



«АЛТАЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. И.И. ПОЛЗУНОВА» (АЛТГТУ)



II МЕЖДУНАРОДНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ
СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ
И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

**СОВРЕМЕННЫЕ
ТЕНДЕНЦИИ
КОТЛОСТРОЕНИЯ**

г. БАРНАУЛ
2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
Сибирская генерирующая компания (СГК)
АО «Барнаульская ТЭЦ-3»
ОАО «Барнаульская генерация»
ООО «ПроЭнергоМаш-Проект»
ООО «БарнаулЭнергоМаш»
БФ ОАО ТКЗ «Красный котельщик»
ООО «СибЭнергоМаш-БКЗ»



Современные
Тенденции
Котлостроения

**Материалы II международной научно-практической конференции
студентов и молодых ученых**

22 марта 2018 г.

Изд-во АлтГТУ
Барнаул • 2018

УДК 621.18
ББК 31.361

С 568

Современные тенденции котлостроения : материалы II международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2018. – 209 с.

ISBN 978-5-7568-1268-8

Представлены материалы II международной научно-практической конференции студентов и аспирантов «Современные тенденции котлостроения» (22 марта 2018 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:

Е. Б. Жуков,
И. Д. Фурсов,
К. В. Меняев,
Г. Н. Лихачева.

ISBN 978-5-7568-1268-8

© Авторы публикаций, 2018
© Алтайский государственный технический университет
им. И. И. Ползунова, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Жуков Е.Б. Вторая международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых	6
Алияров Б.К., Мергалимова А.К., Жалмагамбетова У.К. О преимуществах способа безмазутной растопки котлоагрегатов	8
Анисимов А.Э., Максимчук С.С., Поломошнов В.В., Таймасов Д.Р., Жуков Е.Б., Меняев К.В. Опыт сжигания кородревесных отходов в виде пеллет	11
Астафьев А.В., Табакаев Р.Б. Изучение характеристик биомассы Томской области применительно к энергетическому использованию	14
Бородин Р.Г., Меняев К.В. Перспектива использования угля Мунайского месторождения на ТЭС Алтайского края	19
Бородин Р.Г., Супрун Н.Ю., Тиханов М.В., Устинов В.А., Шпехт А.В., Меняев К.В. Сравнение расчетных модулей САД систем	25
Вислогузов Р.А., Хаустова О.В., Долгов С.В. Тестирование различных пористых материалов применительно к теплогенераторам беспламенного горения	33
Вислогузов Р.А., Хаустов С.А., Табакаев Р.Б. Эффективная температуропроводность криптола в пористом слое теплогенератора беспламенного горения	38
Воронцов А.А., Бронников Р.Е., Мануйлов Д.А., Любецкий Н.Г. Утилизация вторичных энергетических ресурсов металлургического производства в энергетике	43
Дауткина Е.В., Рьльский Д., Меняев К.В. Повышение экологических показателей Барнаульской ТЭЦ-3	47
Драчук П.С., Спивак Д.А., Визгавлюст Н.В. Численное исследование генерации оксидов азота при факельном сжигании в топке котла БКЗ-320-140	52
Кокшарев О.М., Заворин А.С., Гиль А.В. Подходы к компьютерному моделированию процессов теплопередачи и аэродинамики в котлах с циркулирующим кипящим слоем	58
Копань А.В., Серант Ф.А., Цепенко А.И., Глушаков А.М. Результаты реконструкции схемы сжигания котла П-59 энергоблока 330 МВт	65

Корябкин А.И., Лейкам А.Э., Шестаков Н.С., Григорьев К.А. Численное моделирование комбинированной плоскофакельной горелки: постановка задачи	76
Мальцев К.И., Гиль А.В. Анализ возможностей перевода БКЗ-220-100Ф на непроектное топливо	84
Мацаков А.Н., Волчков А.В., Жуков Е.Б. Исследование процессов горения древесного топлива в топочной камере котла	92
Меняев К.В., Жуков Е.Б., Лебедев А.С., Таймасов Д.Р., Гаврин Н.С. Использование отходов деревообрабатывающей и сельскохозяйственной промышленности в теплоэнергетике	94
Платов И.В., Голубев С.С., Голубев В.А. Утилизация древесных отходов в паровых котлах малой мощности	107
Пузырев М.Е., Голубев В.А., Лихачева Г.Н. Перевод парового котла на сжигание лузги подсолнечника	111
Разин В.А., Белоруцкий И.Ю., Буров В.Ф., Линдт В.В. Внедрение систем безмазутного розжига (СБР) и подсветки на котлах ПАО «Иркутскэнерго»	115
Роговой А.С., Попов И.А., Жуков Е.Б. Блочно-модульные котельные на газообразном топливе	132
Сарсембенов Е.К., Саковский А.А., Пономаренко К.И., Шарков Н.В., Меняев К.В. Установка для экспериментальных исследований топочных процессов на кафедре «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова	135
Сарсембенов Е.К., Меняев К.В., Паутова Е.Е., Жуков Е.Б. Экспериментальное исследование реологических характеристик топочных устройств с кипящим слоем	138
Скворцов М.С., Коробова К.Ф., Хуторненко С.Н., Гладких А.А., Жуков Е.Б., Меняев К.В. Огневая утилизация нетрадиционных видов топлива	149
Смыкалов Д.С., Голубев В.А. Элиминация эрозионного износа конвективных поверхностей водогрейного котла с применением численного моделирования на примере котла КВ-10 (поселок Морон, Монголия)	156
Титов Д.А., Григорьев К.А. Компьютерное моделирование сепараторов пыли	162
Тиханов М.В., Меняев К.В., Жуков Е.Б. Параметрическое моделирование в котлостроении	170

Тихонов Е.В., Меняев К.В. Процесс образования диоксинов при сжигании твердых бытовых отходов, пути снижения выбросов диоксинов	180
Устинов В.А., Меняев К.В. Угольная энергетика в современном мире	183
Филатова Е.Е., Малыгина А.С., Складов Ф.Н., Юрченко Е.В., Таймасов Д.Р. Возможность использования листьев в качестве топлива для котлов	187
Шевцов А.П., Таймасов Д.Р., Меняев К.В. Методика расчета реверсивной топки	191
Шпехт А.В., Тиханов М.В., Бородин Р.Г., Устинов В.А., Филимонов П., Супрун Н.Ю., Меняев К.В. Балансовые испытания водогрейной котельной установки	197
Жуков Е.Б., Меняев К.В., Фурсов И.Д., Гладких А.А. Кафедра котло- и реакторостроения АлтГТУ им. И. И. Ползунова	201
Лузанов И.В., Жуков Е.Б., Меняев К.В. Сибирская генерирующая компания	205

ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ КОТЛОСТРОЕНИЯ»

Е. Б. Жуков

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

Уважаемые коллеги, дорогие друзья! Вторая международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные тенденции котлостроения» проходит 22 марта 2018 года в столице Алтайского края – городе Барнауле. Конференция базируется на кафедре «Котло- и реакторостроение» при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова.

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:

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 АО «Барнаульская ТЭЦ-3»; Лукьянов А.С. директор ОАО «Барнаульская генерация»; 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; Меняев К.В. – доцент кафедры «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

Технический секретарь: Таймасов Д.Р. – ассистент кафедры «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ им. И.И. Ползунова.

На конференцию «Современные тенденции котлостроения» представлен 31 доклад от представителей различных организаций из городов Российской Федерации (г. Барнаул, г. Новосибирск, г. Томск, г. Белгород), Казахстана (г. Алматы) и Белоруссии (г. Минск):

- Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова;
- Национальный исследовательский Томский политехнический университет;
- ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»;
- ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), Санкт-Петербург;
- ООО «ЗиО-КОТЭС»;
- Алматинский университет энергетики и связи;
- ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ»;
- БФ ОАО ТКЗ «Красный котельщик»;
- ООО «СибЭнергоМаш-БКЗ»;
- Белорусский котельный завод ООО «Летерм»;
- ООО «ПроЭнергоМаш-Проект».

Благодарим всех принявших участие в конференции, желаем творческих успехов и плодотворных идей. До встречи на конференции «Современные тенденции котлостроения – 2019»!

О ПРЕИМУЩЕСТВАХ СПОСОБА БЕЗМАЗУТНОЙ РАСТОПКИ КОТЛОАГРЕГАТОВ

Б. К. Алияров, А. К. Мергалимова, У. К. Жалмагамбетова

Алматинский университет энергетики и связи

г. Алматы, Республика Казахстан

Ключевые слова: уголь, котельный агрегат, топка, топливо, мазут, горючие летучие вещества.

Аннотация: Необходимость развития угольных технологий сегодня уже ни у кого не вызывает сомнений. Одним из эффективных, экологически и экономически более приемлемых способов безмазутной растопки котлоагрегатов и стабилизации горения факела является предлагаемая нами технология использования горючих летучих веществ, получаемых из угля.

Уголь с давних времен и по сей день играет огромную роль в развитии техники, энергетики и металлургической промышленности. Широко используется для получения тепла в бытовом секторе. Угольные месторождения имеются более чем в 80 странах. При этом 7 стран – США, Россия, Китай, Австралия, Индия, Германия и ЮАР обладают 82 % мировых доказанных запасов угля, а в трех странах – США, России и Китае сосредоточено более половины мировых запасов. Австралия, США и Канада имеют большие запасы высококачественных углей, которые могут быть использованы для получения энергии. Среди стран СНГ Казахстан занимает третье место по запасам и добыче угля и первое место – по добыче угля на душу населения. Наибольший объем добычи угля в республике приходится на Центральный (Караганда) и Северо-Восточные (Павлодар) регионы – 96,2 %. Экспорт угля Казахстана в 2003 году составил 25,7 млн. т. на сумму 168,9 млн. долл. США. Это 1,8 % общего объема экспорта республики.

Как известно, уголь значительно уступает природному газу и нефти по затратным и экологическим показателям его использования. Однако, по оценкам Международного энергетического агентства, при существующих темпах потребления разведанные запасы нефти будут исчерпаны уже через 30 лет, а газа – в ближайшие 50, в то время как запасов угля при самом интенсивном использовании хватит на 200 лет. Перспективы развития мировой энергетики значительно зависят от ее ресурсной обеспеченности. В данном отношении угольная промышленность находится в гораздо лучшем положении, чем нефтяная и газовая промышленность, а следовательно, в долгосрочной перспективе является более перспективной отраслью ТЭК.

Для сегодняшнего Казахстана главным топливным ресурсом является уголь. Угольная промышленность Казахстана является одной из наиболее крупных отраслей экономики страны. По данным Мирового угольного института на долю угля приходится около 90 % энергетического потенциала всех пригодных для разработки полезных ископаемых органического происхождения. По запасам углей Казахстан уступает лишь Китаю, США, России, Австралии, Индии, ЮАР и Украине. Государственным балансом учтены запасы по 49 месторождениям, составляющие 33,6 млрд тонн. В том числе каменные угли – 21,5 млрд тонн, бурые угли – 12,1 млрд тонн. Большая часть месторождений угля сосредоточена в Центральном (Карагандинский и Экибастузский угольные бассейны), а также месторождение Шубарколь и Северном Казахстане (Тургайский угольный бассейн), в Южном Казахстане – Ленгерские и Нижне-Илийские угли.

Нужно отметить, что потребность в энергетическом угле с каждым годом будет возрастать не только в Казахстане но и в мире в целом, по некоторым данным в ряде развивающихся стран потребность в угле ежегодно будет возрастать на 6 %. Рост потребления энергетического угля обусловлен потребностью в нем многочисленных тепловых электростанций, которые вырабатывают все больше электрической и тепловой энергии. Следовательно добыча угля и разработка новых угольных месторождений не сократиться, а будет интенсивно увеличиваться. Угледобывающие компании будут стремиться повышать качество и конкурентоспособность своей продукции. В настоящее время Казахстан входит в десятку крупнейших производителей угля на мировом рынке, так же как и в десятку крупнейших экспортеров. Республика дает около 3 % общемирового экспорта угля.

Необходимость развития угольных технологий сегодня уже ни у кого не вызывает сомнений. Остальных топливных ресурсов хватит на значительно меньший срок, а их стоимость гораздо выше.

В настоящее время на пылеугольных станциях и котельных в качестве растопочного топлива, а также для стабилизации горения факела используют мазут. Мазут, как топливо, обладает рядом несомненных качеств, но также имеет и ряд существенных недостатков. В первую очередь это эксплуатационные трудности, связанные с высокой температурой застывания мазута, затем его высокая стоимость. Дымовые газы, образующиеся при сжигании мазута, содержат оксиды азота, соединения ванадия и натрия, газообразные и твердые продукты неполного сгорания. В процессе эксплуатации мазутного хозяйства образуются сточные воды, загрязненные мазутом.

Одним из эффективных, экологически и экономически более приемлемых способов безмазутной растопки котлоагрегатов и стабилизации горения факела является предлагаемая нами технология использования горю-

чих летучих веществ, получаемых из угля. По сути станция становится однотопливной. Выделение горючих летучих осуществляется в топочном устройстве, в котором без доступа кислорода производится прогревание слоя угля. В качестве носителя начальной тепловой энергии, необходимой для подогрева угля могут применяться: пар, при наличии работающего котла; электричество или другой носитель тепловой энергии. Выделившиеся после нагрева горючие летучие вещества (СО, Н₂, СН₄ и другие) в случае растопки напрямую подаются в горелочные устройства в топке котла, после растопки могут накапливаться в специальном газовом хранилище-рессивере, при определенном давлении, и в дальнейшем использоваться для поддержания горения факела. Данный процесс получения летучих горючих из угля на начальной стадии схож с процессом газификации угля, но им не является, так как нагрев осуществляется без доступа кислорода, только до температур, необходимых для выхода достаточного объема горючих летучих веществ. Температура эта зависит от вида угля, его технических характеристик. В результате экспериментальных исследований, из углей Казахстанских месторождений наиболее подходящими для получения летучих горючих являются угли месторождений Каражыра, Шубаркуль и Майкубе.

Предлагаемый способ безмазутной растопки котлоагрегатов горючими летучими веществами позволяет исключить использование мазута или природного газа для растопки котла и поддержания устойчивого воспламенения пылевидного факела, при работе котла с пониженными нагрузками. Это дает значительное снижение финансовых затрат, связанных с дорогой мазута. Также снижаются расходы энергии на собственные нужды станции, и один из очень значимых результатов – это снижение выбросов оксидов серы и азота, пятиоксида ванадия, выделяемых при сжигании мазута. Повышается экономичность и эффективность растопки котлоагрегатов. Эта технология получения летучих горючих может быть использована не только на ТЭС, но и на небольших котельных, предназначенных для снабжения тепловой энергией небольших населенных пунктов. В данном случае есть возможность снабжать этот населенный пункт сразу тремя видами энергии: электрической, тепловой и газовым топливом для бытовых нужд.

