

I Международная  
научно-практическая  
конференция студентов и  
аспирантов



«СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ  
КОТЛОСТРОЕНИЯ»

Барнаул 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова»  
Сибирская генерирующая компания (СГК)  
ООО «ПроЭнергоМаш-Проект»  
ООО НПО «СибЭнергоАльянс»  
ОАО БФ ТКЗ «Красный котельщик»

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ КОТЛОСТРОЕНИЯ**

**Материалы I международной научно-практической конференции  
студентов и аспирантов**

16 марта 2017 г.

Изд-во АлтГТУ  
Барнаул • 2017

УДК 621.18  
ББК 31.361  
С 568

**Современные тенденции котлостроения** : материалы I международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2017. – 144 с.

ISBN 978-5-7568-1228-2

Представлены материалы I международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Современные тенденции котлостроения» (16 марта 2017 г.).

Направления работы конференции: 1) актуальные проблемы и современные тенденции развития котлостроения; 2) инновационно-технологическое обеспечение котлостроения; 3) математическое и компьютерное моделирование в котлостроении; 4) автоматизированное проектирование в котлостроении; 5) котлы специальных конструкций.

Издание предназначено для научных и инженерно-технических работников, а также для аспирантов, магистров и бакалавров технических вузов.

Редакционная коллегия:

Жуков Е.Б.,  
Фурсов И.Д.,  
Меняев К.В.,  
Паутова Е.Е.

ISBN 978-5-7568-1228-2

© Авторы публикаций, 2017  
© Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Жуков Е.Б.</b> Первая международная научно-практическая конференция студентов и аспирантов	5
<b>Алиаров Б.К., Мергалимова А.К.</b> О преимуществах использования газа для растопки котлоагрегатов	6
<b>Бородин Р.Г., Супрун Н.Ю., Устинов В.А., Меняев К.В., Паутова Е.Е.</b> Использование кородеревесных отходов в водогрейных котлах	10
<b>Гаврин Н.С., Лебедев А.С., Жуков Е.Б., Меняев К.В.</b> Технология сжигания древесных топлив и древесных отходов	14
<b>Илясова А.С., Любимова Л.Л., Фисенко Р.Н., Кулеш Р.Н.</b> Распределение микротвердости в сварном узле из разнородных сталей	21
<b>Карманов А.Е., Никифоров А.С., Мусабеков Р.А.</b> Исследование предела прочности огнеупорных и теплоизоляционных материалов при повышенных температурах	25
<b>Кокшарев О.М., Гиль А.В.</b> Анализ применения численных алгоритмов для решения задач моделирования топочной среды в котлах с циркулирующим кипящим слоем	28
<b>Красилов К.А., Меняев К.В.</b> Проблемы сжигания лугги подсолнечника в паровых котлах	36
<b>Крюков Д.А., Воронцова Е.С.</b> Обобщенное представление работы с энергетическим топливом на крупных объектах энергетики	42
<b>Лихач С.А., Кулеш Р.Н., Илясова А.С.</b> Методология оценки пригодности к утилизации золошлаков ТЭС	44
<b>Назаров А.А., Жуков Е.Б., Таймасов Д.Р., Меняев К.В.</b> Автоматические угольные котлы	49
<b>Паутова Е.Е., Гладких А.А., Жуков Е.Б., Меняев К.В.</b> Система удаленной диспетчеризации на примере модульной котельной установки	58
<b>Пузырев М.Е., Лихачева Г.Н.</b> Котел с вихревой топкой для сжигания лугги подсолнечника	67
<b>Рыбалов В.Е., Меняев К.В., Паутова Е.Е.</b> Обеспечение отрасли энергомашиностроения экологически чистым топливом	72
<b>Сарсембенев Е.К., Меняев К.В.</b> Явление псевдоожигения в работе экспериментальной установки FB-2	74
<b>Таймасов Д.Р., Пермяков Е.Е., Сеначин П.К.</b> Моделирование процесса газификации угля в газогенераторе плотного слоя обращенного процесса	81

<b>Тиханов М.В., Меняев К.В., Паутова Е.Е.</b> Применение САПР для решения прочностных задач в котлостроении	88
<b>Тихонов Е.В., Меняев К.В., Паутова Е.Е.</b> Твердые бытовые отходы как альтернативный источник энергии, приемлемый для массового использования жителями и организациями города Барнаула	94
<b>Туманов М.С., Любимова Л.Л.</b> Рентгенодилатометрические исследования сплава циркония Э–125 в процессе термоциклирования в вакууме	99
<b>Филин А.Ю., Барташук Е.Г., Глушаков А.М., Межов Е.А.</b> Модернизация котлов БКЗ-75-39ФБ с установкой муфельизированных предтопок	106
<b>Хуторненко С.Н.</b> Развитие технологии ступенчатого подогрева конденсата в котлах-утилизаторах для парогазовых энергоблоков	114
<b>Часовских А.А., Меняев К.В., Паутова Е.Е.</b> Пути минимизации потерь тепловой энергии, повышение энергетической эффективности теплоснабжающих организаций	127
<b>Шаи А.К., Приходько Е.В.</b> Анализ влияния длительности горения топливных брикетов на экономичность работы котлов	130
<b>Шевцов А.П., Меняев К.В., Паутова Е.Е.</b> Применение водоугольного топлива на Алтайской КЭС	135
<b>Шпехт А.В., Тиханов М.В., Жуков Е.Б., Меняев К.В., Паутова Е.Е.</b> Использование сельскохозяйственных отходов в водогрейных котлах	138
<b>Щедров Е.А., Визгавлюст Н.В.</b> Исследование образования оксидов азота в топочной камере котла БКЗ–320–140 от избытка воздуха	141

# **I МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ КОТЛОСТРОЕНИЯ»**

**Е.Б. Жуков**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Уважаемые коллеги! Первая международная научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Современные тенденции котлостроения» проходит 16 марта 2017 г. в столице Алтайского края – городе Барнауле. Конференция базируется на кафедре «Котло- и реакторостроение» при Алтайском государственном техническом университете.

Научно-практическая конференция посвящена актуальным проблемам и современным тенденциям в области проектирования и производства котельного оборудования, инновационным подходам к технологии сжигания традиционных и альтернативных видов топлива, организации процесса проектирования и производства, повышению экологических показателей и эффективности работы котельного оборудования.

Направления работы конференции посвящены следующим вопросам:

1. Актуальные проблемы и современные тенденции развития котлостроения.
2. Инновационно-технологическое обеспечение котлостроения.
3. Математическое и компьютерное моделирование в котлостроении.
4. Автоматизированное проектирование в котлостроении.
5. Котлы специальных конструкций.

Организационный комитет включает в себя ведущих ученых и специалистов в области котлостроения.

Председатель: Пузырев Е.М. – д.т.н., доцент, заместитель директора по научной работе ООО «ПроЭнергоМаш-Проект».

Зам. председателя: Жуков Е.Б – к.т.н., заведующий кафедрой «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

Члены оргкомитета: Лузанов И.В. – директор БФ ООО «Сибирская генерирующая компания», директор ОАО «Барнаульская ТЭЦ-3»;

Маслов К.В. – главный конструктор ООО «Энергомаш инжиниринг»; Коломенский С.И. – главный конструктор ООО «Сибэнергомаш-БКЗ»; Петухов В.Г. – технический директор ОАО БФ ТКЗ «Красный котельщик»; Фурсов И.Д. – к.т.н., профессор кафедры «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова; Меньев К.В. – доцент кафедры «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова; Лихачева Г.Н. – к.т.н., доцент кафедры «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

Технический секретарь: Паутова Е.Е. – ассистент кафедры «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

На конференцию «Современные тенденции котлостроения» представлено 26 докладов от представителей различных организаций из городов Российской Федерации (Барнаул, Новосибирск, Томск), Казахстана (Алматы, Павлодар) и Белоруссии (Минск):

- Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова;
- Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
- ООО «ЗиО-КОТЭС»;
- Алматинский университет энергетики и связи;
- Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова;
- Белорусский котельный завод ООО «Летерм».

Благодарим всех принявших участие в конференции, желаем творческих успехов и плодотворных идей. До встречи на конференции «Современные тенденции котлостроения – 2018»!

## **О ПРЕИМУЩЕСТВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗА ДЛЯ РАСТОПКИ КОТЛОАГРЕГАТОВ**

**Б.К. Алияров, А.К. Мергалимова**  
Алматинский университет энергетики и связи  
г. Алматы, Казахстан

Ключевые слова: котельный агрегат, топка, топливо, мазут, мазутное хозяйство, газ.

Аннотация: Безмазутная растопка котлоагрегатов безусловно имеет много преимуществ. Мазут является дорогостоящим топливом, причем требующим значительных сложностей и затрат в процессе подготовки и эксплуатации мазутного хозяйства. Поэтому использова-

ние газа для растопки и стабилизации горения факела и экономически и экологически оправдано.

На всех ТЭС и крупных котельных, сжигающих природный газ и/или уголь, предусматривается резервное, аварийное и растопочное топливо. Как правило, этим топливом является мазут. Резервное мазутное хозяйство создается на ТЭС и котельных, для которых основным топливом является газ, а мазут сжигается в периоды отсутствия газа (зимой). Аварийное мазутное хозяйство предусматривается на электростанциях и котельных, для которых основной и единственный вид топлива – газ, а мазут используется только при аварийном прекращении подачи газа. Растопочное мазутное хозяйство имеется на всех электростанциях и котельных с камерным сжиганием твердого топлива. Оно используется также для снабжения мазутом пусковой котельной. В случае установки на таких электростанциях газомазутных пиковых водогрейных котлов их мазутное хозяйство объединяется с растопочным. Пусковая котельная снабжается мазутом соответственно от основного или растопочного мазутного хозяйства.

Мазут обладает рядом несомненных качеств как топливо:

- высокая теплотворность – 9500 ккал/кг;
- малое содержание золы – 0,3-0,5%;
- возможность получения светящегося пламени, обеспечивающего высокий радиационный теплообмен в топочном пространстве;
- возможность организации при определенных условиях, его сжигание в малых по габаритам топках.

Но мазут, как топливо, имеет и ряд серьезных недостатков:

- нестабильный состав каждой партии мазута – от близкого к нефти до преимущественно в виде высоковязких крекинг-остатков, в последнем случае быстро закоксовываются форсунки, затягивается процесс горения;
- повышенные требования к технике безопасности. Например, температура вспышки не выше 100–120 °С;
- высокое содержание серы, около 3,5 %;
- высокая температура застывания +(25–30 °С);
- высокая цена.

Но наиболее существенный недостаток мазута, как резервного и растопочного топлива, заключается в неудобствах, связанных с его эксплуатацией, вызванных многоступенчатостью в подготовке мазута к использованию. Загрузка в цистерны и последующая выгрузка из цистерн требует его разогрева до состояния с приемлемой текучестью, что, как правило, достигается за счет использования водяного пара.

Это означает, что на пунктах загрузки и выгрузки мазута необходимо иметь источник пара с требуемой температурой.

Помимо подогрева и перемешивания в резервуарах, также необходимо поддерживать циркуляцию мазута по всему тракту его движения, от хранилища до форсунки, для обеспечения, при необходимости, возможности подачи мазута в топку. Следовательно, подготовка мазута к сжиганию – сложный и трудоемкий процесс, при котором необходимо обеспечить:

- невысокое (до 3 %) содержание воды в мазуте;
- глубокое перемешивание воды с мазутом;
- необходимые температуры подогрева мазута.

Перед подачей мазута в топочную камеру через форсунку его необходимо раздробить специальными устройствами на мелкие капли. Вся эта система потребляет до 4–6 %, а в отдельных случаях до 10 %, от общей производительности котла (так называемые собственные нужды), которые сопоставимы с затратами на измельчение угля до пылевидного состояния. Технологически вполне возможна замена этой сложной системы применения мазута на сжиженный или сжатый природный газ (при их наличии в республике в требуемом количестве). Перевод резервного топлива на природный газ будет особенно востребован для котельных, т. к. они, как правило, размещаются внутри населенного пункта, а мазут является существенным загрязнителем атмосферы. Дымовые газы, образующиеся при сжигании мазута, содержат оксиды азота, соединения ванадия и натрия, газообразные и твердые продукты неполного сгорания. Кроме того, наряду с перечисленными трудностями подготовки к сжиганию мазута в топке котла, в процессе эксплуатации мазутного хозяйства образуются сточные воды, загрязненные мазутом.

Газ как топливо имеет важные преимущества перед мазутом: у него высокая теплотворная способность, более простая технология подготовки к сжиганию и подачи в топку, что существенно снижает затраты. Необходимо, однако, отметить, что распространенная точка зрения на природный газ как на экологически чистое топливо не вполне верна. Во-первых, в газе обычно содержатся соединения серы, которые при горении превращаются в диоксид серы. Во-вторых, получающийся при горении  $\text{CO}_2$  усиливает парниковый эффект, приводящий к повышению температуры атмосферы. В-третьих, высокотемпературное горение газа в топках котлов электростанций сопровождается частичным окислением азота воздуха. В результате в дымовых газах электростанций появляются токсичные оксиды азота. Тем не менее,

природный газ является более чистым топливом по сравнению с мазутом.

Для использования в качестве резервного топлива сжатый и сжиженный природный газ полностью равноценны между собой. При рассмотрении количества топлива в единице объема сжиженный газ обладает некоторым преимуществом, в одинаковом объеме содержится сжиженного природного газа (СПГ) в 3 раза больше, чем компримированного природного газа (КПГ) при давлении 20 МПа. Сжиженный природный газ производят путем охлаждения природного газа, состоящего в основном из метана, до точки сжижения  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В процессе сжижения от газа отделяются и отфильтровываются кислород, сера, азот, двуокись углерода и вода. Поэтому полученный продукт отличается высокой чистотой. После сжижения газ транспортируется в жидком состоянии и в пункте назначения может быть опять восстановлен в газообразную фазу на специальных СПГ терминалах (регазификация). Использование сжиженного газа технологически сложнее, кроме того, нет возможности регенерации части энергии, израсходованной на сжижение природного газа с охлаждением до требуемых низких температур. Применение компримированного природного газа технологически практически совпадает с получением газа из магистральной сети, для ТЭС на природном газе. В дополнение к этому, при установке воздушных турбин на выходе сжатого газа из объемов хранения, есть возможность «вернуть» часть электрической энергии, затраченной на сжатие газа.

### Список литературы

1. Адамов, В. А. Сжигание мазута в топках котлов / В. А. Адамов. – Л. : Недра. 1989. – 304 с.
2. Белосельский, Б. С. Подготовка и сжигание высокоподогретых мазутов на электростанциях и в промышленных котельных / Б. С. Белосельский, Б. Ф. Глухов. – М. : Изд-во МЭИ, 1993. – 167 с.
3. Лялин, К. В. Тенденции развития резервуаростроения / К. В. Лялин // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2000. – № 12.
4. Рудаченко, А. В. Газотурбинные установки для транспорта природного газа: учебное пособие / А. В. Рудаченко, Н. В. Чухарева; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во ТПУ, 2010. – 217 с.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОРОДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ

**Р.Г. Бородин, Н.Ю. Супрун, В.А. Устинов,  
К.В. Меняев, Е.Е. Паутова**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: водогрейные котлы, кородревесные отходы.

Аннотация: Выявление преимуществ и недостатков при использовании древесных отходов в качестве топлива.

На предприятиях в России нередко стоит проблема утилизации производственных древесных отходов. Около половины всей древесины, поступающей на производство, теряется в виде опилок, обрезков и коры. В Алтайском крае находится более ста предприятий, занимающихся производством деревянных изделий: мебельные фабрики, строительные компании, и др.

Большая часть отходов может использоваться вторично, но в любом случае остается та часть, которая подлежит выбросу в отвал на свалку. Одним из способов их утилизации является сжигание отходов в водогрейных котлах. Целью такого сжигания может быть обогрев производственных или жилых помещений в зимнее время.

Основными преимуществами при сжигании дерева являются их доступность, возобновляемость, экологичность, возможность сжигания без дополнительной подготовки. Основной проблемой при сжигании древесных отходов является их высокая влажность в исходном состоянии. Эта проблема решается предварительной подготовкой топлива или использованием специальных топочных устройств.

Для повышения характеристик топлива, можно дополнительно подготовить топливо к сжиганию. Для этого древесные отходы спрессовывают в pellets (рисунок 1).

Они удобны для перемещения и хранения, также подобная обработка позволяет снизить влажность топлива перед использованием. Недостатком такого топлива является его цена. Одна тонна такого топлива имеет рыночную цену около 5000 рублей. Для сравнения, рыночная цена на каменный и бурый уголь составляет около 2500 рублей (цена зависит от качества топлива). Целесообразность покупки pellets есть только в том случае, если нет возможности использовать другое топливо (например, при высокой стоимости перевозки). Также

вполне возможно подготавливать топливо самостоятельно, если у предприятия имеется такое оборудование. В таком случае цена на топливо будет ниже.



Рисунок 1 – Древесные пеллеты

Для сжигания древесных отходов (рисунок 2) необходимы специальные, спроектированные под данный вид топлива, котлы, но возможно также переоборудовать котельную установку. При реконструкции котла, необходимо сконструировать топку так, чтобы на выходе из нее было как можно меньше несгоревших частиц. При их попадании в дымоход или золоуловитель, они могут вызвать пожар. Для реконструкции газового котла, помимо переработки горелочных устройств и топочной камеры, необходимо включить в схему котла золоуловитель.



Рисунок 2 – Кородревесные отходы

Древесные отходы обычно сжигаются в вихревых или слоевых топочных камерах. Предпочтительны варианты с вихревой топкой, т. к. в таком случае мелкие частицы топлива не будут попадать в систему шлакоудаления, поэтому потери тепла с механическим недожогом будут меньше. Пеллеты обычно сжигаются в слоевых топках. Слойные топки имеют простую конструкцию, и соответственно меньшую стоимость и простоту обслуживания.

Для определения топливных характеристик кородревесных отходов были взяты три разные пробы:

- подготовленные к сжиганию пеллеты (рисунок 1);
- кородревесные строительные отходы (рисунок 2);
- кородревесные строительные отходы, обработанные защитными средствами.

В топливной лаборатории были определены такие характеристики, как:

- влажность (характеризует содержание воды в топливе);
- выход летучих (характеризует воспламеняемость топлива);
- зольность (характеризует содержание негорючих минеральных веществ в топливе).

Исследование характеристик проводилось по специальным методикам [1]. Все исследуемые величины являются аналитическими.

Для древесины, средняя низшая теплота сгорания (с учетом затрат тепла на испарение влаги)  $Q_i^d = 11$  МДж/кг.

Таблица 1 – Сравнение характеристик топлив

Характеристика	Ед. изм.	Пеллеты	Строительные отходы	Строительные отходы (обработанные)
Влажность, $W^a$	%	5,1	5,2	5,8
Зольность, $A^a$	%	0,3	0,4	6,5
Выход летучих, $V_{daf}$	%	71,1	77,4	64,2
Рыночная стоимость	руб/т	5000	условно бесплатно	условно бесплатно

В ходе исследования выяснилось, что обработанная древесина имеет повышенную зольность и более низкий выход летучих. Возможно возникнут проблемы при растопке котла и дальнейшем сжигании топлива. Поэтому сжигать такое топливо не рекомендуется.

Для оценки топливных качеств древесных отходов, авторы исследования произвели сравнение исследуемого топлива с бурым углем Назаровского месторождения (Канско-Ачинский бассейн). Данный тип угля широко используется в Алтайском крае. Его характеристики и характеристики пеллет, используемые в расчетах, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики для расчетов водогрейного котла

Характеристика	Ед. изм.	Пеллеты	Назаровский 2Б
Влажность, $W^T$	%	8	39
Зольность, $A^T$	%	1,84	7,9
Выход летучих, $V^{daf}$	%	55	47
Низшая теплота сгорания, $Q_i^T$	МДж/кг	11	12,85
Рыночная стоимость	руб/т	5000	1200

Для оценки эффективности использования кородревесных отходов (пеллетов) в водогрейных котлах, авторы работы выполнили расчет теплового баланса водогрейного котла [2], имеющего следующие параметры:

- мощность 6 МВт;
- температура воды на входе в котел 70 °С;
- температура воды на выходе из котла 115 °С;
- давление воды 0,7 МПа.

При расчетах принималось, что конструктивно котлы одинаковы, и потери тепла от механического недожога в них равны. В реальности котельные установки, работающие на разном топливе, имеют разную конструкцию из-за различий размеров частиц и их свойств, и, следовательно, механический недожог и КПД котла будут разными.

В результате расчета, было выявлено, что при сжигании пеллетов, расход топлива в котле, при сравнении с котлом, работающим на угле (Назаровский 2Б), увеличился на 21 %.

Несмотря на такое увеличение расхода топлива, экономически это может быть выгодно, так как, несмотря на высокую стоимость пеллет, их транспортировка обойдется существенно дешевле. При использовании неподготовленных древесных отходов непосредственно на производствах, возникают трудности при сжигании из-за высокой влажности, однако их стоимость почти бесплатна, и иногда будет дешевле и полезнее их утилизировать, чем выбрасывать на свалку и получать за это штрафы. Если предположить, что данный водогрейный котел будет работать по 5000 часов в год на заданном угле, то стои-

мость топлива в год составит около 12 млн. руб. без учета стоимости доставки. Цена на новый водогрейный котел, работающий на древесной щепе, составляет примерно 11 млн. рублей. То есть переход на сжигание древесных отходов окупится меньше чем за год. При реконструкции уже действующего твердотопливного или газового котла, окупаемость перехода будет выше. Окончательно сделать вывод об экономической эффективности можно только после точных технико-экономических расчетов.

### Список литературы

1. Жуков, Е. Б., Меняев, К. В. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Физико-химические свойства и подготовка к сжиганию органических топлив» для студентов направления 141100 «Энергетическое машиностроение» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2013. – с. 60.

2. Жуков, Е. Б., Меняев, К. В. Водогрейные котлы : учеб. пособие / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 140 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ СЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ТОПЛИВ И ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ

**Н.С. Гаврин<sup>2</sup>, А.С. Лебедев<sup>1</sup>, Е.Б. Жуков<sup>2</sup>, К.В. Меняев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ООО «Летерм» г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

Ключевые слова: альтернативные топлива, вихревое сжигание, древесные отходы.

Аннотация: В работе рассмотрены предпосылки использования древесных отходов в качестве топлива в малой энергетике. Описаны сложности утилизации таких отходов. Приведены результаты экспериментов по сжиганию нетрадиционного топлива, представлены разработки котельных агрегатов с высокими экологическими показателями, с применением многократной циркуляции топлива и результаты их численного моделирования.

В последнее время, в энергетике таких стран как Республика Беларусь, и ряда регионов Российской Федерации, с целью снижения затрат на топливо и минимизации выбросов парниковых газов, отме-

чается рост количества переводов коммунальной энергетики с традиционных видов топлива на альтернативное, возобновляемое.

В республике Беларусь в течение нескольких лет достаточно успешно реализуется программа МВТ (Местные виды топлив), которая позволяет проводить модернизацию котельных и топочных устройств котлов на сжигание древесного топлива и/или торфа. Помимо специально приготавливаемого возобновляемого топлива в РБ, как и в Российской Федерации, на сегодняшний день на предприятиях деревообрабатывающей и лесозаготовительной промышленности, образуется большое количество кородревесных отходов (КДО), которые уже непригодны для вторичной переработки и сваливаются в отвалы (рисунок 1).



Рисунок 1 – Оперативный склад топлива (КДО), летом и зимой.

Использование таких отходов в качестве энергетического топлива вполне логично, так как оно имеет ряд преимуществ: является возобновляемым; имеет минимальные затраты на его доставку от поставщика; исчезает необходимость оплаты штрафов от утилизации отходов в отвалах. Однако в древесных отходах содержание влаги может достигать 50–60 %, что характеризует данный вид топлива как низкосортное, поэтому сжигание его в обычных топочных устройствах неэффективно (рисунок 2). Большинство существующих на сегодняшний день топочных устройств не в состоянии обеспечить полное и экологически чистое выгорание данного топлива.

Сжигание в топках котлов малой и средней мощности измельченных древесных и растительных отходов представляет существенную проблему как из-за трудности удержания легких парусных частиц в процессе их выжигания, так и из-за возможности образования значительных отложений золы в топке и в котельных пучках. При выносе частиц из топки (рисунок 2) возникает опасность периодических по-

жаров в дымоходах и золоуловителях котельной установки по мере накопления в них недожога.



Рисунок 2 – Вынос несгоревшего топлива из дымовой трубы

В работе предлагается новое специальное топочное устройство (рисунки 3, 4), ориентированное на сжигание древесных и сельскохозяйственных отходов.

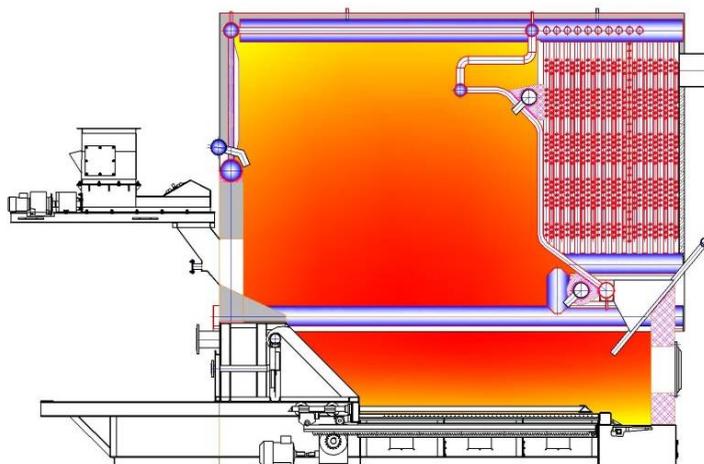


Рисунок 3 – Топочная камера котла КВм-5,0ДВО с топкой ТНФГ

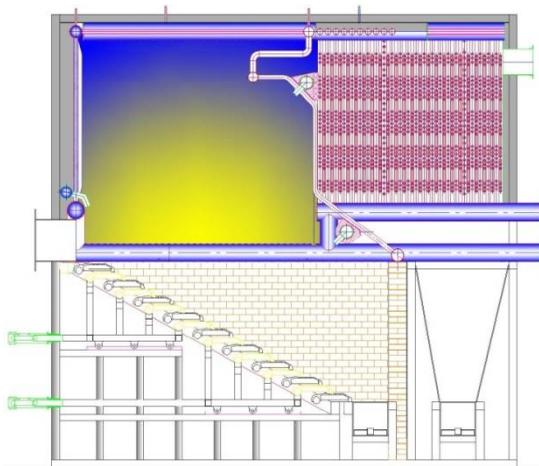


Рисунок 4 – Топочная камера котла КВм-5,0ДВО с наклонной топкой Белорусского котельного завода Летерм

На основании полученных расчетных и экспериментальных данных разработан ряд проектов котельных агрегатов с многократной циркуляцией топлива в топочной камере: котел КВм-5,0ДВО для сжигания древесных отходов (рисунок 3), с топочным устройством ТНФГ. И водогрейный блок котла КВм-5,0ДВО установленный на наклонно переталкивающую решетку производства Белорусского котельного завода (рисунок 4).

Конструктивной особенностью первого исполнения котельного агрегата (рисунок 3) является использование топки ТНФГ (рисунок 5).

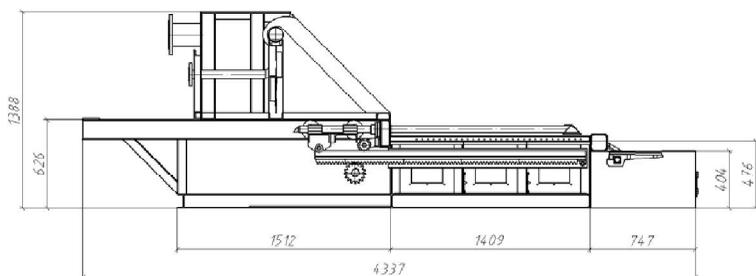


Рисунок 5 – Топка ТФГ-3,0 с блоком наклонных колосников

Удержание частиц топлива в топке до их глубокого выгорания должно обеспечиваться за счет аэродинамики топки. Соответственно целью расчетов является как выявление общей картины аэродинамической обстановки, так и ее детализация и выявление определяющих факторов по организации вихревого течения. Эти вопросы наиболее эффективно решаются при численном моделировании (рисунок 6).

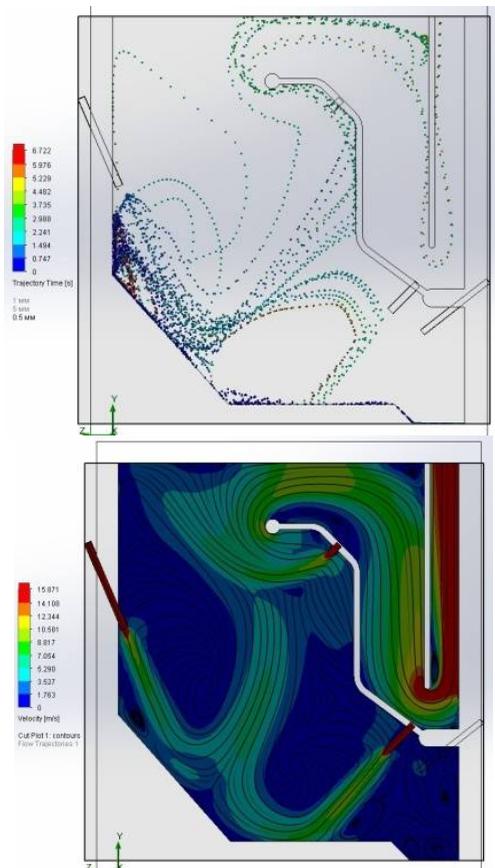


Рисунок 6 – Профиль топочной камеры котла КВм-5ДВО для сжигания КДО. Траектории движение частиц диаметром 0,5 мм в топке котла. Скорость движения частиц в топочном объеме котла

Схема сжигания – в вихревой топке с удержанием мелких частиц до практически полного выгорания над механизированной топкой с шурующей планкой. Используется факельно-слоевое сжигание с дожиганием уноса в потоке острого дутья. За счет глубокого выжигания горючих предлагаемый топочный процесс обеспечивает повышенную экономичность и высокие экологические показатели котла. Объединение слоевого и факельного сжигания обеспечивает взаимное поддержание горения и однородное заполнение всей топки факелом (рисунки 6, 7).

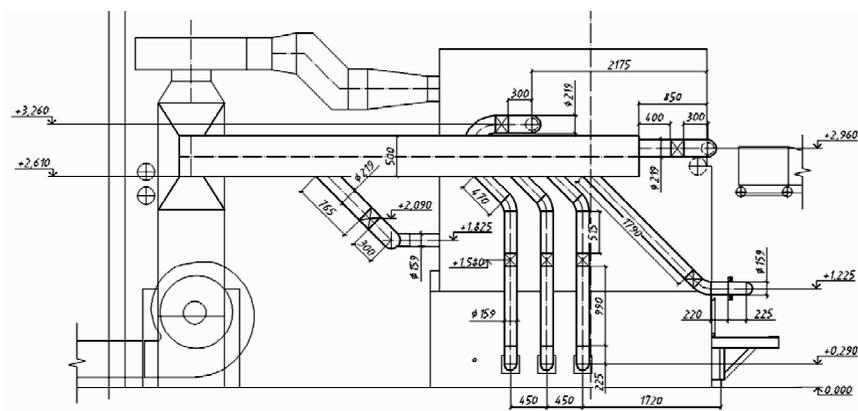


Рисунок 7 – Распределение воздуха в котельном агрегате.  
Воздуховоды котла

Котлы КВм-5,0 ДВО тепловой мощностью 5,0 МВт, а также котлы КВм-2,5 ДВО (2,5 МВт) для сжигания кородревесных отходов изготовлены и установлены в Республике Беларусь (рисунок 8). Проведены пусконаладочные испытания котлов. При пусконаладочных работах на котле КВм-2,5 ДВО при работе на относительно свежих КДО температура в топке достигла проектных значений, котел вышел на режим, удалось добиться устойчивого горения и работы котла в автоматическом режиме.

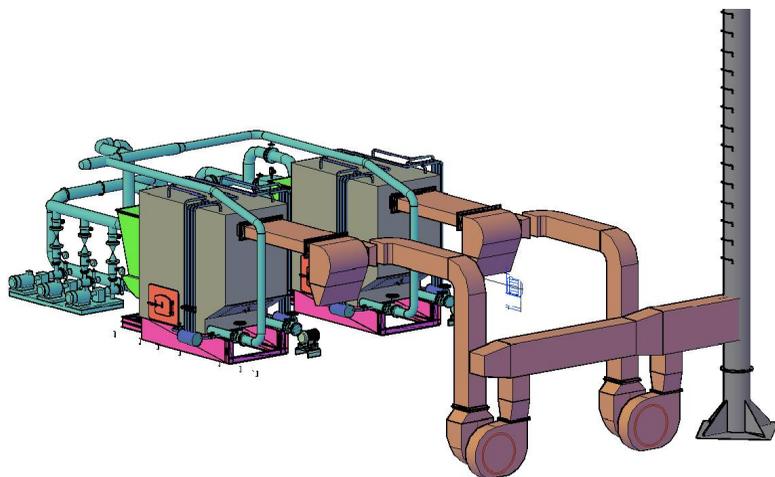


Рисунок 8 – 3D Компоновка котлов в котельной

В работе рассмотрены предпосылки использования древесных отходов в качестве топлива в малой энергетике. Описаны сложности утилизации таких отходов. Приведены результаты экспериментов по сжиганию нетрадиционного топлива, представлены разработки котельных агрегатов с высокими экологическими показателями, с применением многократной циркуляции топлива и результаты их численного моделирования.

### Список литературы

1. Красуцкий, Е. В. Исследование сжигания сельскохозяйственных отходов / Е. В. Красуцкий, И. Д. Фурсов, Е. Б. Жуков, И. С. Якимова, Е. М. Пузырев // Ползуновский вестник». – 2012. – № 3/1. – с. 47–50.

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОТВЕРДОСТИ В СВАРНОМ УЗЛЕ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ

**А.С. Илясова, Л.Л. Любимова, Р.Н. Фисенко, Р.Н. Кулеш**  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»  
г. Томск

Ключевые слова: сварной шов, сталь 12Х1МФ, сталь ДИ-59, микротвердость, ресурс.

