирования, переходный процесс большие концентрации – малые концентрации, пороговый контроль.

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

УДК 621.165:621.438:621.65.03

### Исследование развития асинхронного обката ротора по статору в условиях разного быстродействия систем защиты турбоагрегата

© 2014 г. Шатохин В.Ф.

ОАО “Калужский турбинный завод”<sup>1</sup>

e-mail: shatokhin\_vf@ktz.power-m.ru

Рассматривается возможность стабилизации развивающегося асинхронного обката ротором статора в условиях срабатывания систем защиты разного быстродействия. Развитие асинхронного обката ротором статора возможно в случае контакта вращающегося ротора со статором при больших амплитудах вибрации, вызываемых внезапной разбалансировкой ротора, его вынужденными или самовозбуждающимися колебаниями и другими причинами. Опасность асинхронного обката связана с практически мгновенным развитием самовозбуждающихся колебаний ротора при контакте со статором и опасными для целостности турбоагрегата (ТА) амплитудами колебаний ротора, силами взаимодействия между ротором и статором. Предполагается, что средства защиты ТА срабатывают после подачи сигнала о превышении допустимого уровня вибрации и приводят к отключению генератора от сети, прекращению подачи рабочего тела в проточную часть, прекращению действия момента на валу ТА. Быстродействие системы защиты определяется некоторым временем  $t = \Delta B \text{time}$ , которое теряется на срабатывание ее элементов от начала развития события (подачи сигнала) вплоть до закрытия стопорных клапанов. Приведены графики изменения основных параметров обката в зависимости от времени  $\Delta B \text{time}$ . Показано, что время быстродействия существующих средств защиты не обеспечивает эффективную возможность погашения явления обката, хотя использование электрической системы защиты (с быстродействием 0.40–0.45 с) может положительно сказаться на определенной стабилизации амплитуд колебаний при обкате и сглаживании его опасных последствий. Увеличение потерь энергии в системе ротор–статор (особенно в статоре), соблюдение рекомендаций системы предотвращения катастроф агрегатов (СПКА) являются эффективной мерой смягчения последствий обката ротора по статору.

**Ключевые слова:** ротор, статор, внезапная разбалансировка ротора, обкат ротора по статору (синхронный или асинхронный), коэффициенты контактной жесткости, быстродействие систем защиты турбоагрегата.

---

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

---

УДК 681.5

### Оптимальная настройка системы управления для объекта второго порядка с запаздыванием

© 2014 г. Голинко И.М.

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”<sup>1</sup>

e-mail: igor.golinko@conislab.net

Рассматривается инженерный метод оптимизации параметров ПИ- и ПИД-регуляторов для объекта управления второго порядка с запаздыванием. Для оптимизации системы управления предложен интегральный критерий качества с минимизацией управляющего воздействия, который отличается от существующих корректным учетом управляющего воздействия на технологический процесс. Это позволяет минимизировать расход материальных и/или энергетических ресурсов, при этом ограничивается износ и увеличивается срок службы регулирующих устройств. С использованием теории оптимизации численно подтверждена унимодальность предложенного критерия качества для задач оптимальной настройки регулятора. Для одноконтурной системы управления с помощью расчетных методов определена функциональная взаимосвязь оптимальных параметров регулятора от динамических свойств объекта управления. Проведено сравнение результатов моделирования переходных процессов в системе управления с использованием предложенных и существующих функциональных зависимостей. Расчетные формулы отличаются от существующих простой структурой, высокой точностью поиска оптимальных параметров регулятора, обеспечивают эффективное управление и могут применяться для настройки систем автоматического управления (САУ) в широком диапазоне динамических свойств объекта управления. Полученные расчетные формулы рекомендуются к применению специалистам по автоматизации для проектирования новых систем управления и оптимизации существующих.

**Ключевые слова:** оптимизация, квадратичный критерий, модульный критерий, ПИ-регулятор, ПИД-регулятор, объект управления второго порядка с запаздыванием, система управления.

---

---

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

---

---

УДК 621.039.59

## Некоторые методы повышения эффективности тепловыделяющих сборок

© 2014 г. Болтенко Э.А.