Список литературы

1. Чистые угольные технологии: теория и практика [Электронный ресурс] : монография / Б. Т. Ермагамбет [и др.]. – Электрон. текстовые дан (12,7 Мб). – Караганда : Tengri Ltd, 2013. – 276 с.
2. Патент на полезную модель РК № 2450, 2017. Способ безмазутной растопки котлоагрегатов // Патент на полезную модель РК № 2450 гос. реестр полезных моделей / Алияров Б.К., Мергалимова А.К.

3. Лялин К.В. Тенденции развития резервуаростроения [Текст] / К.В. Лялин // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2000. – № 12. – с. 10 – 13

4. Дубовский В.А. Энергосберегающие системы растопки и подсветки факела топочных камер котлов [Текст] : Монография / В. А. Дубовский, М. В. Зубова ; Сиб. федерал. ун-т. – Москва.: Теплотехник, 2013. – 186 с.

ОПЫТ СЖИГАНИЯ КОРОДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ВИДЕ ПЕЛЛЕТ

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

Ключевые слова: нетрадиционное топливо, древесные отходы, пеллеты.

Аннотация: Рассмотрен опыт использования древесных и сельскохозяйственных отходов в качестве топлива, сложности утилизации таких отходов. Рассматривается перспектива сжигания экологически чистого биотоплива (пеллет). Проводится анализ сжигания древесных пеллет.

Для минимизации затрат на топливную составляющую все большее количество предприятий жилищно-коммунального сектора пытаются внедрять в топливный баланс своих котельных различные отходы и иные низкосортные виды топлив. Так же с целью снижения выбросов парниковых газов, отмечается рост количества переводов коммунальной энергетики с традиционных (ископаемых) видов топлива на альтернативное возобновляемое [1].

На сегодняшний день на предприятиях деревообрабатывающей и лесозаготовительной промышленности образуется большое количество кородревесных отходов, которые уже непригодны для вторичной переработки и сваливаются в отвалы. Использование таких отходов в качестве энергетического топлива, в исходном виде или в виде пеллет, имеет ряд преимуществ: данный ресурс является возобновляемым; минимальные затраты на его доставку от поставщика; исчезает необходимость утилизации отходов в отвалах. Однако в исходных древесных отходах содержание влаги может достигать 60 %, что характеризует данный вид топлива как низкосортное, поэтому сжигание его в обычных топочных устройствах неэффек-

тивно и необходимо применение специальных методов сжигания и соответствующих топочных устройств. Возможна предварительная подготовка данного топлива – повышение его удельной теплоты сгорания, или изготовление так называемых – древесных пеллет [1].

Пеллеты – это топливные гранулы цилиндрической формы (рисунок 1), длиной 10–30 мм и диаметром 6–10 мм. Пеллеты изготавливаются из спрессованных отходов деревообрабатывающего производства. Прессовке подлежат, в основном, отходы хвойных пород деревьев, так как они легче поддаются переработке, чем твердые породы. Прессовка исходной стружки и опилок в пеллеты осуществляется под высоким давлением (около 300 атм.), при этом не используется химических составов и клея, благодаря чему, пеллеты являются одним из самых экологически чистых видов топлива (таблица 1).

Таблица 1 – Ключевые характеристики пеллет

Параметр	Показатель
Энергетическая ценность	не менее 4,7–4,9 кВт/кг
Плотность	1,1–1,3 кг/дм ³
Влажность	не более 10 %
Зольность	0,5 %
Насыпная плотность	порядка 650 кг/м ³
Теплопроводность	4,2–4,5 кВт/кг



Рисунок 1 – Кордревесные пеллеты

Котлы, предназначенные для сжигания пеллет, считаются наиболее эффективными для работы на древесных гранулах, чем угольные котлы. Среди их неоспоримых преимуществ [2]:

- Высокая автоматизация. Топливо из бункера подается автоматически, благодаря этому, котел может работать длительный срок без вмешательства машиниста.

- Долговечность. Эксплуатационный срок котлов на пеллетах превышает 20 лет.

- Диапазон показателей мощности. Использование пеллет позволяет проектировать котлы для различных тепловых нагрузок от 20 кВт до 0,5 МВт.

- Высокий КПД. КПД котлов достигает 85–95 %.

- Безопасность. Пеллетные котлы характеризуются высокой степенью пожаро- и взрывобезопасности.

Экономическая целесообразность использования пеллет. Резкий скачок объемов коттеджного строительства привел к значительному повышению спроса на эффективные отопительные системы.

Произведенные расчеты показали – себестоимость 1 ккал тепловой энергии при сжигании древесных гранул:

- в 2,5 раза ниже, чем при использовании электроэнергии;
- в 2 раза ниже, чем при использовании дизельного топлива;
- в 1,5 раза ниже, чем при использовании сжиженного газа.

Эффективность применения пеллет, в том числе обеспечивается их умеренной стоимостью и невысокими расходами на обслуживание. Полные затраты на пеллетное отопление значительно меньше, чем при сжигании топлива других видов.

На данный момент одним из наиболее популярных видов топлива является природный газ. В сравнении с газом, пеллеты имеют ряд преимуществ – возможность запаса, что в случае с газом невозможно или взрывоопасно, а также значительного капиталовложения при подключении к газовой магистрали. Стоимость газа динамично увеличивается. Исходя из этого применение топливных гранул становится наиболее целесообразным.

Данное топливо подходит для реализации различных способов сжигания. Возможно применение традиционного слоевого, а также в котлах с кипящим слоем. В случае использования котлов с кипящим слоем за счет монофракционного состава пеллет решается основная проблема данного способа сжигания – механический недожог.

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.

2. Жуков Е.Б. Использование сельскохозяйственных и древесных отходов в энергетике / Е.Б. Жуков, К.В. Меняев, Н.С. Маришин // Сборник научных трудов VII международной научной конференции молодых ученых. Новосибирский государственный технический университет; Межвузовский центр содействия научной и инновационной деятельности студентов и молодых ученых Новосибирской области. Новосибирск, 2015. – с. 325 – 329

3. Жуков Е.Б. Технология совместного сжигания бурого угля и кородревесных отходов в энергетических котлах / Е.Б. Жуков, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова, Е.М. Пузырев // В сборнике: Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла. Материалы III Международной научно-технической конференции. ОАО "Всероссийский дважды Ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ"), 2016. – с. 114 – 120.

ИЗУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК БИОМАССЫ ТОМСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ

А. В. Астафьев, Р. Б. Табакаев

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

Ключевые слова: энергетика, биомасса, теплотехнические характеристики, сжигание.

Аннотация: Актуальность работы обусловлена необходимостью вовлечения биомассы в топливно-энергетический баланс мировой энергетики. Целью работы является изучение теплотехнических характеристик биомассы Томской области применительно к её последующему энергетическому использованию. В работе использованы аттестованные методики ГОСТ, элементный анализатор VarioMicroCube (Германия) и бомбовый калориметр АБК-1 (Россия). Установлено, что низшая теплота сгорания биомассы, высушенной до воздушно-сухого состояния, составляет 7.6–18.1 МДж/кг, однако в естественном виде из-за высокой влажности её теплотворная способность будет иметь довольно низкое значение. Торф имеет высокое значение зольного остатка, проявляющего к тому же склонность к шлакованию при сжигании. Высокий выход летучих веществ показывает возможность термического облагораживания биомассы в энергетически ценные топлива.

Введение. Изменение климата является самой большой угрозой для человечества в XXI веке: последствия изменения климата отразятся на здоровье людей в ближайшие десятилетия, повысив риск заболевания и, тем самым, снижая благосостояние населения [1]. По данным Всемирной организации здравоохранения [2], ежегодно число смертей, связанных с загрязнением воздуха, превышает 6,5 млн человек. Одним из основных источников загрязнения остается энергетическая отрасль. В связи с этим современные тенденции в мировой энергетике направлены на вовлечение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в топливно-энергетический баланс, использование которых сопровождается минимальным воздействием на окружающую среду [3].

ВИЭ включает в себя широкий спектр энергетических ресурсов, таких как энергия солнца, воды, ветра, земли и растений. Использование каждого из перечисленных ресурсов имеет как свои преимущества, так и ограничивающие факторы, которые, как правило, и определяют возможность использования того или иного ресурса в конкретной местности [3, 4]. Например, ветряные электростанции имеют наименьшую нормированную себестоимость выработки энергии [3], однако низкая скорость ветра и наличие преград (леса, горы и т. п.) препятствуют строительству подобных электростанций на территории Сибири.

Одним из наиболее универсальных видов ВИЭ, присутствующим практически повсеместно, является биомасса. Особенно актуальной задачей является вовлечение в энергетику той части биомассы, к которой относятся твердые органические отходы (отруби, скорлупа орехов, солома, древесные остатки, бытовой органический мусор и т. п.). Эти отходы сами по себе являются загрязнителем окружающей среды и потенциальным очагом возникновения пожаров [5]. Этот факт не просто говорит о возможности их использования в качестве топлива для энергетики, а свидетельствует о необходимости принятия мер по их утилизации. Однако, для оценки возможности энергетического использования биомассы и разработки сжигающего её энергетического оборудования необходимо знать её теплотехнические характеристики, изучение которых и является целью данной работы.

Объект и методы исследования. В работе рассмотрено несколько видов биомассы, наиболее распространенных на территории Томской области и характерных для России в целом: солома, щепа из различных пород древесины (береза, сосна, осина), сосновые опилки, пшеничные отруби, скорлупа кедровых орехов, торф из окрестностей города Томска, а также с месторождений Суховское (с. Бакчар) и Аркадьевское (с. Кожевниково). Перечисленные пробы выдержаны при комнатной температуре до воздушно-сухого состояния. Теплотехнические характеристики исследуемых проб устанавливались согласно ГОСТ Р 52911-2013, 55661-2013, 55660-2013,

теплота сгорания (Q_i^r) определялась на калориметре АБК-1 (Россия), элементный состав – на анализаторе Vario Micro Cube (Elementar, Германия). Результаты определения приведены с учетом содержащегося в топливе диоксида углерода карбонатов, установленного ускоренным объемным методом согласно ГОСТ 13455-91.

Химический состав зольного остатка определен согласно ГОСТ 10538-87.

Результаты и их обсуждение. Теплотехнические характеристики исследуемых проб биомассы приведены в табл. 1. Можно отдельно выделить пробы торфа, зольность которых существенно отличается от значений остальных видов биомассы (выше в 4,3–25,4 раза). Столь высокое значение зольности предопределяет низкое значение теплоты сгорания торфа в пересчете на рабочее состояние (Q_i^r менее 12 МДж/кг) даже в воздушно-сухом состоянии (при влажности 9,9 %). Низшая теплота сгорания остальных видов биомассы (Q_i^r), также достигших воздушно-сухого состояния, составляет 17,1–18,1 МДж/кг. Однако в естественном состоянии из-за высокой влажности, составляющей в пересчете на рабочее состояние порядка 30–94 % [6–8], теплотворная способность биомассы имеет значительно меньшее значение.

Таблица 1 – Теплотехнические характеристики биомассы Томской области, полученной в результате сельскохозяйственной деятельности и лесопереработки

Теплотехническая характеристика	солома	отруби	скорлупа	щепы	опилки
Влажность W^a , %	7,0	11,5	13,0	7,8	7,0
Зольность на сухую массу A^d , %	2,8	5,9	1,0	1,9	1,6
Выход летучих веществ V^{daf} , %	78,5	81,0	69,7	81,5	83,4
Теплота сгорания на сухую беззольную массу Q^{daf} , МДж/кг	19,6	19,9	21,0	18,9	19,8
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	17,7	16,6	18,1	17,1	18,1

Отношение кислых ($\Sigma K = SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2$) и основных ($\Sigma O = CaO + MgO + K_2O + Na_2O$) компонентов зольного остатка (табл. 3), определяемое согласно [9], показывает его принадлежность к основному виду. Основной характер золы в совокупности с высоким содержанием оксидов кальция ($CaO > 30\%$) указывают на склонность к образованию плотных золовых отложений на поверхностях нагрева в про-

цессе сжигания. Одновременно с этим большое количество оксидов кремния (SiO_2) накладывает ограничение на выбор скорости дымовых газов при проектировании топливосжигающего оборудования из-за возможного эрозионного износа поверхностей нагрева.

Таблица 2 – Теплотехнические характеристики торфа Томской области

Теплотехническая характеристика	томский торф	суховской торф	аркадьевский торф
Влажность W^a , %	7,1	9,9	9,9
Зольность на сухую массу A^d , %	32,6	22,8	25,4
Выход летучих веществ V^{daf} , %	62,9	74,8	70,7
Теплота сгорания на сухую беззольную массу Q^{daf} , МДж/кг	18,5	20,1	20,1
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	7,6	11,8	11,4

Таблица 3. Состав зольного остатка, полученного при озолении топлив

Торф	Состав золы, %						
	SiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$	FeO	SO_3	CaO	MgO	прочее
томский	22,2	0,3	4,4	3,7	48,4	4,2	16,8
суховской	4,1	7,7	12,1	1,3	32,4	1,2	41,2
аркадьевский	21,4	7,2	7,3	1,6	30,3	2,4	29,8

Низкое содержание золы в остальных пробах биомассы, не превышающее 6 %, приводит к выводу об отсутствии необходимости в изучении состава её минеральной части в свете задач настоящего исследования.

Выход летучих веществ из биомассы (V^{daf}) имеет высокое значение, равное 69,7–83,4 %, что говорит о высокой реакционной способности рассматриваемых топлив при сжигании, термической нестабильности их органической массы. Нелетучий остаток, полученный после определения выхода летучих, у соломы и отрубей имеет слипшийся характер, остаток остальных проб – порошкообразного типа.

Заключение. Отмечено, что рассматриваемые пробы торфа имеют высокое значение зольного остатка ($A^d = 22,8\text{--}32,6$ %), проявляющего склонность к шлакованию поверхностей нагрева при сжигании. В целом, низшая теплота сгорания биомассы, высушенной до воздушно-сухого состояния, составляет 7,6–18,1 МДж/кг, однако в естественном виде из-за высокой влажности ($W_i^r = 30\text{--}94$ % [3]) её теплотворная способность будет иметь довольно низкое значение.

Результаты измерения теплотехнических характеристик подтверждают выводы о нецелесообразности её использования в качестве топлива в естественном виде из-за возможных высоких эксплуатационных затрат, возникающих при сжигании высоковлажных и высокозольных топлив.

Высокий выход летучих веществ ($V^{daf} = 62,9\text{--}83,4\%$) показывает возможность термического облагораживания биомассы в энергетически ценные топлива.

Исследование выполнено при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации.