Аннотация: экспериментальным путем показано распределение микротвердости в сварном узле сталей марок 12Х1МФ и ДИ-59. Приведены методики подготовки образцов и проведения эксперимента, обобщены и проанализированы экспериментальные данные

Строительство паровых котлов и ремонт их основных частей должны обеспечивать надежность и работу при рассчитанных параметрах и гарантировать безопасность на протяжении всего предполагаемого ресурса [1]. Как показывает практика, большая часть эксплуатируемых в настоящее время котлов отработали свой парковый ресурс. Безопасность и надежность в данном случае обеспечивается различного рода и объема ремонтами, в результате которых в большинстве случаев производится замена отдельных частей или целых ступеней испарения, либо отдельных пакетов. Необходимость замены в данных случаях определяется диагностированием технического состояния [2], сроки и объем которых строго регламентирован [3 и др.]. После проведения ремонтных работ в необходимых случаях производится термообработка, контроль неразрушающими методами, регламентируемые [4].

Учитывая, что некоторые котельные установки монтировались 30–40 лет назад и подверглись нескольким капитальным ремонтам и модернизациям, зачастую возникала ситуация замены имеющейся марки стали на более современную. Наиболее часто такая ситуация возникает при замене пакетов пароперегревателей, при этом может возникнуть ситуация, при которой обогреваемая их часть заменяется, а необогреваемая с коллекторами остается на месте.

Данная тенденция наблюдается при замене стали 08Х18Н10Т на более современную ДИ-59, сварной шов из сталей этих марок и является объектом исследования.

В процессе работы предполагается всестороннее изучение структуры и свойств объекта исследования, в данной статье приведены результаты измерения микротвердости образцов вдоль сварного соединения (рисунки 1, 2). Данные образцы вырезаны из сварного узла труб указанных сталей типоразмера 32х6, специально изготовленного при ремонте энергетического парового котла с соблюдением соответствующей технологии [4] в условиях монтажной площадки. В дальнейшем образец (рисунок 1) был доставлен в лабораторию для изучения, где из него было вырезано два продольных образца (рисунки 2, 3). Образцы вырезались вручную с принудительным воздушным охлаждением с целью не допустить локального перегрева и, как следствие, изменения свойств.



Рисунок 1 – Фрагмент трубы со сварным швом



Рисунок 2 – Рабочие образцы



Рисунок 3 – Схема изготовления образцов

Полученные образцы полировались до зеркальной поверхности и подвергались испытаниям на микротвердость по Виккерсу по ГОСТ 9450-76 с помощью прибора ПМТ-3.

Микротвердость определялась по всей длине образца с шагом 500 мкм, в зоне сварного шва шаг составил 100 мкм. Результаты приведены на рисунках 4–7.

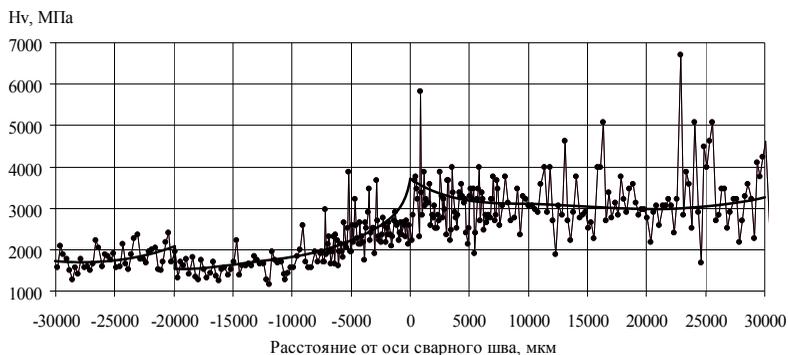


Рисунок 4 – Распределение микротвердости по длине образца

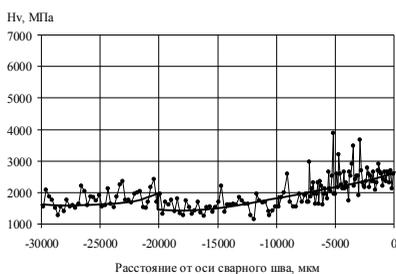


Рисунок 5 – Распределение микротвердости в стали 12X1MF

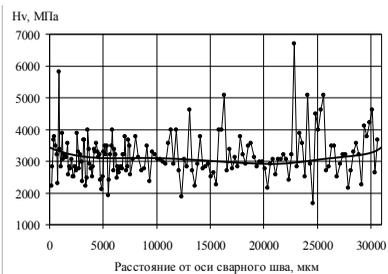


Рисунок 6 – Распределение микротвердости в стали ДИ-59

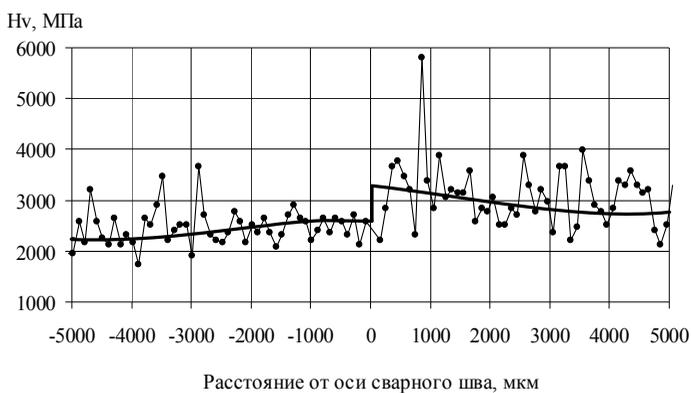


Рисунок 7 – Распределение микротвердости в зоне сварного шва

Анализ приведенных зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- Термическое влияние сварки со стороны стали 12Х1МФ привело к существенному расслоению стенки трубы по уровням микротвердости. В частности, на расстоянии порядка 30000 мкм от оси сварного шва микротвердость соответствует уровню 2000 МПа. Далее к оси сварного шва уровень микротвердости повышается и достигает максимума, равного 3500 МПа, в зоне сварного шва.

- Микротвердость стали ДИ-59 отличается осцилляциями от некоторого среднего значения 3000 МПа до 5000–6000–6500 МПа.

- Зона сварного шва характеризуется резким изменением микротвердости от 2500 МПа до 3500 МПа при переходе от одной стали к другой.

Так как микротвердость связана с прочностными свойствами [5], можно прогнозировать, что в процессе эксплуатации реального котла во всех зонах сварного шва возможно возникновение и развитие трещин вследствие явлений усталости, что приведет к снижению ресурса.

В заключение необходимо отметить, что расслоение по уровням микротвердости характерно для сварных узлов сталей разных марок и коррелирует с предыдущими исследованиями [6, 7]. Планируемые дальнейшие исследования позволят наблюдать за изменением свойств данного узла при физическом моделировании условий его работы на реальном котле, что в дальнейшем позволит получать прогнозные данные по взаимному поведению, работоспособности и сроках безотказной работы сварных узлов из сталей разных марок.

### Список литературы

1. Тихомиров, А. А. Некоторые аспекты диагностики технического состояния паровых котлов ДКВ и ДКВр / А. А. Тихомиров, С. В. Воронкин // Безопасность труда в промышленности. – 2007. – № 5. – с. 59–69.

2. РД 03-421-01. Методические указания по проведению диагностирования технического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов.

3. Федеральные нормы и правила. Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением. Утверждены 25.03.2014. Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору.

4. РД 153-34.1-003-01. Сварка, термообработка и контроль трубных систем котлов и трубопроводов при монтаже и ремонте оборудования электростанций (РТМ-1С). Утверждены приказом Минэнерго России от 02.07.01. № 197. Согласовано письмом Госгортехнадзора России от 25.05.01. №03-35/263.

5. Марковец, М. П. Определение механических свойств металлов по твердости / М. П. Марковец – М : Машиностроение, 1979. – 191 с. : ил.

6. Lyubimova, L., Fisenko, R., Breus, S., Tabakaev, R. The Investigation of Structure Heterogeneous Joint Welds in Pipelines (2016) MATEC Web of Conferences, 72, art. no. 01059.

7. Lyubimova, L. L. , Fisenko, R. N. , Tabakaev, R. B. , Tashlykov, A. A., Zavorin, A. S. X-ray investigation of a heterogeneous steel weld // Materials Science and Engineering: A. – 2017. –Vol. 682. – p. 248–254.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ ОГНЕУПОРНЫХ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

**А.Е. Карманов<sup>1</sup>, А.С. Никифоров<sup>2</sup>, Р.А. Мусабеков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Павлодарский государственный университет  
им. С. Торайгырова, г. Павлодар, Казахстан

Ключевые слова: предел прочности, огнеупоры и теплоизоляция, котлы, энергоэффективность.

Аннотация. В статье производится исследование предела прочности огнеупорных и теплоизоляционных материалов применяемых в ВТУ.

В котельных агрегатах используются различные теплоизоляционные материалы. Скорость прогрева и охлаждения всех этих материалов различна. При этом, несоблюдение временных рамок разогрева котла может привести к возникновению температурных напряжений, превышающих допустимые, и, как следствие, появлению микротрещин с дальнейшим разрушением материала. Например, слишком быстрый рост температуры при холодном старте чаще всего повреждает теплоизоляцию котла. Теплоизоляция имеет низкую теплопроводность и поэтому прогревается медленнее, чем металл.

Кроме того, пока топка еще не прогрета, материал обмуровки поглощает влагу из воздуха. Медленный прогрев необходим для того, чтобы постепенно просушить обмуровку и не допустить вскипание влаги, вызывающее растрескивание кирпичей. Стандартный график разогрева типового котла (рисунок 1) предусматривает повышение температуры воды, в среднем, не более чем на 55 °С в час [1].

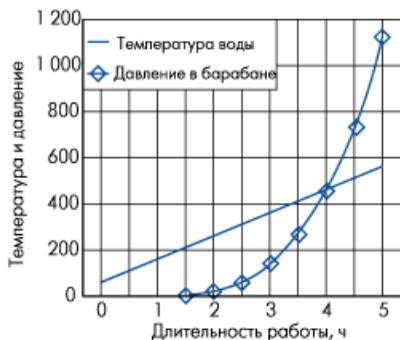


Рисунок 1– Стандартный график разогрева типового котла

Также скорость разогрева котлоагрегата при пуске его в работу для различных котлов регламентируется по другим параметрам. Так, при эксплуатации модульных котельных с котлами малой и средней мощности [2] предлагается растопку котла вести согласно графика, опирающегося на два параметра: давления в барабане и скорости подъема температуры насыщения пара. Кроме того вводится еще один ограничивающий фактор – температура труб настенного пароперегревателя, огибающих амбразуры в районе работающих горелок, которая не должна превышать 560 °С.

В «Инструкции по сушке обмуровок стационарных котлов» при сушке обмуровок стационарных паровых котлов ТЭС, выполняемых из жаростойких бетонов или огнеупорной кладки, максимальная измеренная скорость роста температуры обмуровки при нагреве до 150 °С не должна превышать 20 °С/ч, при нагреве от 150 до 500 °С – не более 30 °С/ч, при дальнейшем нагреве – не более 60 °С/ч во избежание образования трещин и снижения прочности [3].

Оптимизация факторов, влияющих на возникающие температурные напряжения в обмуровке, позволяет увеличить рабочую кампанию агрегатов и избежать увеличения потерь теплоты через обмуровку. Даже не меняя вид используемых материалов в футеровке, совершенствуя лишь условия эксплуатации (температурные режимы), можно добиться значительного результата.

Таким образом, процесс разогрева необходимо вести с максимально возможными скоростями, обеспечивающими возникновение температурных напряжений, не превышающих предел прочности материалов обмуровки при данной температуре. Таким образом, необходимо знать величину предела прочности материала, с которой происходит сравнение возникающих при разогреве температурных напряжений.

Значительный выбор огнеупорных и теплоизоляционных материалов не позволяет найти в технической литературе точные данные о зависимости предела прочности конкретного материала от температуры, что делает опытный метод – единственным источником получения данных для дальнейших расчетов.

Проведенный литературный обзор показал, что вопросам изучения зависимости предела прочности от температуры уделяется недостаточное внимание. Между тем, полученные нами экспериментальные данные для периклазоуглеродистых материалов позволяют говорить об увеличении значения предела прочности на сжатие в интервале температур 150–300 °С (до 20 %), что дает дополнительный резерв для повышения скорости разогрева и снижения времени и энергоресурсов на процесс разогрева [4].

В связи с этим была поставлена задача исследования – определение зависимости предела прочности от температуры для диатомитовых теплоизоляционных материалов в диапазоне рабочих температур.

В качестве исследуемых образцов использовался пенодиатомитовый материал состав по [5]. При этом заявляемый предел прочности на сжатие не менее 6 кгс/см<sup>2</sup>.

Результатом исследований явилось следующее:

- предел прочности материала при температуре 20 °С чуть ниже заявленного – 5 кгс/см<sup>2</sup>;
- при 100 °С предел прочности достигает 6 кгс/см<sup>2</sup>;
- максимум значения предел прочности достигает при температуре (13 кгс/см<sup>2</sup>).

Таким образом, полученная зависимость подтверждает актуальность данных исследований. Предел прочности при повышенной температуре (по максимальному значению) превышает значение прочности при нормальных условиях более чем в два раза, что дает возможность не только вести процесс разогрева со скоростями, при которых не будет разрушаться обмуровка, но и сократить времена и энергоресурсы на процесс разогрева.

## Список литературы

1. William, L. Reeves Avoiding Boiler Problems / William, L. // ASHRAE Journal, vol. 43, no. 9, p. 36–42.
2. Инструкции Эксплуатация модульных котельных. [Электронный ресурс]. – [http : //tvbcom.ru/documents/module/207.htm](http://tvbcom.ru/documents/module/207.htm). (Дата обращения 01.02.2017 г.).
3. Временная инструкция по сушке обмуровок стационарных котлов ТЭС Москва 1980.
4. Никифоров, А. С. Исследование предела прочности периклазоуглеродистых огнеупорных материалов и анализ их порочностных характеристик при повышенных температурах /А. С. Никифоров, Е. В. Приходько, А. К. Кинжибекова, А. Е. Карманов // Стекло и керамика. – 2014. – № 4. – с. 32–35.
5. Маневич, В. Е. Диатомит – кремнеземосодержащий материал для стекольной промышленности / В. Е. Маневич, Р. К. Субботин, Е. А. Никифоров, Н. А. Сеник, А. В. Мешков // Стекло и керамика. – № 5. – 2012.

## АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЧИСЛЕННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОПОЧНОЙ СРЕДЫ В КОТЛАХ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПАЩИМ СЛОЕМ

**О.М. Кокшарев, А.В. Гиль**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»  
г. Томск

Ключевые слова: циркулирующий кипящий слой, топка, численное моделирование, уголь.

Аннотация: В данной статье авторами ставится задача провести анализ состояния развития технологии ЦКС, а также рассмотреть современные методы численного моделирования котлов с ЦКС как в России, так и в зарубежных странах.

Сжигание топлива в ЦКС – это серьезная конкуренция для технологии пылевидного сжигания угля. Данный способ открывает новые возможности для сферы энергетики, решая такие задачи как увеличение эффективности высокосолевого и влажного топлива, уменьшение зольных выбросов, сжигание окислов серы и азота,

повышение уровня утилизации минеральной части топлива. Котлы с циркулирующим кипящим слоем лучше подходят для ступенчатого сжигания, которое позволяет снизить выбросы оксидов азота [1].

В настоящее время мировой опыт эксплуатации котлов с ЦКС очень богат. За годы использования ЦКС в энергетике удалось серьезно уменьшить металлоемкость, усовершенствовать различные конструктивные решения, повысить уровень надежности и экономичности.

В России существуют нормативные методы теплового [2], гидравлического и аэродинамического расчета котельных агрегатов. Однако, до настоящего времени в нормативном методе теплового расчета нет рекомендаций по расчету котлов с кипящим и циркулирующим кипящим слоем. Это связано с отсутствием отечественного опыта эксплуатации энергетических котлов с кипящим слоем. Имеющиеся данные носят разрозненный характер, из широко опубликованных материалов следует отметить [3]. Кроме того, имеется ряд рекомендаций, представленных в отчетах и публикациях НПО ЦКТИ, ВТИ и в диссертационных работах. Среди методик и программ расчета котлов с ЦКС в России также следует отметить разработанную в ОАО «ВТИ» математическую модель топочного контура котла с ЦКС, которая описана в [4, 5].

Большинство специалистов считают, что основой для расчета конвективных поверхностей нагрева котлов с ЦКС может служить нормативный метод [3]. Отличия заключаются в специфических особенностях режимов кипящего слоя, связанных с повышенной концентрацией частиц, что приводит к отличиям в тепловом и материальном балансе топочной камеры. Поэтому расчет гидродинамики и теплообмена в топке с КС и ЦКС является наиболее важным и существенно отличным от аналогичного расчета для традиционного пылеугольного котла. Другими специфическими элементами расчета являются расчет уловителей золы и системы ее возврата в топку, а при наличии зольных теплообменников – расчет их гидродинамики и теплообмена [6]. Однако существуют новые рекомендации, которые заключаются в назначении параметров сепараторов, системе возврата и утилизации золы, выборе скоростного режима в топке. К совершенствующимся сторонам развития относится также оптимизация режима работы топок, оптимизация и разработка конструкций топок с ЦКС.

Необходимо отметить, что в 60-х годах в СССР были заложены фундаментальные основы гидродинамики и тепломассообмена псевдооживленного слоя. Широко известны работы С. С. Забродского,

О. М. Тодеса, М. Э. Аэрова, Н. И. Гальперина, В. Г. Айнштейна, А. П. Баскакова [7–12]. Их результаты использованы в разработке и внедрении аппаратов с кипящим слоем (КС) в химической промышленности и металлургии. Некоторые из них также использовались при реконструкции небольших котлов с КС. Вопросы гидродинамики циркулирующего кипящего слоя в это время не были достаточно изучены в особенности к условиям работы топочных устройств.

В 2016 г. тему научного обоснования сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое представляет в своей докторской диссертации Рябов Г. А. Ранее, в 2014 г., Долгушин И. А. защитил кандидатскую диссертацию, в которой показал, как технологию ЦКС можно использовать для повышения эффективности и улучшения экологических показателей ТЭС.

До определенного времени данная технология не применялась на ТЭЦ в России. В 2007 г. 6-й Генерирующей компанией оптового рынка электроэнергии (сейчас входит в состав 2-й Генерирующей компании) на Новочеркасской ГРЭС (Ростовская область) был заложен первый камень в фундамент первого в России и второго в мире энергоблока с котлом ЦКС на сверхкритические параметры электрической мощностью 330 МВт. Первоначально пуск энергоблока в коммерческую эксплуатацию был назначен на конец 2012 г., однако затем неоднократно откладывался. В 2013 г. продолжалось сооружение энергоблока, а пуск был намечен на 2015 г. По состоянию на окончание февраля 2016 г. в Ростовской области, на энергоблоке № 9 Новочеркасской ГРЭС мощностью 330 МВт завершён монтаж первого в России котла с циркулирующим кипящим слоем на сверхкритические параметры пара. Оборудование спроектировано, изготовлено и поставлено Таганрогским котлостроительным заводом «Красный котельщик», входящим в состав компании «Силовые машины», а также компанией Amec Foster Wheeler (Великобритания). В настоящее время на ГРЭС ведутся пусконаладочные работы [13].

Стоит отметить, что наибольшей эффективностью, с учетом уровня прогресса инновационной вычислительной техники, обладают методы численного анализа. Они имеют ряд преимуществ в сравнении с теоретическими и эмпирическими методами [14]. Необходимо понимать, что программы расчета котлов с ЦКС, разработанные за границей, обычно недоступны по инициативе компаний, занимающихся их поставкой и разработкой. Они находятся в постоянном процессе совершенствования, благодаря непрерывным

исследованиям и материалам экспериментов, на основании которых базируются.

Тем не менее, на сегодняшний день, моделирование с применением методов вычислительной газодинамики обычно ограничено 2-х мерной геометрией, для которой поток частиц моделируется с использованием стандартного многожидкостного подхода эйлера-эйлера, но для большего понимания процессов, происходящих в котлах с ЦКС, необходимо применять трехмерное моделирование [22]. Однако из-за высокой вычислительной сложности, лишь несколько зарубежных исследований, доступных в открытых источниках, посвящены полному циклу трехмерного моделирования промышленных котлов с ЦКС [15 – 18].

Стоит отметить, что правильное понимание тепло- и массообмена в топках с циркулирующим кипящим слоем имеет важное значение для того, чтобы получить лучшую конструкцию и производительность для данного типа системы. В индивидуальном рассмотрении физические явления, такие как течение газа с частицами, турбулентность, химические реакции и теплопередача, сложно поддаются прогнозам и анализу. Этот анализ является более сложным, когда явления данные связаны в крупномасштабных системах, такими как котлы с ЦКС.

В [19] упоминается использование многомерных нестационарных уравнений теории взаимодействующих и взаимопроникающих континуумов при математическом моделировании процессов с ЦКС. Цуо и Гидасповым [19] предложен двумерный подход решения нестационарной гидродинамической модели циркулирующего кипящего слоя. В данной модели используется понятие вязкости дисперсной фазы, которое применяется для учета диссипации энергии между твердыми частицами из-за их произвольных соударений.

На примере котла с ЦКС, установленном на ТЭЦ Лагижа в Польше предлагаются два подхода решения задачи моделирования – эйлера-эйлера и эйлера-лангража (DDPM – Dense Discrete Phase Model), с расширенным методом мультифазной частицы в ячейке (MP-PIC), а также их сравнение [20]. В отличие от использования подхода эйлера-эйлера, эйлера-лангражев подход может быть применен для моделирования потока частиц в блоках ЦКС. В эйлера-лангранжеве подходе движение отдельно взятой частицы не рассматривается, напротив, берется во внимание группа частиц. В данном случае каждая ячейка содержит несколько частиц с одинаковыми массами, скоростями, позициями, температурами, составами и т. д., а их количество легко определяется по формуле. Взаимодействие между

частицами описывается моделями, основанными на кинетической теории потока частиц [21]. Лучистый теплообмен моделировался с помощью метода дискретных ординат. Излучающие свойства  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  были рассчитаны с использованием модели взвешенной суммы серых газов (WSGGM – weighted sum of gray gases model) с использованием различных модельных подходов, в том числе модели, предложенной Бордбаром в [22].

Метод мультифазной частицы в ячейке, или гибридный метод эйлера-лагранжа [23], использует Венг в [24] для моделирования котла с ЦКС мощностью 250 МВт. Данная модель предполагает моментальные испарение и выход летучих топлива. В состав реакций данной модели входят газификация и горение угля (углерода), реакция конверсии окиси углерода в двуокись углерода, сжигание нелетучих гидрокарбонатов и горение окиси углерода. Были показаны профили температуры, а применяемые модели теплопередачи не описаны.

В своей работе [25] Жанг неоднократно показывает применение метода мультимасштабного минимума потенциальной энергии (EMMS – energy minimization multi-scale) для расчета процесса горения в блоке мощностью 150 МВт. Система реакций была упрощена горением углерода, а тепловой эффект испарения влаги и выхода летучих считался как средний теплоотвод, что повлияло на нижнюю часть топки.

Были опубликованы только несколько полуэмпирических моделей, которые позволяют решать ЦКС в трех измерениях. Одна из таких моделей разработана Хуппаненом и позднее доработана Миоханеном в [16] (далее модель CFB3D). Другие аналогичные комплексные 3D-модели были представлены Вишневым и Ратшоу в [17]. В этих моделях, моделирование гидрогазодинамики упрощается, но описание химии горения представлено достаточно детальным образом, вместе с различными неоднородными и однородными реакциями газификации и горения. Решение уравнения энергии, как правило, состоит из понятий, связанных с тепловым эффектом реакции, конвекции газа и твердых тел, теплопередача к стенам, и перемешивание энергии путем диффузионного потока [20].

Палларес реализовал простую модель радиационного теплообмена в модели полуэмпирического процесса. Лучистый теплообмен моделировался как серое излучение, в то время как перенос излучения между ячейками ограничивался тремя ортогональными направлениями граней ячейки для каждой шестигранной ячейки расчета. Влияние излучающих газов было пренебрежено. Модель была применена для моделирования

промышленного образца котла с ЦКС мощностью 12 МВт, для которого подробных исходных данных не указано. Также сообщается, что в области с низкой концентрацией твердых частиц, таких как верхняя часть топки, количество тепла, выделенное в среду, существенно зависит от области, в нескольких метрах от нее [33]. Это доказывает потребность в более сложных излучающих моделях, которые учитывают эффект дальнего действия в данных видах систем.

Во всех выше рассмотренных трехмерных моделях, лучистый теплообмен внутри топки не решается отдельно, однако он был включен в общий тепловой поток между взвешенным веществом и стенами. В топке котла с ЦКС, лучистый теплообмен происходит между частицами, излучающими газами и теплопередающих поверхностей. При полной нагрузке и, особенно, в нижних частях, концентрация твердых частиц в топке высокая, и в данном случае взвесь может считаться оптически толстой средой, что упрощает подсчет лучистого теплообмена. Однако, в условиях низкой нагрузки, концентрация твердых частиц в верхней части топки может быть небольшой: условия могут быть сравнимы с надслоевым пространством (газовой фазы с низкой концентрацией твердых частиц в топке котла с кипящим слоем). Кроме того, при горении в среде кислорода, доля излучающих газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) значительно выше ( $> 90\%$ ), чем в условия горения в воздухе ( $< 30\%$ ), что влияет на радиационный теплообмен. Высокая концентрация поглощающего газа в кислородной среде ограничивает использование ранее разработанных моделей со свойствами излучающих газов, которые были в основном разработаны для систем горения в воздухе.

В настоящее время существует незначительное число материалов эмпирических исследований и познаний определенных аспектов технологического характера для применения псевдооживленного слоя в целях реализации процессов массо- и теплообмена. Для покрытия различных нужд необходимых для разработки топков с кипящим слоем нужен значительный прогресс в сфере математического и численного моделирования каких-либо химико-физических процессов в кипящем слое. Однако данные задачи смоделировать не так просто и, как следствие, на пути специалистов стоит масса трудностей. В пример можно привести выполнение нормативов правильности задания параметров, которое в большинстве случаев очень сложно оценить теоретически. Чаще всего корректность модели подтверждается практическими методами численного моделирования, которое в свою очередь занимает большое количество временного ресурса.

## Список литературы

1. Gungor, A. Analysis of combustion efficiency in CFB coal combustors. *Fuel* 87 (2008) 1083–1095
2. Тепловой расчет котельных агрегатов: (нормативный метод). – 2-е изд. перераб. – М. : Энергия, 1973. – 296 с.
3. Мунц, В. А. Тепловой расчет топок со стационарным и циркуляционным кипящим слоем (ч. 1) / В. А. Мунц, А. П. Баскаков // *Теплоэнергетика*. – 1990. – № 1. – с. 74–77.
4. Кадников, Б. Л. Моделирование физико-химических процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем / Б. Л. Кадников, Н. И. Давыдов, Б. И. Шмуkler, Г. А. Рябов // *Теплоэнергетика*. – 1994. – № 5. – с. 64–70.
5. Кадников, Б.Л. Переменные режимы работы котла с ЦКС : дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14/ Кадников Борис Леонидович – М., 1995. – 22 с.
6. Рябов, Г. А. Научное обоснование использования технологии сжигания твердых топлив в циркулирующем кипящем слое. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, 2016.
7. Забродский, С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое / С. С. Забродский. – М. : Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
8. Забродский, С. С. Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем / С. С. Забродский. – М. : «Энергия», 1971. – 328 с.
9. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов с стационарным и кипящим слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л. : Химия, 1968. – 512 с.
10. Гальперин, Н. И. Основы техники псевдооживления / Н. И. Гальперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
11. Тодес, О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем / О. М. Тодес, О. Б. Цитович. – Л. : Химия, 1981. – 296 с.
12. Процессы тепло- и массопереноса в кипящем слое / под ред. А. П. Баскакова. – М. : Металлургия, 1978. – 247 с.
13. Строительство энергоблока № 9 с использованием технологии ЦКС, Новочеркасская ГРЭС, 330 МВт [Электронный ресурс] – <http://www.ogk2.ru/rus/investment/objects/modnov3.php>. (Дата обращения: 06.02.2017).
14. Tourunen, A., Saastamoinen, J., Nevalainen, H. Experimental trends of NO in circulating fluidized bed combustion. *Fuel* 88 (2009) 1333–1341.

15. Hansen, K. G., & Madsen, J. (2001). A computational and experimental study of gasparticle flow in a scaled circulating fluidized bed. In 9th semester project Aalborg University Esbjerg.
16. Myohanen, K., & Hyppanen, T. (2011). A three-dimensional model frame for modelling combustion and gasification in circulating fluidized bedfurnaces. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 9(A25) <http://dx.doi.org/10.1515/1542-6580.2571>.
17. Wischniewski, R., Ratschow, L., Hartge, E.-U., & Werther, J. (2010). Reactive gas–solids flows in large volumes—3D modeling of industrial circulating fluidized bed combustors. *Particology*, 8, 67–77.
18. Zhang, N., Lu, B., Wang, W., & Li, J. (2008). Virtual experimentation through 3D fullloop simulation of a circulating fluidized bed. *Particology*, 6, 529–539.
19. Gidaspow, D. (1994). *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions*. Boston: Academic Press.
20. Wojciech P. Adamczyk, Gabriel Weceł, Marcin Klajny, Paweł Kozołub, Adam Klimanek, Ryszard A. Białeccki, Modeling of particle transport and combustion phenomena in a large-scale circulating fluidized bed boiler using a hybrid Euler–Lagrange approach, *Particuology* 16 (2014) 29–40.
21. Mohammad Hadi Bordbar, Kari Myohanen, Timo Hyppanen. Coupling of a radiative heat transfer model and a three-dimensional combustion model for a circulating fluidized bed furnace. *Applied Thermal Engineering* 76 (2015) 344–356.
22. M.H. Bordbar, G. Weceł, T. Hyppanen, A line by line based weighted sum of Gray gases model for inhomogeneous CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O mixture in oxy-fired combustion, *Combust. Flame* 161 (2014) 2435–2445, <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2014.03.013>.
23. D.M. Snider, An incompressible three-dimensional multiphase particle-in-cell model for dense particle flows, *J. Comput. Phys.* 170 (2001) 523–549, <http://dx.doi.org/10.1006/jcph.2001.6747>.
24. M. Weng, M. Nies, J. Plackmeyer, Computer-aided optimisation of gas-particle flow and combustion at the Duisburg circulating fluidised bed furnace, *VGB PowerTech J.* 8 (2011) 64–69.

# ПРОБЛЕМЫ СЖИГАНИЯ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА В ПАРОВЫХ КОТЛАХ

**К.А. Красилов, К.В. Меняев**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: биомасса, методы очистки поверхностей нагрева, генератор ударных волн

Аннотация: Рассмотрен способ огневой утилизации лузги подсолнечника и методы очистки поверхностей нагрева от отложений.

Одним из источников энергии является биомасса. Термин биомасса объединяет все органические вещества растительного и животного происхождения. Биомасса делится на первичную (растения, животные, микроорганизмы) и вторичную (отходы при переработки первичной биомассы и продукты жизнедеятельности человека и животных), в свою очередь отходы делятся на первичные – отходы при переработке первичной биомассы (солома, ботва, опилки и т. д.) и вторичные – продукты физиологического обмена животных и человека.

Ежегодное количество органических отходов по разным отраслям народного хозяйства России составляет более 390 млн. тонн. Сельскохозяйственное производство дает 250 млн. тонн, из них 150 млн. тонн приходится на животноводство и птицеводство, 100 млн. тонн на растениеводство. Лесо- и деревообработка дают 70 млн. тонн, твердые бытовые отходы городов – 60 млн. тонн. Осадки коммунальных стоков – 10 млн. тонн (все приведенные выше значения приведены на абсолютно сухое вещество) [1].

Анализ показывает, что при пересчете на горючую массу состав растительных отходов практически идентичен составу твердого топлива по основным элементам и изменяется в пределах:  $C^r = 48...53$ ;  $H^r = 5...7$ ;  $O^r = 35...42$ ;  $N^r = 0,2...1,0$ ;  $S^r = 0...0,2$  %, зольность от 1 % (лузга подсолнечника) до 4...5 % (солома), а на рисовой лузге зольность может достигать 10...20 %. Низшая теплота сгорания растительных отходов поступающих на сжигание, в зависимости от вида топлива, года уборки, региона колеблется от 5 до 15 МДж/кг. Температура размягчения золы растительных отходов по исследованиям изменяется в пределах 1150...1250 К [2].

Растительные отходы существенно различаются по физико-механическим свойствам, что необходимо учитывать при проектировании топочного устройства. Сжигать на колосниковых решетках топок в плотном слое мелочь такую, например, как лузга подсолнечника, рисовая шелуха и отчасти солома, достаточно сложно. При этом неизбежны большие потери тепла с невыгоревшим топливом, провалом и уносом.

Растительные отходы, по сравнению с другими видами твердых топлив, характеризуются повышенным содержанием кислорода, малой зольностью и повышенным выходом летучих. Так же лузга обладает повышенной парусностью и легко выносится из традиционных топочных устройств. Кроме того подсолнечная лузга содержит в своем составе щелочные металлы, которые при температуре выше 1100–1200 °С возгоняются из золы и образуют прочные отложения на стенках топки и трубах конвективного пучка. Отложения на трубах уменьшают коэффициент теплопередачи (отложения имеют низкую теплопроводность и являются своего рода тепловой изоляцией) и эффективность отдачи теплоты. В результате этого температура уходящих газов возрастает.

К сожалению, многие методы очистки поверхностей нагрева, используемые в большой энергетике, непригодны для котлов малой мощности. Практика эксплуатации Бийского котла (КЕ-6,5 для сжигания лузги подсолнечника с вихревой топкой) показывает, что котлы, на которых не применяются меры по очистке поверхностей нагрева, необходимо останавливать уже через 1–2 недели для очистки. Тогда как с системами очистки котел может работать больше месяца.

Методы очистки поверхностей нагрева. Газоимпульсная очистка. Принцип работы ГИО (или генератор ударных волн ГУВ) заключается в воздействии на отложения, образующиеся на поверхностях нагрева направленной ударной акустической волны, генерируемой за счет взрывного горения ограниченного объема газозооной смеси ( $0,01 \div 0,1 \text{ м}^3$ ), осуществляемого в импульсной камере (ИК), размещаемой вне газохода. За счет истечения из ИК продуктов сгорания происходит комплексное волновое и термогазодинамическое воздействие на наружные отложения, теплообменные и ограждающие поверхности.



Рисунок 1 – Импульсная камера на котле ДЕ-6,5-14  
Бийского котельного завода

В качестве рабочих компонентов используется природный газ, топливный или баллонный газ (пропан) и компрессорный или вентиляторный воздух.