ОАО “Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций”<sup>1</sup>

e-mail: boltenko@erec.ru

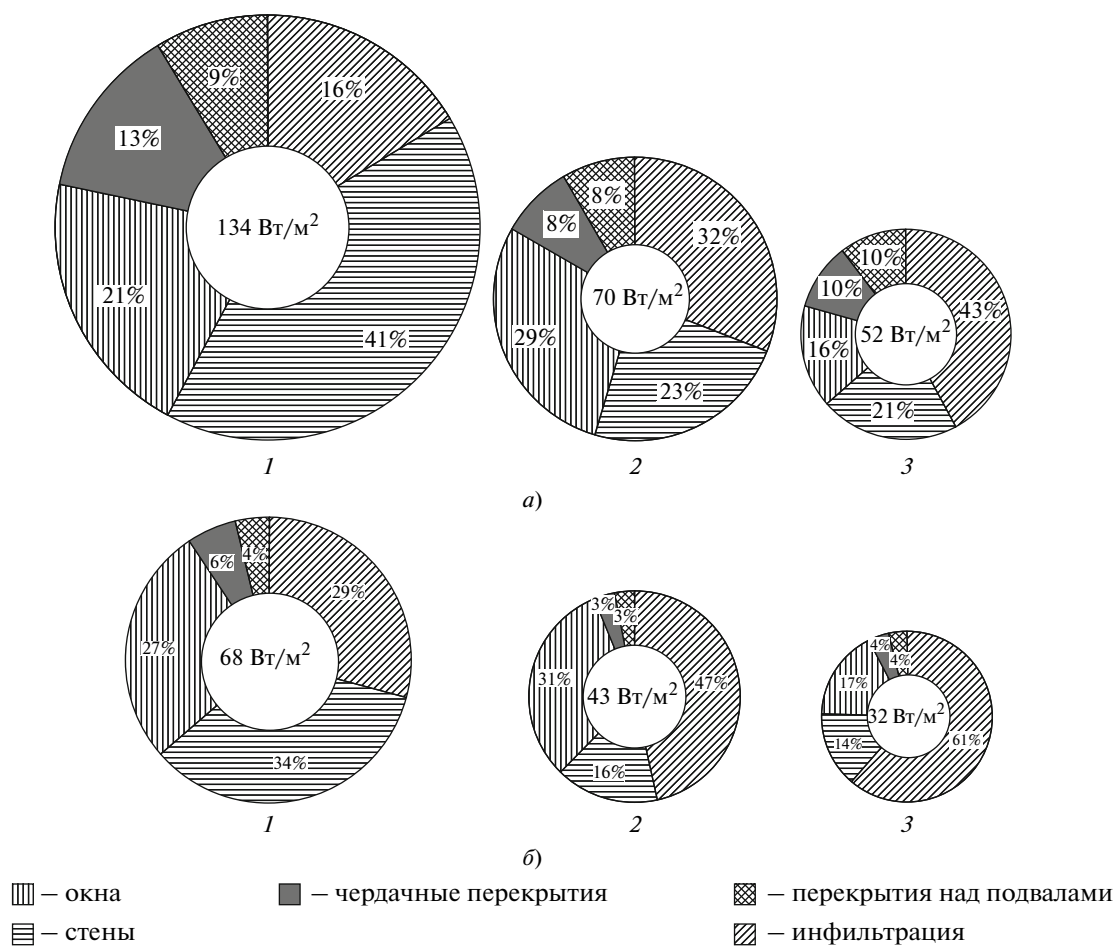
**Повышение эффективности тепловыделяющих сборок (ТВС) реакторных установок (РУ) возможно при внедрении новых технических решений, обеспечивающих снижение неравномерности распределения теплоносителя по сечению сборки, увеличение интенсивности теплосъема на выпуклых теплоотдающих поверхностях и запасов до кризиса теплоотдачи. Рассмотрены технические решения, на основе которых возможно повышение теплосъема на выпуклых теплоотдающих поверхностях и запасов до кризиса теплоотдачи в ТВС РУ. Представлено описание альтернативной схемы теплосъема, использование которой позволяет значительно увеличить энергонапряженность РУ и существенно снизить максимальную температуру твэла.**

**Ключевые слова:** тепловыделяющая сборка, интенсивность теплосъема, методы интенсификации теплосъема, выпуклая поверхность, кризис теплоотдачи, критический тепловой поток.

## Поправка

DOI: 10.1134/S0040363614070121

В статье Филиппова С.П., Дильман М.Д., Ионова М.С. “Оптимальные уровни тепловой защиты жилых зданий для климатических условий России”, опубликованной в № 11 за 2013 г., обозначения на рис. 5 следует читать так:



**Рис. 5.** Структура тепловых потерь индивидуальных (двухэтажных) (а) и многоквартирных (девятиэтажных) (б) зданий (при  $t_{н,р}$  для условий Москвы). Обозначения см. рис. 4

## Поправка

DOI: 10.1134/S004036361407011X

В статье "Концепция продления срока эксплуатации энергоблоков с ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС", опубликованной в № 2 за 2014 г., список авторов следует читать так:

© 2014 г. Асмолов В.Г.<sup>1</sup>, Поваров В.П.<sup>2</sup>, Федоров А.И.<sup>2</sup>, Витковский С.Л.<sup>2</sup>, Беркович В.Я.<sup>3</sup>,  
Четвериков А.Е.<sup>3</sup>, Мозуль И.А.<sup>3</sup>, Семченков Ю.М.<sup>4</sup>, Суслов А.И.<sup>4</sup>