Список литературы

1. Costello A., Abbas M., Allen A., Ball S., Bell S., Bellamy R., Friel S., Groce N., Johnson A., Kett M., Lee M., Levy C., Maslin M., McCoy D., McGuire B., Montgomery H., Napier D., Pagel C., Patel J., de Oliveira J.A.P., Redclift N., Rees H., Rogger D., Scott J., Stephenson J., Twigg J., Wolff J., Patterson C.. Managing the health effects of climate change. Lancet and University College London Institute for Global Health Commission // The Lancet. – 2009. – V. 373. – № 9676. – p. 1693–1733.
2. World Energy Outlook Special Report. Energy and Air Pollution (International Energy Agency, Paris, 2016).
3. Безруких П.П. Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты / П.П. Безруких, С.М. Карабанов // Энергия: экономика, техника, экология. – 2016. – № 6. – с. 11–24.
4. Фортов В.Е. Состояние развития возобновляемых источников энергии в мире и в России / В.Е. Фортов, О.С. Попель // Теплоэнергетика. – 2014. – № 6. – с. 4–13.
5. Аншелес В.Р. Некоторые вопросы переработки древесных отходов как источника вторичных энергоресурсов на Северо-Западе РФ / В.Р. Аншелес, Н.Н. Яшалова // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2013. – Т. 3. – № 4. – с. 5–8.
6. Цивенкова Н.М. Проблемы заготовки древесной щепы для энергетических целей / Н.М. Цивенкова, А.А. Смалыгин // Леспроектинформ. – 2005. – № 9. – с. 64–69.
7. Табакаев Р.Б. Низкосортное топливо Томской области: перспективы энергетического использования / Р.Б. Табакаев, С.А. Хаустов, Г.А. Черкашина, А.В. Казаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – с. 106 – 113.
8. Колотушкин В.И. Справочная книжка торфяника [Текст]/ Под ред. В.Н. Колесина. – М.: Недра, 1973. – 208 с.
9. Алехнович А.Н. Температурные условия начала шлакования при сжигании углей с кислым составом золы / А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 34–38.

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УГЛЯ МУНАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ТЭС АЛТАЙСКОГО КРАЯ

Р. Г. Бородин, К. В. Меньяев

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

г. Барнаул

Энергосистема Алтайского края длительное время является дефицитной, так как производимой в крае электроэнергии не достаточно, чтобы полностью обеспечить потребности населения. Разница, в объеме до 5 млрд. кВт/ч., что составляет порядка 50 % от общего потребления, покрывается закупкой электроэнергии, выработанной в соседних регионах. Проектным видом топлива на электростанциях края, производящих как электрическую, так и тепловую энергию, является уголь. На Барнаульских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 газ используется только как в пиковые нагрузки и резервное топливо, но даже от этой схемы отказываются.

Целью работы является анализ свойств бурого угля Мунайского месторождения с Кузнецким и его дальнейшее сжигание на станциях края.

Недостаточность внимания к целенаправленным поискам угля на территории края оправдана близостью Кузнецкого угольного бассейна. Единственным месторождением, где возможна добыча угля, к тому же открытым способом, является Мунайское буроугольное месторождение, представленное двумя пластами, залегающими на глубине до 60 метров. Возможные запасы составляют порядка 400 млн. тонн. Введение данного угля на баланс городских мощностей поспособствовало бы повышению надежности топливоснабжения, сдерживанию роста цен на привозной уголь, повышению налоговых поступлений от зарегистрированных в крае предприятий угледобывающего сектора, увеличению числа занятых в районе. С появлением собственного угля возможно снижение потребления газа. Его хоть и легко сжигать, но это довольно дорогой вид топлива, запасы которого не столь существенны. К плюсам относится и понижение тарифа на электроэнергию на 15–20 %.

Проанализировав таблицу 1, заметим, что уголь с Мунайского месторождения несколько уступает углю кузнецкого бассейна, но переход электростанций на сжигание алтайского угля возможен при усовершенствовании системы топливоприготовления для обеспечения

подсушки топлива. Так же стоит отметить двукратную разницу в содержании азота, что благоприятно скажется на окружающей среде.

Таблица 1 – Характеристики топлив

Характеристика	Ед. изм.	Мунайский Б	Кузнецкий Д
Влажность, W^f	%	28	11,5
Зольность, A^f	%	15,7	15,9
Выход летучих, V^{daf}	%	43	40
Низшая теплота сгорания, Q_i^f	МДж/кг	15,3	21,9
Содержание серы	%	0,4	0,4
Содержание азота	%	0,9	1,9

Сдерживающим фактором является то, что месторождение не достаточно разведано, геологические условия очень сложные, и очень тяжело спланировать экономику. Для полноценной разработки такого проблематичного с точки зрения добычи и сбыта бурого угля должна быть подъездная железная дорога.

Одним из возможных решений проблемы транспортировки должен стать инвестиционный проект, который одобрило Министерство регионального развития РФ на строительство на прилегающей к разрезу территории Алтайской конденсационной электростанции мощностью 660 МВт. Это достаточно трудный для реализации проект, требующий больших капиталовложений. Так же не стоит забывать про уникальную природу Горного Алтая, находящегося по соседству.

Автором предлагается проект парового прямоточного котельного агрегата паропроизводительностью 430 т/ч, давлением перегретого пара 30 МПа и температурой перегретого пара 610 °С.

Для котла выбрана камерная топка П-образной компоновки. П-образная компоновка применяется для котлов средней и большой мощности. П-образная компоновка позволяет логично увязать топку и конвективные поверхности нагрева, обойтись умеренной высотой котла, простыми средствами организовать каркас, а также поместить тягодутьевые машины на нулевой отметке. При такой компоновке поверхностей нагрева узлы котлов наиболее отработаны конструктивно и технологически, проверены в длительной эксплуатации, что позволяет создавать котлы высокой надежности [1].

Одним из самых ответственных этапов конструирования является выбор температуры продуктов сгорания на выходе из топки. Посколь-

ку радиационный теплообмен эффективен в области высоких температур, экономически выгодной является высокая температура за топкой (порядка 1200–1250 °С), однако эта температура почти всегда ограничивается соображениями бесшлаковочной эксплуатации последующих ширмовых и конвективных поверхностей нагрева. В соответствии с нормами теплового расчета, задаваясь температурой на выходе из топки, после проведения расчетов найдена истинная температура, которая составила $\mathcal{G}_m'' = 1080$ °С.

Используя топку с твердым шлакоудалением при замкнутой системе пылеприготовления и воздушной сушке, принята температура горячего воздуха 320 °С и выбрана наиболее простая одноступенчатая схема низкотемпературных поверхностей нагрева.

Число ступеней пароперегревателя выбирается с учетом разверочных явлений так, чтобы приращение энтальпии пара в каждой из ступеней, особенно выходных по пару не превышало 250–260 кДж/кг.

$$n_{cm,ne} = \frac{\Delta h_{ne}^{n,p}}{\Delta h_{cm}},$$

где $\Delta h_{ne}^{n,p} = h_{ne} - h_p'' + \Delta h_{no}^{np}$ – суммарное приращение энтальпии пара, кДж/кг;

$\Delta h_{ст} \leq 250 - 260$ кДж/кг – приращение энтальпий пара в одной ступени пароперегревателя;

$h_{ne} = 3474,67$ кДж/кг – энтальпия перегретого пара при $P_{не}$ и $t_{не}$;

$\Delta h_{no}^{n,p} = 60 - 85$ кДж/кг – суммарное снижение энтальпии пара в регуляторах перегрева, установленных по ходу пара после ВРЧ;

h_p'' – энтальпия пара на выходе из верхней радиационной части экранов (ВРЧ), кДж/кг.

Энтальпия h_p'' может быть определена только после конструирования и теплового расчета топки, поэтому на этой стадии проектирования прямоточного котла количеством и типом ступеней пароперегревателя рекомендуется предварительно задаться (с последующим уточнением) по аналогии с тепловыми схемами прямоточных котлов-прототипов, используя проектную документацию (каталоги, атласы, чертежи и др.) котлостроительных заводов, например: радиационная ступень (ВРЧ), полурадиационная (ширмы) и две (одна) конвективные ступени.

Число ступеней промежуточного перегревателя выбирается аналогичным способом:

$$n_{cm.nn} = \frac{\Delta h_{nn}}{\Delta h_{cm}},$$

где $\Delta h_{nn} = \Delta h''_{nn} - \Delta h'_{nn} + \Delta h_{no.nn}$ – суммарное приращение энтальпии пара в промежуточном перегревателе (ПП);

$\Delta h''_{nn}$ и $\Delta h'_{nn}$ – энтальпия пара на выходе и на входе в промежуточный перегреватель;

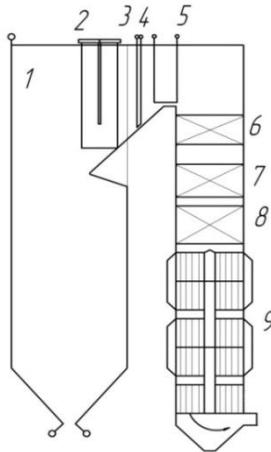
$\Delta h''_{nn} = 3694$ кДж/кг при $P''_{им} = 4,2$ МПа и $t''_{им} = 610$ °С [2];

$\Delta h'_{nn} = 3004$ кДж/кг при $P'_{пп} = 4,4$ МПа и $t'_{им} = 320$ °С [2];

Δh_{cm} – приращение энтальпии пара в одной ступени ПП, рекомендуемое значение 125–260 кДж/кг;

$\Delta h_{no.nn}$ – снижение энтальпии пара в пароохладителях, установленных в тракте промежуточного перегревателя, рекомендуемое значение 60–85 кДж/кг.

$$n_{cm.nn} = \frac{\Delta h_{nn}}{\Delta h_{cm}} = \frac{\Delta h''_{nn} - \Delta h'_{nn} + \Delta h_{no.nn}}{\Delta h_{cm}} = \frac{3694 - 3004 + 60}{250} = 3$$



1 – радиационный; 2 – ширмы; 3 – пароотводящие трубы 4 – конвективная ступень; 5 – третья ступень промежуточного перегревателя; 6 – вторая ступени промежуточного перегревателя; 7 – первая ступень промежуточного перегревателя; 8 – экономайзер; 9 – воздухоподогреватель

Рисунок 1 – Тепловая схема котла

Число ступеней первичного пароперегревателя выбрано равным трем, число ступеней вторичного пароперегревателя – 3. Тепловая схема котла представлена на рисунке 1.

Составление теплового баланса котла заключается в установлении равенства между поступившим в котел количеством тепла и суммой полезно использованного тепла и тепловых потерь. На основании теплового баланса котла вычисляются КПД котла и необходимый расход топлива.

Тепловой баланс составляется применительно к установившемуся тепловому состоянию котла на 1 кг твердого топлива при 0 °С и 101,3 кПа и имеет вид:

$$Q_p + Q_{в.вн.} + Q_{\phi} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

где Q_p – располагаемое тепло топлива, кДж/кг;

$Q_{в.вн.}$ – тепло, подведенное к воздуху предварительно, до входа в воздухоподогреватель, от внешних источников тепла в калориферах, кДж/кг;

Q_{ϕ} – тепло, внесенное в топку паровым дутьем, кДж/кг;

Q_1 – полезно использованное тепло, кДж/кг;

Q_2 – тепловые потери с уходящими газами, кДж/кг;

Q_3 – химический недожог топлива, кДж/кг;

Q_4 – механический недожог топлива, кДж/кг;

Q_5 – потери тепла от наружного охлаждения через стенки газопроходов котла, кДж/кг;

Q_6 – потери тепла с физическим теплом шлаков, кДж/кг.

Располагаемое тепло 1 кг твердого топлива

$$Q_p = Q_i^r = 15300 \text{ кДж/кг.}$$

Тепло, подведенное к воздуху предварительно до входа в воздухоподогреватель $Q_{в.вн.}$, т. к. отсутствует предварительный подогрев воздуха перед подачей в котел.

Основные тепловые потери:

- потери тепла с уходящими газами $q_2 = 6,2 \%$;
- потери тепла с химическим недожогом топлива $q_3 = 0 \%$;
- потери тепла с механическим недожогом топлива $q_4 = 1,5 \%$;
- потери тепла от наружного охлаждения $q_5 = 0,4 \%$;
- потери тепла со шлаком $q_6 = 0,028 \%$ (можно пренебречь);

$$\sum q = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_{6\text{итл}} = 6,2 + 0 + 1,5 + 0,4 = 8,1 \%$$

Коэффициент полезного действия котла:

$$\eta_k = 100 - \sum q = 100 - 8,1 = 91,9 \%$$

Полное количество тепла, полезно использованное в котле:

$$Q_k = D_{ne}(h_{ne} - h_{n.e}) + D_{nn}(h'' - h') = 119,4 \cdot (3474,67 - 1089,8) + 102,77 \cdot (3694 - 3004) = 355664,78 \text{ кВт},$$

где температура и давление питательной воды $t_{пв} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_{пв} = 36 \text{ МПа}$ и энтальпия определяется как функция этих двух параметров $h_{п.в} = 1089,8 \text{ кДж/кг}$, $D_{пс} = 119,4 \text{ кг/с}$ [2];

температура и давление промежуточного перегревателя $t'_{пг} = 320 \text{ }^\circ\text{C}$; $t''_{пг} = 610 \text{ }^\circ\text{C}$; $P'_{пг} = 4,4 \text{ МПа}$; $P''_{пг} = 4,2 \text{ МПа}$ и энтальпии определяются как

функции этих параметров $h'_{пг} = 3004 \text{ кДж/кг}$; $h''_{пг} = 3694 \text{ кДж/кг}$, $D_{пг} = 102,77 \text{ кг/с}$ [2].

Расход топлива, подаваемого в топку

$$B = \frac{Q_k}{\frac{Q_p \cdot \eta_k}{100} + Q_{с.сн} + Q_{ф}} = \frac{355664,78}{\frac{15300 \cdot 91,9}{100}} = 25,2 \text{ кг/с};$$

Данный параметр имеет огромное значение при принятии решения о перспективах разработки разреза, так как можно спрогнозировать на какой период времени, в зависимости от количества котельных агрегатов, хватит топлива.

Но для разработки месторождения немаловажным является следующий фактор. Так как для строительства КЭС потребуется доставлять блоки котлов до разреза или при постановке топлива на баланс края потребуется строительство железной дороги, была рассмотрена экономическая составляющая данного вопроса. Стоимость строительства одного километра железной дороги, учитывая климатические условия региона, составляет 20 млн рублей. Ближайшая железная дорога проходит в г. Бийск в 110 километрах от разреза. Таким образом строительство новой дороги обойдется в 2,2 млрд рублей, что в 30 раз меньше, чем требуется для строительства Алтайской КЭС. Новая железная дорога значительно повышает перспективы угольной отрасли края.

Вывод: Применение бурого мунайского угля экономически целесообразно для восточных районов Алтайского края и при строительстве новой железной дороги. Развитие собственной ресурсной базы на основе Мунайского месторождения бурого угля позволит превратить

край в промышленный и горнодобывающий регион, а в отдаленной перспективе – покрыть потребности новой КЭС мощностью более 600 МВт в Солтонском районе.

Список литературы

1. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: учебное пособие [Текст]/ И.Д. Фурсов // Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 4-е издание, переработанное и дополненное – Барнаул. : Изд-во АлтГТУ, 2017. – 300 с.
2. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин. – М.: «Энергия», 1975. – 80 с.
3. Меняев К. В. Тепловые электрические станции: Учебное пособие [Текст]/ К.В. Меняев // Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул.: Изд-во АлтГТУ, 2015. – 121 с.
4. Администрация Алтайского края. Постановление об энергетической стратегии Алтайского края на период до 2020 года / 2008. – 96 с.