Активно применяются как переносные ГУВы, использующие одноразовый заряд, так и стационарные, применяемые для котлов большей производительности. При этом ГУВы стационарно монтируются на котлоагрегатах в виде системы из нескольких ГУВов по всему газовому тракту. Создание системы ГУВов на котлоагрегате заключается: в выборе оптимальных точек ввода УВ, установке в этих точках ГУВов, подвода электропитания к ним и сборке пульта управления. Объемный характер действия УВ и ее «дальнобойность» позволяет ограничиться малым числом ГУВов даже на котлоагрегатах большой производительности.

Ручной метод очистки. При ручной очистке котла необходима его полная остановка и время для остывания. Далее с помощью инструмента (скребки и т. д.), вручную проходит очистка котла (топки и конвективных участков).

Методы огневой утилизации растительных отходов. Слоевой способ сжигания. Сжигание подсолнечной лузги можно реализовать в топках, основанных на слоевом способе сжигания. Конструкции этих топочных устройств наиболее просты, надежны в эксплуатации и могут быть приспособлены к часто изменяющимся фракционному составу и влажности лузги [3].

Слоевой способ сжигания подсолнечной лузги может быть реализован путем использования следующих принципов организации работы слоя (рисунки 2–6).

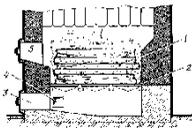


Рисунок 2 – Сжигание подсолнечной лузги в горизонтальном слое

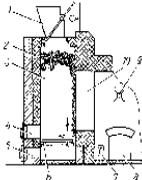


Рисунок 3 – Сжигание топлива в вертикальном слое

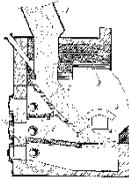


Рисунок 4 – Сжигание топлива в наклонном слое

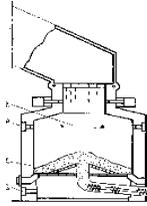


Рисунок 5 – Кучевое сжигание подсолнечной лузги

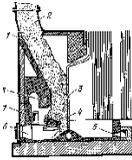


Рисунок 6 – Сжигание топлива в зажатом слое

Вихревой способ сжигания. Вихревой способ сжигания заключается в сжигании измельченных высокорекреакционных топлив во взвешенном состоянии во время витания их частиц в топочной камере по круговым или петлевым траекториям (рисунок 7). Вращательное движение газовой среды в топочной камере создается нижним подводом первичного воздуха тангенциально закругленной внутренней поверхностью этой камеры [3].

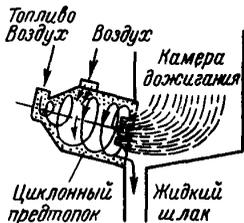


Рисунок 7 – Вихревой способ сжигания лузги подсолнечника

Циклонный способ сжигания. Циклонный процесс сжигания по своему принципу аналогичен вихревому процессу (рисунок 8). Сущность циклонного процесса заключается в том, что сжигание мелкого топлива локализуется в цилиндрической топочной камере, где посредством подвода воздуха тангенциально внутренней поверхности камеры создается интенсивное вращательное движение воздуха, продуктов горения и взвешенных в этой газовой среде частичек топлива [3].

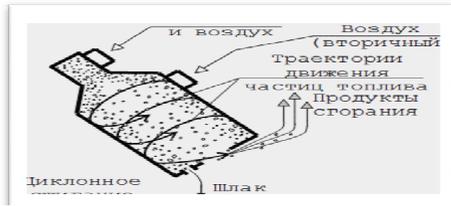


Рисунок 8 – Циклонный способ сжигания

Сжигание в топках низкотемпературного кипящего слоя. Для сжигания подсолнечной лузги применяются топки низкотемпературного кипящего слоя (НТКС) (рисунок 9), в т. ч. для сжигания отходов влажностью 60 и более процентов. Котлы с топками НТКС успешно работают на сельскохозяйственных предприятиях. Технология «кипящего слоя» позволяет повышать эффективность сжигания низкокачественных или нетрадиционных видов топлива. Второе преимущество – экологичность, в частности, количество выбросов токсичных оксидов серы в атмосферу может быть снижена больше чем на 90 %. Третье преимущество – высокая эффективность сжигания и теплообмена [3].

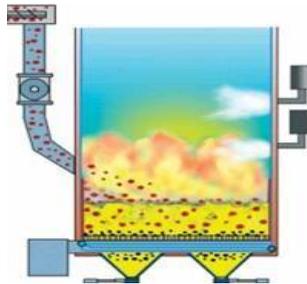


Рисунок 9 – Сжигание лузги в топке НТКС

Одной из конструкций котлов для сжигания высокопарусных топлив, в частности лузги, является паровой котел марки КЕ-6,5 Бийского котельного завода (рисунок 10). У этого котла имеется предтопок, в который через тангенциально расположенные горелки подается лузга и необходимый для горения воздух. В предтопке организуется вихрь, который обеспечивает необходимую сепарацию коксовых частиц препятствуя их выносу в газоходы для поддержания процесса горения в камере дожигаания установлены газовые горелки.

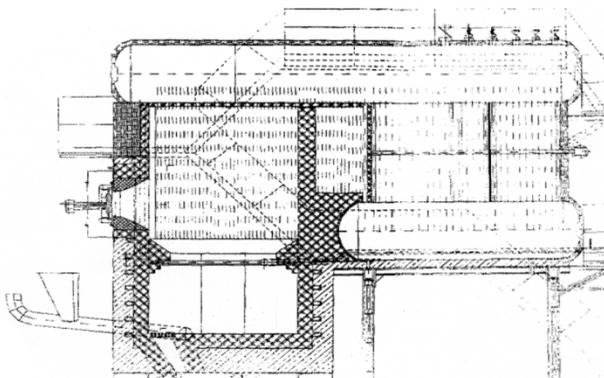


Рисунок 10 – Котел КЕ-6,5

Для сжигания измельченных растительных отходов, и особенно лузги подсолнечника, требуется специальное топочное устройство. В паровом котле использована низкотемпературная вдвоенная вихревая топка, ее аэродинамическая схема разработана на основе принципов сжигания твердого топлива в циклонных топках. За счет эффективного удержания легких частиц топлива в топке происходит глубокое выжигание горючих веществ с одновременным устранением образования внутритопочных и натрубных отложений, характерных для высокотемпературных топочных процессов.

Эффективность удержания частиц в топке возрастает с увеличением их массы. Соответственно при этом создаются условия для глубокого выгорания и таких массивных частиц, как вылетевшие в топку с лузгой зерна и устраняется опасность пожаров в дымоходах и золоуловителях котельной установки.

Низкотемпературный режим обеспечивается расположением в топке большой поверхности нагрева – боковых и дополнительных экранов парового котла и созданием активной аэродинамики в топочном объеме.

### Список литературы

1. Вихарев, Ю. В. Использование биомассы при производстве электрической энергии / Ю. В. Вихарев // Экономия энергии ВИНТИ. – 2002. – № 5. – с. 63–64.
2. Хзмалян, Д. М. Теория горения и топочные устройства / Д. М. Хзмалян. – М. : Энергия, 1976.

3. Вихревые топki для сжигания лужи[Электронный ресурс], – <http://www.ekovortex.ru>. (Дата обращения 06.02.2017 г.).

4. НПО ЦКТИ [Электронный ресурс],– <http://www.ckti.ru/gio>. (Дата обращения 06.02.2017 г.).

## **ОБОБЩЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РАБОТЫ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ТОПЛИВОМ НА КРУПНЫХ ОБЪЕКТАХ ЭНЕРГЕТИКИ**

**Д.А. Крюков, Е.С. Воронцова**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»

г. Томск

Ключевые слова: качество топлива, экспресс-анализатор, лабораторная проба, акт, протокол, претензия.

Аннотация: В статье описаны основные этапы работы подразделений объекта при поступлении энергетического топлива на станцию и порядок их действий с целью повышения эффективности данного процесса.

На предприятиях энергетического назначения, использующих котельное оборудование, необходимо проводить комплекс мероприятий контроля топлива на соответствие заданным качеству, количеству и прочим характеристикам. Данный комплекс включает в себя сложные схемы и этапы взаимодействий различных подразделений объекта и сопровождается ведением большого количества нормативно-технической документации [1].

Прежде, чем произойдет поставка топлива на станцию, необходимо составить договор. Сотрудниками топливно-транспортного цеха определяются необходимые объемы и сроки поставки топлива. Производственно-техническим отделом готовится и передается заявка в службу закупок, где оформляются все необходимые документы на поставку топлива. Заявка отправляется поставщику для реализации поставки топлива [2].

При поступлении топлива на ТЭЦ операторами топливно-транспортного цеха производится весовой контроль и отбор проб, после чего составляются акты и удостоверения проведенных операций.

Следующим этапом является входной контроль поступившего топлива. Точечную пробу, отобранную ручным либо механизированным способом, помещают в экспресс-анализатор, результатом работы которого является оценка влажности и зольности топлива. По резуль-

татам экспресс-анализа составляется протокол испытаний топлива, пришедшего на ТЭЦ.

Далее в испытательной лаборатории осуществляется приготовление лабораторной пробы и последующая проверка на соответствие элементарного состава и теплотворных характеристик топлива. По завершении испытаний на соответствие составляется протокол о качестве топлива.

При соответствии всех необходимых параметров заданным операторами топливно-транспортного цеха осуществляется приемка топлива. Топливо отгружается на склад предприятия, после чего составляется акт приемки.

Если топливо по каким-либо параметрам не соответствует заданным характеристикам или количеству, нарушены сроки или правила поставки, то начинается претензионная работа. Претензия оформляется претензионной группой совместно с бухгалтерским и юридическим отделами. Бухгалтерским отделом высчитывается сумма претензии в связи с недостатками топлива, либо вследствие низких показателей качества топлива. Юридической службой претензия проверяется на предмет составления юридически грамотного содержания, при необходимости вносятся корректировки. Иск по претензии отправляется поставщику [3]. Таким образом, на предприятии взаимодействует определенная схема подразделений объекта, которая включает в себя сложные связи (рисунок 1).

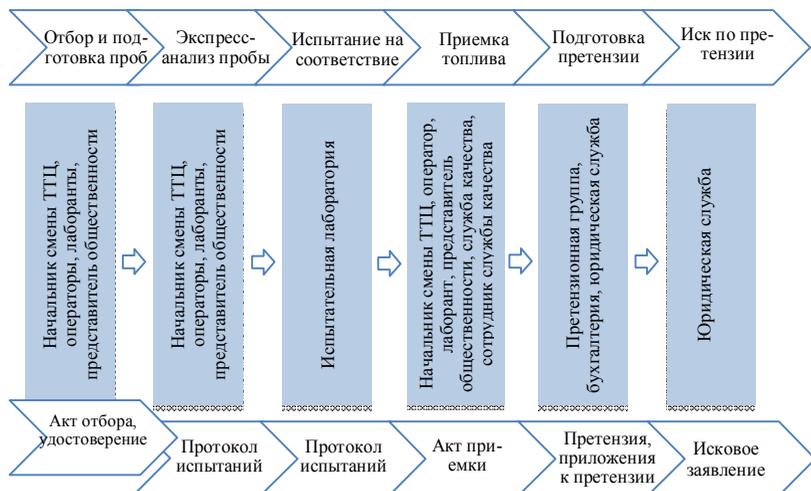


Рисунок 1 – Порядок работы с энергетическим топливом

В связи со сложностью процесса и большим количеством связей между подразделениями объекта возникает необходимость во внедрении систем автоматизированного проектирования в процессе работы с энергетическим топливом [4].

### Список литературы

1. Казаков, В. И. Входной контроль качества твердого топлива на электростанциях России / В. И. Казаков, П. А. Мингалев, Д. О. Ленов // Энергетик – 2015. – № 6 – с. 27–29.
2. СТО 70238424.27.100.023-2008. Топливо-транспортное хозяйство ТЭС. Прием и хранение твердого топлива. Условия поставки. Нормы и требования.
3. Воронцова, Е. С. Организация работы с энергетическим топливом / Е. С. Воронцова, У. В. Дорохова // Современные техника и технологии : сборник трудов XVIII международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 9–13 апреля 2012 г. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – 2012. – Т. 3. – с. 169–170.
4. Kleshnya, Vadim. Automated Complex Project on the Organization Claim Works With Fuel [Electronic resource] / V. Kleshnya, E. S. Vorontsova, T. S. Taylasheva // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 91: Smart Grids 2017. – [01025, 4 p.].

## МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ПРИГОДНОСТИ К УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВ ТЭС

**С.А. Лихач, Р.Н. Кулеш, А.С. Илясова**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

г. Томск

Ключевые слова: ТЭС, золошлаковые отходы, золошлаковый материал, экология, строительство, уголь, золошлакоотвал, зола.

Аннотация: В данной статье рассмотрена проблема утилизации золошлаковых отходов, учитывая сложившуюся в настоящее время ситуацию. Проанализированы направления утилизации техногенного сырья как складированного, так и вновь вырабатываемого. Предложен общий подход к выбору направлений утилизации последовательность действий, учитывающая режимы работы котельных установок и условия складирования золошлаков в золошлакоотвале.

В настоящее время актуальна разработка ресурсосберегающих технологий во всех отраслях промышленности, в которых заменяется традиционно привозное сырье местными природными ресурсами и промышленными отходами. Для энергетики особенно остро стоит проблема заполнения золошлакоотвалов, т. к. объем производимых в России ЗШО составляет сотни миллионов тонн в год, из которых только около 15 процентов перерабатывается. Ежегодная выработка ЗШО в России составляет около 30 млн. тонн, а накоплено уже в общей сложности более 1,5 млрд. тонн. При этом у 115 станций из 172, работающих на угле, емкость золошлакоотвалов практически исчерпана [1].

Из-за переполненности золошлакоотвалов возникают проблемы экологического характера, а именно: пылевыведение с сухих пляжей загрязняет атмосферный воздух и почву, фильтрация высокоминерализованной воды через грунты основания приводит к ее смешению с поверхностными и грунтовыми водами. Особенно остро проблема экологии ощущается в тех городах, где изначально электростанции были построены за городом, теперь находятся в черте города (Томск, Кемерово, Белово, Новосибирск).

Между тем, минеральная часть угля и содержащиеся в ней компоненты могут стать мощным источником сырья и найти широкое применение в некоторых отраслях промышленности.

Проанализировав известные способы утилизации, можно выделить следующие ее направления:

1. Выемка ЗШО из золошлакоотвала с последующей перевозкой и заполнением выработанных угольных карьеров, либо использование в ландшафтных работах.
2. Использование ЗШО в строительстве (использование ЗШО в данной отрасли хорошо изучено и находит наибольшее применение).
3. Использование ЗШО в сельском хозяйстве в качестве раскислителя почвы и др.
4. Извлечение из ЗШО отдельных элементов.
5. Современные подходы к утилизации ЗШО, в большинстве своем находящиеся в стадии разработки.

Широкомасштабность и разнообразие способов утилизации ЗШО очевидны, и, если из ранга вредных отходов золу возвести в ранг промышленного продукта, сырья, сбываемого товара, то ее улавливание из вынужденного, убыточного для теплоэнергетики мероприятия превращается в нормальный, прибыльный технологический процесс [2].

Выходом из проблемы могут стать производства, продукцией которых являются материалы непосредственно из ЗШО или их компоненты, либо продукты технологий более глубокой их переработки.

Однако большинство вариантов использования ЗШО предъявляет жесткие требования к различным параметрам исходного сырья.

Для определения возможности реализации утилизации ЗШО необходимо проведение ряда исследований, на основании которых составляется паспорт золошлаковых материалов (ЗШМ) как продукции станции и принимается решение о способе утилизации ЗШМ. Отличие ЗШМ от ЗШО заключается в том, что ЗШМ – классифицированный продукт с физико-химическими и гранулометрическими свойствами, которые соответствуют техническим условиям. Паспорт ЗШМ составляется на основе лабораторных исследований, результатом которых становится определение химического, минералогического состава ЗШО, который зависит от многих факторов: условия сжигания угля, режимов работы котлоагрегата и т. д. Следовательно, в паспорте должны быть представлены диапазоны возможного разброса требуемых параметров.

Идентификация свойств продукта также должна соответствовать целевым группам. Например, при предполагаемом использовании золы-уноса каменного угля в качестве добавки к бетону важно определить диапазон работы котельных установок, в котором получается продукция требуемого этой категории качества. При смене режима работы возможно изменение свойств ЗШМ, но, одновременно, их соответствие другой целевой группе. В этом случае ЗШМ целесообразно складировать в отдельном от первого случая месте, таким образом, при налаженном сбыте продукции, система золоудаления и складирования ЗШМ станции превращается в комплекс устройств (силосов, бункеров, площадок, трубопроводов и т. д.) для складирования ЗШМ требуемого качества с их отгрузкой по мере необходимости.

Как указано выше, современную котельную установку нужно рассматривать как комплекс устройств для выработку пара и ЗШМ требуемого качества что, несомненно, внесет коррективы в режимную карту ее работы и, скорее всего, снизит общий КПД теплового цикла, однако при реализации вышеописанного комплекса потери КПД будут восполняться доходами от реализации ЗШМ и отсутствием расходов на обслуживание и содержание золошлакоотвала [3].

Отдельно можно выделить существующие золошлакоотвалы как хранилища ЗШМ с «местно-усредненными свойствами». Данный термин употреблен вследствие особенности конструкции и системы подачи ЗШО станции на поле золошлакоотвала, а также различные периоды пребывания ЗШО в обводненном состоянии. Данный вопрос также требует детальной проработки, связанной с полномасштабным исследованием состава и свойств складированных отходов сжигания угля, а

также изменением их химического состава с течением времени. Данная работа представляется аналогичной полевым отборам керновых проб на вновь открытых или исследуемых месторождениях углей. При обнаружениях закономерностей указанных характеристик исследуемых материалов принимается решение о возможности их использования в конкретной технологии переработки, при существенной неоднородности – наиболее перспективным представляется их изъятие и вывоз для заполнения выработанных угольных карьеров с использованием железнодорожного транспорта, привозящего уголь на станцию [4].

С целью оценки пригодности ЗШО как техногенного сырья проведено обследование золошлакоотвала и изучение проб углей и ЗШО электростанции, сжигающей канско-ачинские угли, результаты исследования химического состава приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Процентные диапазоны содержания элементов

Содержание элементов в расчете на оксиды	Величина, %		
	Зола	Шлак	Золошлаковая смесь
Потери при прокаливании	0,07–0,18	–	до 10
$SiO_2$	32,97–48,01	41,05–49,16	49,23–65,79
$TiO_2$	0,27–0,48	0,27–0,31	0,32–0,55
$Al_2O_3$	6,25–9,01	5,89–7,41	7,08–10,14
$Fe_2O_3$	10,78–15,94	15,23–19,05	6,29–18,1
$CaO$	26,7–33,9	20,6–25,07	10,2–21,4
$MgO$	5,15–7,09	3,39–4,29	2,32–6,45
$K_2O$	0,2–0,3	0,2–0,5	0,2–0,42
$Na_2O$	0,3–0,6	0,35–0,6	0,2–0,4
$SO_3$	1,31–2,12	0,48–2,12	0,48–1,47
$CaO_{св}$	6,5–9,7	нет	0,14–0,98

Анализы подтвердили существенные различия тестируемых показателей в пробах ЗШО из золошлакоотвала. Как отмечалось выше, большинство производств предъявляют жесткие требования к различным параметрам исходного сырья и, следовательно, изучаемые ЗШО не могут быть переработаны в традиционных производствах (вследствие большой неравномерности в результатах определения  $CaO$ ,  $CaO_{св}$ , потерь при прокаливании и прочих основных показателях, интересных для строительной отрасли).

Однако «свежевыработанные» зола и шлак характеризуются относительным постоянством в тестируемых показателях, которые варьируются в зависимости от нагрузки котла и некоторых других условий.

Таким образом, утилизацию ЗШО станции необходимо вести в двух направлениях: во-первых – утилизация накопленных в золошла-

коотвале ЗШО, характеризующихся большой неоднородностью в химических и прочих показателях; во-вторых – утилизация вновь производимых ЗШМ (с классификацией и распределением их по группам потребителей и по составу).

Для реализации поставленной задачи целесообразно вести утилизацию накопленных в золошлакоотвале ЗШО по первому пункту приведенной выше классификации (перевозка ЗШО в отработанные угольные карьеры). Необходимо учесть также острую ситуацию с заполнением емкости золошлакоотвалов на некоторых станциях, и, как следствие, необходимость принятия срочных мер по утилизации больших объемов ЗШО, что возможно при реализации только данного направления.

При оценке данного способа утилизации ЗШО, включающего в себя цикл выемки ЗШО из золошлакоотвала с загрузкой в автомобильный транспорт, цикл перегрузки в железнодорожный транспорт, а также пункт разгрузки ЗШО на угольном разрезе, при реализации рассмотренной схемы критичными составляющими расчетов являются расстояние от золошлакоотвала до пункта выгрузки в железнодорожный транспорт (обычно его размещение целесообразно в непосредственной близости от станции, т. е. в месте подвоза угля), расстояние по железной дороге от станции до угольного разреза (используя идущие обратно пустыми составы подвоза угля, экономические показатели резко возрастают) и сезонность работ (т. е. возможность отгрузки ЗШО в зимнее время).

При имеющихся сведениях для каждой рассматриваемой станции можно рассчитать стоимость и ликвидность транспортировки накопленных ЗШО, являющуюся хорошим вариантом поддержания экологического равновесия региона, т. к. при этом исключается строительство новых золошлакоотвалов и, следовательно, различные проблемы экологического характера и связанные с этим финансовые затраты станции.

Таким образом, возможна либо полная утилизация ЗШО, находящихся в золошлакоотвале, либо поддержание определенного их объема путем варьирования производительностью цикла по объему изымаемых ЗШО.

Что же касается вновь производимых ЗШМ, то их целесообразно разделить на группы, соответствующие различным направлениям использования (в основном, в строительстве). В соответствии с режимами работы котлоагрегатов необходимо их складировать в соответствующие места (емкости, силосы). Для золы потребуется монтаж нескольких силосов, соответствующих различным параметрам продукта

и направлениям реализации. Шлак предполагается отводить в специально выделенные места золошлакоотвала, а его отгрузка потребителю будет осуществляться частично при помощи техники, участвующей в выемке накопленных ЗШО.

Предложенный комплекс полной утилизации ЗШО станции может стать альтернативой строительству новых золошлакоотвалов, организация которых требует значительных финансовых вложений (по некоторым оценкам, строительство золошлакоотвала обходится в сумме свыше 1 млрд. рублей).

### Список литературы

1. Кожуховский, И. С. Угольные ТЭС без золошлакоотвала : реальность и перспективы / И. С. Кожуховский, Ю. К. Цельковский // Энергетик. – 2011. – № 6. – с. 20–32.
2. Козлов, М. М. Использование золошлаковых отходов ТЭЦ-22 в народном хозяйстве / М. М. Козлов, В. Д. Ильин, Ю. К. Цельковский // Электрические станции. – 2005. – № 11.
3. Калачев, А. И. Рынок ЗШО России глазами трейдера. Консорциум Феникс / А. И. Калачев // Материалы V конференции «Золошлаки ТЭС : удаление, транспорт, переработка, складирование», Москва, 24–25 апреля 2014г. – М. : Полиграфический центр МЭИ, 2014.
4. Заворин, А. С. О проблеме заполнения емкостей существующих золошлакоотвалов / А. С. Заворин [и др.] // Энергетика : экология, надежность, безопасность : материалы докладов XV Всероссийской научно-технической конференции, 9–11 декабря 2009 г., Томск / Томский политехнический университет (ТПУ) [и др.] ; под ред. В. В. Литвака. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – с. 109–111.

## АВТОМАТИЧЕСКИЕ УГОЛЬНЫЕ КОТЛЫ

**А.А. Назаров, Е.Б. Жуков, Д.Р. Таймасов, К.В. Меняев**  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: автоматические котельные и угольные котлы, виды топлива.

Аннотация: В статье рассмотрен опыт сжигания угля, новейшие технологии автономного отопления. Рекомендованный сорт угля для котлов «Терморобот».

Данная работа выполнена в рамках литературного обзора к проектированию ретортной топки. В ходе критического обзора было установлено, что одним из ведущих производителей ретортных котлов является котельный завод «Терморобот».

Котельный завод «Терморобот» – разработка и серийное производство отопительных автоматических угольных котлов (100–800 кВт) и блочно-модульных автоматических угольных котельных мощностью от 60 кВт до 4 МВт [1].

Термороботы обеспечивают экономичное и удобное автономное отопление и горячее водоснабжение отдельностоящих зданий площадью от 500 до 40 000 м<sup>2</sup>, не подключенных к газу и центральному отоплению. Это:

- школы, клубы, детские сады, бассейны;
- цеха и административные здания;
- объекты Министерства обороны и МЧС;
- многоквартирные жилые дома;
- гостиницы, ТЦ, склады, гаражи, теплицы;
- поликлиники, санатории, базы отдыха.

Промышленные стальные жаротрубные отопительные котлы с линейной горелкой «Терморобот» нового типа. Перемещение и ворошение горящего угля в горелке, а также удаление золы из зоны горения производит водоохлаждаемый шнек; такая технология сжигания топлива близка к реализованной в промышленных топках с кипящим слоем.

Подача угля из бункера в топку производится шнеком. Микропроцессор котла регулирует подачу угля и воздуха в зависимости от требуемой тепловой мощности.



Рисунок 1 – Котел «Терморобот»



Рисунок 2 – Шнековый питатель

Автоматические угольные котлы ТР – современная альтернатива устаревшим ручным котлам при модернизации котельных.

**Преимущества «Термороботов».** В автоматической линейной горелке «Терморобот» реализована промышленная технология полного сжигания в «кипящем слое» практически любых российских каменных и бурых углей фракции 0–70 мм, что обеспечивает высокий КПД (86–90 %) и высокие экологические показатели котлов «Терморобот».

Линейная горелка, применяемая в топке автоматических угольных котлов «Терморобот» мощностью 60–600 кВт, разработана в Новосибирске в 2009 г. Если сравнивать ее с «классическими» топками, она имеет некоторые общие черты с слоевой топкой с цепной механической решеткой, но есть важные отличия, которые позволяют рассматривать ее как новый тип горелочного устройства, сжигающего уголь в режиме, близком к сжиганию твердого топлива в псевдоожиженном («кипящем») слое.

Рассмотрим конструкцию линейной горелки «Терморобот». Она состоит из стального ложа с форсунками подачи первичного воздуха, и шнека, который является неотъемлемой частью горелки (в отличие от других угольных котлов, где шнек используется только для подачи угля из бункера в топку [винтовой питатель], но не участвует в процессе сжигания угля в топке).

При работе котла шнек почти непрерывно ворошит и передвигает горящий уголь, поэтому здесь одновременно горят все куски угля, в отличие от слоевых топок с покоящимся углем, где куски угля горят по очереди, слой за слоем (на цепной решетке и колосниковом барабане пласт угля перемещается как целое). Одновременное горение всех кусков угля определяет высокую удельную мощность горелки.

За счет механизированного ворошения куски угля очищаются от золы и образующегося шлака, что обеспечивает постоянный доступ кислорода к их горячей поверхности. Шнек непрерывно перемещает

шлак в зольник, не давая ему скапливаться в зоне горения, поэтому горелка мало чувствительна к качеству топлива (стабильно горит уголь даже с высокой зольностью) [1].



Рисунок 3 – Автоматическая линейная горелка «Терморобот»

**Линейная горелка «Терморобот» – угольная топка с высоким КПД.** В автоматических угольных котлах малой мощности (десяти-сотни киловатт) применяется три основных вида топок: барабанная колосниковая решетка (Carborobot, Венгрия); ретортная горелка различных модификаций (SAS, Defro и другие польские заводы) и варианты колосниковой решетки с шурующей планкой. Линейная горелка «Терморобот» является существенно новым типом топки, представленным на рынке.

Тип топки определяет основные характеристики угольного котла: КПД, требования к углю, диапазон регулирования мощности, экологические показатели. Рассмотрим особенности линейной горелки на примере КПД котла.

По уравнению обратного баланса КПД – брутто котла =  $100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$ , где  $q_2 - q_6$  – величина основных видов потерь тепла (%). Конструкция линейной горелки позволяет минимизировать следующие потери:

- $q_2$  (с уходящими газами). Количество тепла, уносимого дымовыми газами, зависит от их температуры и массы. Эффективный 5-ходовый теплообменник котлов ТР снижает температуру дымовых газов почти до минимально возможной (115 °С при работе на 600 кВт), поэтому уменьшить потери тепла можно только снижая избыток воздуха во всех режимах работы котла (прежде всего, на малой мощности). Достигается это путем зонирования подачи первичного воздуха в топку. При работе на полной мощности горелка почти по всей площади заполнена горящим углем, но в начале горелки (куда подается уголь) воздуха требуется больше, а в конце горелки (где горючие вещества угля уже почти выгорели) – меньше. Такое распределение воз-

духа достигается заслонкой, снижающей подачу воздуха во вторую половину горелки. На малой мощности, когда уголь горит только в первой половине горелки, часть форсунок можно отключить полностью, прекратив тем самым подачу воздуха мимо зоны горения. Такая схема позволяет горелке работать даже на 15–20 % мощности без подачи в топку избыточного воздуха, то есть, с оптимальным для угля коэффициентом избытка воздуха (альфа);

- $q_3$  (химический недожог горючих газов). Полное сгорание горючих газов в топке достигается так. Контроллер котла вычисляет количество воздуха, которое нужно подать в топку (оно пропорционально количеству подаваемого угля, а значит, текущей мощности котла) и частотными регуляторами меняет производительность вентилятора поддува и дымососа. Таким образом, в любом режиме работы котла в топку подается оптимальное количество воздуха. Подача угля в зону горения производится маленькими порциями (шнек вращается медленно, почти непрерывно), это позволяет равномерно и в нужном соотношении смешивать в топке горючие газы с воздухом. Нужное соотношение не является постоянным, оно зависит от марки сжигаемого угля. Так, бурые угли содержат около 50 % летучих веществ, а каменные угли СС, ТС (которые тоже можно использовать в котлах ТР) – около 25 %. Для того, чтобы в обоих случаях сжигание было полным, в линейную горелку встроены регуляторы, которые изменяют соотношение подаваемых в топку первичного и вторичного воздуха. Таким образом горелку можно настроить на полное сжигание угля различных марок. Дожигание горючих газов происходит в футерованной топке, где поддерживается высокая температура, а большая длина топки обеспечивают достаточное время горения газов;

- $q_4$  (механический недожог). Ложе горелки не имеет прозоров, а первичный воздух подается в топку через 50–80 форсунок. Это исключает просыпание мелкой фракции угля, штыб (угольная пыль) в топке полностью выгорает (в отличие от топок других типов), можно использовать фракцию 0–50 мм;

- $q_5$  (потери на наружное охлаждение) относится к котлу в целом, поэтому здесь не рассматриваются;

- $q_6$  (унос тепла со шлаками). В процессе работы шлак перемещается шнеком из зоны горения к концу горелки и сыпается во внешний зольник. При этом он перемещается по ложу горелки; водоохлаждаемая горелка и шнек выступают как эффективный теплообменник, поэтому шлак сыпается в зольник уже остывшим, что резко снижает унос тепла.

Таким образом, в линейной горелке «Терморобот» минимизированы все основные виды потерь тепла.

Автоматические угольные котельные «Терморобот» – это новая технология автономного отопления.

Высокая степень автоматизации котла и большой объем угольного бункера (4,2–10 м<sup>3</sup>) обеспечивает бесперебойную работу котельной без участия человека в течение 3–20 дней на 1 загрузке топлива. Ручной труд сведен до минимума: в котельной не нужны кочегары и операторы. Бригада из 7 человек может обслуживать до 25 котельных «Терморобот», разнесенных на десятки километров, заменяя собой до 100 кочегаров и другой персонал. Управлять работой «Термороботов» можно дистанционно с помощью системы диспетчеризации. Это позволяет работать по энергосервисным контрактам, продавая тепло муниципальным заказчикам [1].

**В состав 1-контурной модульной котельной «Терморобот» входит:**

- котел ТР-60 – ТР-600 в сборе;
- утепленный модуль со встроенным угольным бункером; дымовая труба; дверь;
- основной, резервный и вспомогательный циркуляционные насосы;
- распределительный электрощит + АВР с электросчетчиком; освещение;
- водосчетчик с импульсным выходом; термометры, манометры;
- автоматический электродвигатель (9 кВт); ИБП (инвертор) с аккумуляторами;
- запорная арматура, трубы, фильтры; рама с тележкой для зольника; лестница.

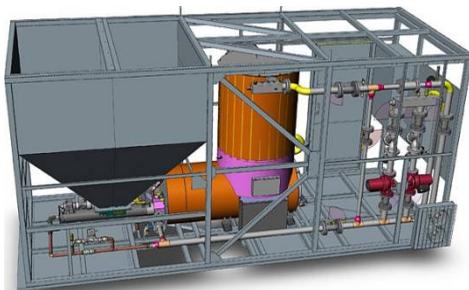


Рисунок 4 – Котельная «Терморобот»

**В состав 2-контурной блочно-модульной котельной входит:**

- 1-контурная блочно-модульная котельная «Терморобот» нужной мощности;
- утепленный модуль для размещения дополнительного оборудования;
- 2 пластинчатых теплообменника; расширительный бак котлового контура;
- 2 основных и вспомогательный циркуляционные насосы сетевого контура;
- ИБП с аккумулятором для вспомогательного насоса (в котельных от 1 МВт);
- узел коммерческого учета тепла (2 расходомера); система умягчения воды;
- термометры, манометры, запорная арматура, фильтры сетевого контура.

Какой уголь подходит для «Терморобота». В официальной документации на котлы «Терморобот» указан рекомендованный сорт угля. При использовании этого угля завод гарантирует, что фактические показатели котла будут соответствовать паспортным по следующим параметрам:

- номинальная мощность котла и диапазон изменения мощности;
- КПД котла;
- часовой и суточный расход угля;
- содержание твердых и газообразных загрязняющих веществ в дымовых газах;
- бесперебойность работы в автоматическом (без участия человека) режиме;
- срок эксплуатации котла в целом, а также быстроизнашиваемых узлов.

Рекомендуется использовать сухой бурый уголь сорта ЗБМ (фракция 13–25 мм) или ЗБОМ (13–50 мм) (см. классификацию угля) месторождения Большесыртское Балахтинского района Красноярского края, он имеет хорошие показатели и цену.

В документации указаны также допустимые сорта угля. Это уголь марки Д (каменный длиннопламенный) и угли Б, Д фракции 0–50 мм (ОМСШ). При сжигании таких углей гарантируется работоспособность котла, однако допускается ухудшение перечисленных выше параметров. Например, согласно п. 3.5 ГОСТ 30735-2001, «при использовании рядового угля вместо грохоченого теплопроизводи-

тельность котла снижается до 85 % номинальной». См. также п. 4.1.19 и п. 6.1 указанного ГОСТа.

Не рекомендуется использовать уголь низкого качества (отсев, шлак; уголь с высоким содержанием влажной пыли). Котлы «Терморобот» сохраняют работоспособность при использовании весьма плохих углей, но использование несортového угля не дает экономии:

- влажный уголь содержит около 10 % воды. Купив его, Вы недополучите 10 % угля, и будете вынуждены потратить часть тепла на испарение этой воды (Вам придется купить угля на 11–12 % больше);
- низкокачественный (мелкий, влажный) уголь «зависает», то есть, слипается или замерзает в бункере. Это вызывает остановку котла, и может привести к размораживанию здания, теплотрассы и самого котла. Засыпав плохой уголь, придется круглосуточно следить за котлом и обрушивать уголь вручную;
- зольность низкосортного угля на 5–10 % выше, чем у сортового, а теплота сгорания ниже, это тоже прямая потеря денег (каменная пыль по цене угля);
- повышенная зольность угля приводит к ускоренному загрязнению горелки, теплообменника и дымохода (придется чаще чистить котел), а зола уноса загрязняет прилегающую территорию;
- большое содержание породы и инородных тел в низкосортном угле приводит к механическому износу механизма подачи и может вызвать заклинивание или повреждение шнека (негарантийный случай).

По сути, плохой уголь превращает автоматический котел в ручной; расходы на оплату труда и ремонт котла будут гораздо выше, чем полученная «экономия».

Не рекомендуется использовать угли марок Г (газовые), Ж (жирные), Т (тощие), СС (слабоспекающиеся), А (антрацит). При их использовании ухудшаются характеристики и потребительские свойства котла и не гарантируется его бесперебойная работа.

Если нет возможности купить рекомендованный уголь, можно выслать на завод «Терморобот» несколько тонн местного угля (2–3 суточных нормы расхода угля на максимальной мощности), специалисты завода проведут его испытания. Если такой уголь может нормально гореть в «Термороботе», будут выработаны рекомендации по настройкам котла, а также определены его фактические характеристики при работе на этом угле (например, может снизиться его мощность). Пример таких испытаний:

- 1Б, РУ «Новошахтинское» (Приморский край);
- 2Б, Кангаласский угольный разрез (Якутия);

- ТС, Кайерканский угольный разрез (Норильск, Красноярский край);

- СС, Кедровский угольный разрез (Кемеровская область).

Если результаты испытаний угля будут отрицательными (стабильное качественное горение не будет обеспечено), покупка «Терморобота» окажется нецелесообразной.

Не допускается использование любых других видов топлива (дрова, пеллеты, опилки, щепа, торф, угольные брикеты и гранулы, различные смеси сухих и жидких горючих веществ).

Производитель не гарантирует безопасного горения этих видов топлива: несмотря на установленные в котле системы защиты, горение может пойти в бункер и вызвать возгорание котла. Использование этих видов топлива означает безусловное снятие котла с гарантии.

**Виды и сорта угля.** Уголь классифицируется по многим параметрам (география добычи, химический состав), но при покупке угля достаточно разобраться в маркировке и возможности использования в «Термороботе». По степени углефикации выделяют три вида угля: **бурый, каменный и антрацит**. Используют следующую систему обозначений: **сорт = марка + класс крупности** (таблицы 1, 2).

Таблица 1 – Марки углей

<b>Бурые</b>		<b>Б</b>
<b>Каменные</b>	Длиннопламенные	<b>Д</b>
	Газовые	<b>Г</b>
	Жирные	<b>Ж</b>
	Коксовые	<b>К</b>
	Отощенно-спекающиеся	<b>ОС</b>
	Слабоспекающийся	<b>СС</b>
	Тощие	<b>Т</b>
<b>Антрациты</b>		<b>А</b>

Кроме основных марок, приведенных в таблице 1, выделяют также промежуточные марки каменного угля: ДГ (длиннопламенно-газовые), ГЖ (газовые жирные), КЖ (коксовые жирные), ПА (полуантрациты), бурые угли делятся по группам (1Б, 2Б, 3Б). Коксующиеся марки угля (Г, кокс, Ж, К, ОС) в теплоэнергетике практически не используются, т. к. они являются дефицитным сырьем для коксохимической промышленности. По классу крупности (размеру кусков, фракции) сортовой каменный уголь подразделяется на следующие (таблица 2):

Таблица 2 – Классы углей

<b>П</b>	Плитный	более 100 мм
<b>К</b>	Крупный	50-100 мм
<b>О</b>	Орех	26-50 мм
<b>М</b>	Мелкий	13-25 мм
<b>С</b>	Семечко	6-13 мм
<b>Ш</b>	Штыб	менее 6 мм
<b>Р</b>	Рядовой	не ограниченный размерами

Кроме сортового угля в продаже присутствуют совмещенные фракции и отсевы (ПК, КО, ОМ, МС, СШ, МСШ, ОМСШ). Размер угля определяют исходя из меньшего значения самой мелкой фракции и большего значения самой крупной фракции, указанных в названии марки угля. Например, фракция ОМ (М – 13–25, О – 25–50) составляет 13–50 мм. Кроме указанных сортов угля в продаже можно встретить угольные брикеты и гранулы, которые прессуют из низкообогащенного угольного шлама.

В рамках магистерской диссертации мною будет предложено точное устройство с ретортной топкой, позволяющее сжигать уголь разного фракционного состава (т. к. реторта «Терморобота» позволяет сжигать уголь определенного фракционного состава).

### Список литературы

1. Автоматические угольные котлы и котельные Терморобот [Электронный ресурс]. – [http : //termorobot.ru/](http://termorobot.ru/)– статья в интернете.

## СИСТЕМА УДАЛЕННОЙ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ НА ПРИМЕРЕ МОДУЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

**Е.Е. Паутова, А.А. Гладких, Е.Б. Жуков,  
К.В. Меняев, М.В. Тиханов**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: система удаленной диспетчеризации, модульная котельная установка.

Аннотация: Произведен анализ особенностей использования модульных котельных, в частности разработана система удаленной диспетчеризации.

В настоящее время актуальны вопросы рационального или цивилизованного энергопотребления. В это понятие входят: обеспечение достаточных комфортных условий внутри помещений, снижение непроизводительных трат энергии, надежное, стабильное функционирование оборудования, обеспечивающего теплоснабжение и, наконец, минимизация капитальных и эксплуатационных затрат.

Актуальность рассматриваемой проблемы связана с тем, что наиболее выгодным вариантом замены изношенного, морально устаревшего отопительного оборудования являются модульные котельные. Так как данный тип котельных служит для теплоснабжения отдельных зданий или производственных помещений, расположенных в основном в сельских и труднодоступных местностях, то мониторинг режимов работы оборудования обычными средствами становится затруднительным либо невозможным.

Модульные котельные установки (МКУ) – это небольшие котельные установки для местного теплоснабжения жилых домов, общественных или производственных зданий. Блок можно устанавливать на землю возле потребителя тепла или на крыше дома [1].

В модульных котельных установках смонтированы котлы, теплообменники, насосы, системы автоматики и водоподготовки. МКУ небольшой мощности монтируются в одном контейнере. Если же требуется высокая мощность, например, для отопления нескольких зданий, котельная может состоять из нескольких контейнеров. Такая модульная котельная будет относиться к блочному типу.

Модульные котельные установки различаются по мощности котлоагрегатов. В МКУ котлоагрегаты могут быть мультитопливными, то есть работать и на газообразном, и на жидком топливе. Переключение с одного вида топлива на другой, осуществляется в считанные минуты. Модульные котельные с мультитопливными котлоагрегатами незаменимы в тех регионах, где бывают перебои с поставками газа. Кроме того, котельные такого типа, имеющие относительно небольшие габариты, легко перевозятся на автотранспорте. Поэтому муниципальные коммунальные службы все чаще используют их в чрезвычайных ситуациях – например, при авариях на теплотрассах. Такой модуль подвозят к оставшимся без тепла домам и подключают с помощью шлангов к отопительной системе. Параллельно устраняется авария на трассе.

Модульные котельные установки можно разделить на модульные котельные контейнерного типа (МККТ), модульные котельные блочного типа (МКБТ) и модульные котельные быстросборные (МКБ).

МККТ представляет собой транспортабельный модуль-контейнер, состоящий из стального каркаса и ограничительных конструкций – строительных плит типа «сэндвич» с толщиной 100–120 мм, отвечающих правилам пожарной безопасности, а также климатическим условиям, как Севера, так и средней полосы России. Имеется вентиляционное оборудование, система отопления. Смонтированы котлоагрегаты, теплообменники, насосы, системы автоматики и водоподготовки. Автоматика МККТ полностью обеспечивает выполнение всех операций по производству необходимого количества тепла для систем отопления и ГВС (горячего водоснабжения) в зависимости от погодных условий и от изменения разбора горячей воды. Модуль стабильно работает в автоматическом режиме, поэтому не требуется постоянного присутствия дежурного персонала.

Преимущества модульной котельной контейнерного типа (МККТ) перед котельной централизованного теплоснабжения:

- МККТ не требуют укладки теплотрасс, а, следовательно, и затрат на их содержание;
- нет необходимости возводить здание под котельную и привлекать спецтехнику и рабочих для подготовки фундамента;
- модульные котельные приспособлены к характерным российским условиям эксплуатации: к некачественной воде и нестабильному давлению газа.

Мощностной ряд МККТ имеет ограничение сверху. При мощности котлоагрегата выше 4 МВт контейнер, в котором размещается оборудование, становится нетранспортабельным, и основные преимущества модульных котельных пропадают. Но, помимо мощности, критерием выбора МККТ становится также тип сжигаемого топлива. МККТ может иметь котлоагрегат с любым видом топлива (жидким и газообразным). Сопутствующее оборудование размещается в отдельном модуль-контейнере.

Модульные котельные блочного типа (МКБТ) – котельные, состоящие из нескольких модулей, разделенных на блоки [2]. Котельная установка может комплектоваться разным числом модулей, это зависит от мощности и интересующих Заказчика характеристик. Модульная котельная установка может работать на любом виде топлива – твёрдое топливо, газ, дизтопливо, мазут. Также может использоваться одновременно несколько типов топлива. Модульная котельная полностью комплектуется необходимыми устройствами контроля, учёта и автоматизации процессов. Они изготавливаются мощностью от 0,6 до 16 МВт (водогрейные), от 1 до 16 т/ч (паровые).

Модульные котельные быстроборные (МКБ) представляют собой стационарную котельную с применением современного оборудования, автоматики, систем диспетчеризации и управления [3]. Изготовление конструкции требует использования специальной техники для возведения фундамента, установки несущих конструкций, а также монтажа стеновых панелей. Быстроборные котельные изготавливаются мощностью от 16 МВт до 35 МВт. Процесс автоматизации контроля работы всех инженерных структур осуществляется при помощи большого количества датчиков, связанных между собой. Таким образом, можно значительно повысить качество обслуживания технологического оборудования и предотвратить возникновение аварийной ситуации; сократить время на установление причин аварии; сократить потребление энергоносителей и значительно уменьшить количество обслуживающего персонала. Все это возможно при установлении системы диспетчеризации, работа которой основана на взаимосвязи различных датчиков с центральным компьютером, который фиксирует их данные.

Система диспетчеризации обеспечивает многоуровневый комплексный контроль и управление, а именно:

- автоматический сбор рабочих данных и параметров системы, подлежащих диспетчерскому контролю;
- отображение состояния работы элементов (подсистем, оборудования, устройств) системы и представление информации в удобном для анализа виде (таблицы, графики, диаграммы);
- бесперебойную диагностику подчиненных объектов по перечню контролируемых параметров, обеспечение внеочередного прохождения сигналов с объектов контроля, которым присвоен высший аварийный приоритет с четким представлением ситуации и окнами контекстной подсказки диспетчеру;
- ведение журнала событий в автоматическом режиме с персонализацией ответственности за принимаемое диспетчером решение.

Преимущество применения систем диспетчеризации:

- быстрая и достоверная диагностика состояния объектов;
- возможность замены множества дорогих механических самописцев всего одним персональным компьютером диспетчера с возможностью оперировать информацией в электронном виде с удобной визуализацией необходимой информации;
- сбор информации для статической обработки и прогнозирования, анализ потерь энергоносителей в коммунальном хозяйстве, в особенности при проведении взаимных денежных расчетов;
- круглосуточный контроль работы оборудования;
- снижение влияния человеческого фактора;

- снижение эксплуатационных расходов;
- оперативное реагирование на возникающие нештатные ситуации.

В общем виде система диспетчеризации включает в себя шкаф управления и диспетчерский пункт.

Шкаф управления системой диспетчерского контроля и управления обеспечивает сбор информации на месте размещения оборудования и передачу данных на диспетчерский пункт управления.

Диспетчерский пункт служит для получения данных от шкафов системы диспетчеризации, отображения данных в режиме реального времени, оповещения о нештатных ситуациях, архивирования и протоколирования данных.

Шкаф управления и диспетчеризации размещается непосредственно на контролируемом объекте. Диспетчерский пункт – на рабочем месте дежурного персонала. Ввиду большой удаленности контролируемых объектов относительно диспетчерского пункта, организация проводных каналов связи для контроля параметров не представляется возможным, ввиду чего сбор информации организуется на основе беспроводных каналов связи. Одним из самых распространенных способов является передача данных через распределенные сети GSM, для чего шкаф управления и диспетчерский пункт оснащаются GSM – модемами.

Архитектура системы удаленной диспетчеризации (СУД), представленная в настоящей работе, подразумевает наличие трех блоков: объект контроля; серверная часть; клиентская часть.

Применительно к СУД, объект контроля, которым в настоящей работе выступает модульная котельная, осуществляет регистрацию, сбор и отправку контролируемых параметров. Очевидно, что эти функции должны быть реализованы средствами системы автоматического регулирования.

Функционально, серверная часть выполняет сбор, первичный анализ, архивацию, генерацию отчетов и трансляцию полученных данных для клиентской части СУД. Практическая реализация серверной части может быть выполнена:

1. В виде выделенной ЭВМ диспетчерского пункта, имеющая круглосуточный доступ к сети интернет, обладающая статическим IP адресом (т. е. сетевой адрес компьютера обеспечивает непосредственное обращение к нему через сеть интернет), а также защищенный от непосредственного физического воздействия извне (персонал не должен иметь непосредственный доступ). Основывающийся на интернет сервисах, предоставляемых сторонними компаниями.

2. Клиентская часть комплекса СУД, обеспечивает доступ к данным хранящимся в архивах серверной части, объект контроля, получение транслируемых параметров работы оборудования. Так как, основное требование, предъявляемое к данной части – обеспечение доступа из любого места, то по этой причине клиентская часть выполняется в виде мобильного приложения для смартфонов и планшетных компьютеров. Так же не маловажную роль играет и представление полученных данных в виде удобном для анализа.

Из практики эксплуатации отопительных котельных известно, что наилучшим образом технологический процесс описывается по средствам показаний датчиков:

$t^{\text{в}}$  – температура воды на входе, °С;

$P^{\text{в}}$  – давление воды на входе, Па;

$t^{\text{в}}$  – температура воды на выходе, °С;

$P^{\text{в}}$  – давление воды на выходе, Па.

Указанные параметры непосредственно говорят о тепловой нагрузке на котел в текущий момент времени. Остальные параметры при необходимости так же могут быть, по желанию, включены в состав передаваемых данных, при этом изменится состав оборудования системы автоматического регулирования.

Очевидно, что реализация системы удаленной диспетчеризации подразумевает передавать данные в цифровом виде. Для этого в составе системы автоматического регулирования должны иметься приборы, выполняющие функции аналого-цифрового преобразования. На сегодняшний день подобные устройства нашли широкое применение в энергетической отрасли страны так и в иных областях, промышленного производства. Кроме преобразования сигналов в цифровой вид, такие устройства должны обеспечивать передачу полученных данных в локальную технологическую сеть, для последующего сбора и передачи в серверную часть. Такой локальной технологической сетью является RS485. Сеть имеет топологию шина, обеспечивает достаточное количество подключаемых приборов (без повторителей в обычных условиях максимально 32), поддерживается значительным количеством современных приборов.

Сбор данных из локальной технологической цепи осуществляется, в обычном случае программируемым логическим контроллером (ПЛК). Этот элемент системы предназначен для генерации комплексных управляющих воздействий, в соответствии с управляющей программой, на автоматизированные органы управления. Следует сказать, что этот элемент системы автоматического регулирования не всегда может присутствовать.

Так, например, возможны варианты построения, при которых управляющие воздействия на технологический процесс оказываются средствами отдельных регуляторов, контролирующими отдельный параметр или их группу. Очевидно, что при подобном подходе в локальной технологической сети необходимости нет, а, следовательно, о создании на базе данного технологического оборудования СУД, без кардинального изменения структуры системы автоматического регулирования, речи быть не может.

Таким образом, применение ПЛК, на сегодняшний день, становится необходимостью, обеспечивающий надежное и эффективное управление процессом генерации тепловой энергии.

Выбор и функционал, ПЛК зависит во многом от оборудования и особенностей технологического процесса. С точки зрения СУД, функцией ПЛК является, помимо сбора и первичной обработки данных, полученных от приборов АЦП, формирование пакета данных направляемых в серверную часть комплекса СУД. Структура данных в пакете зависит от принимающей программы скрипта.

Передача данных серверной части осуществляется средствами GSM модема.

Обычно GSM модемы строят свою работу на основе беспроводных сетей передачи информации. За счет этого процесс установки и управления реализуется в кратчайшие сроки на высоких скоростях. Модемы работают на основе прозрачного соединения типа «точка-точка», которое накладывается поверх стека TCP/IP. Существует несколько вариантов настройки оборудования: через стандартный браузер веб, при помощи быстрых смс-сообщений, через облачный портал.

Модемы функционируют в непрерывном режиме и могут устанавливаться в местах, где проводное соединение не представляется возможным.

Число поддерживаемых интерфейсов различно и зависит от выбранной модификации оборудования. При желании представленное оборудование может интегрироваться в разнообразные m2m системы и подсистемы. Соединение выполняется по принципу «точка-точка», наложенному поверх стека TCP/IP.

Таким образом, модем, подключенный непосредственно к ПЛК принимает от него пакет данных. Учитывая специфику работы GSM модемов, пакет по своей сути является так называемой AT командой.

AT-команды – набор команд, разработанных в 1977 г. Набор команд состоит из серий коротких текстовых строк, которые объединяют вместе, чтобы сформировать полные команды операций, таких как набор номера, начала соединения или изменения параметров подклю-

чения. Каждая команда всегда начинается буквами AT, дополненными одной или более командой.

Набор команд и архитектура оказались весьма удачными и неоднократно расширялись и дополнялись. ETSI выпустил ряд стандартов описывающих управление мобильными телефонами и модемами стандарта GSM.

Далее модем, подключенный к текущему сотовому оператору, выполняет отсылку пакета данных по указанному в AT команде адресу.

Клиентская часть комплекса СУД предназначена для непосредственной визуализации контролируемых параметров технологического процесса. Так как доступ к серверной части осуществляется по средствам сети интернет, то отслеживание параметров может быть обеспечено из любой точки мира при условии наличия подключения к сети. Реализация данной части осуществлена в виде мобильного приложения для устройств, хотя при необходимости подобные функции можно обеспечить путем создания сайта имеющего подобные возможности.

Современные средства разработки мобильных приложений практически не имеют различий в операционных системах при компиляции приложения, таким образом, мобильное приложение может быть сгенерировано под любую из современных платформ (Windows, iOS, Android).

В качестве первичных преобразователей температуры предполагается использование погружных термосопротивлений марки ДТС с защищенными гильзами производства НПО «ОВЕН». Принцип действия термосопротивления основан на свойстве проводника изменять электрическое сопротивление с изменением температуры окружающей среды.

В качестве первичных преобразователей давления сетевой воды предполагается использование датчиков избыточного давления марки ПД100-ДИ производства НПО «ОВЕН». Это микропроцессорный датчик давления, предназначенный для непрерывного избыточного преобразования давления измеряемой среды в унифицированный сигнал постоянного тока 4...20 мА.

Датчики применяются в системах автоматического регулирования и управления технологическими процессами в различных областях промышленности и жилищно-коммунального хозяйства: в котельных, на тепловых пунктах, компрессорных и насосных станциях, КНС, станциях водоподготовки, газовом хозяйстве, объектах газоснабжения, мазутных парках и т. п.

Рекомендуемая рабочая среда для датчиков – различные жидкости (в т. ч. агрессивные), пар, газы (в т. ч. метан), парогазовые и газовые смеси, не агрессивные к материалу измерительной мембраны и уплотнения сенсора, при давлении, не превышающем верхний предел измерения датчика.

Для регистрации и передачи показаний с датчиков температуры и давления предполагается использование модулей серии MB110, производства НПО «ОВЕН». В основу MB110 положен широко распространенный стандарт проводной связи RS-485. Все модули используют для коммуникации простые протоколы, основанные на принципе «запрос-ответ». Тип протокола определяется прибором автоматически. Прибор не является Мастером сети, поэтому сеть RS-485 должна иметь Мастер сети, например, персональный компьютер с запущенной на нем SCADA-системой, контроллер или регулятор. В данном случае в качестве Мастера сети предполагается использование контроллера «ОВЕН» ПЛК. Конфигурирование прибора осуществляется на персональный компьютер через адаптер интерфейса RS-485/RS-232 или RS-485/USB с помощью программы конфигуратора.

Блок логического управления и обработки предполагается выполнить на базе программируемого логического контроллера СПК107 с сенсорным управлением (панель оператора) НПО «ОВЕН». СПК107 представляет собой устройство класса человеко-машинный интерфейс со встроенными функциями свободно программируемого контроллера. СПК107 предназначен для создания автоматизированных систем управления технологическими процессами в различных областях промышленности и энергетики.

Передачу данных серверной части комплекса предполагается осуществлять при помощи Модема TELEOFIS RX100-R2. Модем построен на базе модуля Telit GL868-Dual. Стандартный последовательный порт обеспечивает трансляцию данных к прибору. На текущий момент GSM модем RX100-R2 совместим со всеми типами популярных приборов учета ресурсов с портом RS-232. Модем имеет встроенный TCP/IP стек с управлением AT командами, автоматическая подача которых может быть реализована на встроенном интерпретаторе языка Python.

В заключении следует отметить, что модульная котельная является одним из наиболее выгодных вариантов замены изношенного отопительного оборудования. Представленная система диспетчеризации позволяет обеспечить многоуровневый комплексный контроль над основными параметрами котельной. Так как большая часть модульных котельных используется в сельской либо труднодоступной местности,

то данный тип диспетчеризации является самым удачным. Применение СУД позволяет быстро и достоверно диагностировать состояние объекта; снизить расходы на эксплуатацию; уменьшить количество обслуживающего персонала, тем самым повысив эффективность его работы.

### Список литературы

1. ООО «Завод котельного оборудования ЭнергоРесурс» [Электронный ресурс] / Модульные котельные установки. – Режим доступа : <http://www.rer22.ru/catalog/modulnye-kotelnye-ustanovki/> / свободный. (Дата обращения 06.02.2017 г.).
2. ООО «Стройтехкомплект» [Электронный ресурс] / Блочно-модульные котельные. – Режим доступа : <http://www.tehcomp.ru/block-module/>. (Дата обращения 06.02.2017 г.).
3. ООО «Стройтехкомплект» [Электронный ресурс] / Стационарные котельные. – Режим доступа : <http://www.tehcomp.ru/stationary/>. (Дата обращения 06.02.2017 г.).

## КОТЕЛ С ВИХРЕВОЙ ТОПКОЙ ДЛЯ СЖИГАНИЯ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА

**М.Е. Пузырев, Г.Н. Лихачева**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»

г. Барнаул

Ключевые слова: вихревая топка, котел, растительные отходы, лузга подсолнечника.

Аннотация: Предлагается использование паровых котлов с вихревыми топками для сжигания лузги, образующейся при производстве подсолнечного масла. Тем самым обеспечивается утилизация растительных отходов и выработка CO<sub>2</sub>-нейтральной энергии для нужд производственного комплекса.

При переработке подсолнечника на маслоэкстракционных заводах происходит его ошелушивание. Выход шелухи (лузги) составляет 11–20 % от массы семян, образуя многотонный поток отходов. Целесообразным является рассмотрение лузги в качестве топлива, учитывая достаточно высокую теплоту сгорания, 3700–4100 кДж/кг. В связи с низкой насыпной плотностью 100–150 кг/м<sup>3</sup> транспортирование и

складирование шелухи в исходном виде весьма проблематично, следовательно, первичную переработку разумнее осуществлять в непосредственной близости от основного производства.

На российском рынке котлов на растительных отходах для промышленной теплоэнергетики практически не представлены отечественные образцы. Краткий же обзор иностранных экземпляров показал, что все они по конструкции являются жаротрубными, с большой футерованной топочной камерой, скомпонованной с наклонно-переталкивавшей решеткой. Такая конструкция проверена десятилетиями и обладает не плохими эксплуатационными качествами, однако, является очень громоздкой, с высокой металлоемкостью и, соответственно, стоимостью. Кроме того, для размещения в российских климатических условиях таких котлов требуется возведение, соразмерно большего, здания котельной [1].

Принципиально другой подход к проектированию котлов для сжигания сухих парусных топлив используется на предприятии «ПроЭнергоМаш», г. Барнаул. В основе лежит использование камерных вихревых топков. Вихревая топка обладает рядом преимуществ:

- частицы удерживаются внутри топочной камеры до полного выгорания за счет циклонного эффекта, не требуется наличие большого объема для гравитационной сепарации уноса;
- ступенчатая подача дутья и хорошее перемешивание продуктов сгорания обеспечивают низкий недожог;
- полностью экранированная камера позволяет удерживать процесс горения в низкотемпературном диапазоне, предотвращая интенсивное шлакование.

Вихревое движение лужи в объеме топки осуществляется при тангенциальной подаче потоков первичного и вторичного воздуха [2]. В зависимости от конструктивного оформления топки возможно образование вихря с горизонтальной или вертикальной осью. В результате вихревого процесса увеличивается время пребывания частиц лужи в топке и, соответственно, уменьшается их недожог. Вихревой факел равномерно заполняет экранированную топочную камеру, при этом температура в зоне горения значительно снижается.

Автором совместно с конструкторами предприятия «ПроЭнергоМаш» проводилось проектирование, монтаж и испытания паровых и водогрейных котлов с вихревыми топками для сжигания подсолнечной лужи в котельных ряда маслоэкстракционных заводов. Выявлены техническая обоснованность и экономическая целесообразность использования такой технологии сжигания.

В 2016 г. запущена в эксплуатацию новая производственная котельная на «Барнаульском МЭЗе» с котлом Е-14-1,4, паропроизводительностью 14 тонн в час. Котел оборудован вихревой дубль-топкой «Торнадо». Топка работает в режиме факельно-слоевого сжигания топлива. Большая часть топлива сгорает во взвешенном состоянии внутри вращающегося вихревого факела. При этом мелкие частицы удерживаются в топке за счет циклонного эффекта, а более крупные оседают на колосник со шнеком-ретортой. Вихревой поток горящего топлива и дутья предотвращает спекание слоя, обеспечивает равномерное перемешивание горящих частиц с окислителем и глубокое выжигание из них горючих веществ.

При работе котла горящий слой топлива стабилизирует горение в вихре, т. е. в над-слоевой части топки. И наоборот, вихревой факел, дожигаящий унос и летучие за счет искр и излучения, ускоряет воспламенение и горение слоя. Временное прекращение подачи топлива на 5–10 минут не влияет на работу котла.

Теплотехнические испытания с наладкой режимов работы проводились при сжигании подсолнечной лузги на нагрузках от 6 до 16 тонн пара в час.

В результате испытаний было установлено, что котел Е-14-1,4 ОИ обеспечивает необходимые параметры работы: нагрузку – до 15,2 т/ч. при расходе лузги 2510 кг/час, рабочее давление пара 1,3 МПа. Максимально достигнутая паропроизводительность составила 16 т/ч. Увеличение паропроизводительности сверх номинальной (14 т/ч) не рекомендуется из-за возможного выхода из низкотемпературного режима работы вихревой топки с интенсификацией процессов шлакования поверхностей нагрева котельной установки.

Заполнение топочных камер вихревым факелом равномерное, рисунок 1. Вынос искр из топок практически отсутствует (рисунок 2).

Избыток воздуха в уходящих газах  $\alpha=1,37\dots 1,43$ .

Температура в топке не более 1000 °С.

Насыпная плотность лузги 130 кг/м<sup>3</sup>.

Рабочая зольность лузги 2,4 %.

Рабочая влажность лузги 10 %.

Доля горючих в уносе 0 %. Доля уноса 0,1.

Для горючих в золе провала и шлаке 3 %.

Выбросы оксидов азота составили 50–120 мг/м<sup>3</sup>.

Выбросы оксиды серы ниже чувствительности прибора.

Выбросы окислов углерода при работе котла на нагрузке 50–75 % держатся в диапазоне 250–500 мг/м<sup>3</sup>, при нагрузке 75–100 % составляют в среднем 400 мг/м<sup>3</sup>.

Работа котла продемонстрировала хорошую стабильность процесса горения. Вихревые топki легко растапливаются и быстро выходят на режим. Наличие слоя топлива на колоснике обеспечивает устойчивость пламени, запуск вихревой топki из горячего резерва возможен через 60 минут после прекращения подачи топлива.

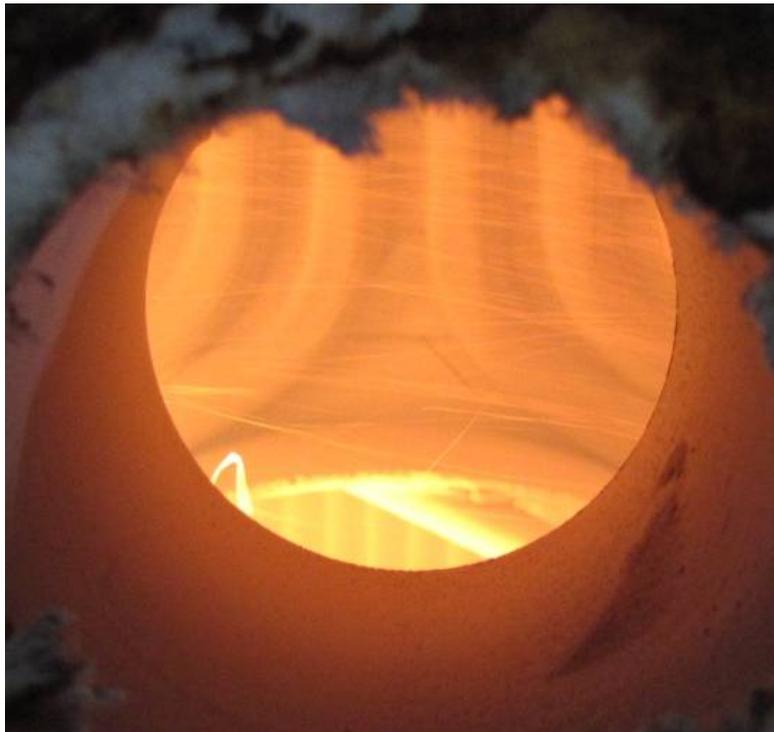


Рисунок 1 – Вид вихревой топki через боковой лючок



Рисунок 2 – Вид в камере охлаждения. Свечение из вихревых топков

### Список литературы

1. Пузырев, М. Е. Использование соломы в качестве топлива в промышленной теплоэнергетике / М. Е. Пузырев, Г. Н. Лихачева, Е. Б. Жуков // Сб. статей XX международной конференции: «Развитие науки в XXI веке» – г. Харьков, НИЦ «Знание», часть 1. – 2016. – с. 83–87.
2. Вихревая топка [Текст]: пат. 2582722 Рос. Федерация : F23C 5/32 (2006.01)/ Пузырев Е. М., Голубев В. А., Пузырев М. Е. ; заявитель и патентообладатель Пузырев Е. М. – № 2013136666/06; заявл. 05.08.2013; опубл. 27.04.2016, Бюл. № 12.

# ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТРАСЛИ ЭНЕРГОМАШИНОСТРОЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫМ ТОПЛИВОМ

**В.Е. Рыбалов, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: биологические отходы, биогазовая установка.

Аннотация: Рассмотрено обеспечение отрасли энергомашиностроения и общественного транспорта экологически чистым топливом и проблемы его производства и адаптация технических и экономических систем к данной инновации

Во-первых, – это постоянно растущая цена на углеводороды. Во-вторых, понимание возможности безотходной утилизации биологических отходов, что решает проблему свалок и производства экологически чистого и более дешевого относительно классического природного газа и нефти энергоносителя.

Речь пойдет о природном газе метане. Для изготовления биогаза, в качестве сырья, подходит любой органический элемент: растительный материал (листва, трава, древесина); отходы растениеводческой деятельности; отходы животноводческого хозяйства; различные органические отходы жизнедеятельности человека и прочее. Таким образом, схема производства биогаза, в качестве бизнес – идеи, окупает себя не только продажей непосредственно газа, но и продажей различных ресурсов, таких как электричество, удобрение, углекислого газа. Кроме того, согласно протоколу для компаний, при работе в сфере альтернативных источников энергии, компания получает надбавку при реализации электричества на оптовом рынке. Биогазовая установка должна иметь следующее необходимое оборудование: емкость гомогенизации, загрузчик твердого (жидкого) сырья, реактор, мешалки, газгольдер, система смешивания воды и отопления, газовая система, насосная станция, сепаратор, приборы контроля КИПиА с визуализацией, система безопасности, биогаз из навоза [1].

Принцип работы установки по производству биогаза представлен на рисунке 1.

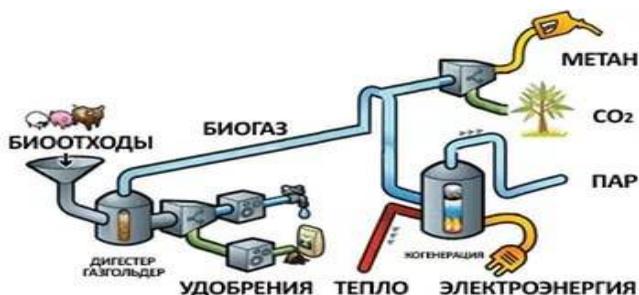


Рисунок 1 – Схема переработки биоотходов

Отрасли, в которых имеется перспектива использования – топливо для котельных установок. Общественный транспорт.