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ МОДУЛЕЙ CAD СИСТЕМ

**Р. Г. Бородин, Н. Ю. Супрун, М. В. Тиханов, В. А. Устинов,
А. В. Шпехт, К. В. Меняев**

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

Ключевые слова: CAD, CAE, САПР, моделирование, проектирование, расчеты.

Аннотация: В данной статье рассмотрены программы для 3D проектирования, обладающие возможностью выполнения расчетов непосредственно на модели, выполнено их сравнение.

В условиях современного производства, предъявляются высокие требования к качеству выпускаемой продукции. При этом важно эффективно использовать время, отведенное на разработку. Применение систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет сократить время проектирования и улучшить его качество. Программы для проектирования развиваются скачкообразно, их функционал постоянно расширяется. Одним из недавних изменений стало внедрение расчетных модулей в системы CAD (Computer Aided Design). Это по-

зволяет выполнять различные расчеты непосредственно при проектировании без переработки 3D моделей в расчетные схемы.

Расчетные модули различных разработчиков обладают схожим функционалом:

- статический расчет;
- расчет на устойчивость;
- расчет колебаний;
- тепловой расчет и др.

На данный момент функционал встроенных расчетных модулей не способен конкурировать с возможностями полноценных CAE (Computer Aided Engineering) систем. Преимуществом использования расчетных модулей является их полная интеграция в CAD.

В области программного обеспечения (ПО) для проектирования выделяются такие крупные разработчики, как:

- Autodesk;
- Dassault Systèmes;
- АСКОН.

Autodesk – это один из крупнейших в мире поставщиков ПО для компьютерного моделирования и анимации. Самым известным продуктом компании в области 3D проектирования является программа Inventor. Программа широко используется при проектировании в машиностроении.

Французская компания Dassault Systèmes предлагает множество решений в сфере проектирования. Среди них наиболее известные в российском машиностроении Solid Works и CATIA.

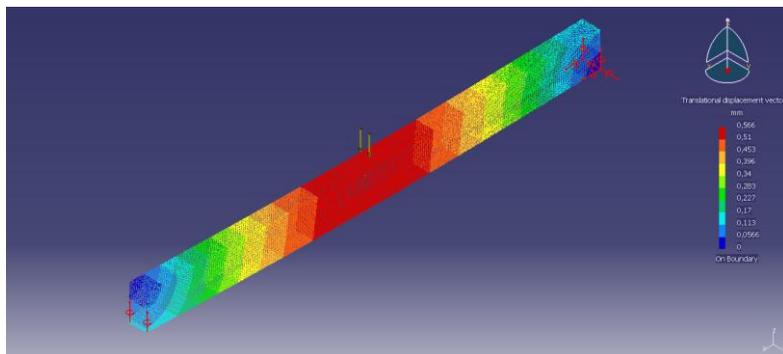


Рисунок 1 – Анализ результатов статического расчета в CATIA V5

КОМПАС-3D от компании АСКОН является довольно распространенной и популярной программой для проектирования в России. Отличительной особенностью этой программы является её адаптация под ЕСКД.

В данной статье произведено сравнение результатов расчетов, выполненных вручную [1], с результатами, полученными с использованием ПО. Для этого составлены две простые расчетные схемы с простыми сечениями балки (рисунки 2, 3) и простая схема с более сложным сечением (рисунки 4, 5). Материал балок – сталь.

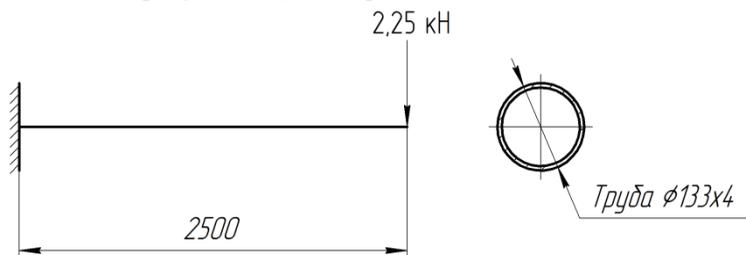


Рисунок 2 – Расчетная схема для трубы

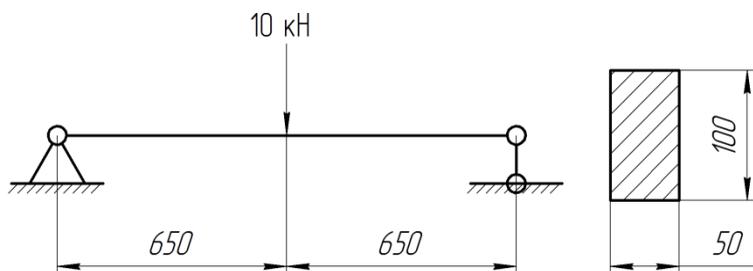


Рисунок 3 – Расчетная схема для детали с прямоугольным сечением

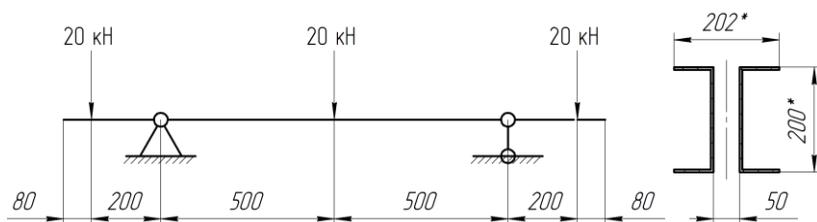


Рисунок 4 – Расчетная схема для сборки

В первых двух расчетных схемах будет выполнен статический расчет деталей. Для третьего расчета составлена сборка, состоящая из нескольких деталей, которая имитирует реальную сборочную единицу. Сечение данной сборки состоит из двух швеллеров 20П по ГОСТ 8240-89.

Целью данных расчетов будет определение прогиба. Для первой расчетной схемы будет измеряться прогиб на свободном конце, для второй и третьей схем прогиб в центре балки.

Для расчета использовались следующие программы:

- CATIA V5;
- Inventor Professional 2018;
- КОМПАС V17.

Выбор именно этих программ обусловлен тем, что они находятся в свободном доступе для студентов и в каждой из них предустановлен расчетный модуль.

Расчет в подобных программах выполняется по методу конечных элементов. Модель разбивается на множество элементов, например тетраэдров (рисунок 6). Данное множество обычно называют сеткой. Каждый элемент высчитывается отдельно, затем результаты суммируются для получения итогового результата.

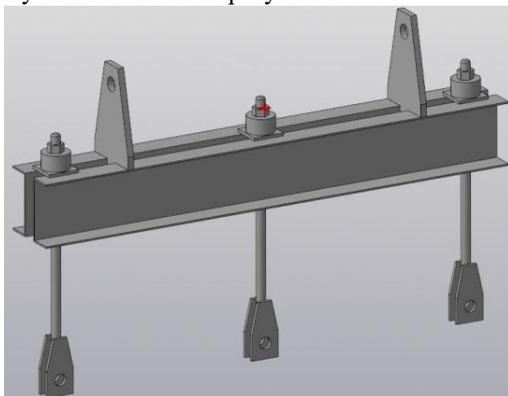


Рисунок 5 – Модель сборки в КОМПАС-3D

Оценка эффективности осуществляется по следующим критериям:

- скорость выполнения работы;
- точность результатов расчета.

В качестве эталона принят результат ручного расчета (ожидаемый результат).

Результат компьютерного расчета зависит от разбиения на элементы. Чем больше элементов – тем точнее получится результат, но при этом уве-

личиваются требования к техническому оснащению ПК. В данном исследовании выполнены расчеты с низкой и высокой точностью.

Все программы были установлены на один и тот же компьютер, который имеет следующие характеристики:

- Процессор Intel Core i3 3120M 2.5 GHz;
- ОЗУ 8 ГБ;
- Видеокарта Nvidia GeForce GT 635M.

Результаты расчетов деталей представлены в таблицах 1 и 2, результаты расчетов сборки в таблице 3.

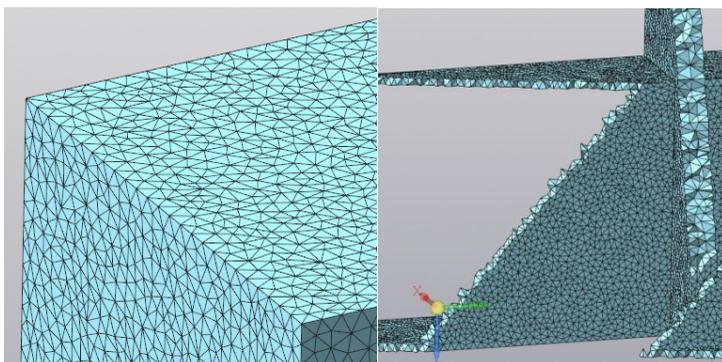


Рисунок 6 – Демонстрация разбиения на элементы в КОМПАС-3D

Таблица 1 – Результаты расчета трубы

Про-грамма	Число элементов	Вре-мя, с	Скор. обра-ботки, эл./сек	Резуль-тат, мм	Ожидае-мый ре-зультат, мм	Отклоне-ние, %
Catia*	18306	6	3051	-16,1019	-17,3598	7,25
Catia**	70352	15	4690,133	-17,3013		0,34
Inventor*	19247	14	1374,786	-16,59		4,43
Inventor* *	70583	50	1411,66	-16,6		4,38
Компас - 3D*	18948	46	411,913	-16,806		3,19
Компас - 3D**	73942	72	1026,972	-17,514		0,89
Примечание: * - расчет с низкой точностью, ** - расчет с высокой точно-стью.						

Таблица 2 – Результаты расчета детали с прямоугольным сечением

Программа	Число элементов	Время, с	Скорость обработки, эл./сек	Результат, мм	Ожидаемый результат, мм	Отклонение, %
Catia*	16553	5	3310,6	-0,50411	-0,5493	8,22
Catia**	39985	10	3998,5	-0,53524		2,55
Inventor*	16992	6	2832	-0,5355		2,5
Inventor**	36807	13	2831,308	-0,536		2,41
Компас - 3D*	13256	37	358,2703	-0,524		4,6
Компас - 3D**	38190	52	734,4231	-0,541		1,5
Примечание: * - расчет с низкой точностью, ** - расчет с высокой точностью.						

Таблица 3 – Результаты расчета сборки

Программа	Число элементов	Время, с	Скорость обработки, эл./сек	Результат, мм	Ожидаемый результат, мм	Отклонение, %
Catia*	158740	35	4535,429	-	0,01371	0,31
Catia**	745492	134	5563,373	-		14,68
Inventor*	140717	47	2993,979	-0,0135		1,5
Inventor**	866341	348	2489,486	-0,0162		18,2
Компас - 3D*	145111	140	1036,507	-0,0123		10,26
Компас - 3D**	839562	920	912,5674	-0,0148		7,98
Примечание: * - расчет с низкой точностью, ** - расчет с высокой точностью.						

Из результатов видно, что все программы справились с задачей – полученные значения прогиба не сильно отличаются от эталонных. При расчете сборки наблюдалась странная тенденция: при увеличении количества элементов, существенно менялись результаты расчета. В справочных материалах к Inventor указаны оптимальные параметры для построения сетки [2], которые соответствуют расчету низкой точности из таблицы 3. При расчетах деталей такого явления не наблюда-

лось. Для более наглядного отображения результатов, составлены диаграммы, изображенные на рисунке 7.

Самой быстрой программой оказалась CATIA V5. Но, из-за ограничений учебной версии, отсутствует функция анализа сборок, поэтому для теста сборка выполнена одной деталью, что исключает расчет контактирующих поверхностей. Эта особенность, возможно, сильно повлияла на скорость работы при расчете сборки, и дает повод усомниться в справедливости теста, хотя при расчете деталей результаты теста всё равно наилучшие.

Второй результат по скорости показал Inventor Professional 2018.

В отличие от других программ задание размера сетки происходит в зависимости от размеров сборки или детали, а не вводом абсолютного значения, как в остальных программах. Результаты расчетов деталей при высокой и низкой точности имеют практически одинаковые отклонения, но результаты расчетов сборки имеют наибольший разброс.

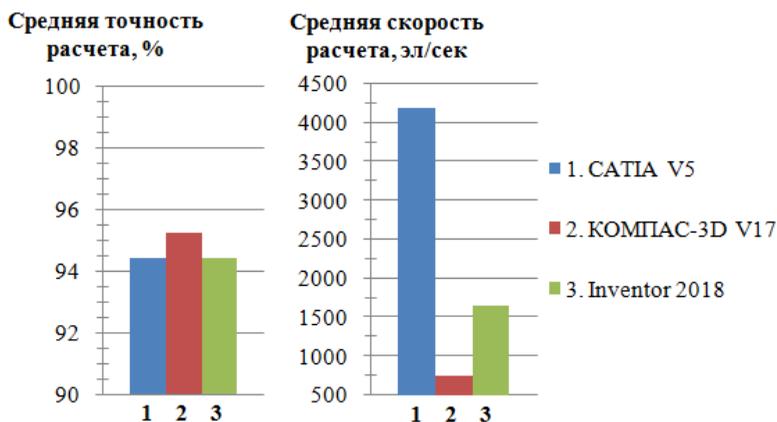


Рисунок 7 – Сравнение результатов расчетов

Последнее место по скорости работы занял КОМПАС-3D. Построение сетки здесь выполняется как отдельная операция, которая занимает достаточно длительное время. Результаты расчетов в КОМПАС-3D ненамного опережают по точности результаты других программ.

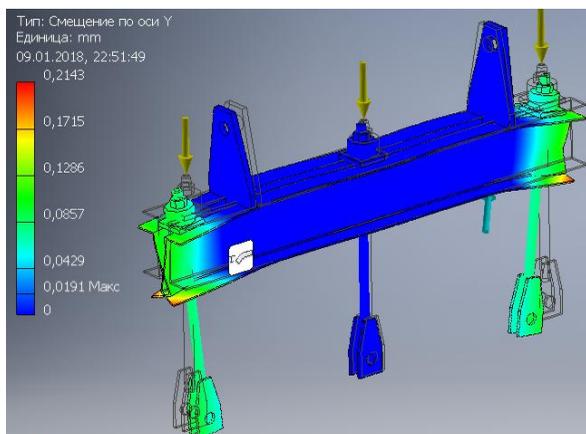


Рисунок 8 – Анализ результата расчета сборки в Inventor

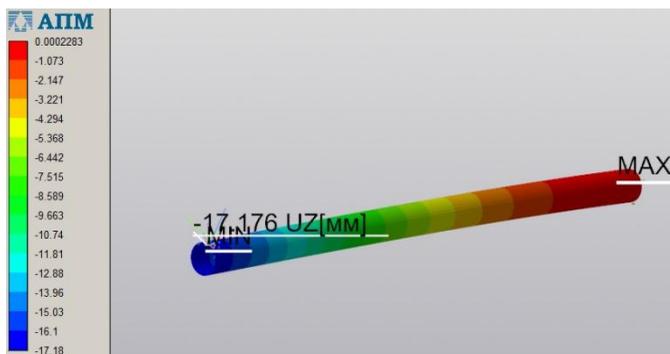


Рисунок 9 – Анализ результата расчета детали в КОМПАС-3D

Работа в расчетных модулях не представляет особой сложности, основные операции интуитивно понятны для новичка. Результаты расчетов, такие как напряжения, перемещения, деформации, нагрузки на опоры и др. отображаются прямо на модели. Также имеется возможность сгенерировать отчет для печати. Рассмотренное программное обеспечение позволяет быстро и качественно разрабатывать различные конструкции, однако для подтверждения правильности выбора тех или иных решений необходим расчет, выполненный в соответствии с нормами. Подобное ПО может помочь лишь при рассмотрении и выборе различных вариантов исполнений конструкции.