Создание системы переработки отходов и дальнейшего распределения готового топлива позволяет экономить природные ресурсы, а, следовательно, и бюджет государства, сократить выброс вредных веществ в атмосферу, что уменьшит локализацию загазованности в городе. Также решается вопрос с многочисленными свалками мусора, т. к. отходы будут стоить денег.

Существуют различные виды органических отходов, которые просто выбрасываются, хоронятся на отстойниках, либо сливаются в реки. Считаю, что такое отношение к ресурсам весьма пренебрежительно. Перечислю возможные этапы построения системы:

- организация системы сортировки и сборов отходов (обычный мусор, выкидываемый на свалку). Для отходов жизнедеятельности человека необходимо создать систему канализации приводящую отходы в специальные подготовительные отстойники. Так же это отходы сельского хозяйства;
- решение инженерно-управленческой задачи по построению завода, на котором будет производиться альтернативное биотопливо;
- экономически-правовая поддержка проекта государством;
- подготовка кадровой базы для проекта;
- подготовка котельных предприятий и автобусных парков города для перевода на метан.

### Список литературы

1. Производство биогаза из отходов органики как бизнес [Электронный ресурс], – <https://biznes-prost.ru/biogaz.html>– статья в интернете.

# ЯВЛЕНИЕ ПСЕВДООЖИЖЕНИЯ В РАБОТЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ FB-2

**Е.К. Сарсембенов, К.В. Меняев**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: псевдоожигение, экспериментальная установка, кипящий слой.

Аннотация: В данной статье рассмотрены преимущества и недостатки технологии кипящего слоя, представлены результаты эксперимента по исследованию аэродинамики топочных устройств с кипящим слоем.

Состояние двухфазной системы, при котором происходит перемещение твердых частиц относительно друг друга в ходе обмена энергией с каким-либо ее источником, называется псевдоожигением [1].

Псевдоожигение – это процесс, при котором по сути твердая статическая масса переводится в псевдосостояние, подобное состоянию жидкой массы. В отличие от сжижения в псевдоожидкое состояние переводится не газ, а сыпучая (при определенных обстоятельствах) масса. Название «кипящий слой» было присвоено благодаря тому, что слою присущи некоторые свойства капельной жидкости [1].

На практике псевдоожигенный слой образуется при восходящем потоке ожигающего агента через слой зернистого материала в момент достижения давления величины, достаточной для поддержания зернистого материала во взвешенном состоянии (рисунок 1) [2].

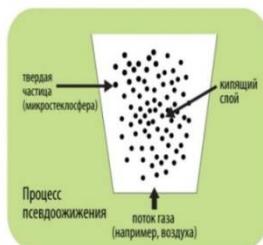


Рисунок 1 – Псевдоожигенный слой

В вертикальный сосуд любой (например, цилиндрической) формы, оснащенный поперечным газопроницаемым поддерживающим устройством в виде сетки, пористой перегородки и т.п., погружен слой мелкозернистого материала. При подаче через распределительную решетку снизу вверх потока газа (или жидкости) с малой скоростью слой остается неподвижным. Если постепенно увеличивать скорость газа до величины, при которой вес зернистого материала в слое уравновешивается силой гидродинамического давления восходящего потока, твердые частицы окажутся в гидродинамическом равновесии и получат возможность взаимного пульсационного перемещения, т.е. слой станет «текучим» и приобретет некоторые свойства капельной жидкости. С дальнейшим увеличением скорости газа слой расширяется, интенсивность движения частиц возрастает, но без нарушения гидродинамического равновесия. Наконец, по достижении скорости газа, при которой силы гидродинамического давления становятся больше силы тяжести, частицы выносятся из слоя [3].

Скорость газа (жидкости), при которой неподвижный слой зернистого материала переходит в псевдоожигенное состояние, называют скоростью начала псевдоожигения (или первой критической). Скорость газа, при которой твердые частицы выносятся из слоя, называется скоростью уноса (или второй критической). Таким образом диапазон псевдоожигения ограничен первой и второй критическими скоростями.

Зернистый материал для псевдоожигения может быть загружен в аппарат одновременно (периодическое псевдоожигение), либо может непрерывно вводиться и выводиться из аппарата (непрерывное псевдоожигение).

Если скорость ожимающего агента (газа или жидкости) незначительно превышает скорость начала псевдоожигения, то движение частиц выражено слабо – слой находится в состоянии спокойного псевдоожигения [1]. По мере увеличения скорости газа в слое начинают появляться небольшие газовые пузыри, повышающие интенсивность перемешивания частиц. Свободная поверхность слоя в этом случае очерчена достаточно резко, испытывая сравнительно небольшие колебания. Такой слой получил название собственно кипящего слоя. В литературе термину «кипящий слой» часто придают более широкий смысл, понимая его как псевдоожигенный слой в любых модификациях [1]. Характер псевдоожигения в значительной мере зависит от свойств твердых частиц, составляющих слой. В частности, крупные частицы одинакового размера склонны к образованию слоя с барботажем крупных пузырей. Добавление к такому слою порции более мелких частиц

несколько увеличивает его однородность, газовые пузыри становятся меньше. Вообще псевдоожигение полидисперсного слоя происходит более плавно (мягче). Псевдоожигение зернистых материалов возможно так же с помощью какого-либо механического побудителя, например лопастной мешалки или вибратора (механическое псевдоожигение). В таких системах твердые частицы могут интенсивно перемещаться в слое, который обладает многими свойствами, характерными для псевдоожигения газами (пневматическое псевдоожигение) и капельными жидкостями (гидравлическое псевдоожигение), например, текучестью, увеличением объема и др. Не касаясь специфических особенностей механического псевдоожигения, заметим, что одним из его преимуществ является возможность осуществления процессов в вакууме [1].

Сжигание твердого топлива в псевдоожигенном слое. Метод псевдоожигения твердого топлива получил довольно широкое распространение в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, строительной, фармацевтической промышленности, черной и цветной металлургии, энергетике и ряде других отраслей. Исследовались значительные выгоды использования псевдоожигенного слоя применительно к весьма широкому кругу технологических процессов и объектов. Однако при практическом внедрении метода выявились и определенные недостатки псевдоожигенного слоя.

Последующее изучение псевдоожигенных систем, работа над практическим внедрением метода привели к более сбалансированным оценкам. Было показано, что многие недостатки этого метода могут быть устранены или сведены к минимуму разработкой и внедрением рациональных технологических режимов и конструктивных решений. Это позволило расширить перечень технологических проблем, которые целесообразно решать, используя метод псевдоожигения [1].

Широкое внедрение метода псевдоожигения в промышленную практику обусловлено следующими достоинствами [1]:

1. Интенсивное перемешивание твердой фазы, приводящее к практическому выравниванию температур и концентраций в объеме псевдоожигенного слоя. Благодаря этому, в частности, устраняется опасность локального перегрева (или переохлаждения) твердых частиц, препятствующих оптимальному протеканию ряда тепловых, каталитических и других процессов.

2. Высокие значения коэффициентов эффективной теплопроводности и теплоотдачи от псевдоожигенного слоя к поверхностям теплообмена (или наоборот), соизмеримые с соответствующими значениями коэффициентов для капельных жидкостей. Эта важная осо-

бенность псевдооживленного слоя позволяет экономить поверхности теплообмена, рабочие объемы аппаратов.

3. Возможность использования твердых частиц малых размеров.

4. Подвижность псевдооживленного слоя позволяет создать аппараты с непрерывным вводом свежей и отводом отработанной твердой фазы, используя при этом выносные устройства для теплообмена и регулирования температуры.

5. Небольшое гидравлическое сопротивление и независимость его величины от скорости оживающего агента (газа или жидкости) в пределах существования псевдооживленного слоя.

6. Широкий диапазон свойств применяемых твердых частиц и оживающих агентов (газы, пары и капельные жидкости), включая возможность питания аппаратов с псевдооживленным слоем пастообразными материалами и суспензиями.

7. Сравнительно простое устройство аппаратов с псевдооживленным слоем, легкость их механизации и автоматизации.

8. В сравнении с другими видами сжигания твердого топлива снижаются удельные капитальные затраты.

9. Низкие температуры сгорания приводят к снижению выбросов оксидов азота.

10. Добавка относительно небольшого количества известняка связывает сернистый ангидрид с зольным остатком.

11. Появляется возможность использования угля с повышенным содержанием серы, с высокой зольностью и с низкой теплотой сгорания.

12. Появляется возможность создания топочных камер с избыточным давлением, что открывает дальнейшие перспективы для снижения габаритов котельных установок.

Наряду с большими достоинствами методу псевдооживления присущи некоторые недостатки [1]:

1. Неравномерность времени пребывания в псевдооживленном слое частиц твердой фазы и оживающего агента. Одинаково возможны быстрый проскок частиц и их пребывание в слое дольше среднестатистического времени.

2. Возможность в ряде случаев нежелательного изменения свойств твердых частиц (истирание, растрескивание, науглероживание, слипание, стекание и т. п.).

3. Необходимость установки мощных пылеулавливающих аппаратов на выходе газов из псевдооживленного слоя, особенно при широком гранулометрическом составе твердой фазы.

4. Эрозия аппаратуры в зоне псевдооживленного слоя, особенно значительная в случае использования частиц с высокими абразивными свойствами.

5. Ограниченность рабочих скоростей оживающего агента пределами, соответствующими началу псевдооживления твердой фазы и ее уносу из слоя.

6. Возникновение значительных зарядов статического электричества при псевдооживлении частиц диэлектрических материалов (взрывоопасность системы).

7. Большой унос частиц из слоя и связанный с ним механический недожог.

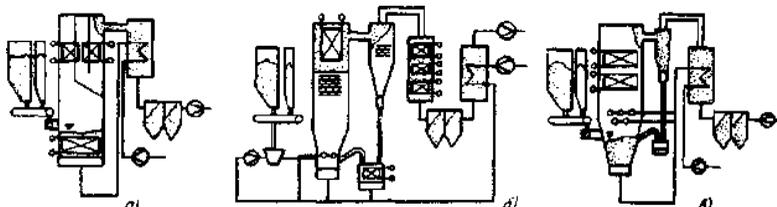
8. Проблематична разработка газораспределительной решетки, обеспечивающей удаление из слоя случайно попавших в него крупных предметов и отсутствие шлакования.

9. Проблематична загрузка топлива в слой, гарантирующая равномерное распределение концентраций горючих по всей его площади.

Перечисленные недостатки метода псевдооживления не являются, как правило, определяющими, а некоторые из них могут быть частично или полностью устранены.

Достоинства метода псевдооживления, безусловно, превалируют над его недостатками.

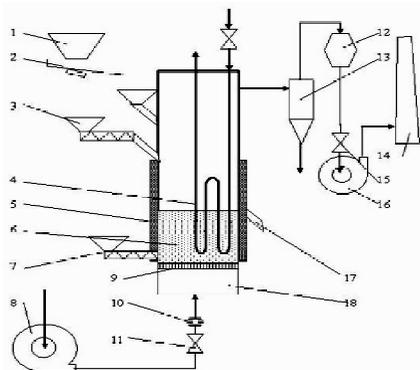
Наибольшее распространение в мировой практике котлостроения пока что получили одноступенчатые топки с кипящим слоем при атмосферном давлении. Можно выделить три основные категории котлов с кипящим слоем: стационарный кипящий слой; циркулирующий кипящий слой; расширяющийся кипящий слой (рисунок 2).



а – стационарный (пузырьковый); б – циркулирующий;  
в – расширяющийся

Рисунок 2 – Основные типы котлов с кипящим слоем

В данной работе изучение поведения и выгорания топливных гранул в кипящем слое проводились на малогабаритной камере сгорания FB-2 (150) (рисунок 3). Широкий диапазон регулирования режимных параметров позволяет широко варьировать высоту слоя, а также сжигать гранулы с различным составом.



1 – бункер топлива; 2 – вибропитатель; 3 – гранулятор; 4 – поверхность теплообмена; 5 – теплоизоляция; 6 – кипящий слой; 7 – подача топлива под слой; 8 – вентилятор 30-ЦС; 9 – газораспределительная решетка; 10 – измерительная диафрагма; 11 – регулирующий клапан; 12 – тканевый фильтр; 13 – циклон ЦН-15; 14 – дымовая труба; 15 – направляющий аппарат; 16 – дымосос; 17 – слив слоя; 18 – воздушный короб

Рисунок 3 – Схема огневого стенда с кипящим слоем (FB-2)

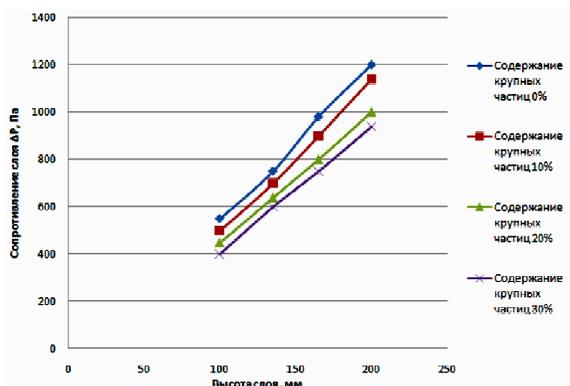


Рисунок 4 – Зависимость сопротивления псевдооживленного слоя от высоты слоя

Установка FB-2 (150) состоит из камеры сгорания диаметром 150 мм и высотой 1200 мм. Толщина стенок камеры сгорания составляет 7 мм. Охлаждение стенок происходит путем естественной конвекции воздуха.

Стенки камеры сгорания выполнены из стали 12Х18Н10Т. Отсутствие изоляции на камере сгорания приводит к быстрому падению температуры над слоем. Это обстоятельство ограничивает сгорание уносимых углеродистых частиц. Высота сепарационного пространства равна 1 м, что обеспечивает унос в режиме пневмотранспорта. В нижней части камеры сгорания расположена перфорированная решетка с живым сечением 2,5 % и диаметром отверстий 1,2 мм. В подрешоточную камеру подается холодный воздух высоконапорным вентилятором. Подача гранул на слой осуществляется вибропитателем. Отбор проб уноса осуществляется из-под циклона, с помощью съемного пробоотборника и тканевого фильтра, установленного после циклона. Предусмотрен также специальный пробоотборник для взятия проб из слоя в количестве 45–50 г. Взятая проба из слоя быстро охлаждается без доступа воздуха, а в слой досыпается такая же порция состав слоя.

Для контроля и измерения температуры слоя, холодного воздуха, уходящих газов используются хромель-копелевые термодпары (ТХК), подключенные к самопишущему прибору КСП-4.

При экспериментальных работах проводилось исследование влияния крупных частиц на сопротивление слоя (рисунок 4). Анализируя полученный график можно сделать вывод о линейной зависимости сопротивления псевдооживленного слоя и его высоты, что соответствует выражению  $\Delta P = \rho gh$ .

### Список литературы

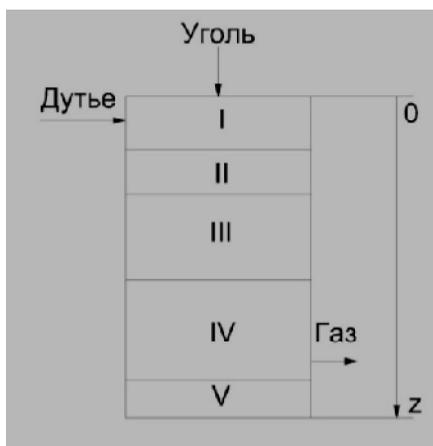
1. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления / Н. И. Гельперин. – М. : Изд-во «Химия», 1967.
2. Баскаков, А. П. Котлы и топки с кипящим слоем / А. П. Баскаков. – М. : Энергоатомиздат, 1995.
3. Баскаков, А. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя : Справочник / под ред. И. П. Мухленова и др. – Л. : Химия, 1986 г.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГАЗИФИКАЦИИ УГЛЯ В ГАЗОГЕНЕРАТОРЕ ПЛОТНОГО СЛОЯ ОБРАЩЕННОГО ПРОЦЕССА

**Д.Р. Таймасов, Е.Е. Пермяков, П.К. Сеначин**  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: газификация угля, математическая модель слоевого реактора.

Аннотация: Изучить процесс газификации угля в газогенераторе плотного слоя обращенного процесса. Создать модель, с помощью которой, будет наглядно продемонстрирован обращенный процесс газификации угля в газогенераторе плотного слоя.



I – зона сушки; II – зона выхода летучих; III – окислительная зона;  
IV – восстановительная зона; V – зольная подушка

Рисунок 1 – Газогенератор обратного процесса

Когда мы говорим о газогенераторе плотного слоя обращенного процесса (рисунок 1), мы подразумеваем, что движение газа направлено вниз через раскаленный опускающийся плотный слой коксового остатка, в отличие от газогенератора плотного слоя прямого процесса, когда поток воздуха и топлива встречается друг с другом и генераторный газ движется вверх.

Что же особенного в газогенераторах обращенного процесса?

Во-первых, раскаленный опускающийся плотный слой является аккумулятором тепла.

Во-вторых, слой также является механическим фильтром для смол и сажи.

В-третьих, при обращенном процессе газификации из зоны окисления в зону восстановления попадает уже обедненный углеродом и обогащенный золой кокс.

Такая технология обеспечивает более чистый генераторный газ с содержанием смол 50...500 мг/нм<sup>3</sup>. Это обусловлено тем, что зола частично сгорает, частично подвергается глубокому крекингу и превращается в постоянные газы. Генераторный газ после системы газоочистки может использоваться в поршневых двигателях. Ранее такие газификаторы использовали в стационарных двигателях небольшой мощности. И это логично ведь для двигателей внутреннего сгорания очень важен состав топлива. Необходимо чтобы топливо было максимально отчищено от пыли и смолы, ведь пыль – это абразивный износ, а смола оставляет отложения на клапанах, вследствие чего нарушается работа двигателя.

Таким образом, газификаторы обращенного процесса позволяют получать из топлива с большим содержанием смол, газ без смол.

Примером использования ГОП в настоящее время может служить мини-ТЭС на базе газодизельного двигателя, включающая слоевой газогенератор обращенного процесса мощностью 600 кВт, систему очистки генераторного газа, водогрейный котел и дизель генератор мощностью 229 кВт. Станция предназначена для автономного обеспечения теплом и электроэнергией 200-квартирного дома. Сырье для газогенерации – все виды отходов органического происхождения влажности не более 60 %.

Характеристики станции:

- Расход сухого биотоплива на номинальной нагрузке 240 кг/ч;
- Низшая теплота сгорания генераторного газа 4,5 МДж/нм<sup>3</sup>;
- Расход дизельного топлива для подсветки 5 г/кВт;

- Диапазон регулирования электрической мощности от 0 до 220 кВт.

Коэффициент использования теплоты генераторного газа при выработке тепловой энергии 85 %.

Благодаря применению обращенного процесса и упрощенный схеме очистки генераторного газа на 20 % снижается металлоемкость.

В УГТУ-УПИ в сотрудничестве с «Уралтрансгаз», ОАО «Газпром» была разработана и изготовлена газогенераторная станция с двигателем внутреннего сгорания.

В ходе испытаний был запущен двигатель УАЗ-24-10 с электрогенератором БГ-16. В качестве нагрузки были подключены электрические лампы накаливания общей мощностью 6 кВт. Двигатель установлен на улице, испытания проводились в ноябре и декабре, где средняя температура наружного воздуха была до минус 16 градусов по Цельсию). Работа двигателя внутреннего сгорания была стабильная, запуск устойчивый, без растопочного топлива. Результаты испытаний сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – предельные по расходу дутья рабочие режимы ГОП.

Режим	Низкотемпературный	Высокотемпературный
$V_v, \text{ м}^3/\text{ч}$	80	160
$b_g, \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ ч})$	110	560
Т горения, градусов по Цельсию	1100	1500
CO, %	13	36
H <sub>2</sub> , %	15	21
CH <sub>4</sub> , %	3,1	2,3
CO <sub>2</sub> , %	15	3
Q <sub>н</sub> , МДж/м <sup>3</sup>	4,3	7,6
КПД хим., %	40–45	75–80

Несмотря на удачный опыт применения ГОП, существуют и некие трудности в организации этого процесса. К примеру, сложно организовать бесперебойную и равномерную подачу топлива. В частности, при применении газа, полученного путем обращенного процесса газификации на бензиновых двигателях, приводило к падению мощности. Это связано с низкой теплотворностью газа и медленной скоростью горения газозооушной смеси. Также наблюдается ухудшения наполнения цилиндров, за счет сопротивления трубопроводов, охладителя и фильтре газозооушной установки. Для борьбы с этой проблемой необходимо увеличить степень сжатия мотора.

Итак, при создании модели будут учтены все недочеты, найденные в ходе исследования обращенного процесса газификации угля. На основе информации о получении газа с помощью установок обращенного процесса была получена математическая модель.

### **Математическая модель слоевого реактора**

В модели рассматривается одномерный адиабатический противоточный газогенератор Lurgi, уголь представлен в виде пористой среды, составленной из монодисперсных сферических частиц диаметра  $d_0$  с жестким зольным скелетом и выгорающим углеродным ядром, порозность (отношение объема пор к общему объему) принимается одинаковой по всей высоте газогенератора. Через пористую среду фильтруется газовая фаза. Температура угля и газа на каждой высоте газогенератора одинакова. Обычно в реакторах Lurgi выделяют несколько зон, в том числе: сушки, выхода летучих, восстановительную, окислительную, зольную подушку (рисунок 1), однако в настоящей работе рассматриваются общая окислительно-восстановительная зона.

На вход газогенератора (при  $z = 0$ ) подается смесь воздуха с водяным паром и угля, и на поверхности пор протекают следующие гетерогенные реакции:

- 1)  $C + O_2 = CO_2 + 395 \text{ кДж/моль}$ ;
- 2)  $2C + O_2 = 2CO + 219 \text{ кДж/моль}$ ;
- 3)  $C + CO_2 = 2CO - 175.5 \text{ кДж/моль}$ ;
- 4)  $C + H_2O = CO + H_2 - 130.5 \text{ кДж/моль}$ ;
- 5)  $2CO + H_2O = CO_2 + H_2 + 40,4 \text{ кДж/моль}$ ;
- 6)  $C + 2H_2 = CH_4 - 74 \text{ кДж/моль}$ .

Основные уравнения, описывающие процесс газификации, следующие:

- уравнения неразрывности для каждого  $j$ -го компонента газовой фазы

$$\rho_j \frac{dw_\phi}{dz} + w_\phi \frac{d\rho_j}{dz} = \sum M_j \sum_i \xi_{ij} W_i, \quad (1)$$

где  $\rho_j$  – действительная плотность  $j$ -го компонента газовой фазы;

$w_\phi$  – скорость фильтрации относительно угля;

$M_j$  – молярная масса  $j$ -го компонента;

$W_i$  – скорость  $i$ -й реакции;

$\xi_{ij}$  – стехиометрический коэффициент  $i$ -й гомогенной реакции (где продукты реакции имеют знак «+»);

- уравнение неразрывности для твердой фазы

$$\rho_C^0 u_C \frac{d\eta}{dz} = M_C \sum_i \xi_{iC} W_i, \quad (2)$$

где  $\eta$  – глубина выгорания угля, лежащая в пределах от 0 до 1 (1 соответствует полному выгоранию);

$\rho_C^0$  – начальная плотность углерода;

$u_C$  – скорость угля относительно стенок;

$M_C$  – молярная масса углерода;

$W_i$  – скорость  $i$ -й реакции с участием угля;

$\xi_{iC}$  – стехиометрический коэффициент  $i$ -й реакции с участием угля (где продукты реакции имеют знак «+»);

- уравнения теплового баланса

$$\left[ (w_\phi + u_C) \sum_s c_s \rho_s + u_C (c_C \rho_C^0 (1 - \eta) + c_b \rho_b) \right] \frac{dT}{dz} = \lambda \frac{d^2 T}{dz^2} + \sum_i W_i Q_i - \frac{\alpha}{r_{gen}} (T - T_0), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – порозность;

$C_s$  – теплоемкость компоненты  $s$ -ой газовой фазы;

$C_C$  – теплоемкость углерода;

$c_b$  – теплоемкость балласта;

$\rho_b$  – плотность балласта;

$\lambda$  – макроскопический коэффициент теплопроводности заполненной пористой среды;

$Q_i$  – теплота  $i$ -й реакций;

$T$  – температура газа;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи между пористой средой и стенкой генератора;

$r_{gen}$  – внутренний радиус генератора;

- уравнение закона Дарси (для пористых сред)

$$\frac{dp}{dz} = - \frac{w_\phi}{k_\phi}, \quad (4)$$

где  $p$  – давление,  $k_\phi$  – коэффициент фильтрации;

- уравнение состояния газовой фазы

$$p = \sum_s p_s = RT \sum_s \frac{\rho_s}{M_s}; \quad (5)$$

- уравнения скорости  $i$ -й газофазной (гомогенной) реакции (определяется законом Аррениуса)

$$W_i = k_i \prod_j A_{ij} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right), \quad (6)$$

- скорость гетерогенной  $i$ -й реакции углерода с  $j$ -м компонентом газовой фазы

$$W_i = K_{ci} S_C (1 - \eta), \quad (7)$$

где  $S_C = \frac{6(1 - \eta) / d_0}{1 + (\rho_C^0 / \rho_b) / (100 / A^r - 1)}$ ;

$$K_{ci} = \frac{\beta_i A_j}{1 / k_{wi} + d_0 / (\text{Nu}_D D_j)},$$

$A^r$  – зольность угля;

$A_j$  – концентрация  $j$ -го компонента газовой фазы;

$\text{Nu}_D$  – диффузионное число Нуссельта;

$D_j$  – коэффициент диффузии  $j$ -го компонента;

$k_{wi}$  – кинетическая скорость  $i$ -й реакции, вычисляемая исходя из закона Аррениуса и предположения о существовании полюса скоростей.

$$k_{wi} = k_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right). \quad (8)$$

Система (1)–(8) дополняется двумя замыкающими уравнениями:

- уравнение альтернативного условия прекращения горения

$$p(1 - \eta) = 0 \quad (9)$$

- кинематическое условие стационарности процесса (скорости горения  $u_f$  на фронте пламени)

$$u_f = w_f - u_c = 0. \quad (10)$$

Граничные условия задачи:  
(на входе в реактор при  $z = 0$ )

$$p = p_0, \quad T = T_0, \quad \rho_g w_f = m_g^0, \quad A_j = A_j^0, \quad \rho_C = \rho_C^0, \quad \frac{dT}{dz} = 0, \quad (11)$$

(на выходе из реактора при  $z = h$ )

$$p < p_0, \quad \eta = 0, \quad \frac{dT}{dz} = 0. \quad (12)$$

Кроме того, на фронте пламени имеем

$$z = z_f, \quad \frac{dT}{dz} = 0, \quad A_{O_2} = 0. \quad (13)$$

На основании построенной физико-математической модели процессов переноса, уравнений баланса массы вещества, импульса и энергии в реагирующей пористой среде в дальнейшем планируется расчет параметров газовой среды и температур в окислительной и восстановительной зонах газогенератора угля плотного слоя обращенного процесса.

### Список литературы

1. Загруддинов, Р. Ш. Технологии газификации в плотном слое : монография / Р. Ш. Загруддинов, А. Н. Нагорнов, А. Ф. Рыжков, П. К. Сеначин и др.; под ред. П. К. Сеначина. – Барнаул : ОАО «Алтайский дом печати», 2009. – 296 с.
2. Нагорнов, А. Н. Физико-химические основы горения и газификации углей в плотном слое газификатора Lurgi / А. Н. Нагорнов, Р. Ш. Загруддинов, П. К. Сеначин, С. М. Кисляк, Р. М. Утемесов // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008) : Материалы второй Всероссийской научно-практической конференции с международным участием / Барнаул, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 1–4 октября 2008. – Барнаул : ОАО «Алтайский дом печати», 2008. – с. 380–397.

3. Степанов, С. Г. Математическая модель газификации угля в слоевом реакторе / С. Г. Степанов, С. Р. Исламов // Химия твердого топлива. – 1991. – № 2. – с. 52–58.

4. Померанцев, В. В. Основы практической теории горения : учеб. пособие для вузов. / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др. – Л. : Энергоатомиздат, Ленингр. отделение, 1986. – 312 с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ САПР ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ЗАДАЧ В КОТЛОСТРОЕНИИ**

**М.В. Тиханов, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова**  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: САПР, прочность.

Аннотация: Создание современного оборудования не ограничивается созданием его геометрической модели. Для того чтобы изделие было надежно, безопасно и конкурентоспособно, необходимо производить всесторонний анализ. Главные цели, которые перед собой ставят разработчики, это обеспечение статической прочности и жесткости детали, достаточной долговечности и устойчивости, оставаясь при этом конкурентоспособными, т.е. деталь должна иметь минимальный вес, минимальную стоимость и минимальные затраты на эксплуатацию. Использование САПР позволяет не только создать модель, но и произвести инженерный анализ деталей, узлов или изделия в целом.

Целью выполнения данной работы является определение оптимальной толщины стенки цилиндрической части коллектора пароперегревателя парового прямоточного котла Пп-410-30-600КТ. Модель цилиндрической части коллектора представлена на рисунке 1.

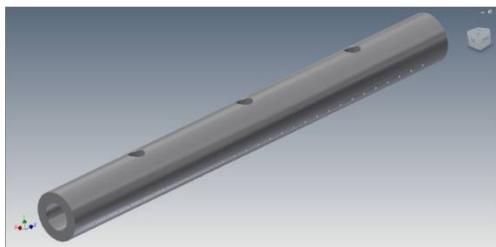


Рисунок 1 – Коллектор пароперегревателя

Коллектор имеет 3 отверстия под приварку пароперепускных труб и поле отверстий под приварку труб поверхности нагрева. Развертка коллектора представлена на рисунке 2.

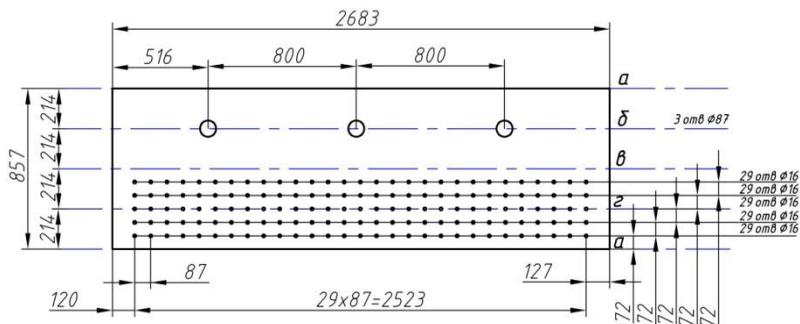


Рисунок 2 – Развертка коллектора

Существующие арифметические формулы для нахождения параметров прочности и жесткости применимы только для простых схем нагружения детали, при условии, что конфигурация детали достаточно простая. В более сложных случаях корректный расчет на прочность и жесткость можно произвести только методом конечных элементов. Метод конечных элементов – это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач механики деформируемого твердого тела, теплообмена, гидродинамики и электротехники.

В программе Autodesk Inventor прочностной расчет производится методом конечных элементов. Анализ методом конечных элементов начинается с дискретизации исследуемой области (области задачи) и делении ее на ячейки сетки. Такие ячейки называют конечными элементами. В Inventor тело разбивается на множество подобных фигур – тетраэдров. Точность расчета напрямую зависит от размеров этих элементов. Общее правило состоит в том, что чем больше количество элементов (чем меньше их размер) тем точнее оказывается решение, но тем дороже оно стоит с вычислительной точки зрения.

Произведем расчет на прочность выходного коллектора пароперегревателя. Для этого необходимо создать твердотельную модель цилиндрической части коллектора, задать ей необходимые свойства и приложить нагрузки. Давление рабочей среды в коллекторе составляет 30 МПа[1].

Температура стенки коллектора определяется по формуле:

$$t = t_m + x \cdot \Delta t = 600 + 0,5 \cdot 10 = 605^\circ \text{C},$$

где  $t_m = 600^\circ \text{C}$  температура среды в коллекторе;

$x = 0,5$  – коэффициент, учитывающий перемешивание среды;

$\Delta t = 10^\circ \text{C}$  – превышение температуры среды в развернутой трубе, над средней температурой среды.

Для изготовления коллектора используется сталь марки 12X18H12T. Выбор данной стали обосновывается температурой стенки коллектора. Допустимое напряжение для этой стали, при расчетной температуре стенки  $605^\circ \text{C}$ , составляет 71 МПа.

Произведем расчет на прочность данного коллектора в программе Autodesk Inventor. Для этого нужно перейти во вкладку «Среды» и выбрать «Анализ напряжений». Добавив необходимые нагрузки и настроив способ разбиения детали на конечные элементы, выполняем расчет. Результаты расчета представлены на рисунках 3, 4 и 5. Деталь окрашивается цветами, соответствующими напряжениям: синий соответствует минимальному напряжению, красный – максимальному.

Программа позволяет выполнять параметрический расчет детали. Управляя определенными параметрами, можно подобрать оптимальную конфигурацию детали при определенной нагрузке. Используем инструмент «Параметрическая таблица». В качестве зависимости выберем «максимальное напряжение», а тип зависимости – «верхний предел». Добавив какой либо изменяемый параметр, и обозначив предел, можно подобрать минимальное значение параметра, при котором условия прочности будут выполняться. В нашем случае в роли изменяемого параметра будет выступать толщина стенки. Так, поочередно производя расчет для стенок, толщиной 50, 56 и 60 мм (ряд толщин стенок для трубы 273 по сортаменту), видим, что минимально допустимая толщина стенки составляет 60 мм. При такой толщине максимальное напряжение равно 67,65 МПа. На рисунке видно, что концентраторами напряжений являются отверстия, а наиболее нагруженное место – в районе отверстия под приварку пароперепускных труб.

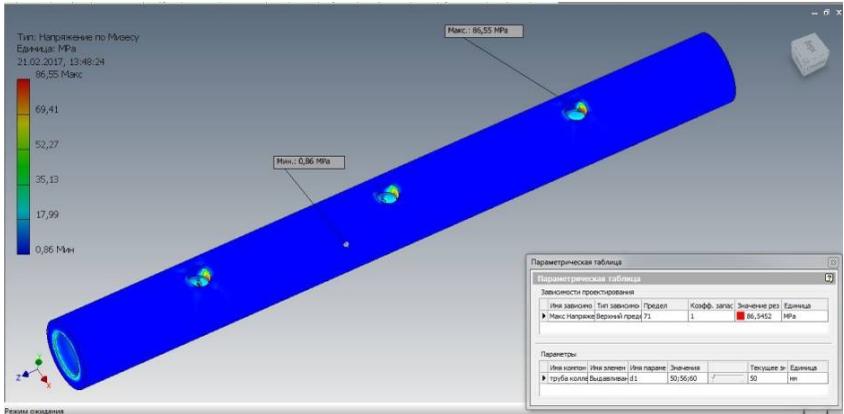


Рисунок 3 – Результат расчета коллектора теплоносителя на прочность при толщине стенки 50 мм (максимальное напряжение составляет 86,55 МПа)

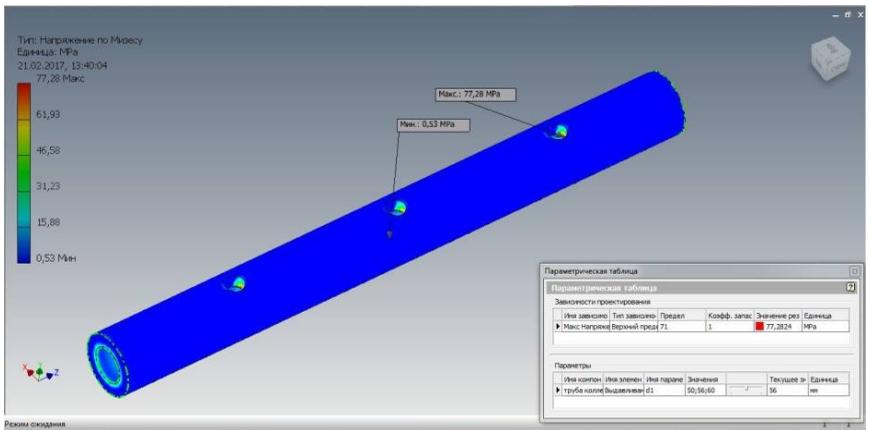


Рисунок 4 – Результат расчета коллектора теплоносителя на прочность при толщине стенки 56 мм (максимальное напряжение составляет 77,28 МПа)

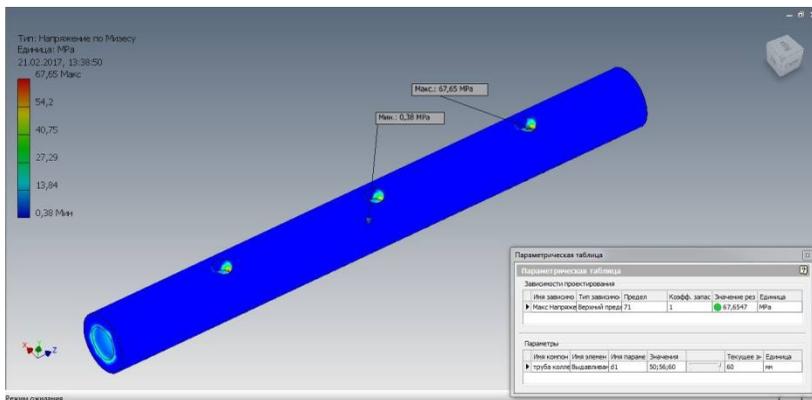


Рисунок 5 – Результат расчета коллектора теплоносителя на прочность при толщине стенки 60 мм (максимальное напряжение составляет 67,65 МПа)

Трехмерные напряжения и нагрузки образуются в нескольких направлениях, эти многонаправленные напряжения суммируются для получения эквивалентного напряжения, которое называется напряжением по Мизесу. Критерий максимального напряжения по Мизесу основывается на теории Мизес-Хенки (Mises-Hencky), также известной как теория энергии формоизменения. Теория утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. Результат расчета представляется именно напряжением по Мизесу.

Для сравнения произведем традиционный прочностной расчет этого коллектора. Особенностью расчета толщины стенки коллектора является необходимость определить коэффициент прочности при ослаблении стенки полем отверстий и одиночным отверстием. В качестве расчетного коэффициента будет использоваться наименьший из рассчитанных.

При коридорном равномерном поле одинаковых отверстий вычисляется коэффициент прочности для продольного ряда и для поперечного ряда.

Коэффициент прочности коллектора, ослабленного продольным рядом одинаковых отверстий ( $d$ ), расположенных с одинаковым шагом ( $t$ ), определяется по формуле:

$$\phi = \frac{t-d}{t} = \frac{87-16}{87} = 0,816,$$

где  $d = 16$  мм – диаметр отверстий;

$t = 87$  мм – шаг между отверстиями;

Коэффициент прочности коллектора, ослабленного поперечным рядом одинаковых отверстий ( $d$ ), расположенных с одинаковым шагом ( $t_1$ ), определяется по формуле:

$$\phi = 2 \frac{t_1 - d}{t_1} = 2 \frac{56 - 16}{56} = 1,42,$$

где  $d = 16$  мм – диаметр отверстий;

$$t_1 = \frac{\pi(D_a + S)}{360} \alpha = \frac{\pi(273 + 60)}{360} 30 = 56 \text{ мм.}$$

Коэффициент прочности коллектора, ослабленного одиночным отверстием ( $d$ ):

$$\phi = \frac{2}{z + 1,75};$$

$$z = \frac{d}{\sqrt{D_m(S-C)}} = \frac{87}{\sqrt{213(60-0)}} = 0,80,$$

где  $D_m = D_a - S = 273 - 60 = 213$  мм – средний диаметр элемента;

$d = 87$  мм – диаметр отверстия [3]

$C = 0$  – прибавка по толщине, мм.

Одиночным считается отверстие, кромка которого удалена от кромки ближайшего отверстия на расстояние более  $A \geq \sqrt{D_m(S-C)}$

$A = 713$  мм (рисунок 2).

$$\sqrt{D_m(S-C)} = \sqrt{213(60-0)} = 217.$$

Условие выполняется, следовательно, отверстие можно считать одиночным.

$$\phi = \frac{2}{z + 1,75} = \frac{2}{0,80 + 1,75} = 0,783.$$

В качестве расчетного принят коэффициент прочности для одиночного отверстия  $\varphi = 0,783$ , так как он имеет наименьшее значение.

Расчетная толщина стенки коллектора:

$$S_R = \frac{p \cdot D_a}{2 \cdot \varphi[\sigma] + p} = \frac{30 \cdot 273}{2 \cdot 0,783 \cdot 71 + 30} = 57,9 \text{ мм.}$$

Округляем расчетную толщину стенки коллектора до ближайшего большего значения по сортаменту  $S = 60$  мм.

Результаты традиционного прочностного расчета мало отличаются от результатов расчета в среде анализа напряжений Autodesk Inventor, что позволяет нам применять данный способ при конструировании. Это позволяет проектировщику оперативно выполнять прочностной анализ детали, задавая ее геометрию, свойства материала, различные условия нагружения и закрепления. Результаты прочностного анализа могут служить не только основанием для внесения изменений в конструкцию.

### Список литературы

1. Тепловой расчет паровых котлов : (нормативный метод) / под ред. Н. В. Кузнецова и др. – М., «Энергия», 1973. – с. 296.

## **ТВЕРДЫЕ БЫТОВЫЕ ОТХОДЫ КАК АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ, ПРИЕМЛЕМЫЙ ДЛЯ МАССОВОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИТЕЛЯМИ И ОРГАНИЗАЦИЯМИ ГОРОДА БАРНАУЛА**

**Е.В. Тихонов, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова**  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, мусоросжигательный завод, теплоэлектроцентраль.

Аннотация: Рассмотрены преимущества использования твердых бытовых отходов как альтернативный источник энергии.

В Барнауле ежегодно образуется более 250 тыс. тонн твердых бытовых отходов. Средняя теплота сгорания ТБО 5,2–16,5 МДж/кг к примеру теплота сгорания природного газа 36 МДж/кг, теплота сгорания Кузнецкого угля 18–25 МДж/кг. Исходя, из этих данных можно сделать вывод, что ТБО может стать хорошим источником энергии и сэкономить углеводородные запасы. Бытовые отходы, представляющие собой смесь из органических веществ различного происхождения, являются ничем иным как высококалорийным топливом. Вывезти и утилизировать ТБО затратное дело (около 200 рублей за куб. м).

Почему бы не использовать ТБО как возобновляемый источник энергии? Это будет не только экономически прибыльно, но и улучшит экологическую ситуацию в городе Барнауле. Учитывая экономический интерес населения города Барнаула, постоянный рост тарифов на энергоносители, ТБО как разновидность топлива очень актуальны на сегодняшний день. Энергию от переработки ТБО можно пустить на коммунальные потребности населения или нужды, какого либо производства. Тем самым мы уменьшим негативное влияние полигона ТБО на окружающую среду [1]. Посредством мусороперерабатывающих заводов ТБО разделяют на три вида топлив это:

- газообразное топливо (содержащее метан);
- твердое биотопливо;
- жидкое биотопливо.

Все эти виды топлива помогут сэкономить: уголь, нефтепродукты, дерево и т. д.

Биометан обладает теми же свойствами, преимуществами и возможностями, что и природный газ. Средняя теплота сгорания биогаза от 21 до 27,2 МДж/м<sup>3</sup>. При разложении 1 тонны отходов выделяется 200-250 м<sup>3</sup> биогаза. Разложение отходов начинается под действием кислорода воздуха, однако слои, расположенные на глубине котлована, разлагаются и без доступа кислорода. На глубине около 4 м температура достигает 35...40 °С. Температура, необходимая для нормально протекания биохимических процессов, не должна быть ниже +15 °С.

Твердое биотопливо является высококалорийной фракцией ТБО. Негативное влияние, на окружающую среду, возникающее в процессе сжигания твердого биотоплива, является низким в сравнении со сжиганием традиционных теплоносителей. К числу неоспоримых достоинств твердого топлива из ТБО можно отнести его постоянную (не изменяющуюся) калорийность и стандартную форму. Все это существенно упрощает управление и контроль над процессами сжигания, поскольку при использовании данного топлива обеспечивается максимально полное и качественное сгорание, которое к тому же является

практически безотходным. Утилизация отходов путем изготовления из них твердого топлива и последующее его сжигание (вместо традиционного сжигания самих твердых бытовых отходов) сегодня является одним из наиболее эффективных способов переработки мусора.

Из жидкого биотоплива можно производить «биоэтанол», «биодизель», «бионефть», получаемые из различных видов биомассы. Жидкое топливо из ТБО научились получать относительно недавно, однако результат превзошел все ожидания исследователей, ведь на выходе получилось синтетическое дизельное топливо, которое можно использовать в двигателях внутреннего сгорания. Причем, оно выгодно отличается от дизельного топлива, получаемого на основе нефтепереработки, поскольку оно не имеет в своем составе серы, которая засоряет двигатели, что негативно сказывается на их долговечности.

Для получения энергии из ТБО можно скомбинировать мусоро-сжигательный завод (далее МСЗ) и энергетическое оборудование. Есть несколько вариантов комбинирования.

1. Котельная и МСЗ. Конечным продуктом является тепловая энергия.

Котельные оснащаются паровыми котлами-утилизаторами с параметрами пара, как правило, давлением 1,4–2,4 МПа температурой до 250–300 °С, при слоевом сжигании топлива на специальных решетках различных систем (в т. ч. «кипящего» слоя), но с глубокой шнуровкой слоя горящих отходов. Иногда котлы-утилизаторы применяются водогрейные.

Процесс сжигания предполагается осуществлять в две стадии. На первой стадии твердые отходы превращаются в горючий продукт-газ. На второй – полученный газ сжигается в паровом или водогрейном котле. Суммарный коэффициент тепловой мощности составляет около 95 %. Таким образом, при работе мини-ТЭЦ на отходах можно обеспечить горячей водой, отоплением предприятие или несколько больших многоквартирных домов. Вследствие этого, располагать установку наиболее рационально стоит в том районе города, где есть проблемы с транспортировкой ТБО, и имеется потребность в дополнительной тепловой энергии. Один из вариантов – использование установки в порядке модернизации старых угольных ТЭЦ [3]. Перед тем как отходы будут подвергаться сжиганию, они пройдут первичную сортировку и измельчение до требуемых линейных размеров кусков – в пределах 20 на 20 см.

Предлагаемая технология обеспечивает допустимый уровень образования диоксинов. Максимальная температура (1000–1200 градусов) и время горения в зоне газификации гарантируют уничтожение

диоксинов. После первой стадии сжигания выбросы в атмосферу отсутствуют, т. к. весь продукт-газ идет в горелку на выработку тепловой энергии. Низкие линейные скорости газового потока в реакторе и его фильтрация через слой исходного перерабатываемого материала обеспечивают крайне низкий вынос пылевых частиц с продукт-газом. В итоге появляется возможность значительно сократить капитальные затраты на газоочистное и энергетическое оборудование. Таким образом, сжигание в две стадии позволяют резко сократить образование диоксинов и обеспечить допустимые нормы выбросов.

Что касается образующейся золы, то предлагается технология, позволяющую перерабатывать золу в химически нейтральный, механически достаточно стойкий продукт, который можно использовать даже при строительстве без всяких опасений. Из золы получаются керамические шарики, в которых имеется тройная физико-химическая защита поступления тяжелых металлов в окружающую среду. Степень вымываемости тяжелых металлов из таких шариков в тысячи раз меньше, чем из самой золы. Это переводит золу в безопасное состояние, т. к. простое замешивание в цемент означает просто отсрочку негативных последствий, поскольку цементные блоки недолговечны.

2. Теплоэлектроцентр со сжиганием ТБО (рисунок 1). Конечным продуктом является тепловая и электрическая энергия (или только электроэнергия) [2].

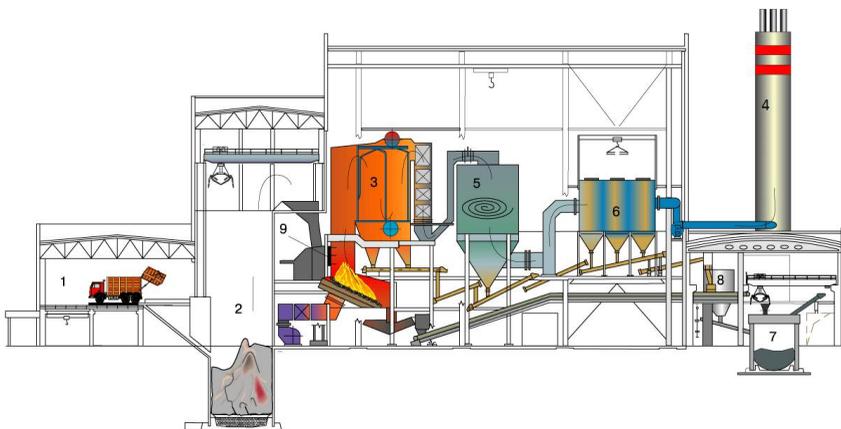
2.1. ТЭЦ, сжигающие ТБО на базе парогазовой установки (ПГУ);

2.2. ТЭЦ, сжигающие ТБО на базе газотурбинной установки (ГТУ);

2.2. ТЭЦ на базе ПГУ, сжигающие совместно с ископаемым топливом ТБО (или топливо из ТБО);

ТЭЦ оснащены турбогенераторами с турбинами различного назначения:

- теплофикационными для выработки электроэнергии с отбором пара низкого давления и тепла как для собственных нужд МСЗ, так и отдачи внешним потребителям через электрические и тепловые сети городов;
- производственными с отборами пара повышенного давления, обеспечивающие технологические и коммунальные нужды предприятий;
- а также чисто конденсационными, вырабатывающими только э/энергию.



1 – приемное отделение; 2 – приемный бункер для отходов;  
 3 – котлоагрегат; 4 – дымовая труба; 5 – абсорбер; 6 – рукавный  
 фильтр; 7 – бункер шлака; 8 – бункер золы; система подавления  
 окислов азота

Рисунок 1 – ТЭЦ, работающая на ТБО

### Список литературы

1. Переработка мусора (ТБО) – инвестиции в будущее : [Электронный ресурс]. – [http: //ztbo.ru](http://ztbo.ru). – статья в интернете.
2. Тугов, А. Н. Отечественные ТЭС на ТБО / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, А. Н. Смирнов // Опыт освоения и пути развития. Экология и промышленность России. – 2009. – № 3. – с. 4–7.
3. Тугов, А. Н. Опыт освоения сжигания твердых бытовых отходов на отечественных ТЭС / А. Н. Тугов, В. Ф. Москвичев, Г. А. Рябов и др. // Теплоэнергетика. – 2006. – № 7. – с. 55–60.

# **РЕНТГЕНОДИЛАТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЛАВА ЦИРКОНИЯ Э-125 В ПРОЦЕССЕ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ В ВАКУУМЕ**

**М.С. Туманов, Л.Л. Любимова**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»  
г. Томск

Ключевые слова: сплав циркония, высокотемпературная рентгенография, параметр элементарной ячейки, дилатации кристаллической решетки, аномалии свойств кристаллической решетки.

Аннотация: При термоциклических испытаниях в вакууме сплава циркония Э-125 в области температур 250–350 °С установлено наличие аномалий термических деформаций кристаллических решеток, снижающих работоспособность твэлов.

Основными конструкционными элементами активной зоны реактора РБМК-1000 являются циркониевые трубы технологических каналов (ТК), оболочки твэлов и блоки графитовой кладки. В результате сложного воздействия эксплуатационных факторов каналные трубы и оболочки претерпевают необратимое формоизменение. С одной стороны, возникает угроза разрушения барьеров безопасности ядерного реактора за счет непроектных напряжений, с другой стороны, формоизменением оболочек ограничивается глубина выгорания топлива и снижается экономичность реактора [1]. Взаимодействия между деформациями за счет радиационного распухания, возникающими напряжениями и работоспособностью элементов активной зоны послужили основой методики проведения термоциклических испытаний с целью определения тепловых дилатаций кристаллической решетки сплава циркония.

В качестве объекта исследований применен образец канальной трубы из циркониево-ниобиевого сплава Э-125 с содержанием ниобия в количестве порядка 2,4...2,7 %.

Методика термоциклических испытаний имитировала процессы термической усталости и заключалась в воспроизведении последовательности циклов «нагрев – охлаждение – нагрев» с повышением температуры в каждом очередном цикле.

Экспериментальные данные об изменении формы и размеров изделий из металлов показали, что при термоциклировании размеры могут как увеличиваться, так и уменьшаться [2].

Термические испытания проводились в вакууме методом высокотемпературной рентгенографии (ВТР) с применением рентгеновского дифрактометра и высокотемпературной дифрактометрической установки УВД-2000. Длина волны используемого излучения составляла  $\lambda_{Co} = 0,71069 \text{ \AA}$ . Для анализа выбраны две рентгеновские дифракционные линии с индексами (002) и (101), углы дифракции которых служили основой для определения размеров  $a$  и  $c$  кристаллической гексагональной решетки сплава циркония, которые определялись согласно основным формулам кристаллографии [3].

Относительная погрешность при измерении параметров кристаллической решетки составляла:  $\Delta a/a$  не  $> \pm 0,03 \%$  и  $\Delta c/c$  не  $> \pm 0,3 \%$ .

На рисунок 1-3 представлены изменения  $a$ ,  $c$  и отношения  $c/a$  элементарной ячейки сплава циркония в процессе термоциклирования.

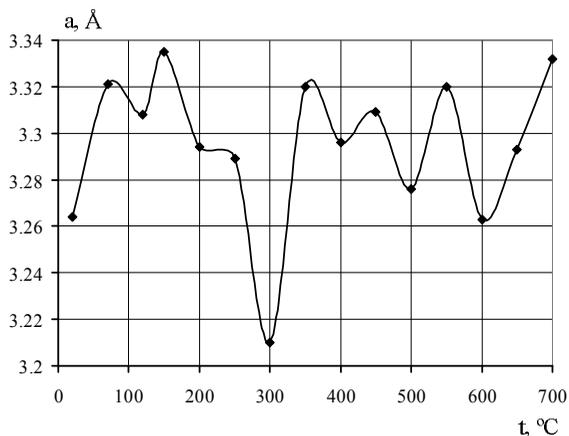


Рисунок 1 – Зависимость параметра  $a$  сплава циркония Э-125 от температуры

Для особо чистого циркония  $a = 3,23118 \text{ \AA}$ ,  $c = 5,14634 \text{ \AA}$ , отношение  $c/a$  составляет:  $c/a = 1,59271$  [4, 5].

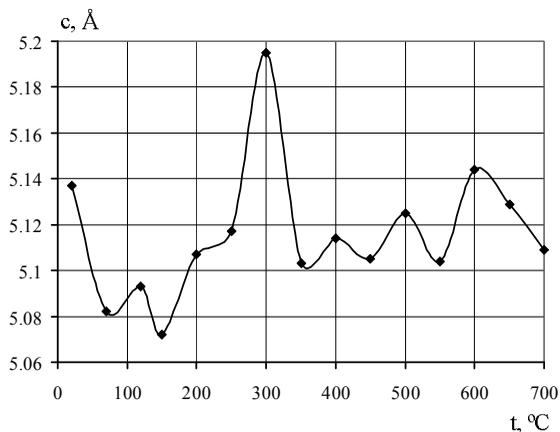


Рисунок 2 – Зависимость параметра  $c$  сплава циркония Э-125 от температуры

Данные по величине  $c/a$  для различных сплавов циркония могут заметно отличаться друг от друга, т. к. на параметры решетки существенное влияние оказывают легирующие добавки, примеси внедрения и замещения, температура, текстуры, предварительные деформации и т. д. [5]. Все это свидетельствует о необходимости установления закономерностей поведения образцов для однотипных изделий конкретного состава и формы.

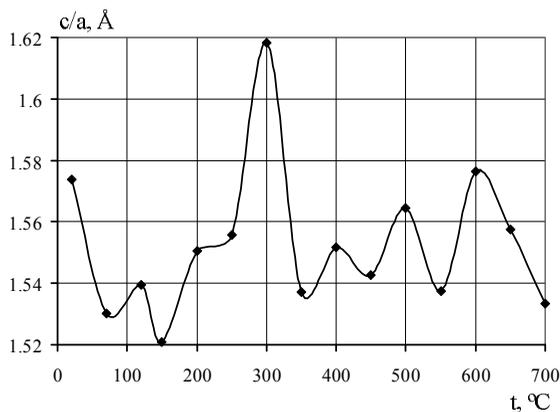


Рисунок 3 – Отношение  $c/a$  для сплава циркония Э-125

Из рисунков 1–3 видно, что параметры кристаллической решетки сплава обнаруживают весьма сложную температурную зависимость.

Так, параметр решетки  $a$  осциллирует, проявляя при некоторых температурах отрицательную ползучесть (рисунок 1): в окрестности 100 °С, в диапазонах значений температур 350–400 °С, 450–500 °С, 550–600 °С. Наиболее сильная температурная аномалия для параметра решетки  $a$  отмечается в области служебных температур для сплава циркония 250–350 °С.

Для параметра  $c$  кроме эффектов отрицательной ползучести наблюдается аномальный скачок термических деформаций при температуре 300 °С (рисунок 2).

Зависимость отношения  $c/a$  кристаллической решетки также отличается структурной неустойчивостью, наиболее ярко выраженной для области температур 250–350 °С (рисунок 3).

Аномальные эффекты термических деформаций кристаллических решеток относят к области полиморфных превращений [4].

Особенность полиморфных превращений в конструкционных материалах как разновидности фазовых переходов заключается в том, что в процессе превращений, например, под действием температуры, вещество скачкообразно изменяет плотность, находясь в твердом состоянии. При этом регистрируется изменение микротвердости, коэффициента диффузии водорода, теплоемкости, возникает температурный гистерезис.

Отмечаются аномальные изменения свойств – коэффициента линейного расширения, модуля Юнга, удлинения, пластичности и теплоемкости в строго определенных интервалах температур [6]. При этом симметрия кристаллической решетки в области аномалий не изменяется, поэтому отнести аномалии к полиморфным фазовым переходам не удастся, соответственно, не выяснена их причина. Очень важно отметить, что аномалии наследуются химическими соединениями и сплавами подобно структурному полиморфизму. Например, если сам цирконий не имеет фазовых переходов I рода и аномальных эффектов термических деформаций в изучаемой области температур, но в состав его сплава входит элемент, например, никель, имеющий этот эффект, то сплав циркония с добавкой никеля наследует эту особенность [7]. В частности, никель, входящий в состав циркониевого сплава Э-125, имеет аномалии термических деформаций кристаллических решеток в области 300–400 °С, т. е. примерно той же, что и сплав циркония [4].

Справедливо предположить, что наличие никеля в составе сплава может отрицательно сказаться на его служебных свойствах, так как в

аномальных температурных точках наблюдаются следующие свойства материалов и процессы:

- сверхпластичность – резкое снижение предела прочности и твердости в сплавах циркония (железа, титана);
- 10...20 – кратное скачкообразное удлинение металлов без образования шейки и разрыва;
- штамповка приводит к более мелкому зерну;
- закалка сохраняет свойства той высокотемпературной фазы, с которой начато охлаждение;
- отжиг деформированного металла ниже аномальной точки приводит к мелкому зерну, а при температуре выше аномальной точки – к крупному (разная скорость роста зерна);
- термоциклирование через аномалию вызывает необратимое формоизменение изделий;
- возрастают сорбционные свойства материала и газопроницаемость;
- с увеличением степени деформированности нарастает скорость окисления и растворения металлов в химических реакциях [2].

Отрицательная ползучесть связывается с разрывом межатомных связей и образованием микротрещин и пористости [8]. Возникновение пористости и микротрещин в структуре сплава циркония имеет большое значение, т. к. цирконий практически единственный металл (еще титан), растворяющий в больших количествах кислород, образующий с цирконием как химическое соединение  $ZrO_2$ , так и фазы внедрения кислорода в кристаллическую решетку. Неметаллические примеси (O, H, C, N) существенно изменяют свойства циркония. Растворение кислорода в цирконии является важным процессом, связанным с образованием защитных окисных пленок. Коррозионное поведение циркония и его сплавов в пароводяной среде характеризуется наличием двух периодов. В первом периоде до перелома на поверхности циркония образуется окисная пленка, оказывающая высокую защитную функцию, и скорость окисления циркония стабилизируется. После достижения определенной критической толщины окисный слой вдруг резко разрушается – это второй период окисления, в котором окисный слой перестает защищать металл и происходит его быстрое разрушение [1, 5, 9].

В этой связи одной из проблем является потеря защитных свойств окисных пленок  $ZrO_2$ . Эта важнейшая проблема является дискутируемой и до настоящего времени. Для объяснения второго периода в кинетике окисления циркония привлекаются различные теории и механизмы, в частности, теории механического растрескивания окисной пленки [1, 5, 9].

На основании полученных экспериментальных результатов (рисунки 1–3) полагается, что на свойства окисных пленок циркония и их разрушение оказывает влияние аномальное поведение сплава в области его эксплуатационной температуры и накоплением повреждаемости при наличии даже незначительных градиентов температур. Накопление повреждаемости приводит к возникновению предельного состояния поверхности, ее разрушению и разрушению защитной окисной пленки. Спусковым механизмом к разрушению окисной пленки являются процессы деструкции самого циркониевого сплава, что не может не повлиять на структуру сформированных защитных окислов  $ZrO_2$ .

Таким образом, определяющим процессом в разрушении окисной пленки, или немаловажным, может выступать внутрискруктурное состояние сплава, механизмы и скорость его деградации.

Примеси, пористость и характер структуры внутри- и межзеренных границ окажут существенное влияние и на другие свойства, например, такие как гидрирование. Известно, что циркониевые сплавы активно поглощают водород, а деформация образцов сплава циркония, как показано на рисунках 1–3, приведет только к увеличению поглощения водорода.

В результате выполненных исследований установлено следующее.

1. Кристаллические решетки сплава циркония Э-125 обнаруживают сложную зависимость от температуры, проявляя при некоторых ее значениях отрицательную ползучесть, что связывается с микротрещинообразованием.

2. Кристаллические решетки сплава циркония Э-125 проявляют эффекты аномальных термических расширений кристаллических решеток при отсутствии явлений полиморфизма в области температур эксперимента. Эффект в наибольшей степени проявляется в области эксплуатационных температур 250...350 °С и может быть причиной разрушения защитных окисных пленок.

Таким образом, говоря об аномальных свойствах применительно к термонапряженным элементам конструкций ядерных энергетических реакторов можно ожидать, что исследование аномальных проявлений позволяет получать наиболее полную картину поведения многокомпонентных металлических систем при высокой температуре.

## Список литературы

1. Белянин, Л. А. Безопасность АЭС с канальными реакторами. Реконструкция активной зоны / Л. А. Белянин, В. И. Лебедев, Ю. В. Гарусов и др. – М. : Энергоатомиздат, 1997. – 256 с.
2. Коваленко, В. Ф. Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. / В. Ф. Коваленко – М. : Советское радио, 1975. – 216 с.
3. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : «МИСИС», 2002. – 360 с.
4. Финкель, В. А. Высокотемпературная рентгенография металлов. – М. : Металлургия, 1968. – 204 с.
5. Дуглас, Д. Металловедение циркония / пер с англ. // под ред. чл.-корр. АН СССР А. С. Займовского. – М. : Атомиздат, 1975. – 369 с.
6. Assessing the Life of Boiler on the Basis of Anomalous Thermal Deformation of Its Crustal Lattice / L. L. Lyubimova, A. A. Makeev, A. A. Tashlykov et al // Steel in Translation. – Vol. 44. – No. 2. – 2014. – pp. 117–122.
7. Вишняков, Я. Д. Дефекты упаковки в кристаллической структуре / Я. Д. Вишняков. – М. : Металлургия, 1970. – 215 с.
8. Заворин, А. С. Способ рентгенометрической оценки температурных условий эксплуатации трубных элементов котлов : пат. 2 509 298 (13) С1 Рос. Федерация: МПК G01N 23/20(2006.01) / А. С. Заворин, Л. Л. Любимова, А. А. Ташлыков, Р. Н. Фисенко, Р. Б. Табакаев ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – № 2012147388/28; заявл. 07.11.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – с. 7: ил.
9. Парфенов, Б. Г. Коррозия циркония и его сплавов / Б. Г. Парфенов, В. В. Герасимов, Г. И. Венедиктова. – М. : Атомиздат, 1967. – 258 с.

*Работа поддержана грантом РФФИ «Фундаментальные основы инженерных наук» №15-08-99544а.*

# МОДЕРНИЗАЦИЯ КОТЛОВ БКЗ-75-39ФБ С УСТАНОВКОЙ МУФЕЛИЗИРОВАННЫХ ПРЕДТОПКОВ

<sup>1,2</sup>А.Ю. Филин, <sup>2</sup>Е.Г.Барташук,

<sup>2</sup>А.М. Глушаков, <sup>2</sup>Е.А. Межев

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет», г. Томск,

<sup>2</sup>ООО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск

Ключевые слова: котел БКЗ-75-39ФБ, муфелизированные предтопки.

Аннотация: В данной статье представлены основные технические решения по реконструкции пылеугольного котла БКЗ-75-39ФБ с установкой системы муфельной подсветки и описаны решения по применению пылеугольных муфелизированных предтопков (муфельных горелок (МГ)) для надежного воспламенения и стабильного горения пылеугольной смеси.

Многие ТЭЦ России на сегодняшний день вынуждены работать на сниженной нагрузке. Это обусловлено, с одной стороны, падением объемов потребления теплоносителей, особенно в летний сезон, а с другой – необходимостью работы ТЭЦ как минимум с двумя котлами для обеспечения надежного снабжения предприятий промышленным паром. Пылеугольные паровые котлы с твердым шлакоудалением, как правило, способны надежно работать на нагрузке от  $0,5D_{\text{ном}}$  до  $1,0D_{\text{ном}}$ . Снижение нагрузки до технического минимума (около  $0,3D_{\text{ном}}$ ) достигается чаще всего при подсветке мазутом, однако такой режим имеет ряд недостатков: неблагоприятные условия работы поверхностей нагрева, приводящие к низкотемпературной коррозии, повышение выбросов оксидов серы, высокая стоимость мазута. Все это заставляет задуматься о замене жидкого топлива пылеугольным.

В данной статье представлены основные технические решения по реконструкции пылеугольного котла БКЗ-75-39ФБ с установкой системы муфельной подсветки и описаны решения по применению пылеугольных муфелизированных предтопков (муфельных горелок (МГ)) для надежного воспламенения и стабильного горения пылеугольной смеси. При использовании систем муфельной подсветки жидкое топливо (мазут) используется только для растопки котельного агрегата, а подсветка основного факела производится пылеугольным топливом, подготовленным в прогретой муфельной горелке. Такая система му-

фельной подсветки разработана и внедрена на котле типа БКЗ-75-39ФБ.

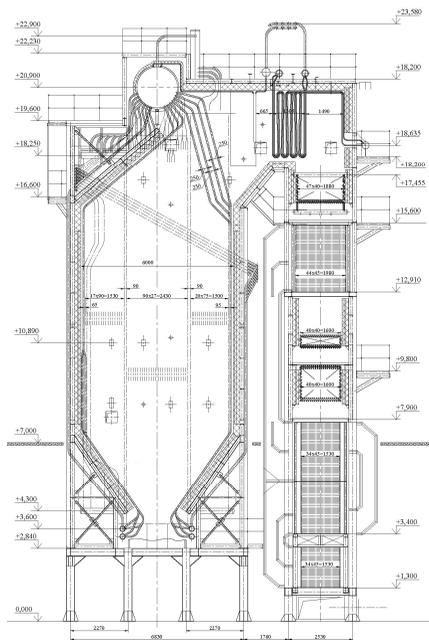


Рисунок 1 – Общий вид котла БКЗ-75-39ФБ

Котел БКЗ-75-39ФБ вертикально-водотрубный, одnobарабанный, с естественной циркуляцией, оборудован шахтно-мельничной системой пылеприготовления, предназначен для получения перегретого пара. Общий вид котла приведен на рисунке 1.

Компоновка котла выполнена по П-образной схеме. Трубы заднего экрана в верхней части топки заводятся в 4 ряда, образуя фестон. В горизонтальном газоходе расположен пароперегреватель. В опускном газоходе расположены экономайзер и воздухоподогреватель, установленные в «рассечку». Котел оборудован двумя индивидуальными системами пылеприготовления с прямым вдуванием и молотковыми тангенциальными мельницами типа ММТ 1300/2030/735 с гравитационным (шахтным) сепаратором. Топка котла оборудована двумя прямоточными горелками, расположенными на фронтальной стене топки в один ярус на отметке +10,200 м. Технические характеристики котла БКЗ-75-39ФБ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики котла

Параметры	Обозначение	Величина
Номинальная паропроизводительность, т/ч	$D_{ПЕ}$	75
Минимально-продолжительная нагрузка, т/ч	$D_{\min}$	35
Рабочее давление пара, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	$P_{ПЕ}$	39 (3,9)
Давление в барабане котла, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)	$P_6$	43 (4,3)
Температура перегретого пара, °С	$t_{ПЕ}$	440
Температура питательной воды, °С	$t_{ПВ}$	103
Температура горячего воздуха, °С	$t_{ГВ}$	334
Температура уходящих газов, °С	$t_{ВХ}$	140

Котел БКЗ-75-39ФБ спроектирован для сжигания бурых углей Ирша-Бородинского (Канского) месторождения. В настоящее время в котле сжигаются непроектные ирбейские угли марки ЗБ (пласт «Латынцевский» и «Спутник»), близкие по основным характеристикам к проектным углям. Эти угли относятся к III группе взрывоопасности (по шкале ВТИ). Состав и характеристики используемого на станции угля приведены в таблице 2.