Список литературы

1. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический. В 2 книгах. Книга 1. [Текст]/ под ред. А.А. Уманского. – изд. 2-е, М.: Стройиздат, 1972. – 600 с.
2. Inventor 2018 Справка: Скорректируйте настройки и элементы управления сетки [Электронный ресурс] // Inventor 2018 Справка URL: <http://help.autodesk.com/view/INVENTOR/2018/RUS/?guid=GUID-B73B2C75-4AA4-4F9E-9BC4-4AB8D26C1765> (дата обращения: 09.01.2018).
3. Тиханов М.В. Анализ результатов инженерного расчета системы САЕ / М.В. Тиханов, А.В. Шпехт, Р.Г. Бородин, В.А. Устинов, Н.Ю. Супрун, К.В. Меняев // Журнал Фундаментальные основы механики. – 2017. – № 2. – с. 126 – 128.

ТЕСТИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕПЛОГЕНЕРАТОРАМ БЕСПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ

Р. А. Вислогузов, О. В. Хаустова, С. В. Долгов
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»
г. Томск

Ключевые слова: горелочное устройство, беспламенное горение, жидкое топливо, пористая структура, муллит

Аннотация: Задача утилизации жидких отходов различного углеводородного состава является одной из важных проблем, стоящих перед мировым сообществом. Одним из решений утилизации жидких углеводородных отходов, позволяющих обеспечить автономную выработку тепла, является огневая утилизация в беспламенном режиме. Принцип работы подобных теплогенераторов основан на обеспечении подготовки топливовоздушной смеси и активного окисления внутри пористой структуры фракций засыпки, в качестве которой в ряде технических решений применяется криптол, формирующий матрицу объема активной зоны горения. Однако криптол обладает высокой теплоемкостью, придавая системе тепловую инерционность, что существенно усложняет процессы инициации и устойчивого горения. В этой связи целью настоящей работы является тестирование различных порис-

тых материалов применительно к горелочным теплогенераторам беспламенного горения. Установлено, что максимальной сорбцией из рассмотренных материалов обладает муллит. Средняя температура нагревателя при его использовании в качестве засыпки камеры сгорания, зафиксированная термопарой в момент воспламенения керосина, составляет 160 °С.

Для минимизации антропогенного воздействия жидкими горючими отходами на окружающую среду, может быть рассмотрена возможность их сжигания в беспламенном режиме. Это позволит не только утилизировать жидкие горючие отходы, но и обеспечивать выработку полезного тепла, а в перспективе и электроэнергию. Существующие конструктивные решения горелочных устройств, реализующих принцип беспламенного горения, требуют технологической адаптации, дополнительных конструктивных преобразований, экспериментальных исследований. Необходимым этапом исследований является экспериментальное подтверждение инициации процесса воспламенения жидкого топлива в пористой неметаллической структуре негорючего материала, а также выбор такого материала, который наиболее оптимален по параметру сорбции.

По мере прогрессирующего использования традиционных энергоносителей и увеличения динамики образования жидких отходов в виде легковоспламеняющихся веществ, остро стоит вопрос эффективного использования (утилизации) низкосортного органического сырья и вторичных ресурсов. В связи с этим практический интерес вызывает их целевое энергоиспользование. Но данное направление в энергоресурсосбережении сдерживается недостаточностью разработок эффективных способов, позволяющих сжигать такие топлива как: синтез- и биогазы, попутный газ, газоконденсаты, машинные масла, отходы мазутных хозяйств, легковоспламеняющиеся вещества (ЛВЖ) и др., обеспечивая при этом надежную эксплуатацию топливосжигающего оборудования [1].

Одним из решений подобного рода задач в малой энергетике могут стать специальные горелочные устройства, разработанные в конструктивных вариантах (рис. 1) [2–4]. Принцип их работы основан на обеспечении подготовки топливовоздушной смеси и активного окисления внутри пористой структуры засыпки, в качестве которой применяется криптол. Такой принцип подготовки топливовоздушной смеси позволяет исключить возможность развития критического объема для взрыва и способствует предотвращению проскока пламени [5], обеспечивая при этом эффективность и безопасность при сжигании как низ-

кокалорийных, так и высококалорийных топлив. Особенностью процесса горения в углеродистой засыпке является увеличение скорости реакции окисления, при этом в условиях теплопередачи излучающих частиц засыпки обеспечивается предварительный прогрев топлива. Уменьшение размера реакционных зон (пор, образованных частицами засыпки) способствует усилению этого эффекта [6].

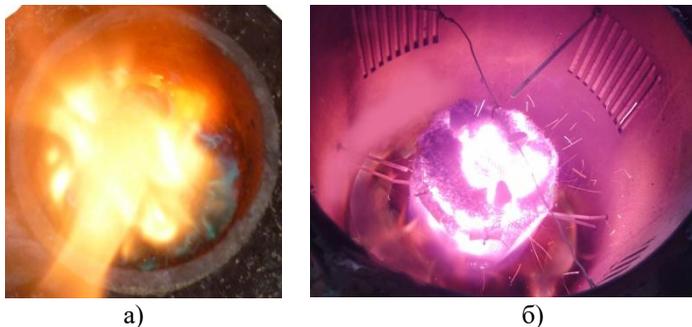


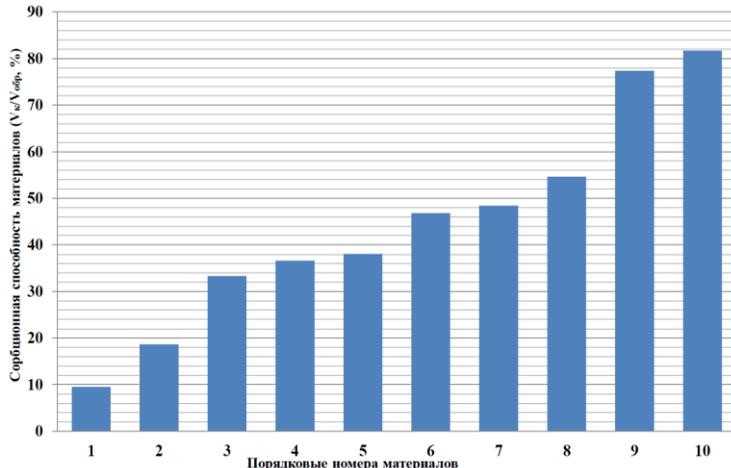
Рисунок 1 – Вид на устье горелок в режиме испытания: а, б – первая и вторая модификации горелок

Важным аспектом в создании таких горелочных устройств, является выбор принципа инициации воспламенения жидкого топлива с последующим поддержанием автотермической реакции горения. Ввиду высокой теплоемкости фракций криптола, формирующих активную зону горения вышеприведенных устройств, такая система инерционна в части розжига и поддержания горения топливовоздушной смеси. Исходя из этого, авторами предполагается использование термоэлемента для локального нагрева. Термоэлемент, помещенный в сорбирующий топливо материал, нагреваясь, способствует выделению (десорбции) жидкого топлива в виде газов с последующим их воспламенением. Были рассмотрены десять материалов на предмет возможного их использования в качестве топливного накопителя системы розжига горелок. Выбор сорбирующего материала производился по параметру сорбирующей способности.

Исследования проводились с образцами различного объема и плотности. Образец с целью удаления влаги из пор сначала высушивался в муфельной печи один час при температуре 800 °С, затем образец взвешивался и помещался в керосин на определенное время в интервале до 4 часов. Керосин был выбран в качестве сорбируемого вещества, т. к. он обладает хорошей проникающей способностью. Его удаление из образца производилось выжиганием. Масса образца заме-

рялась до и после выжигания. Измерения производились для 10 образцов каждого из исследуемых материалов. Конечным итогом выполнялся анализ расчетного среднего соотношения объема сорбированного керосина к объёму образца для каждого из рассмотренных материалов.

Из результатов эксперимента (рис. 2) видно, что наибольшей сорбцией из рассмотренных материалов обладает муллит. Этот материал также применяется в муфельных печах в качестве жаропрочного огнеупора.



1 – керамзит; 2 – шамот; 3 – силикат; 4 – пеностекло; 5 – пемза;
6 – гипс; 7 – кальциевая керамика; 8 – газобетон; 9 – мат базальтовый БСТВ-80; 10 – муллит

Рисунок 2 – Сорбционная способность материалов в порядке возрастания

Т. к. муллит обладает такими ценными с точки зрения теплотехники свойствами, его использование, по мнению авторов, является оптимальным для системы розжига горелочных устройств с углеродистой пористой структурой. По этой причине был разработан дополнительный экспериментальный стенд, состоящий из стального реактора, в центре которого размещен термоэлемент. Пространство между внутренней стенкой реактора и термоэлементом занято муллитом. Термоэлемент подключен к источнику постоянного тока и коммутирован с амперметром. В центре термоэлемента фиксировалась температура с помощью установленной термопары. Эксперимент включал в себя

следующий алгоритм действий: реактор надежно фиксировался на штативе, муллит (в зоне размещения термоэлемента) равномерно запитывался керосином в объеме одного миллилитра, затем на термоэлемент подавался постоянный ток (~9А). На рис. 3 показан стенд в процессе эксперимента.



Рисунок 3 – Испытательный стенд в процессе эксперимента (вид на реактор сверху)

Эксперимент производился десятикратно при одинаковых условиях (начальная температура воздуха, объем используемого керосина и муллита, сила тока подаваемого на нагревательный элемент). После каждого эксперимента используемый муллит подвергался дополнительной термообработке для удаления из пор несгоревшего керосина. После чего заполняющий пространство реактора муллит подлежал контрольному взвешиванию и сравнению с его начальной массой для подтверждения отсутствия сорбированного керосина в его пористой структуре. Средняя температура нагревателя, зафиксированная термомпарой в момент воспламенения керосина, составляет 160 °С.

Экспериментами подтверждена возможность сорбции/десорбции керосина с возможностью инициации его воспламенения.

Список литературы

1. Багрянцев Г.И. Термическое обезвреживание и переработка промышленных и бытовых отходов / Г.И. Багрянцев, В.Е. Черников // Муниципальные и промышленные отходы: способы обезвреживания и вторичной

переработки: аналит. обзоры. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 1995. – с. 128–137.

2. Патент на полезную модель 129599 РФ. №2012141632 / 06(067033). Горелочное устройство инфракрасного излучения // Заявл. 28.09.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. №18.– 3 с.

3. Патент на полезную модель 136875 РФ. №2013134821/06. Горелочное устройство инфракрасного излучения // Заявл. 23.07.2013; опубл. 20.01.2014, Бюл. №2. – 3 с.

4. Долгов С.В. Испытания горелочного устройства / С.В. Долгов, К.И. Ключко, Р.Б. Табакаев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2014.– №2. – С. 38–41.

5. Талантов А.В. Основы теории горения. Ч. 1. [Текст] / А.В. Талантов – Казань: КАИ им. А.Н. Туполева, 1975. – 273 с.

6. Беляев А.Ф. Переход горения конденсированных систем во взрыв [Текст] / А.Ф. Беляев, В.К. Боболев, А.И. Коротков, А.А. Сулимов, С.В. Чуйко. – М.: Наука, 1973. – 292 с.

ЭФФЕКТИВНАЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТЬ КРИПТОЛА В ПОРИСТОМ СЛОЕ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА БЕСПЛАМЕННОГО ГОРЕНИЯ

Р. А. Вислогузов, С. А. Хаустов, Р. Б. Табакаев
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»
г. Томск

Ключевые слова: горелочное устройство, беспламенное горение, жидкое топливо, пористая структура, муллит

Аннотация: Развитие технических решений по огневой утилизации жидких углеводородных отходов в беспламенном режиме требуют знания эффективных термических характеристик пористой засыпки криптола в условиях работы теплогенератора. Теплофизические процессы при прогреве криптоловой пористой матрицы исследовались на специально разработанном экспериментальном стенде с целью получения зависимостей эффективной теплопроводности криптола от температуры. Рассмотрено два варианта компоновки стенда: с максимальной и минимальной интенсивностью свободной конвекции воздуха в порах. Установлено, что в зависимости от расположения и ориентации нагревательного элемента изменяется специфика теплообмена в порах. Полученные зависимости позволят рассчитывать расположе-

ние и необходимую мощность нагревательных элементов для предварительного прогрева криптоловой матрицы.

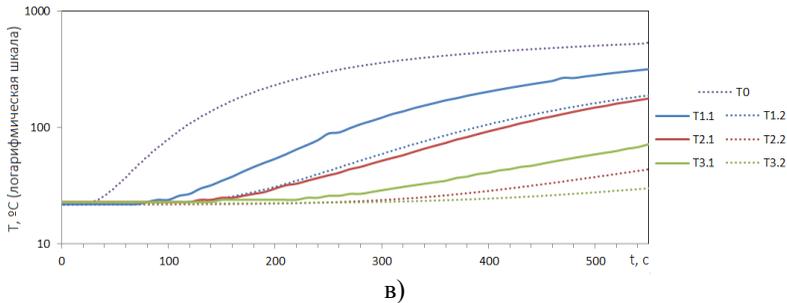
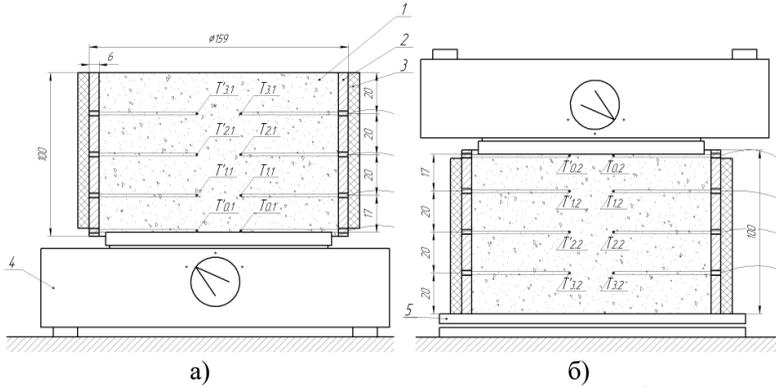
Единственным техническим решением, позволяющим эффективно и экологично сжигать жидкие углеводородные отходы является их огневая утилизация в беспламенном режиме [1]. Однако, существующие беспламенные горелки [2, 3] не предназначены для сжигания жидких углеводородных отходов. Предварительные результаты численных и экспериментальных исследований [4, 5] показали, что существующая тепловая инерция криптола (пористого наполнителя) существенно усложняет организацию процесса воспламенения и стабильного горения углеводородных отходов. Дальнейшее развитие исследований в этом направлении и конструкторская разработка технических решений на его основе требуют знания эффективных термических характеристик криптола в условиях работы теплогенератора.

В частности, актуальной задачей является разработка способов инициирования воспламенения и совершенствование технологий предварительного прогрева криптоловой матрицы. Для прогнозирования неравновесных тепловых процессов в углеродной матрице криптола требуется определить эффективное значение теплофизической величины, характеризующей скорость изменения температуры – температуропроводность [6]. В связи с вышеперечисленным целью настоящей работы ставится получение аналитических зависимостей для расчета эффективной температуропроводности криптола.

Теплофизические процессы при прогреве криптоловой пористой матрицы исследовались на специально разработанном экспериментальном стенде (рисунок 1). Рассмотрено два варианта компоновки стенда: с максимальной (рисунок 1, а) и минимальной (рисунок 1, б) интенсивностью свободной конвекции воздуха в порах. При проведении эксперимента непрерывно регистрировалась температура в трех точках на определенном расстоянии друг от друга и от плоского источника теплоты. Чтобы исключить влияние необратимости температурных изменений на изучаемые характеристики, эксперимент воспроизводился трижды как с полной заменой, так и без замены криптоловой засыпки между опытами. К моменту начала каждого эксперимента температура в объеме пористой засыпки распределялась равномерно и равнялась с температурой окружающей среды. Результаты проведенных испытаний на экспериментальном стенде приведены на рисунке 1, в.

В точках установки первой термопары T_1 для обоих вариантов ориентации нагревательного элемента наблюдалось сначала увеличе-

ние скорости изменения температуры во времени до некоторого максимума, а затем плавное её снижение. В остальных точках установки термопар (T_2 и T_3) скорость изменения температуры во времени увеличивается строго монотонно для обоих вариантов расположения нагревательного элемента.



а) – первый стенд (поверхность нагревательного элемента ориентирована вверх); б) – второй стенд (поверхность нагревательного элемента ориентирована вниз); 1 – криптол; 2 – металлическая труба; 3 – теплоизоляция; 4 – нагревательный элемент; 5 – крышка; $T_{0.1}$ – $T_{3.1}$ – измерительные термопары (ХА) первого стенда; $T_{0.2}$ – $T_{3.2}$ – измерительные термопары (ХА) второго стенда; $T'_{0.1}$ – $T'_{3.1}$, $T'_{0.2}$ – $T'_{3.2}$ – дублирующие термопары (ХА) первого и второго стендов соответственно; в) – показания термопар во время испытаний

Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для определения теплоемкости и теплопроводности криптола при различной ориентации подвода тепла

При математической обработке экспериментальных данных эффективное значение коэффициента температуропроводности выража-

лось из конечноразностного аналога дифференциального уравнения теплового баланса в нестационарной постановке:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial X^2}, \quad (1)$$

где T – температура, К; t – время, с; X – вертикальная координата в направлении теплопереноса, характеризующая расстояние до нагревательного элемента, отложенное по нормали к его поверхности, м; α – эффективная температуропроводность слоя, $\text{м}^2/\text{с}$.

Выражая из (1) эффективное значение коэффициента температуропроводности путём подстановки конечноразностных схем получаем зависимости эффективного коэффициента температуропроводности пористого криптола от температуры. Эффективная температуропроводность пористого криптола с повышением температуры интенсивно растет (рис. 2). Разница в значениях кривых для экспериментов с различной интенсивностью свободной конвекции приводит к выводу, что высокие эффективные значения коэффициентов температуропроводности пористой среды обусловлены в основном конвекцией [7].



Рисунок 2 – Аналитическая зависимость коэффициента теплоотдачи ($\text{м}^2/\text{с}$) от температуры (К)

Экспериментально установлено, что в зависимости от расположения и ориентации нагревательного элемента изменяется специфика теплообмена в порах. Для ориентированной вверх горячей поверхности, пористая зона лежит выше нагревательного элемента, и вследствие свободной конвекции в поле сил тяжести во всем объеме крипто-

ловой матрицы развивается активная циркуляция воздуха. Зависимость $a(T)$ в этом случае описывается квадратичной функцией:

$$a(T) = 7 \cdot 10^{-11} \cdot (T - 273)^2 - 7,74 \cdot 10^{-9} \cdot (T - 273) + 9,37 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}.$$

При ориентации нагревательного элемента вниз из-за низкой интенсивности его охлаждения конвективными потоками наблюдаются высокие значения температурного градиента в масштабах зерна криптола, и эффективная теплопроводность растет за счет радиационного теплообмена между твердыми частицами криптола. Полученная аналитическая зависимость $a(T)$ для этого случая имеет вид:

$$a(T) = -8,14 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 273) + 6,33 \cdot 10^{-7}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Полученные зависимости позволят с применением уравнения (1) рассчитывать расположение и необходимую мощность нагревательных элементов для предварительного прогрева криптоловой матрицы.

Список литературы

1. Раяк М.Б. Совершенствование процесса сжигания топлива. Обзор зарубежных технологий / М.Б. Раяк, Г.Я. Бернер, М.Г. Кинкер // Новости Теплоснабжения. – 2011. – Т. 135. – № 11 (электронный доступ: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2550).
2. Каталог продукции компании Viessmann http://www.viessmann.com/vires/product_documents/5681611VSA00001_1.PDF.
3. Патент РФ № 2616962 Россия. МПК F24C5/00; F23C3/00; F23G7/05. Камера сгорания теплогенератора / С.В. Долгов, Е.К. Савченко, Р.Б. Табакаев и др.; заяв. 27.04.2016; опубли. 18.04.2017, Бюл. № 11. – 9 с.: ил.
4. Долгов С.В. Тестирование конструктивного исполнения технических решений по огневой утилизации жидких углеводородных отходов / С.В. Долгов, С.А. Хаустов, Р.Б. Табакаев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 9. – с. 49–56.
5. Долгов С.В. Испытания горелочного устройства / С.В. Долгов, К.И. Клочко, Р.Б. Табакаев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. – 2014. – № 2. – с. 38–41.
6. Bergman T.L., Incropera F.P., DeWitt D.P., Lavine A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – USA: John Wiley & Sons, 2011. – 1048 p.
7. Чудновский. А. Ф. Теплообмен в дисперсных средах [Текст] / А.Ф. Чудновский. – М.: Гостехиздат, 1954. – 444 с.

УТИЛИЗАЦИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В ЭНЕРГЕТИКЕ

А. А. Воронцов¹, Р. Е. Бронников¹, Д. А. Мануйлов¹, Н. Г. Любецкий²

¹ ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический

университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

² ООО «СибЭнергоМаш – БКЗ», г. Барнаул

Ключевые слова: вторичные энергетические ресурсы, энергоэффективность, промышленные котлы.

Аннотация: В данной статье рассматриваются способы по утилизации вторичного сырья металлургического производства. Представлено топочно-горелочное устройство для сжигания ВЭР в топках паровых котлоагрегатов.

На сегодняшний день большое внимание уделяется использованию вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Это обусловлено тем, что утилизация ВЭР дает значительный энергосберегающий эффект, поскольку позволяет экономить использование основного топлива. К примеру, в качестве ВЭР металлургического производства выступают коксовый газ, доменный газ и другие виды ресурсов.

Целями воплощения проектов по использованию (утилизации) ВЭР, помимо получения экономического эффекта, также являются уменьшение объема отходов для улучшения экологии страны и развитие отечественной технологии производства альтернативного топлива в качестве создания резерва для традиционных энергоносителей и как следствие – создание новых рабочих мест.

Черная металлургия лидирует по вовлечению ВЭР. Их суммарный выход в пересчете на условное топливо равен 30–50 млн. т/год при максимальной возможности утилизации около 20 млн. т.

Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии представлены всеми группами (горючие, тепловые, избыточного давления). К горючим прежде всего относятся доменный, конвертерный и коксовый газы. Они же являются высокопотенциальными тепловыми выбросами с температурой от 300 до 1600 °С, а доменный газ обладает еще и избыточным давлением.

На долю черной металлургии приходится примерно 40 % тепловых и до 80 % горючих ВЭР, которые применяются в промышленности и энергетике. Как ни странно большой процент ВЭР приходится на

горючие отходы, которые в свою очередь и являются наиболее мощными в качестве энергетических ресурсов.

Использование доменного газа. Доменный газ является сопутствующим продуктом выплавки чугуна в доменных печах. Используется как газообразное топливо в доменном цехе для нагрева насадок регенеративных воздухонагревателей, в других цехах металлургических предприятий и на коксохимических заводах. Характеристика доменного газа: температура 175–250 °С, выход 1100–2200 м³/т чугуна; состав, %: 23–40 СО, 12–22 СО₂, 1,5–6,0 Н₂, остальное – азот; теплота сгорания ~4 МДж/м³; давление на колошнике до 0,4 МПа.

Использование коксового газа. Коксовый газ получают одновременно с коксом в печах коксохимических заводов, при сухой перегонке каменного угля в пределах температур от 900 до 1200 °С. Газ является продуктом термического разложения веществ, составляющих уголь. Коксовый газ, получаемый в печах для производства кокса для доменной печи, имеет большое значение в топливном балансе страны. При ежегодной выработке около 80–85 млн т кокса получается более 25 млрд м³ коксового газа. Коксовый газ является одним из лучших технологических газообразных топлив благодаря своей высокой теплотворной способности (14–18 МДж/м³), температуре горения, небольшому количеству балласта (СО₂, О₂, N₂), относительно высокому содержанию СО₂ и Н₂О в продуктах горения, что обуславливает его широкое применение в различных топливопотребляющих агрегатах. Основными потребителями коксового газа, а также смесей его с бедными (доменным, генераторным) газами как топлива являются: коксовые печи и доменные печи; мартеновские печи; нагревательные печи и устройства прокатных цехов; энергетические котлы заводской ТЭЦ [1].

Использование конверторных газов. Конверторный газ состоит в основном из СО (> 60 % об.) и небольшого количества водорода, остальное – инертные газы (N₂ и СО₂). Газы, выходящие из конвертера с температурой 1500–1800 °С и охлаждаемые до температуры 900 °С в котлах-утилизаторах, поступают в газоочистку, в которой концентрация пыли снижается до 120 мг/м³. После газгольдера газы поступают в электрофильтр мокрого типа, где проходят доочистку до концентрации 10 мг/м³, и затем компрессором подаются в газопровод. После охлаждения и очистки газы с теплотой сгорания около 8,4–10,5 МДж/м³ могут быть использованы как топливо. Однако при этом следует учитывать периодичность выхода конверторных газов. Поэтому использование тепла конверторных газов возможно при смешении их с домен-

ным, коксовым или природным газами, что позволит сгладить пиковый характер выдачи конвертерного газа [1].

Наиболее значительно по объему использование технологических газов на ТЭЦ при металлургических заводах. Сжигание смеси газов, таких как доменного, коксового и природного на ТЭЦ представляет собой сложные инженерно-технические и экологические задачи. Для их решения необходим индивидуальный подход, так как топлива такого рода имеют специфические свойства. В основном речь пойдет о разработке специализированных горелочных устройствах.

Барнаулский котельный завод ООО «СибЭнергоМаш – БКЗ, занимается подобными разработками и производит специализированные топочно-горелочные устройства, с помощью которых в топках энергетических котлов сжигают смеси газов. Газы в смеси находятся в различном процентном соотношении.

На рисунке 1 представлена одна из разработок прямоточно-вихревой комбинированной многотопливной горелки. Это прямоточно-вихревое горелочное устройство представляет собой сочетание установленных под углом друг к другу нижней горизонтальной горелки, предназначенной для сжигания природного и коксового газов, и верхней, наклоненной под углом 32° к горизонту горелки, предназначенной для сжигания доменного газа. Нижняя горелка выполнена двухпоточной по воздуху, по природному и коксовому газам. По оси горелки расположено два коллектора коаксиально друг к другу для подачи коксового газа. Выход газа происходит как из отверстий конусной насадки, так и из отверстий трубы. Подача природного газа осуществляется с помощью газораздающих трубок малого диаметра, расположенных между периферийным и центральным воздушными каналами. Воздух, подаваемый в центральный и периферийный каналы, закручивается с помощью неподвижных аксиальных лопаток. По оси данной горелки встроена мазутная форсунка паромеханического распыливания. Горелочное устройство оборудовано запально-сигнализирующим устройством ЗСУ, оснащённым фотодатчиком. ЗСУ предназначено для обеспечения дистанционного розжига запальника и горелки, а также контроля и сигнализации о наличии пламени запальника и факела горелки. Топливом для ЗСУ служит природный газ.

Верхняя горелка выполнена в виде трубы с концентрическими каналами, через которые чередуется подача доменного газа и вторичного воздуха. В наружном кольцевом канале установлены периферийные трубки для подачи основной части доменного газа, остальная часть доменного газа подаётся в топку через центральный коллектор, выход доменного газа из которого происходит через отверстия конус-

ной насадки. Вторичный воздух подаётся через кольцевой канал горелки, в котором установлен аксиальный завихритель, обеспечивающий крутку воздуха, и центральную трубу, расположенную по оси горелки. Эта горелка при растопке не используется, не имеет запального устройства и включается в работу после растопки нижней горелки. Разделение горелок на 2 типа по сжиганию конкретных видов топливных газов, упрощает их обвязку топливопроводами, особенно топливопроводами доменного газа.

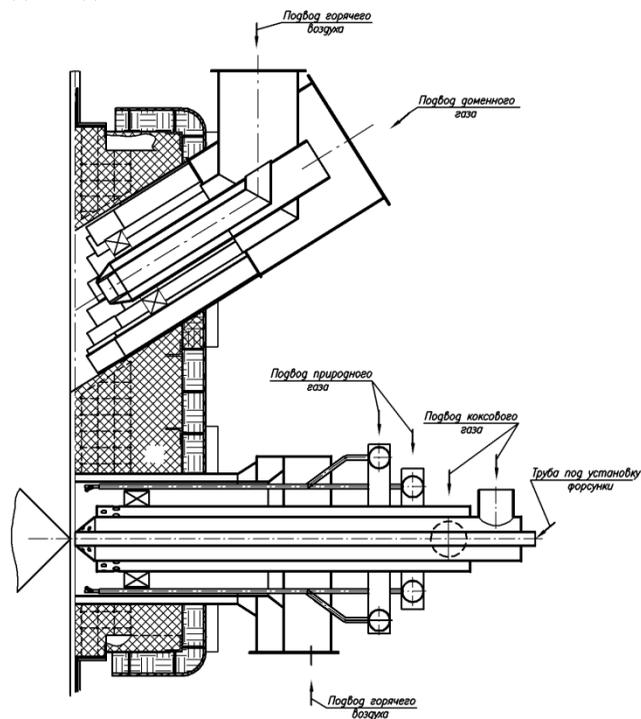


Рисунок 1 – Прямоточно-вихревая комбинированная многотопливная горелка

В целом, подводя итог по данной проблеме, важнейшим результатом применения ВЭР – экономия первичного топлива, которая и определяет величину получаемого экономического эффекта. Эффективность использования ВЭР на ТЭЦ повышается за счет уменьшения стоимости отпускаемой продукции. При этом улучшается экологическая обстановка при закрытии мелких котельных, на которых отсутствуют пылегазоулавливающие устройства, загрязняющие окружающую

среду. Вместе с тем расширение применения ВЭР требуют внедрения новой техники и прогрессивной технологии, что связано с дополнительными капитальными затратами, особенно остродефицитными в настоящее время.