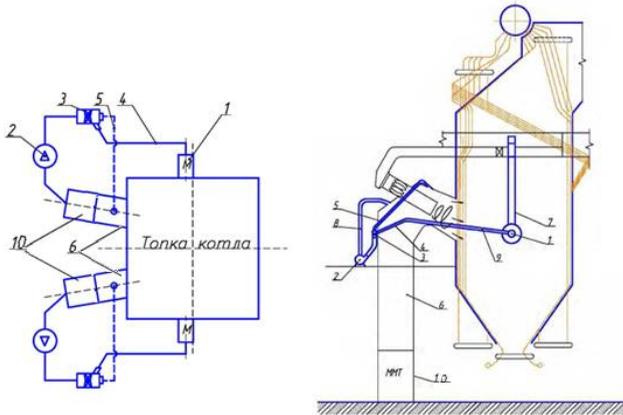
Таблица 2 – Состав и характеристики Ирбейского угля

Наименование	Обозначение	Значение
Углерод, %	$C^r$	45,53
Водород, %	$H^r$	3,40
Кислород, %	$O^r$	11,67
Азот, %	$N^r$	0,60
Сера, %	$S^r$	0,30
Влажность, %	$W^r$	29,0
Зола, %	$A^r$	9,50
Сумма, $\Sigma$		100
Выход летучих, %	$V_{daf}$	47,0
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	$Q_r^i$	3897
Коэффициент размолоспособности	$K_{ло}$	1,15
<i>Плавкостные характеристики золы</i>		
Температура начала деформации золы, °С	$t_A$	1175
Температура начала размягчения золы, °С	$t_B$	1230
Температура жидкоплавкого состояния золы, °С	$t_C$	1300

### Описание системы муфельной подсветки

Спроектированная и внедренная система муфельной подсветки (рисунок 2) состоит из следующих основных элементов:

- муфельные горелки (2 шт.), располагающиеся на боковых стенах топочной камеры на уровне основных горелок;
- пылевые вентиляторы (2 шт.) осуществляющие отбор аэро-смеси из шахтных сепараторов на муфельные горелки;
- делитель-пылеконцентратор (2 шт.), устанавливаемый на напоре мельничного вентилятора для подачи нужного количества пыли на муфельную горелку;
- пылепроводы от делителей-пылеконцентраторов до муфельных горелок;
- воздухопроводы от коробов вторичного воздуха котла до муфельных горелок.



- 1 – муфельная горелка; 2 – пылевой вентилятор;  
3 – делитель-пылеконцентратор; 4 – пылепровод подачи концентрированного потока ПВС на муфельную горелку;  
5 – линия возврата слабозапыленного потока; 6 – основная горелка;  
7 – воздухопровод вторичного воздуха;  
8 – линия отбора ПВС из шахтного сепаратора;  
9 – линия подачи ПВС в МГ; 10 – мельница

Рисунок 2 – Схема подключения мельниц к горелкам котла БКЗ-75-39ФБ

Муфельные горелки установлены на расстоянии ~3м от осей фронтных экранных труб (рисунок 2). Задача муфельных горелок заключается в предварительной термообработке угольной пыли и подаче

в топочную камеру высокотемпературного пылеугольного факела. Цель МГ обеспечение равномерного заполнения топки факелом и стабилизации воспламенения основных горелок. Номинальная тепловая мощность каждой муфельной горелки  $\sim 4$  МВт, что составляет  $\sim 20$  % от тепловой мощности топки (19,6МВт) на нагрузке  $0,3D_{\text{ном}}$ .

Делитель-пылеконцентратор (ДПК) делит воздушный поток на две равные части, а дисперсную фазу (пыль) концентрирует и направляет к муфельной горелке малозапыленный поток направляется к основной горелке. Изменение угла наклона лопаток ДПК позволяет регулировать, как концентрацию угольной пыли в пылевоздушных потоках, так и количество топлива, идущего к муфельной и основной горелкам. ДПК должен обеспечивать раздачу сушильного агента приблизительно на равные части, и поддержание оптимальных скоростей по раздающим пылепроводам 18–25 м/с.

Результаты математического моделирования показали, что разработанная и принятая конструкция ДПК оптимальна, поворот лопаток завихрителя на угол в  $20^\circ$  обеспечивает подачу на МГ угольной пыли до 85 % от общего количества, доля сушильного агента до 41 %. Дополнительно корректирование расхода сушильного агента (СА) обеспечивается за счет регулирования клапаном на линии возврата (рисунок 2 поз. 5).

Подобные муфельные горелки внедрены на ряде энергетических объектов. В данной конструкции муфельной горелки реализованы новые перспективные решения, а также учтен опыт эксплуатации по предыдущим проектам, так например в отличие от ранее применяемых МГ в данной конструкции исключен пережим на выходе из муфельной горелки, максимально упрощена конструкция.

Эскиз муфельной горелки для котла БКЗ-75-39ФБ представлен на рисунок 3. Муфельная горелка состоит из воздушного короба, цилиндрической камеры, футерованной изнутри шамотным кирпичом, нерегулируемого аксиального завихрителя установленного в кольцевом канале расположенном между футеровкой и конусной обечайкой. Так же, имеется два коаксиальных канала: центральный – канал обрудован мазутной форсункой (ФМК-350/1400-90), внешний – канал ПВС оснащен регулируемым осевым лопаточным завихрителем. На выходе из канала пыле-воздушной смеси (ПВС) устанавливается конический расщепитель.



Рисунок 3 – Эскиз муфельной горелки

Подача вторичного воздуха осуществляется через кольцевой канал, расположенный под футеровкой муфеля. В кольцевом канале установлен нерегулируемый аксиальный завихритель.

Вторичный воздух используется не только для сжигания пыли, но и для охлаждения внешних стен МГ. Вторичный воздух поступает в воздушный короб обтекает цилиндрическую камеру охлаждая ее стенки, затем разворачивается и проходя через аксиальный завихритель попадает в муфельизированный предтопок. Такая конструкция подачи вторичного воздуха позволяет обеспечить охлаждение не только цилиндрической камеры, но и внешнее охлаждение стенок футеровки, а так же защитить внутренние стенки муфельного предтопка от наброса угольной пыли. Расход вторичного воздуха регулируется клапаном на входе. На подводящих воздуховодах вторичного воздуха к горелкам установлены расходомерные устройства типа плоских сужающихся устройств.

В канале ПВС установлен регулируемый осевой лопаточный завихритель. В расчетном режиме ( $0,3D_{ном}$ ) продольная скорость ПВС на входе в завихритель составляет 11–15 м/с. При крутке потока ПВС создаются условия хорошего смесеобразования вблизи горячих стенок муфеля и образуется приосевая зона рециркуляции горячих топочных газов, которая, в свою очередь, обеспечивает надежное воспламенение угольной пыли в зоне муфельной горелки.

Воспламенение пылеугольной смеси осуществляется за счет излучаемого тепла от горячих стенок муфеля. Первичный разогрев стенок муфеля осуществляется за счет подачи горячего воздуха и предварительного сжигания высокорекреакционного топлива (мазута), подаваемого через мазутную форсунку.

Конусная обечайка выполнена из жаростойкой стали 20Х23Н18 (допустимая температура 1100 °С).

В торцевой части муфеля имеются гляделки и патрубки для возможной установки запального устройства, датчика контроля факела место для их размещения видно на рисунке 4.

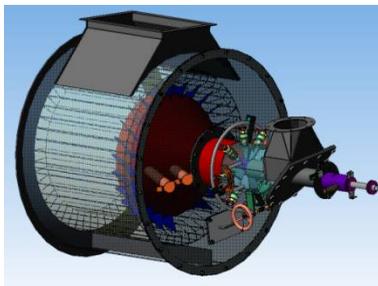


Рисунок 4 – Муфельная горелка. Общий вид регулирующих механизмов

Запальник снабжен приводом, с помощью которого он вводится внутрь муфеля на 350...400 мм для зажигания мазута и затем возвращается в исходное положение.

Конструкция МГ допускает ремонтпригодность футеровки. Футеровка МГ выполняется из шамотного кирпича, при этом отсутствуют элементы сложной геометрической формы. В конструкции МГ предусмотрена возможность демонтажа муфельного предтопка от топочной камеры по монтажным стыкам.

#### **Результаты наладочных испытаний**

В период с июля по август 2013 г. на котле БКЗ-75-39ФБ специалистами ЗАО «ЗиО-КОТЭС» при активном участии специалистов станции выполнена наладка работы системы муфельной подсветки, проверена надежность работы экранов топочной камеры, проведены режимные и теплехимических испытания котла с муфельными горелками на нагрузках  $(0,3-0,5) D_{ном}$ .

Муфельные горелки обеспечивают подачу в топочную камеру факела с температурой 1250...1300 °С, при этом температура факела внутри муфельных горелок составляет 1150...1250 °С. Факел от муфельных горелок распространяется на 2,5...3,0 м вглубь топочной камеры. Испытания показали, что возможна эксплуатация котла БКЗ-75-39ФБ при работе системы муфельной подсветки в диапазоне нагрузок  $0,3...0,4D_{ном}$ .

Таким образом, МГ могут исключить подсветку основного факела мазутными форсунками при сниженных нагрузках, но при этом обеспечить надежную работу котла.

Также проведены испытания в эксплуатационном диапазоне нагрузок  $0,5...1,0 D_{\text{ном}}$  и режимно-наладочные испытания котла в диапазоне  $0,3...0,5 D_{\text{ном}}$  с включенной системой муфельной подсветки.

В этом режиме обеспечивается стабильное устойчивое горение в топочной камере, при этом параметры пара следующие: при  $0,3D_{\text{ном}} = 22...23$  т/ч,  $T_{\text{пе}} = 390...400$  °С,  $P_{\text{пе}} = 35...40$  кгс/см<sup>2</sup>; при  $0,4D_{\text{ном}} = 30...32$  т/ч,  $T_{\text{пе}} = 400...420$  °С,  $P_{\text{пе}} = 39...40$  кгс/см<sup>2</sup>.

Мощность муфеля при нагрузке  $0,3D_{\text{ном}}$  составила 2,5 МВт.

Показания датчиков контроля факела (ДКФ), установленных на боковых стенах топочной камеры зафиксировали устойчивость общего пылеугольного факела в топке.

Проведены опыты при снижении нагрузки до  $0,2D_{\text{ном}}$ , при этом обеспечивались следующие значения параметров пара:  $0,2D_{\text{ном}} = 15...18$  т/ч,  $T_{\text{пе}} = 360...370$  °С,  $P_{\text{пе}} = 40$  кгс/см<sup>2</sup>.

Отключение системы муфельных горелок производится при достижении нагрузки  $0,45...0,5 D_{\text{ном}}$ .

Установлено, что включение в работу муфельных горелок даже при небольшой их мощности приводит к улучшению циркуляции пароводяной смеси в экранах топки при малых нагрузках таких как  $0,2...0,3 D_{\text{ном}}$ .

По результатам испытаний установлено, что применение системы муфельной пылеугольной подсветки обеспечивает стабильное надежное горение в топочной камере котла в диапазоне минимальных нагрузок, при этом обеспечиваются необходимые параметры пара, допустимые по условиям работы станции, устойчивый гидравлический режим и отсутствуют существенные отклонения от нормального теплохимического режима котла.

Предполагается, что муфельные горелки могут служить дополнительным рычагом регулирования и стабилизации топочных процессов котла, например при ухудшении качества угля.

## Список литературы

1. Цепенюк, А. И. Разработка и внедрение муфельизированных предтопок для снижения технического минимума пылеугольных котлов / А. И. Цепенюк, Ф. А. Серант, И. Ю. Белоруцкий, А. Р. Квривишвили, О. И. Ставская, В. А. Полосков, В. Г. Боярченко, П. Р. Егоров // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горе-

ние твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13–16 ноября 2012 г.

2. Шихотинов, А. В. Установка муфельных горелок как способ снижения технического минимума нагрузки пылеугольных котлов / А. В. Шихотинов, Ф. А. Серант, А. И. Цепенек // ЗАО «ЗиО-КОТЭС» Энергетик. – 2015. – № 7 – с. 52–56.

3. Цепенек, А. И. Опыт использования муфельизированных предтопок для снижения технического минимума пылеугольных котлов / А. И. Цепенек, Ф. А. Серант, А. В. Шихотинов, И. Ю. Белоруцкий, О. И. Ставская, Е. Г. Барташук // Сборник докладов ; II Международная научно-техническая конференция. Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла. – 2014. – М., ОАО «ВТИ». – с. 413–420.

## **РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТУПЕНЧАТОГО ПОДОГРЕВА КОНДЕНСАТА В КОТЛАХ-УТИЛИЗАТОРАХ ДЛЯ ПАРОГАЗОВЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ**

**С. Н. Хуторненко**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

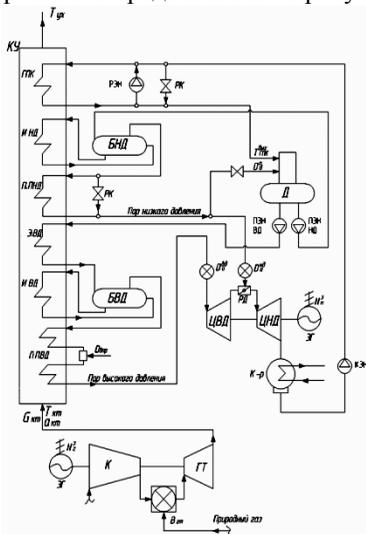
Ключевые слова: парогазовый цикл, котел-утилизатор, газотурбинная установка, газовый подогреватель конденсата, ступенчатый подогрев конденсата.

Аннотация. В статье рассмотрена технология ступенчатого подогрева конденсата в котлах-утилизаторах для парогазовых энергоблоков.

Энергетика России, как и энергетика любой другой страны, является основополагающей промышленностью. Наряду с этим в последнее время наблюдается отставание темпов ввода новых мощностей по производству электрической энергии от темпов роста спроса на электроэнергию. Для повышения энергостабильности России наиболее перспективным является строительство энергоблоков работающих по комбинированному циклу. Согласно энергетической стратегии России одним из целевых показателей программы модернизации электроэнергетики России на период до 2020 г. является увеличение установленной мощности газовых ТЭС с применением передовых технологий на

основе ПГУ до 50900 МВт [2] [5]. При проектировании основного оборудования для вновь вводимых энергоблоков особое внимание уделяется повышению коэффициента полезного действия энергоблока в целом. Одним из возможных путей повышения КПД блока является снижение затрат электроэнергии на собственные нужды. Несмотря на это вопрос снижения затрат электроэнергии на собственные нужды, изучен не достаточно подробно.

В ходе выявления основных групп факторов, которые влияют на процесс повышения эффективности энергоблоков ПГУ посредством оптимизации тепловых схем котлов-утилизаторов, для анализа был принят двухвальный моноблок с котлом-утилизатором (КУ), принципиальная схема энергоблока представлена на рисунке 1.



ГПК – газовый подогреватель конденсата; ГТ – газовая турбина;  
 ГТУ – газотурбинная установка; ИВД – испаритель высокого давления; ИНД – испаритель низкого давления; К – компрессор;  
 КЭН – конденсатный электронасос; К-р – конденсатор;  
 КУ – котел-утилизатор; ППВД – пароперегреватель высокого давления; ППНД – пароперегреватель низкого давления;  
 ПН – питательный насос; ПТ – паровая турбина РЭН – насос рециркуляции конденсата; ЭВД – экономайзер высокого давления;  
 ЭГ – электрогенератор; ЦВД – цилиндр высокого давления паротурбинной установки; ЦНД – цилиндр низкого давления паротурбинной установки

Рисунок 1 – Принципиальная схема энергоблока ПГУ-230

Анализ схемы энергоблока, представленного на рисунке 1, показал, что основными электропотребителями для обеспечения нормального протекания технологических процессов, в схеме котла-утилизатора являются электроприводы арматуры, питательных электронасосов и насоса рециркуляции конденсата. С учетом того, что первые две из перечисленных группы электропотребителей являются неотъемлемыми для обеспечения бесперебойной работы котла-утилизатора, а насос рециркуляции конденсата предусматривается для обеспечения безаварийной работы низкотемпературной поверхности на выходе из КУ (газового подогревателя конденсата или ГПК), то принято решение проработать возможные пути оптимизации тракта газового подогревателя конденсата с возможностью исключения из технологической схемы линии рециркуляции конденсата.

За основу для исследования принят котел-утилизатор, предназначенный для работы в составе энергоблока ПГУ-230. Согласно классификации по действующей нормативной документации данный энергоблок представляет собой двухвальный моноблок, в состав которого входят (энергоблоки с подобным составом были введены на ряде электростанций в 2014 г., в т. ч. при участии автора):

- одна газотурбинная установка типа ГТЭ-160;
- котел-утилизатор типа Е-236/40,5-9,3/1,5-514/299-13,5 вв;
- одна паровая турбина типа Т-63/76-8,8.

Поскольку данная работа посвящена оптимизации теплогидравлической схемы тракта ГПК, то в данном случае ГПК следует рассматривать не как поверхность нагрева отдельно, а как систему. На рисунке 2 представлена классическая схема тракта ГПК, которая включает в себя:

Поверхность нагрева, предназначенная для передачи тепловой энергии дымовых газов рабочему телу;

С помощью системы подводящих и отводящих трубопроводов осуществляется подвод конденсата от конденсатного тракта и отвод конденсата в деаэрактор;

Система байпаса конденсата, предназначенная для передачи части холодного конденсата минуя поверхность нагрева. Данное технологическое решение необходимо для поддержания температуры конденсата перед подачей в деаэрактор ниже температуры насыщения в деаэраторе, это необходимо для обеспечения надежной деаэрации.

Система рециркуляции конденсата, предназначенная для перекачки части подогретого конденсата на вход в поверхность нагрева. Данное технологическое решение обусловлено тем, что температура конденсата за конденсатором паровой турбины находится в преде-

лах 25–50 °С, а сама поверхность нагрева устанавливается в зоне низких температур (температура уходящих газов порядка 100 °С), то существует вероятность возникновения низкотемпературной коррозии входной по конденсату части поверхности нагрева. Расход конденсата через линию рециркуляции определяется из материального и теплового баланса тракта ГПК. Так же на линии рециркуляции устанавливают водо-водяной теплообменник, предназначенный для подогрева сетевой воды.

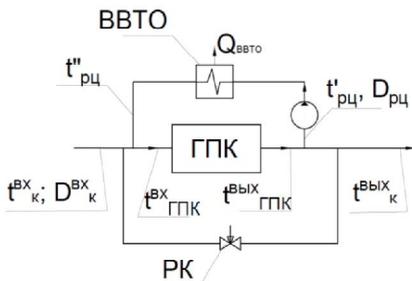
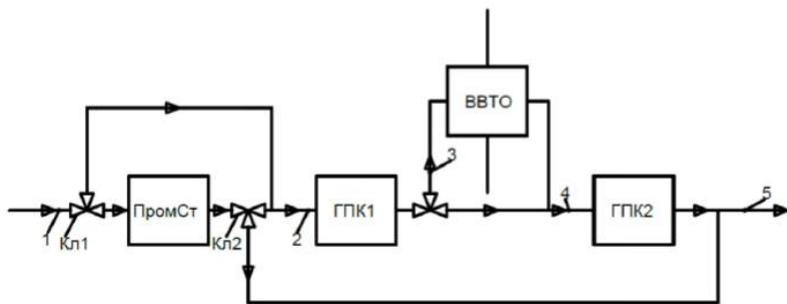
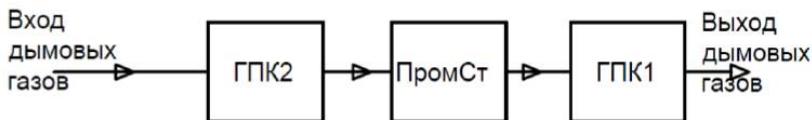


Рисунок 2 – Схема замеров параметров при испытании ГПК с рециркуляцией

На рисунке 3 представлена альтернативная схема включения поверхностей нагрева газового подогревателя конденсата. Альтернативность предлагаемой автором технологической схемы ГПК заключается в том, что из тракта ГПК исключается система рециркуляции конденсата.



а)



б)

а – гидравлическая схема; б – схема расположения поверхностей нагрева в газовом тракте

Рисунок 3 – Альтернативная схема включения поверхностей нагрева ГПК

Основной идеей этой схемы является исключение из теплогидравлической схемы тракта ГПК системы рециркуляции и введение промежуточной ступени для предварительного подогрева части конденсата и смешением с основным конденсатом перед подачей в КУ. Для этого потребовалось разделить всей поверхности нагрева ГПК на три ступени:

Входная по конденсату ступень – ГПК1;

Промежуточная ступень для подогрева конденсата – ПромСт;

Выходная по конденсату ступень – ГПК2.

Движение рабочей среды (конденсата) в тракте ГПК происходит следующим образом. Холодный конденсат поступает во входную ступень (ГПК1), параллельно входному трубопроводу включена промежуточная ступень в которой осуществляется подогрев конденсата. Тепловая нагрузка промежуточной ступени при этом равна количеству энергии, необходимой для подогрева всего количества конденсата перед подачей в ГПК1 до температуры не ниже 60 °С. Регулирование расхода конденсата через промежуточную ступень, соответственно и тепловой нагрузки этой ступени, осуществляется посредством установки трехходового клапана на входе (Кл1). Далее подогретый конденсат с температурой 60 °С поступает в ГПК1. Конденсат после подогрева в ГПК1 направляется в водо-водяной теплообменник (ВВТО), где происходит нагрев сетевой воды. Для окончательного нагрева перед подачей в деаэрактор конденсат направляется в ГПК2. Традиционно в схемах ГПК предусматривают байпасную линию для поддержания недогрева до кипения. В общепринятых схемах ГПК осуществляется байпасирование холодного конденсата. В предлагаемой альтернативной схеме байпасирование осуществляется не холодного, а частично подогретого в промежуточной ступени конденсата. Такое технологическое решение обусловлено тем, что в режимах, когда температура конденсата за конденсатором паровой турбины приближается к 60 °С и выше, т. е. не требуется до-

полнительного подогрева, тепловая нагрузка, а соответственно и расход конденсата через промступень будет приближаться к нулю. Работа промступени в безрасходном режиме может привести к нарушению гидродинамического режима, а в худшем случае и к повреждению поверхности нагрева промступени. Регулирование расхода конденсата для поддержания недогрева конденсата до кипения перед деаэратором осуществляется с помощью трехходового клапана устанавливаемого за промступенью (Кл2). Все ступени ГПК включены по противоточной схеме.

Как было сказано ранее, одной из задач исследования является установление зависимостей величин относительного тепловосприятия поверхностей нагрева ГПК от величин известных в начальный момент проектирования. Такими величинами являются относительное тепловосприятие ВВТО и температура конденсата на входе в котел-утилизатор. В данном случае под относительной тепловой нагрузкой поверхностей нагрева принято отношение тепловой нагрузки данной поверхности к общему тепловосприятию газового подогревателя конденсата в данном режиме и определяется по соотношению:

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_{ГПК}},$$

где  $Q_i$  – тепловосприятие  $i$ -ой ступени ГПК, кВт;

$Q_{ГПК}$  – тепловосприятие газового подогревателя конденсата, кВт.

Относительная нагрузка водо-водяного теплообменника (ВВТО):

$$q_{ВВТО} = \frac{Q_{ВВТО}}{Q_{ГПК}},$$

где  $Q_{ВВТО}$  – тепловосприятие ВВТО, кВт.

Тепловосприятие газового подогревателя конденсата ( $Q_{ГПК}$ ) определяется по следующей формуле:

$$Q_{ГПК} = Q_{\kappa} + Q_{ВВТО}, \text{ кВт}$$

где  $Q_{\kappa}$  – количество тепла, необходимое для нагрева конденсата, кВт.

Для определения исходных данных для исследования выполнена серия тепловых расчетов по определению указанных ранее зависимостей. Исходными данными при этом служили температура конденсата на входе в котел-утилизатор в диапазоне от 25 до 55 °С и тепловая нагрузка ВВТО принята в диапазоне от 25 до 100 % от номинальной нагрузки самого ВВТО. Номинальная нагрузка ВВТО равна 13500 кВт. Исходные данные и результаты тепловых расчетов представлены в таблицах 1–4.

Таблица 1 – Зависимость относительной нагрузки ступеней ГПК от нагрузки ВВТО при температуре конденсата на входе 25 °С

Параметр	Значение			
	13500	10125	6750	3375
Тепловая нагрузка ВВТО	13500	10125	6750	3375
Относительное тепловосприятие ГПК2	0,47	0,42	0,35	0,28
Относительное тепловосприятие ГПК1	0,31	0,34	0,36	0,40
Относительное тепловосприятие промежуточные ступени	0,20	0,23	0,27	0,31
Относительное тепловосприятие ВВТО	0,24	0,19	0,13	0,07

Таблица 2 – Зависимость относительной нагрузки ступеней ГПК от нагрузки ВВТО при температуре конденсата на входе 35 °С

Параметр	Значение			
	13500	10125	6750	3375
Тепловая нагрузка ВВТО	13500	10125	6750	3375
Относительное тепловосприятие ГПК2	0,46	0,40	0,34	0,26
Относительное тепловосприятие ГПК1	0,34	0,36	0,39	0,42
Относительное тепловосприятие промежуточные ступени	0,18	0,22	0,26	0,31
Относительное тепловосприятие ВВТО	0,25	0,20	0,14	0,07

Таблица 3 – Зависимость относительной нагрузки ступеней ГПК от нагрузки ВВТО при температуре конденсата на входе 45 °С

Параметр	Значение			
	13500	10125	6750	3375
Тепловая нагрузка ВВТО				
Относительное тепловосприятие ГПК2	0,46	0,40	0,33	0,25
Относительное тепловосприятие ГПК1	0,35	0,37	0,40	0,43
Относительное тепловосприятие промступени	0,17	0,21	0,26	0,31
Относительное тепловосприятие ВВТО	0,27	0,22	0,15	0,08

Таблица 4 – Зависимость относительной нагрузки ступеней ГПК от нагрузки ВВТО при температуре конденсата на входе 55 °С

Параметр	Значение			
	13500	10125	6750	3375
Тепловая нагрузка ВВТО				
Относительное тепловосприятие ГПК2	0,46	0,40	0,33	0,24
Относительное тепловосприятие ГПК1	0,36	0,38	0,40	0,44
Относительное тепловосприятие промступени	0,17	0,21	0,26	0,31
Относительное тепловосприятие ВВТО	0,29	0,23	0,15	0,09

Для удобства определения характера зависимости относительного тепловосприятия ГПК2 от относительного тепловосприятия ВВТО при различных температурах конденсата на входе в КУ данные были нанесены на координатную сетку и представлены на рисунке 4.

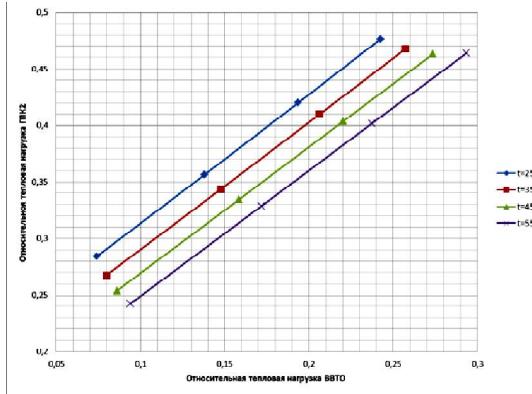


Рисунок 4 – Зависимость относительной нагрузки ГПК2 от относительной нагрузки ВВТО при различных температурах конденсата на входе в КУ

Анализ графиков зависимости относительной нагрузки ГПК2 от относительной нагрузки ВВТО показывает, что указанная зависимость носит линейный характер при всех значениях температуры конденсата, т. е. функция имеет вид:

$$q_{ГПК2} = k \cdot q_{ВВТО} + b.$$

Для определения коэффициентов  $k$  и  $b$ , входящих в состав уравнения при различных температурах конденсата, применен метод наименьших квадратов в соответствии с рекомендациями [4] [1] [3]. При этом следует учесть, что значения коэффициентов  $k$  и  $b$  являются переменными величинами и зависят от температуры конденсата на входе в котел-утилизатор. Таким образом, необходимо определить значения коэффициентов  $k$  и  $b$  при различных температурах конденсата, вывести зависимости коэффициентов  $k$  и  $b$  от температуры конденсата. Результаты расчетов приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения коэффициентов  $k$  и  $b$  в зависимости от температуры конденсата на входе в КУ

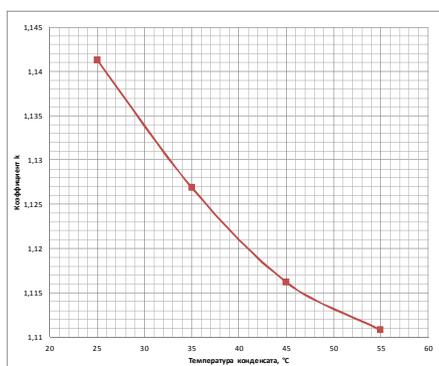
Параметр/коэффициент	Значение			
	25	35	45	55
Температура конденсата, °C	25	35	45	55
Коэффициент $k$	1,1415	1,1268	1,1159	1,1103
Коэффициент $b$	0,1997	0,1778	0,1579	0,1381

Поскольку коэффициенты  $k$ ,  $b$  зависят от температуры конденсата на входе в котел-утилизатор, то для вывода универсальной зависимости относительной нагрузки потребуется найти решения следующих функций:

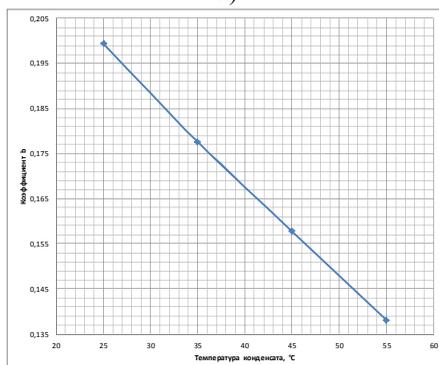
$$k = f_1(t_k); \quad b = f_2(t_k),$$

где  $t_k$  – температура конденсата на входе в котел-утилизатор.

Для удобства определения типов функций, описывающих зависимости изменения коэффициентов  $k$  и  $b$  от температуры конденсата на входе в КУ, построены графические зависимости, представленные на рисунке 5.



а)



б)

Рисунок 5 – Графическая зависимость коэффициентов  $k$  и  $b$  от температуры конденсат на входе в котел-утилизатор

Из рисунка 5 видно:  
коэффициент  $k$  описывается полиномом второй степени и имеет вид:

$$k = a \cdot t_{\kappa}^2 - b \cdot t_{\kappa} + c,$$

коэффициент  $b$  описывается линейной функцией и имеет вид:

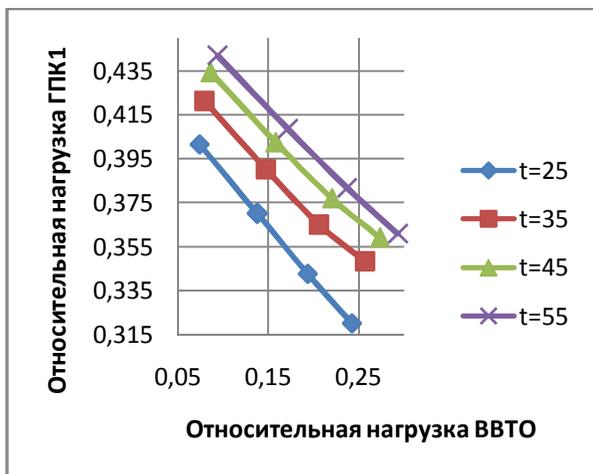
$$b = n \cdot t_{\kappa} + m.$$

Для определения неизвестных коэффициентов ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $n$ ,  $m$ ), входящих в состав приведенных выше уравнений, применен метод наименьших квадратов.

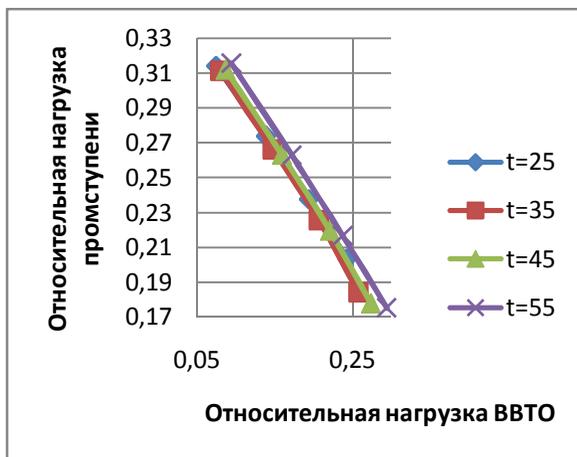
После определения всех неизвестных коэффициентов получена универсальная зависимость относительной нагрузки ГПК2 от относительной нагрузки ВВТО и температуры конденсата на входе в КУ:

$$q_{\text{ГПК2}} = (2,3 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\kappa}^2 - 0,0028 \cdot t_{\kappa} + 1,1979) \cdot q_{\text{ВВТО}} + (-0,002 \cdot t_{\kappa} + 0,25).$$

Аналогично, как и в случае со ступенью ГПК2, были построены графические зависимости относительной нагрузки ГПК1 и промежуточной ступени от относительной нагрузки ВВТО и температуры конденсата на входе в котел-утилизатор. На рисунке 6 приведены семейства кривых отображающих зависимость относительной нагрузки ГПК1 и промежуточной ступени от относительной нагрузки ВВТО при различных температурах конденсата.



а)



б)

Рисунок 6 – Графическая зависимость относительного тепловосприятия ступеней ГПК1 и протопустени

Из анализа рисунка 6 видно, что зависимость относительной нагрузки ГПК1 и протопустени от относительной нагрузки ВВТО изменяется по различным законам в зависимости от температуры конденсата на входе в котел-утилизатор. Поэтому, данные величины целесообразно рассматривать совместно для определения общего подхода к решению данной задачи.