Список литературы

1. Скляр В.О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии: учебное пособие [Текст]/ В.О. Скляр. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
2. Сухоцкий А. Б. Вторичные энергетические ресурсы. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии : учебно-метод. пособие для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» [Текст] / А. Б. Сухоцкий. – Минск : БГТУ, 2012. – 92 с.
3. Шульман В. Л. Развитие топочных технологий в российской энергетике : учебное пособие [Текст] / В. Л. Шульман [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 504 с.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БАРНАУЛЬСКОЙ ТЭЦ-3

Е. В. Дауткина, Д. Рыльский, К. В. Меняев
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
г. Барнаул

Ключевые слова: золошлаковые отходы, золошлаковые материалы, золоотвал, зола, шлак.

Аннотация: Рассмотрена проблема золошлакоотвалов тепловых электрических станций и пути повышения экологических показателей золошлакоотвалов Барнаульской ТЭЦ-3.

В настоящее время пристальное внимание теплоэнергетиками уделяется вопросам сокращения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, сбросов веществ и микроорганизмов в водные объекты, а также вопросам сбора, транспортировки и утилизации отходов производства.

Количество золы и шлака, которое образуется на электростанции, зависит от вида используемого топлива, его зольности, способа его

сжигания, расхода и эффективности золоулавливающих устройств [1].
Общее количество шлака и золы, подлежащее удалению с ТЭС, определяется по выражению:

$$G_{\text{ш.з}} = 0,01B(A^r + q_4 Q_i^r / 32,7) [1 - a_{\text{ун}}(1 - \eta_{\text{зу}}/100)],$$

где 32,7 – теплота сгорания недожога, МДж/кг;

$\eta_{\text{зу}}$ – эффективность золоуловителей, %;

q_4 – потери теплоты с механическим недожогом топлива, %;

A^r – рабочая зольность топлива, %;

Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг;

$a_{\text{ун}}$ – доля золы, уносимой газами.

Находят применение механическая, гидравлическая, пневматическая и смешанная системы золошлакоудаления. В каждой системе используются элементы другой. Выбор той или иной системы определяется расходом топлива и свойствами золы и шлака, надежностью и экономичностью работы, стоимостными характеристиками, условиями обслуживания, наличием мест для золоотвалов и их удаленностью от электростанции, способом очистки дымовых газов, наличием достаточного количества воды [1].

Механические системы золошлакоудаления в настоящее время на ТЭС не применяются. Они используются только в малых котельных.

Гидравлические системы получили наиболее широкое распространение. В этих системах могут применяться совместная транспортировка золы и шлака по общим каналам и трубам и раздельная транспортировка – шлак удаляется отдельно от золы по самостоятельным каналам и трубам. Раздельная транспортировка осуществляется в случаях, когда при использовании шлака и золы не допускается их смешение.

Совместное удаление золы и шлака (пульпы) производится багерными насосами, которые могут размещаться в главном корпусе ТЭС или на некотором удалении от него. Багерные насосы устанавливаются с резервным и ремонтным агрегатами на каждой насосной станции. К багерным насосам зола и шлак поступают по самотечным золовым и шлаковым каналам, которые в пределах котельного помещения выполняются раздельными.

Для удаления летучей золы из бункеров золоуловителей служат золосмывные аппараты. В них происходит смачивание и перемешивание золы с водой.

Площади, выделяемые для организации золошлакоотвалов, должны обеспечивать работу электростанции в течение не менее 25

лет. Вместимость золошлакоотвалов предусматривается достаточной для работы электростанции в течение 5 лет после вывода ее на проектную мощность. Необходимая площадь отчуждения для отвалов, строящихся ТЭС оценивается по годовому выходу золошлакового материала и составляет 200–500 га при выходе золы и шлака более 1500 тыс. т/год. Максимальная высота золошлакоотвала 35–40 м.

В настоящее время в связи с ужесточением требований природоохранного законодательства в области охраны водных объектов возникла необходимость строгого соблюдения нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ, в сточных водах, сбрасываемых с золошлакоотвала Барнаульской ТЭЦ-3 в пойму реки Обь.

В связи с этим разработан план природоохранных мероприятий АО «Барнаульская ТЭЦ-3», одним из которых является перевод золошлаковых отходов (ЗШО) в золошлаковые материалы (ЗШМ).

Исходным сырьем для производства ЗШМ являются золошлаковые отходы, образованные в результате термохимических превращений неорганической части топлива (угли Бородинского разреза Канско-Ачинского угольного бассейна) при сгорании в топках котлов Барнаульской ТЭЦ-3, и транспортированные на золошлакоотвал по системе гидрозолоудаления (ГЗУ), полученные после их обработки (обезвоживания).

Обезвоживание золошлаковых отходов не является частью технологического процесса производства ЗШМ и осуществляется в результате существующей деятельности Барнаульской ТЭЦ-3.

Область применения ЗШМ:

1. Рекультивация нарушенных земель (технический этап).
2. Вертикальная планировка территорий, исключая жилую застройку.
3. Строительные работы по отсыпке котлованов и выемок.
4. Применение в дорожном хозяйстве:
 - для сооружения земляного полотна;
 - для устройства дополнительных слоев оснований дорожных одежд.

ЗШМ должен соответствовать требованиям радиационно-гигиенической безопасности (НРБ-99/2009 (СанПиН 2.6.1.2523-09), ОСПОРБ 99/2010) и требованиям санитарно-эпидемиологической безопасности (СанПиН 2.1.7.1287-03).

Производство продукта «Материал золошлаковый для рекультивации, получаемый в результате деятельности АО «Барнаульская ТЭЦ-3» осуществляется на участках производства работ, расположенных в границах промышленной площадки действующего золошлакоотвала.

Существующая схема складирования золошлаков предполагает последовательные во времени этапы: намыв золошлаков и их обезвоживание (осушение) в двух секциях золошлакоотвала.

Производство ЗШМ на золошлакоотвале АО «Барнаульская ТЭЦ-3» рассчитано на 100 тыс. т в год (120 тыс. м³ в год).

В целях соблюдения безопасности гидротехнических сооружений (ГТС) наполнение золошлакоотвала пульпой осуществляется до отметок, не превышающих рабочих отметок согласно действующему проекту.

После заполнения секции и переключения пульповыпусков, с целью заполнения другой секции, начинается понижение уровня воды в осушаемой секции, сопровождающееся процессом обезвоживания ЗШО за счет понижения уровня воды путем отвода свободной осветленной воды с помощью шандорных колодцев, а также естественным путем (процесс испарения).

Продолжительность процесса обезвоживания золошлаков составляет не менее 1 года.

Специфической особенностью складирования золошлаков является самоцементация золошлаков при намыве и обезвоживании в секции золошлакоотвала.

С целью производства ЗШМ, предусматривается перемешивание и измельчение золошлаков на участках (площадках) производства работ посредством применения специальной техники.

Последовательность выполнения работ состоит из нескольких основных операций:

1-я операция – перемешивание и измельчение золошлаков до требуемых параметров;

2-я операция – контроль с целью определения соответствия произведенного продукта предъявляемым к нему требованиям.

С целью усреднения гранулометрического состава обезвоженных золошлаков в осушенной секции золошлакоотвала на участке производства работ осуществляется перемешивание и измельчение (разрушение) золошлаков до требуемых параметров.

В результате процессов преобразования исходной золошлаковой смеси (процесс осушения (обезвоживания) – существующая деятельность, процессы измельчения и перемешивания – намечаемая деятельность) происходит образование дисперсного продукта – ЗШМ, физико-механические показатели которого соответствуют ГОСТ 25100-2011.

Выполнение данных работ предусмотрено с помощью гусеничного бульдозера.

После выполнения операций по перемешиванию и измельчению (разрушению) золошлаков до требуемых параметров, осуществляется их контроль с целью определения соответствия произведенного материала предъявляемым к нему требованиям.

После подтверждения характеристик продукта требуемым показателям (одна партия), производится его выемка с целью дальнейшей транспортировки к месту потребления.

Транспортировка ЗШМ предусмотрена автосамосвалами с характеристиками, аналогичными автосамосвалам КамАЗ 65115.

Секция, освобожденная от ЗШМ после выемки, ставится под заполнение, в соответствии с производственными инструкциями по эксплуатации золошлакоотвала и трасс ГЗУ.

Концепция наилучшей доступной технологии (НДТ) в смысле комплексного предупреждения и контроля загрязнений окружающей среды в результате хозяйственной деятельности, учитывает возможные экономические затраты и экологические выгоды, получаемые в результате реализации НДТ, а также направлена на комплексную защиту окружающей среды.

Использование золошлаковых отходов представляет собой их трансформацию, ориентированную на производство продукции – золошлаковых материалов.

Современное развитие теплоэнергетики, методов очистки дымовых газов, сточных вод и использования (утилизации) ЗШО позволяют значительно уменьшить воздействие ТЭЦ на окружающую среду, что в настоящее время стало актуальным в связи с ужесточением экологического законодательства. Так с 2019 года на объектах I категории стационарные источники должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета объема или массы выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ и концентрации загрязняющих веществ, а также техническими средствами фиксации и передачи информации об объеме и о массе выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ и о концентрации загрязняющих веществ в государственный фонд данных государственного экологического мониторинга. Так же ужесточаются требования к документации предоставляемой в рамках согласования и получения разрешительной документации по экологической деятельности со стороны Росприроднадзора, ежегодно увеличиваются ставки платы за негативное воздействие на окружающую среду.

Список литературы

1. Меняев К. В. Тепловые электрические станции: учебное пособие [Текст] / К.В. Меняев. – Барнаул.: Изд-во АлтГТУ, 2015. – 121 с.
2. Носков, А.С. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба [Текст] / А.С. Носков, М.А. Савинкина, Л.Я. Анищенко. – Новосибирск, 1990. – 184 с.
3. «Наращивание дамбы золоотвала и устройство шандорных колодцев». Проектная документация. Шифр 2298.12-КР, ОАО «СибИАЦ», г. Красноярск, 2012 г.
4. Программа мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территории объекта размещения отходов «золошлакоотвал АО «Барнаурской ТЭЦ-3» и в пределах его воздействия на окружающую среду, 2017 г.
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Алтайского края в 2016 году». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://altaipriroda.ru/doklady/eko_doklady (тегу. – дата обращения 14.01.2018).

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ФАКЕЛЬНОМ СЖИГАНИИ В ТОПКЕ КОТЛА БКЗ-320-140

П. С. Драчук, Д. А. Спивак, Н. В. Визгавлюст
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»
г. Томск

Ключевые слова: математическое моделирование котлов, оксиды азота, распределение температур, кинетический механизм.

Аннотация: Произведено численное исследование различных схем образования оксидов азота, которые применяются при численном моделировании факельного сжигания в топочной среде парового котла БКЗ-320-140 на основе одномерных и трехмерных моделей горения и теплообмена.

На сегодняшний день отрицательное воздействие энергетики на природу имеет существенное значение, побуждающее к принятию мер. Без энергетики у человечества нет будущего, это неопровержимо, однако вред, наносимый окружающей среде, ухудшает и условия жизни

людей. Масштабы энергопотребления постоянно растут, что сопровождается, как известно, увеличением количества вредных выбросов. Проблема защиты атмосферного воздуха возникла по причине нерациональной и несовершенной деятельности человека. С экологической точки зрения наибольшая опасность исходит от искусственных антропогенных источников загрязнения воздуха, напрямую связанных с процессами сжигания разных видов органического топлива. Главными источниками подобного загрязнения являются ТЭЦ, которые в качестве топлива используют преимущественно уголь, а также промышленные топливосжигающие установки, вырабатываемые внушительное количество оксидов азота (NO и NO_2), твердые частицы (сажа, зола, пыль), и в не таком существенном количестве альдегиды, органические кислоты, оксиды углерода. [1]. Ежегодно требуются к экологической безопасности ужесточаются. Согласно ГОСТ Р 50831-95 выбросы оксидов азота для ТЭС, которые будут работать после 2016 года должны составлять не более 200 мг/м^3 для твердых топлив (при мощности $> 300 \text{ МВт}$). Поэтому первоочередной проблемой при проектировании оказывается соблюдение прописанных санитарными органами положений о предельно допустимых концентрациях газообразных примесей (прежде всего – оксидов азота) в атмосферном воздухе как для новых, так уже и для работающих станций. Отсюда следует, что одной из главных целей энергетики, является прогнозирование и контроль образования вредных веществ в результате горения органического топлива в котлах теплоэлектростанций. Но накладываются существенные ограничения, ввиду того, что получение данных, требующихся для оценки конструктивных решений в результате физического моделирования процессов или промышленных испытаний, является трудоемким и дорогостоящим методом. Использование методов математического моделирования служит выходом из данной ситуации.

Для проведения численного анализа образования оксидов азота при горении пылевидного топлива в данном эксперименте использована кинетическая модель образования NO на базе модели Митчелла и Тэрбола [2]. Кинетическая схема такой модели содержит только 13 реакций, в том числе реакции выхода, горения летучих веществ и догорание коксового остатка, что является современным представлением химических процессов оксидов азота в результате горения твердого топлива. Именно поэтому модель Митчелла и Тэрбола удобна в использовании.

Генерация оксидов происходит следующим образом (рисунок 1): Пиролиз (термическое разложение) частицы угля при ее быстром нагревании, в следствии которого происходит выход летучих состав-

ляющих угля (азота топлива и углеводородов). В результате этого почти мгновенно основная часть (до 80 %) связанного азота топлива переходит в свою газообразную фазу в форме цианидов. Далее возникает гетерогенное догорание коксового остатка и горение углеводородных компонентов летучих веществ. Оставшаяся, равномерно распределенная по частице кокса, часть азота, составляющая соответственно около 20–30%, окисляется до NO со скоростью пропорциональной скорости догорания коксового остатка (реакция 2). При выходе летучих веществ образуются цианиды, которые переходят в амины (реакция 3), которые, после этого, реагируют с O₂ (реакция 4) или NO (реакция 5), что приводит соответственно либо к восстановлению N₂ из NO, либо к генерации оксидов азота. Помимо этого, при взаимодействии углеводородов с NO (реакция 6), образовывается HCN, эта реакция является немаловажной при конверсии оксидов азота, а также гетерогенная реакция между NO и частицей кокса (реакция 7) [2]. Происходят:

- реакция 1 – N (в летучих) → HCN,
- реакция 2 – N (в коксе) + 0,5O₂ → NO,
- реакция 3 – HCN + H₂O + 0,5O₂ → NH₃ + CO₂,
- реакция 4 – NH₃ + O₂ → NO + H₂O + 0,5H₂,
- реакция 5 – NH₃ + NO → N₂ + H₂O + 0,5H₂,
- реакция 6 – NO + углеводороды → HCN + H₂O,
- реакция 7 – C (кокс) + 2NO → CO₂ + N₂,
- реакция 8 – N₂ + O₂ ↔ 2NO,
- реакция 9 – H₂ + 0,5O₂ = H₂O.