Тепловая нагрузка ГПК1 и протопустени, кВт, может быть определена по следующей формуле:

$$Q = D_k \cdot (h_k^{вых} - h_k^{вх}),$$

где  $h_k^{вых}$  – энтальпия конденсата при температуре и давлении на выходе из ступени, кДж/кг,

$h_k^{вх}$  – энтальпия конденсата при температуре и давлении на входе в ступень, кДж/кг.

Относительное тепловосприятие ступеней определено по результатам параллельного сведения материальных и тепловых балансов по ступеням ГПК, в результате получено следующее:

Относительное тепловосприятие ГПК1 от относительного тепловосприятия ВВТО и температуры конденсат на входе в КУ

$$q_{ГПК1} = \frac{D_k \cdot (h_{ГПК2}^{ex} - h_{ГПК1}^{ex})}{Q_{ГПК}} - q_{ГПК2} + q_{ВВТО}.$$

Относительное тепловосприятие промступени от относительного тепловосприятия ВВТО и температуры конденсата на входе в КУ

$$q_{ПромСт} = 1 - q_{ГПК1} - q_{ГПК2} = 1 - \frac{D_k \cdot (h_{ГПК2}^{ex} - h_{ГПК1}^{ex})}{Q_{ГПК}} - q_{ВВТО}.$$

Выводы. Рассмотрена альтернативная схема включения поверхностей нагрева газового подогревателя конденсата котла-утилизатора. Исследованы основные эксплуатационные характеристики предлагаемой схемы. Полученные уравнения зависимости относительного тепловосприятия ступеней ГПК от относительного тепловосприятия ВВТО и температуры конденсата на входе в КУ могут быть использованы для проведения НИОКР в данной области. Применение рассматриваемой в статье схемы позволяет снизить затраты электроэнергии на собственные нужды энергоблока в целом, что повышает эффективность производства электрической энергии.

### Список литературы

1. Амосов, А. А. Вычислительные методы для инженеров : учеб. пособие / А. А. Амосов, Ю. А. Дубинский, Н. В. Копченова. – М. : Высш. шк., 1994. – 544с. : ил.
2. Волков, Э. П. Развитие электроэнергетики России / В. А. Баринов, А. С. Маневич, М. И. Сапаров // Электрические станции, 2013. – № 3. – с. 3–8.
3. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский // Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971.
4. Теплоэнергетика и теплотехника : Справочная серия : в 4кн. / под общ. ред. чл.-кор. РАН А. В. Клименко и проф. В. М. Зорина. – 4-е изд., стереот. – М. : Издательский дом МЭИ. 2007.
5. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года – М. : – ГУ Институт энергетической стратегии, 2010. – 180 с.

# **ПУТИ МИНИМИЗАЦИИ ПОТЕРЬ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ, ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ ОРГАНИЗАЦИЙ**

**А.А. Часовских, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова**  
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: затраты, тепловая сеть, котельная.

Аннотация: Рассмотрены пути и мероприятия по энергетической эффективности работы теплоснабжающих предприятий.

Пути и мероприятия по энергетической эффективности работы теплоснабжающих предприятий должны быть направлены на снижение затрат отпускаемой тепловой энергии руб./Гкал.

Затраты. Тепловая сеть. Основные потери транспортируемой тепловой энергии от теплового источника (котельной) до потребителя обусловлены потерями тепла через изолированную, зачастую частично изолированную поверхность трубопроводов. На данный момент в тепловых хозяйствах малой теплоэнергетики присутствует тенденция к децентрализации систем теплоснабжения, тепловые сети, сооруженные в советское время по большей части находятся в ветхом состоянии, количество отапливаемых объектов сократилось, однако пропускная способность основных магистральных трубопроводов остается значительно превосходящей расчетную отопительную нагрузку существующих потребителей. Отсюда вытекает еще одно направление: потери тепла через изолированную поверхность. Ее можно сократить, уменьшив сечение трубопроводов (эти мероприятия производятся при реконструкции тепловых сетей). Еще один немаловажный фактор: несанкционированный водоразбор из тепловых сетей, что в свою очередь так же ведет к снижению эффективности теплоснабжающих организаций. В итоге, необходимо применение современных долговечных теплоизоляционных материалов теплопроводов, работы по реконструкции тепловых сетей обязательно должны учитывать текущий объем отапливаемых потребителей.

Затраты. Котельная. Основным источником теплоснабжающих организаций для получения тепловой энергии являются котельные и ЦТП. Котельные (совокупность котлов и оборудования, которая вклю-

чает в себя устройства подачи и сжигания топлива; очистки, химической подготовки и деаэрации воды; теплообменные аппараты различного назначения; насосы: сетевые, подпиточные, рециркуляционные и т. д.; баки питательные, конденсационные, баки-аккумуляторы горячей воды; дутьевые вентиляторы и воздушный тракт; дымососы, газовый тракт и дымовая труба; устройства вентиляции; системы автоматического регулирования и безопасности сжигания топлива; тепловой щит или пульт управления). ЦТП (Центральный тепловой пункт – комплекс устройств, служащих для обслуживания группы потребителей (зданий, промышленных объектов), чаще располагающийся в отдельно стоящем сооружении, но может быть размещен в подвальном или технической помещении одного из зданий.). Затраты для получения тепловой энергии складываются:

- фонд заработной платы;
- амортизационные отчисления;
- затраты на электроэнергию;
- уголь, газ;
- транспортирование до котельных;
- собственные нужды.

Фонд заработной платы сократить за счет механизации процессов для угольных котельных, либо обоснованное по технико-экономическим расчетам строительство газовых котельных без обслуживания персоналом.

Отчисления на амортизацию можно снизить за счет сокращения парка оборудования, а также своевременного обновления на новое более экономичное – котлы с высоким КПД, насосы, рассчитанные на существующую тепловую нагрузку.

При проектировании и реконструкции ЦТП и котельных обязательный расчет квт/Гкал с соответствующими мероприятиями – применение частотного регулирования приводов оборудования и т. д.

Применение правильного процесса подготовки топлива (для твердого топлива), для снижения химического недожога, т. е. для полного соединения углерода с кислородом без возникновения окиси углерода. Потери энергии на недожог могут составлять около 18 %. Применение правильных топочных устройств для котлов, чтобы снизить механический недожог, возникающий в топке из-за раннего удаления шлака и недостаточной температуры в топочной камере.

Современной тенденцией к эффективному снижению затрат является борьба с так называемым «перетопом» посредством современных комплексов погодозависимого регулирования. Перетоп возникает в том случае, если температура окружающей среды резко возрастает, а

котельные не могут с такой же скоростью снизить ее в теплоносителе, отсюда возникает перегрев здания и некомфортные условия для потребителя, но так же большое количество тепловой энергии попросту теряется. В таких случаях могут быть использованы погодозависимые регуляторы расхода теплоносителя, например при помощи изменения расхода теплоносителя через автоматический трехходовой клапан и одновременного забора возвращаемой от потребителя воды (обратки) и подачу уже разбавленной воды потребителю.

Так же для повышения эффективности теплоснабжающих организаций могут быть использованы тепловые сети минимум с двумя контурами, одним из которых является контур котельной. Данный метод повышает износостойкость оборудования, а в большей степени пределов котельной. Обусловлено это тем, что вода из котлов не покидает пределов котельной, а всю тепловую энергию передает через теплообменники (техническое устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя средами, имеющими различные температуры) во внешний контур, к потребителю. Так же в этом случае во внутреннем контуре возможно использование не воды, как теплоносителя, а тосола. Данный метод уменьшает износ внутренней поверхности труб в котле, что увеличивает время высокого КПД котла, что в свою очередь значительно увеличивает эффективность теплоснабжающих организаций.

Потери в тепловых сетях  $Q_{тс}$  за отчетный период можно определить как сумму теплотерь с непродуктивной утечкой воды из сети  $Q_{ут}$ , с продуктивной  $Q_{ут.пр}$ , и потерь тепла через изоляцию в трубопроводах тепловой сети от границы раздела до узла учета тепловой энергии  $Q_{из}$ .

$$Q_{тс} = Q_{ут} + Q_{ут.пр} + Q_{из}.$$

Еще одним звеном потери тепловой энергии может являться потеря через обмуровку котла. В большей степени решить данную проблему помогут решить высококачественные изоляционные материалы, не допускающие нагрева окружающей среды.

Не маловажным фактором экономии тепла может являться и сам потребитель. В большинстве случаев это можно наблюдать, увеличив и улучшив утепление самого здания, что видно из рисунка 1. Установка качественных теплопакетов также увеличит отдачу и эффективность теплоносителя.

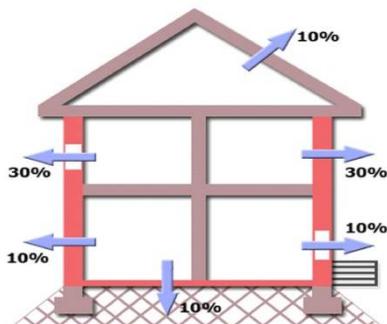


Рисунок 1 – Потери тепла через неизолированные поверхности здания

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ РАБОТЫ КОТЛОВ**

**А.К. Шаи, Е.В. Приходько**

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова  
г. Павлодар, Казахстан

Ключевые слова: топливные брикеты, длительность горения, энергоэффективность.

Аннотация. В статье производится анализ эффективного использования топливных брикетов из возобновляемых материалов в теплогенерирующих установках.

При использовании топливных брикетов из возобновляемых органических материалов важным является вопрос о длительности горения топлива. Топливные брикеты по калорийности соответствуют некоторым углям. Но при этом, их плотность значительно ниже, а пористость выше. В связи с чем, при сжигании брикетов в котлах малой и средней производительности возникает вопрос об эффективном использовании этого топлива.

Скорость горения конкретного вида топлива зависит от многих факторов, и для дальнейших разработок было решено провести исследования зависимости скорости сгорания топлива от времени. Для сравнения скорости горения различных видов твердых топлив необходимо создать одинаковые условия их сжигания. Кроме того, созданные

условия должны быть максимально приближены к условиям горения в реальной теплогенерирующей установке.

Это производится, например, при использовании образцов определенной формы и строго нормированного размера и сжигании их в нормированных условиях [1, 2]. Данные методики определяют скорость горения топлива в мм/с (дюйм/с) и применяются для определения параметров горения твердого ракетного топлива.

Для исследований горения топлива в котлах малой и средней мощности данный способ неприменим, т. к. условия сжигания топлива, указанные в литературе значительно отличаются от реальных условий. Для того, чтобы узнать реальную скорость горения кусков топлива (и брикетов) необходимо создать условия, идентичные горению топлива на колосниковой решетке котла. Для этого была создана физическая модель топочной камеры котла и проведены замеры скоростей ряда образцов топлива [3].

Для исследования длительности горения твердых топлив были выбраны следующие виды образцов:

- топливные брикеты из опавшей листвы. Давление прессования – 15 МПа.
- навески сухой древесины: бука и сосны;
- уголь Экибастузский.

Топливные брикеты. Средняя скорость горения брикетов составила 1,271 гр/мин (среднее время горения 35 мин 22 сек; масса навесок около 44,8 гр., средняя плотность 953 кг/м<sup>3</sup>).

Древесина (бук и сосна). Для сравнения скоростей горения были изготовлены образцы древесины в форме цилиндров (аналогично форме брикетов). Разная скорость горения (бук – 1,05 гр/мин; сосна – 1,115 гр/мин) объясняется плотностью образцов: плотность бука – 708 кг/м<sup>3</sup>; плотность сосны – 422 кг/м<sup>3</sup>.

Уголь Экибастузский. Горение угля в слое достаточно подробно описано в литературе [4], поэтому останавливаться на стадиях горения не имеет смысла. Ограничимся лишь измеренной нами конечной цифрой: средняя скорость горения Экибастузского угля 0,207 гр/мин.

Таким образом, при сжигании килограмма рассматриваемых брикетов выделяется столько же теплоты, как и при сжигании килограмма Экибастузского угля, но при этом, время горения брикетов в пять раз меньше. Таким образом, если использовать котел, предназначенный для сжигания угля, при сжигании брикетов, получаем ситуацию, когда

котел работает с повышенной температурой уходящих газов (т. е. с высокими потерями  $q_2$ ) и сниженным КПД.

Рассмотрим, что же предлагают производители топливных брикетов и пеллет в таких случаях. Во-первых, производители рекомендуют уменьшение притока воздуха до минимума для длительного горения. После того как дом нагреется до нужного уровня рекомендуется прикрыть дверку зольника, или шибер притока свежего воздуха. Этим снижается скорость горения, а значит, увеличивается длительность. Горение при этом, переходит в долгое устойчивое тление, поддерживающее комфортную температуру в доме. Продолжительность горения в режиме тления увеличивается в 2–3 раза [5]. Комментируя данные рекомендации можно сказать, что длительность горения действительно будет дольше, но при этом:

- режим тления идет с образованием недожога ( $CO$ , а не  $CO_2$  – как при горении с достаточным количеством кислорода). Это влечет за собой значительное увеличение химического недожога ( $q_3$ ) и, как следствие, снижение КПД котла в целом;
- повышение выбросов вредных веществ вследствие химического недожога;
- отложение сажи (недогоревших частиц) в газоходах.

Таким образом, эта рекомендация неприемлема со всех сторон: экологической, экономической и эксплуатационной.

Во-вторых, для увеличения продолжительности горения и поддержания постоянного жара рекомендуется проводить процесс горения с неполной закладкой и подкладывать каждый час по 15–20 брикетов [6].

Это более приемлемый с технической точки зрения выход. Но потребителям важно именно длительное горение топлива на одной закладке, а не постоянное подкидывание топлива в топку (особенно в ночное время). Кроме того, при неполной загрузке топки возможно, что не вся газовая фаза сгорит полностью: нужна еще высокая температура на всем пути горения. В данном случае возможна ситуация, когда при неполной загрузке горючие газы, выделяющиеся при нагреве топлива, ударяются о холодные стенки котла, частично гаснут и уносятся в трубу, что также приводит к химическому недожогу.

В соответствие с вышесказанным нами были разработаны рекомендации по оптимизации использования топлива из органических отходов в котлах малой и средней мощности.

Во-первых, рекомендации касаются стадии проектирования. При сжигании в котле брикетов топочная камера должна отличаться размерами. Брикеты (как и дрова) горят длинным пламенем, которое зачастую уходит за пределы топки, в связи с чем, чтобы максимально отобрать тепло из зоны горения котел должен иметь длину больше чем длина пламени. На угле котел обычно размерами меньше и котел более компактный.

Во-вторых, подача кислорода для горения.

Для котлов средней мощности рекомендуется установить газоанализатор и добиваться «экономичного» содержания кислорода на выходе из котла (около 5 %) путем регулирования подачи воздуха.

Ожидать от владельцев котлов малой мощности установки газоанализатора (хотя бы простейшего с датчиком по  $O_2$ ) нереально, так как это требует денежных затрат. Поэтому в рекомендациях отметим, что регулировать количество подаваемого воздуха (открытие поддува) можно ориентируясь на цвет пламени.

В-третьих, установка в системе отопления теплового аккумулятора.

Котельные установки, работающие на топливных брикетах, не могут работать долгое время без вмешательства человека, который должен периодически загружать в топку топливо. Если этого не сделать, теплоноситель начнет остывать, температура в доме будет понижаться. Кроме того, при наличии в системе циркуляционного насоса, в случае отключения электроэнергии при полностью разгоревшейся топке появляется опасность вскипания теплоносителя в рубашке агрегата и последующее ее разрушение. Все эти проблемы можно решить, установив тепловой аккумулятор для котлов отопления.

Роль аккумулятора теплоты в общей схеме отопления следующая: в процессе работы котла в штатном режиме накапливать тепловую энергию, а после прогорания топлива отдавать ее радиаторам в течение определенного промежутка времени. Конструктивно тепловой аккумулятор для твердотопливного котла представляет собой утепленную емкость для воды расчетной вместительности. Она может устанавливаться как в помещении топочной, так и в отдельной комнате дома.

Преимущества ее использования на лицо:

- постоянная работа котла с максимальной экономичностью;
- увеличение времени между дозагрузками котла;

- возможность использования котла летом исключительно на нужды горячего водоснабжения;
- возможность использования в системе отопления любого котла, даже с мощностью в разы превышающей теплотеперь здания;
- защита от закипания и разрушения водяной рубашки котла;
- отсутствие подвижных механических частей и каких-либо химических процессов;
- статичность работы (высокая надежность и долговечность);
- исключена подача холодной воды из обратного трубопровода в раскаленный чугунный теплообменник после внезапного включения циркуляционного насоса.

### Список литературы

1. Способ определения скорости горения твердого ракетного топлива. Патент 2267636 РФ, МКИ F02K9/96.
2. Вейше, В. Расчет скоростей горения твердого топлива на основе кинетики разложения конденсированной фазы / В. Вейше, Дж. Веноград // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36. – № 1. – с. 138–148.
3. Приходько, Е. В. Исследование длительности горения топливных брикетов из органических отходов / Е. В. Приходько, А. К. Кинжибекова, А. К. Шаи // Эпоха науки. – 2016. – № 8. – с. 345–351.
4. Аскарова, А. С. Численное моделирование горения твердого топлива. / А. С. Аскарова, В. Е. Мессерле, А. Б. Устименко, С. А. Болегенова, В. Ю. Максимов, А. Бекмухамет // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, – 2012. – с. 101–107.
5. «Экодрев Плюс» – Преимущества очевидны [Электронный ресурс]. – <http://ecodrevplus.ru/home.html>. – статья в интернете.
6. Что такое брикет из древесного угля или древесноугольный брикет? [Электронный ресурс]. – <http://ru-bio.ukrbio.com/ru/articles/4099/>. – статья в интернете.

# ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА НА АЛТАЙСКОЙ КЭС

**А.П. Шевцов, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: водоугольное топливо, Алтайская КЭС.

Аннотация: Выявление преимуществ и недостатков применения водоугольного топлива на Алтайской КЭС.

Мы знаем, что Алтайский край очень беден на месторождения угля, единственное исследованное месторождение – это Мунайское месторождение, расположенное в п. Сузоп Солтонского района. Оно представлено двумя промышленными, горизонтально залегающими на глубине 41–57 м пластами угля средней мощностью 10–12 м. Прогнозируемые запасы оцениваются в 250 млн. тонн. Мунайские значительно уступают каменным кузнецким по теплотворной способности (примерно в 2 раза). Мунайские угли сопоставимы с Канско-Ачинскими, однако по содержанию золы и серы несколько им уступают. В данный момент Мунайский уголь мало используется, т. к. уголь низкосортный, с высоким содержанием золы, поэтому целесообразней закупать уголь на Кузбассе. Но из-за этого возникает зависимость Алтая от соседних регионов, поэтому для решения данной проблемы был разработан проект строительства на Мунайском месторождении КЭС, который был принят распоряжением Правительства России № 1634-р от 01.08.2016 г. «О схеме территориального планирования в области энергетики». Назначение Алтайской конденсационной электрической станции (КЭС) – обеспечение энергетической безопасности Алтайского края и Республики Алтай. Реализация проекта строительства Мунайской КЭС не только позволяет закрыть потребности региона в электроэнергии с учетом всех работающих мощностей производства энергии, но станция при возможных возникающих катаклизмах может подстраховать энергосистему Сибири. Географическое местоположение объекта таково, что ее можно будет по оценкам экспертов, оперативно переключить на энергоснабжение Кемеровской, Омской и Томской областей, а также Красноярского края [1].

Но, как было уже сказано, Мунайский бурый уголь низкого качества, следственно возникает ряд экологических, экономических и технологических проблем. Для их решения существует множество

способов, но заострим свое внимание на водоугольном топливе. Водоугольное топливо (ВУТ) представляет собой дисперсную топливную систему, состоящую из тонкоизмельченного (100–300(500) мкм) угля, воды (любого качества, включая шахтные и воды промышленных стоков, а также меласную спиртовую барду) и реагента-пластификатора. Такое использование ВУТ имеет экологические, технологические и экономические преимущества:

Экологические:

- безопасно на всех стадиях производства, транспортирования и использования;
- позволяет в 1,5–3,5 раза снизить вредные выбросы в атмосферу (пыль, оксиды азота, бензопирена, двуокись серы) за счет более низкой температуры в зоне активного горения, не превышающей 1200 °С;
- позволяет эффективно использовать образующуюся при сжигании летучую мелкодисперсную золу в производстве строительных материалов.

Технологические:

- подобно жидкому топливу (при переводе теплогенерирующих установок на сжигание ВУТ не требует существенных изменений конструкции агрегатов);
- позволяет полностью механизировать и автоматизировать процессы приема, подачи и сжигания топлива;
- новая технология вихревого сжигания при температуре 950–1150 °С позволяет достичь эффективности использования топлива свыше 97 %;
- разработаны несколько систем зажигания водоугольного топлива: с применением плазмотрона, природного газа, жидкого и твердого топлив.

Экономические:

- технология не требует применения термических и химических процессов, и поэтому она не капиталоемкая и не энергоемкая;
- возможность использования углей любых марок (антрациты, каменные, бурые угли), что позволяет привлекать угли местных месторождений, тем самым уменьшить расходы на транспортировку;
- на 15–30 % снижаются эксплуатационные затраты при хранении, транспортировке и сжигании;
- благодаря простоте транспортировки ВУТ возможно сооружение централизованного комплекса для его приготовления и снабжение потребителей уже готовым топливом;

- окупаемость затрат при внедрении ВУТ составляет 1–2,5 года (в зависимости от мощности котельной и числа часов ее работы в год).

Такая технология была реализована в 80-е гг. прошлого века у нас в составе опытно-промышленного комплекса «Белово – Новосибирская ТЭЦ-5». Опыт, к сожалению, не был доведен до конца, но определенные результаты все-таки принес, подтвердив оптимистические надежды на водоугольное топливо и выявив его недостатки, а именно:

- громоздкая, затратная и сложная технология приготовления ВУТ с большим разбросом фракционного состава, нестабильными характеристиками пластичности и необходимостью ввода химических добавок;

- неудовлетворительные результаты сжигания ВУТ в камерной топке котла большой мощности из-за низкого ресурса работы сопел форсунок (40 часов), необходимости постоянной подсветки факела и наличия значительного недожога топлива (более 15 %).

Наши надежды на перспективность водоугольного топлива основываются на новой технологии приготовления этого топлива, а именно – кавитационной, характеризующейся высоким уровнем местного динамического компрессионного и температурного воздействия на обрабатываемый материал (до 2000 °С и 25000 атм) [2]. В результате твердый компонент смеси (уголь) измельчается до заданной степени дисперсности, а суспензия приобретает новые свойства, выгодно отличающие ее от получаемой традиционным способом, в том числе:

- стабильность на протяжении длительного времени (контрольные образцы выдерживаются около трех лет) и пластичность без каких-либо присадок при достигнутом содержании твердого до 70 %;

- полностью высушенное или частично обезвоженное топливо переходит при добавлении воды в состояние устойчивой суспензии без механического побуждения;

- топливо не увеличивает объема при замерзании, а после размораживания восстанавливает свои исходные свойства.

Данная технология требует больших финансовых вложений, но на данный момент это одна из самых перспективных технологий будущего, и для Алтайской КЭС это отличная перспектива, т. к уголь Мунайского месторождения уступает Кузбасскому.

## Список литературы

1. Водоугольное топливо – экологичное и эффективное [Электронный ресурс]. – <http://www.sib-science.info/ru/institutes/pomol-i-kavitatsiya-23122016/> – статья в интернете.
2. Проблемы внедрения водоугольного топлива в России [Электронный ресурс]. – <http://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=120&nomer=8> – статья в интернете.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОТХОДОВ В ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛАХ

**А.В. Шпехт, М.В. Тиханов, Е.Б. Жуков,  
К.В. Меняев, Е.Е. Паутова**

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический  
университет им. И.И. Ползунова»  
г. Барнаул

Ключевые слова: водогрейный котел, сельскохозяйственные отходы, лузга.

Аннотация: В наше время руководители многих предприятий ищут пути преодоления кризиса энергоснабжения. У многих предприятий, перерабатывающих сельскохозяйственную продукцию, имеется большое количество отходов. Использование лузги подсолнечника, отходов переработки зерна в качестве топлива позволяет снять остроту экономических вопросов многих промышленных предприятий.

Сейчас большая часть предприятий, перерабатывающих сельскохозяйственную продукцию, продают отходы производства, а для отопления производственных помещений используют традиционные топлива (газ или уголь). Целью исследования является выявление преимуществ и недостатков перехода на сжигание нетрадиционных топлив. В Алтайском крае большая часть предприятий отапливают свои помещения углем. Наиболее доступный уголь в Алтайском крае это Кузнецкий уголь. Средняя цена 1 тонны угля по краю составляет 2500 рублей. Основные характеристики угля «Кузнецкий Д, Р, СШ» представлены в таблице 1.

В данной работе были рассмотрены такие виды отходов, как: лузга овсяная, лузга подсолнечника и шелуха соевая. В топливной лаборатории были определены такие характеристики отходов, как: теплота сгорания, выход летучих, влажность и зольность.

Влажность  $W$  является одной из важнейших характеристик топлива, так как она препятствует воспламенению топлива, снижает тем-

пературу в топке, увеличивает потери тепла с уходящими газами. Существуют прямые и непрямые методы определения влаги в топливе. Был использован непрямой весовой метод, как наиболее простой и дающий точные результаты. Метод предусматривает высушивание топлива и косвенное определение массы влаги по изменению массы топлива. Зола удаляется из котла в виде шлака и летучей золы при помощи системы шлакоудаления и дымососов соответственно. В практике проектирования и эксплуатации котельных установок, работающих на твердом топливе, необходимы данные о количественном содержании золы. Для определения зольности топлива, пробу помещают в муфельную печь, затем, дождавшись полного озолоения, взвешивают зольный остаток. Для получения достоверных результатов, необходимы достаточное количество воздуха, для того чтобы все топливо прореагировало и определенная температура, чтобы не допустить глубоких превращений в минеральной части золы.

Выход летучих  $V$  – характеристика, дающая представление о реакционной способности топлива. При нагревании топлива разрушаются сложные химические связи, органическая часть разлагается на более простые твердые, жидкие и газообразные вещества. Газообразные и жидкие продукты разложения, образующиеся в парообразной фазе, называют летучими веществами. Выход летучих определяется в муфельной печи в закрытых емкостях, что препятствует попаданию кислорода и выгоранию коксового остатка. Для определения выхода летучих сравнивают массу первоначальной пробы и массу коксового остатка.

Таблица 1 – Характеристики угля «Кузнецкий Д, Р, СШ» [1]

Содержание влаги общей	Зольность	Содержание серы	Содержание углерода	Содержание водорода	Содержание азота	Содержание кислорода
$W_t^r$	$A^r$	$S_p^r + S_o^r$	$C^r$	$H^r$	$N^r$	$O^r$
11.5	15.9	0.8	56.4	4	1.9	9.9
Низшая теплота сгорания	Влага гигроскопическая	Приведенные значения		Выход летучих	Теплота сгорания	Коэффициент размо- лоспособности по ВТИ
$Q_{ib}^r$ МДж/кг	$W^{гн}, \%$	$W_{пв}^r$ %*кг/ Мдж	$A_{пв}^r$ %*кг/ Мдж	$V^{daf}, \%$	$Q_{бс}^{daf}$ %*кг/ Мдж	GrVTi
21,9	4,5	0,53	0,73	40,5	31,94	1,1

Именно эти характеристики определяют наиболее важные решения по организации топочного процесса, тепловую и конструктивную схемы котла, выбор оборудования систем шлакозолоудаления и золоулавливания.

Основные характеристики образцов, полученные в ходе лабораторных испытаний, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики сельскохозяйственных отходов

Наименование	Низшая теплота сгорания $Q_i^r$ , КДж/кг	Рабочая влажность $W^r$ , %	Выход летучих $V^{daf}$ , %	Зольность $A^r$ , %
Овсяная лузга	16400	9,5	64,9	4,5
Лузга подсолнечника	18800	10	55,5	2,9
Соевая лузга	17000	12	60,3	4,8

Чтобы оценить эффективность сжигания сельскохозяйственных отходов, был рассчитан водогрейный котел, работающий на угле, и тот же самый котел на сельскохозяйственных отходах. В качестве примера был использован водогрейный котел мощностью 2 МВт, имеющий следующие параметры:

- температура воды на входе 70°C;
- температура воды на выходе 115°C;
- рабочее давление 0,7 МПа.

В результате теплового расчета котла, работающего на угле, был получен расход топлива, равный 396 кг в час [2].

В данной работе было решено в качестве топлива выбрать лузгу подсолнечника, так как она имеет наивысшую теплоту сгорания, среди испытанных отходов. Расход топлива составил 512 кг в час [2].

Так как большинство предприятий в Алтайском крае, занимающихся переработкой сельскохозяйственной продукции, уже имеют свои котельные, работающие на угле, то можно выделить несколько путей перехода на сжигание отходов собственного производства. Первый путь, это полная замена котлоагрегатов. Такое решение подойдет в том случае, если оборудование устарело или в котельной установлены котлы малой мощности. В случае с котлами малой мощности, замена котлоагрегатов не повлечет за собой больших капитальных затрат. Второй путь, это замена топочного устройства. Такое решение

подойдет для котлов большой мощности, срок эксплуатации которых невелик.

В данной работе было решено заменить котлоагрегат полностью, так как его мощность невелика. Для оценки целесообразности замены, был рассчитан срок окупаемости котла. В Алтайском крае отопительный сезон составляет примерно 5000 часов в год. При средней стоимости угля 2500 рублей за тонну, и расходе угля 396 кг в час годовые затраты на топливо составляют около 5 млн. рублей. Стоимость котла мощностью 2 МВт и всего вспомогательного оборудования составляет ориентировочно 7 млн. рублей.

В заключении следует отметить, что в данном случае замена котельного агрегата целесообразна, так как срок окупаемости составит примерно 1,5 отопительного сезона. В каждом отдельном случае экономическую целесообразность нужно определять индивидуально.

### **Список литературы**

1. Фурсов, И. Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов : учеб. пособие / И. Д. Фурсов; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – 3-е изд. перераб. и доп. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 300 с.
2. Жуков, Е. Б. Водогрейные котлы : учеб. пособие / Е. Б. Жуков, К. В. Меняев; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2016. – 140 с.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЛА БКЗ–320–140 ОТ ИЗБЫТКА ВОЗДУХА**

**Е.А. Щедров, Н.В. Визгавлюст**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Томский  
политехнический университет»  
г. Томск

Ключевые слова: вредные выбросы, оксиды азота, численное исследование, топочная камера

Аннотация: Выполнено численное исследование образования оксидов азота в топке котла БКЗ-320-140ПТ при сжигании полифракционного твердого топлива. Приведены результаты сравнительного анализа численного моделирования и экспериментальных данных генерации  $\text{NO}_x$  при изменении коэффициента избытка воздуха.

Одной из наиболее актуальных проблем современности является защита атмосферного воздуха, необходимость которой инициирована несовершенной хозяйственной деятельностью человека. Наибольшую опасность создают искусственные антропогенные источники загрязнения воздуха [1]. Поэтому прогнозирование образования вредных веществ при сжигании натурального топлива в котлоагрегатах тепловых электростанций остается одной из актуальных задач для энергетики. Получение сведений при испытаниях, необходимых для оценки конструктивных изменений и оптимизации инженерных решений путем промышленных испытаний или физического моделирования процессов, имеет существенное ограничение из-за большой трудоемкости и высокой стоимости. В такой ситуации одним из выходов является применение методов математического моделирования.

В представляемом исследовании описывается численное моделирование образования оксидов азота при горении пылевидного топлива в топке промышленных котлоагрегатов на базе разработанной Митчеллом и Тэрболом [2] кинетической модели образования NO при сжигании угольной пыли. Эта модель удобна в использовании, т.к. ее кинетическая схема включает только 13 реакций (сюда входят реакции догорания коксового остатка и выхода и горения летучих) и соответствует современному представлению о химических процессах, ведущих к образованию оксидов азота при сжигании твердого топлива.

Численные исследования на основе предложенной модели проведены в камерной топке котла БКЗ-320-140ПТ с последующей верификацией полученных результатов по экспериментальным данным [3].

Расчеты концентрации оксидов азота, температуры выполнялись с использованием аэротермодинамических и температурных полей, полученных с помощью пакета прикладных программ FIRE3D [4], в зависимости от избытка воздуха при нагрузке 300 т/час.

Из рисунка 1, видно, что разработанная численная модель имеет достаточно высокую адекватность предсказания генерации оксидов азота, поскольку средняя погрешность между численными результатами и экспериментальными данными составляет 2 %. И в дальнейшем может рассматриваться как постпроцессор к пакету Fire3D [4] и вместе с ним использоваться для вариантной проработки конструктивных решений при проектировании и модернизации котельных агрегатов.

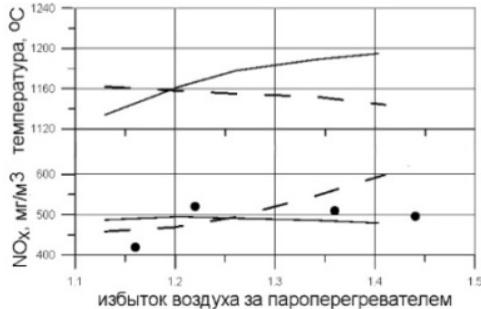


Рисунок 1 – Изменение температуры на выходе из топки и концентрации оксидов азота в зависимости от избытка воздуха:

- – измерения [3], — — — — расчет с помощью ППП FIRE 3D-NO<sub>x</sub>,
- — — — расчет по нормативному методу

### Список литературы

1. Котлер, В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов / В. Р. Котлер. – М. : Энергоатомиздат, 1987 – 144 с., ил.
2. Mitchell, J. W. A kinetic model of nitric oxide formation during coal combustion / J. W. Mitchell, J. M. Tarbell // American Institute of Chemical Engineers Journal. – 1982. – V. 28. – № 2. – P. 302–310.
3. Будилов, О. И. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции / О. И. Будилов, А. С. Заворин. – Томск. : Изд-во «Красное знамя», 1994. – 100 с.
4. Заворин, А. С. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов / А. С. Заворин, С. В. Красильников, А. В. Старченко // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях : Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск : СибВТИ, 2000. – с. 369–371.

Научное издание

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ КОТЛОСТРОЕНИЯ**

**Материалы I международной научно-практической конференции  
студентов и аспирантов**

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 11.08.2017. Формат 60×84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 8,37.

Тираж 50 экз. Заказ 2017 –.

Издательство Алтайского государственного  
технического университета им. И.И. Ползунова,  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Отпечатано в типографии АлтГТУ,  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46  
тел.: (8-3852) 29-09-48