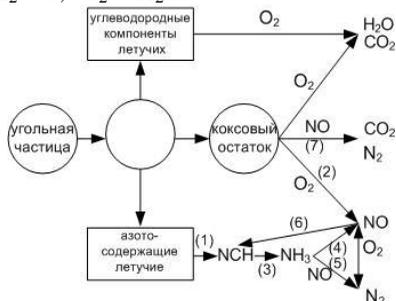
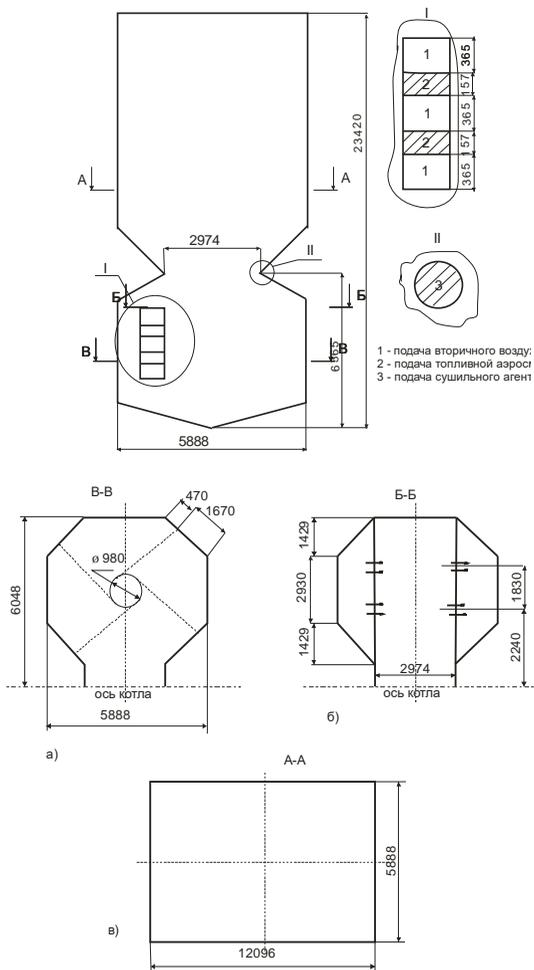


Рисунок 1 – Схема суммарного кинетического механизма горения угольной частицы и образования оксидов азота [2]

В топочной камере БКЗ-320-140 было произведено численное исследование на базе представленной модели, с дальнейшей верификацией полученных данных с экспериментальными результатами исследования, произведенного в реальных условиях. [3].



а – горизонтальное сечение камеры горения на уровне горелок;
 б – горизонтальное сечение пережима топочной камеры; в – горизонтальное сечение камеры охлаждения

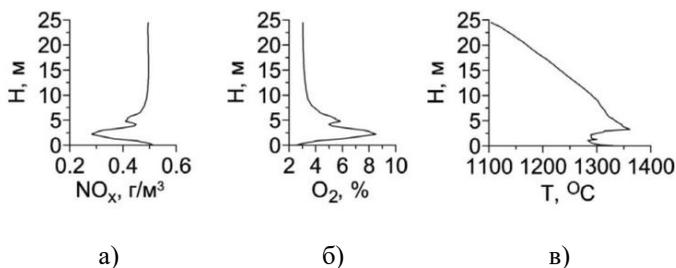
Рисунок 2 – Геометрические характеристики топки котла БКЗ–320–140

Однокорпусная П-образная котельная установка БКЗ–320–140ПТ имеет симметричное расположение поверхностей нагрева. БКЗ-320-140 сконструирован для сжигания бурых углей Канско-

Ачинского бассейна [3]. Топочная камера представляет собой полуоткрытый тип с жидким шлакоудалением. На отметке + 11400 "Пережим", отделяющий камеру охлаждения от камеры горения, образуется фронтальным и задним экранами. Два сообщающихся восьмигранных предтопка, из которых состоит камера горения (рисунок 2), оснащены четырьмя прямоточными горизонтально щелевыми горелками, а также футерованными экранами. Оси горелок каждого предтопка направлены по касательной к воображаемой окружности диаметром 980 мм и наклонены к поду на 15°. В «перезиме» осуществляется сброс в топку слабо запыленного сушильного агента из системы пылеприготовления через сбросные горелки.

С помощью пакета прикладных программ FIRE 3D (а именно аэродинамических и температурных полей) были произведены расчеты распределения концентрации оксидов азота, температуры и концентрации кислорода по высоте топки, основываясь на избыток воздуха при нагрузке 300 т/час [4].

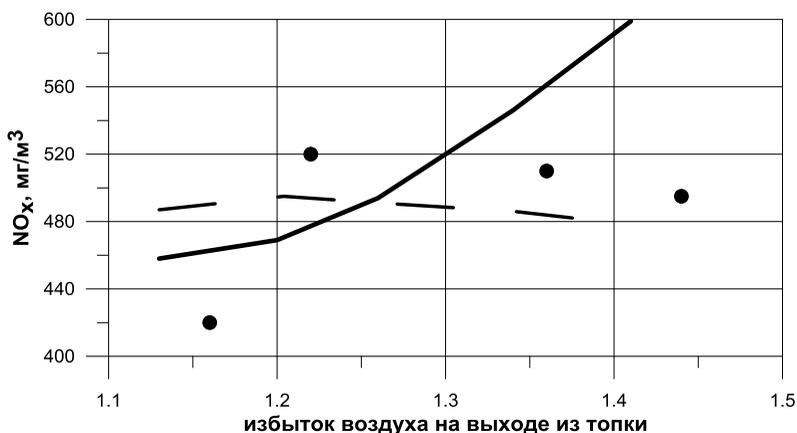
На рисунке 3 представлено типичное распределение концентраций оксидов азота и кислорода, интегральных значений температуры по высоте топочной камеры.



а – концентрации оксидов азота, б – концентрации кислорода, в – температуры факела

Рисунок 3 – Распределение средних в горизонтальных сечениях по высоте топочной камеры

Анализируя рисунок 3, на котором выполнено распределение данных по высоте топки, наблюдаем, что область максимальных температур (до 1400 °С) и генерация оксидов идет в относительно небольшой зоне выше уровня горелочного пояса, процесс горения топлива завершается на высоте около 10 м.



- – экспериментальные измерения [3], — — — – расчет с помощью ППП FIRE-3D-NO_x [2], — — — – расчет по методу [5]

Рисунок 4 – Изменение концентрации оксидов азота в зависимости от избытка воздуха

При тестировании различных котлов, неоднократно было доказано, что уменьшение концентрации кислорода в зоне горения топлива влечет за собой подавление генерации термических и топливных оксидов азота. Тем не менее, использование этого метода может привести к возникновению коррозии и недожога.

Исходя из полученных данных, представленных рисунке 4, видно, что средняя погрешность между экспериментальными данными и численными результатами равна приблизительно 2 %, что является хорошим показателем и обуславливает эффективность и адекватность в предсказании генерации оксидов азота. При изменении значения избытка воздуха от 1,13 до 1,41 концентрация оксидов азота изменяется от 470 мг/м³ до 520 мг/м³. Данные возможно использовать для обеспечения минимизации вредных выбросов с дымовыми газами. Так, например, выяснено, что самым оптимальным путем внутритопочного снижения образования NO является реализация ступенчатого сжигания. При проектировании и усовершенствовании котельных агрегатов возможно представление, в перспективе, пакета Fire3D [4] как постпроцессора с использованием вариативной проработки конструктивных решений.

Список литературы

1. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов [Текст] / В.Р. Котлер. – М. : Энергоатомиздат, 1987. - 141 с.
2. Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during coal combustion // American Institute of Chemical Engineers Journal. – 1982. – V. 28. – № 2. – P. 302–310.
3. Будилов О.И. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции [Текст] / О.И. Будилов, А.С. Заворин. – Томск.: Издательство «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.
5. Безгрешнов А.Н. Расчет паровых котлов в примерах и задачах [Текст] / А.Н. Безгрешнов, Ю.М. Липов, Б.М. Шлейфер. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.

ПОДХОДЫ К КОМПЬЮТЕРНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕДАЧИ И АЭРОДИНАМИКИ В КОТЛАХ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ

О. М. Кокшарев, А. С. Заворин, А. В. Гиль
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»
г. Томск

Ключевые слова: циркулирующий кипящий слой, котельные агрегаты, компьютерное моделирование, горение, циклоны и системы возврата золы.

Аннотация: Моделирование различных процессов в котлах с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) таких как горение, аэродинамика, гидродинамика и т. д. связано с решением систем дифференциальных уравнений с большим числом неизвестных. Для моделирования процессов, происходящих в ЦКС, учеными разрабатываются и внедряются различные методы, использующие те или иные решатели для вычислительной гидрогазодинамики. Методы моделирования данных систем

могут быть разделены на практико-ориентированные и теоретические модели. В теоретических моделях, моделирование гидрогазодинамики производится на основе доступных теоретических принципов, таких как мультифизические модели Эйлера-Эйлера с применением кинетической теории потока частиц. В практико-ориентированных моделях, или инженерных моделях, теория упрощается и корректируется эмпирическими зависимостями для того, чтобы увеличить скорость расчета и аппроксимировать результаты численного моделирования с результатами натуральных измерений. Данная работа состоит из нескольких частей и направлена на оценку применимости тех или иных математических алгоритмов для получения качественного компьютерного моделирования процессов в энергетических котлах с ЦКС. В данной статье представлен обзор основных методов моделирования данных систем, а также рассмотрены результаты моделирования методом Эйлера-Лагранжа на основе пакета прикладных программ ANSYS FLUENT.

Установки и агрегаты с кипящим и циркулирующим кипящим слоем изначально широко распространились в химической промышленности. Данная технология часто применяется в химических реакторах для сжигания, газификации, неоднородно катализируемого синтеза и крекинга. Однако, с ужесточением экологических требований, в последние десятилетия ЦКС нашел свое применение в энергетике. Понимание и качественное моделирование гидрогазодинамики ЦКС имеет жизненно важное значение для прогнозирования процессов переноса частиц, тепло- и массообмена, а также химических реакций, протекающих в подобного вида систем. Эти знания используются в научных исследованиях многофазных потоков, а также при проектировании и оптимизации промышленных объектов.

Для моделирования процессов, происходящих в ЦКС, учеными были разработаны и внедрены различные методы, использующие те или иные решатели для вычислительной гидрогазодинамики. Эти подходы можно разделить, основываясь на пространственных и временных масштабах, учитываемых в моделях, представленные авторами в работе[1].

Они также могут быть выделены на основе представления твердой фазы. Модели Лагранжевых или дискретных частиц (или фаз) отслеживают частицы или их группы. В Эйлеровых или двухжидкостных моделях твердая фаза рассматривается как непрерывная. В них усреднено движение частиц, что позволяет выполнять моделирование на сетках с ячейками гораздо более крупными, чем диаметры частиц. Та-

кие модели могут применяться для моделирования крупномасштабных систем.

Следует также отметить, что точность аппроксимации должна быть предусмотрена как при взаимодействиях жидкости и твердого тела, так и для твердотельных взаимодействий. Взаимодействия жидкости и твердого тела реализуются с использованием коэффициентов сопротивления [2]. Для твердотельного взаимодействия применяется кинетическая теория потока частиц (KTGF) [2, 3], которая позволяет определить напряжения в твердом теле, возникающих от потока частиц и их столкновений. Однако, в плотных областях важное значение приобретают напряжения вязкости, и для учета этих явлений необходимо предусмотреть дополнительные функции замыкания.

В данной статье авторами при моделировании рассматривается гибридный метод Эйлера-Лагранжа. Объектом исследования является котел с ЦКС, оборудованный двумя циклонами для захвата частиц. Топочная камера оборудована 4 устьями подачи частиц на тыльной стене и 10 устьями вторичного дутья на фронтальной стене в 2 яруса (рисунок 1). Также представлен схематический чертеж объекта исследования (рисунок 2).

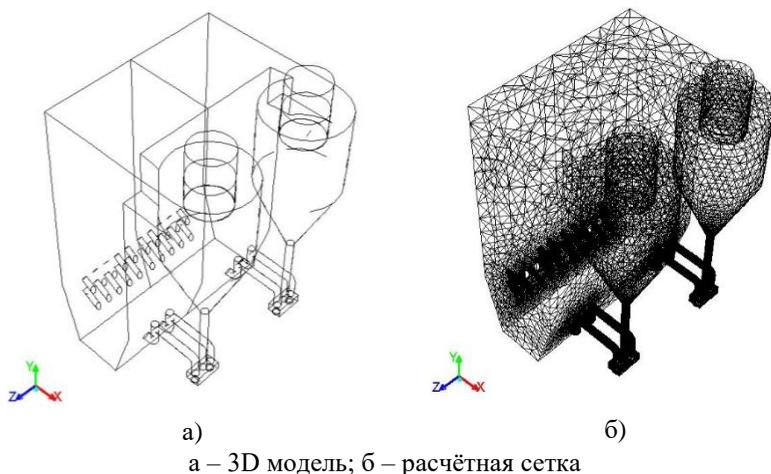


Рисунок 1 – Объект исследования

Основными показателями адекватности математической модели являлись: скорость распределения частиц и воздуха, профили давления, объем частиц и характер его распределения по объему котла, кон-

турные графики температуры, а также контурные графики теплового потока, которые сравнивались с аналогичными исследованиями.

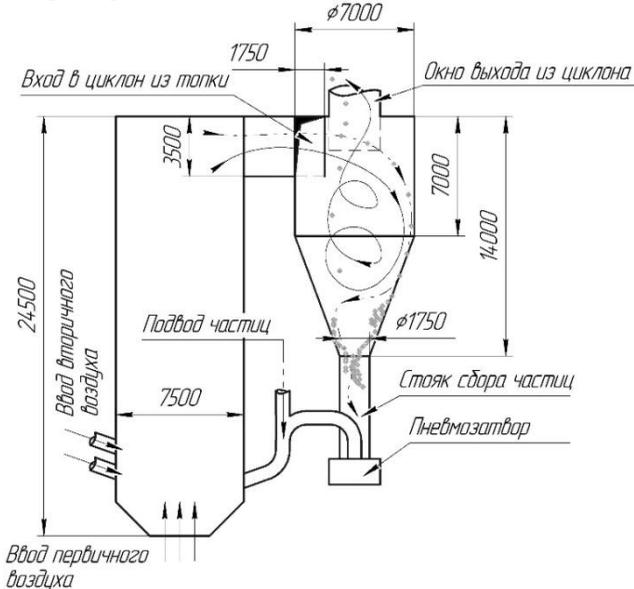
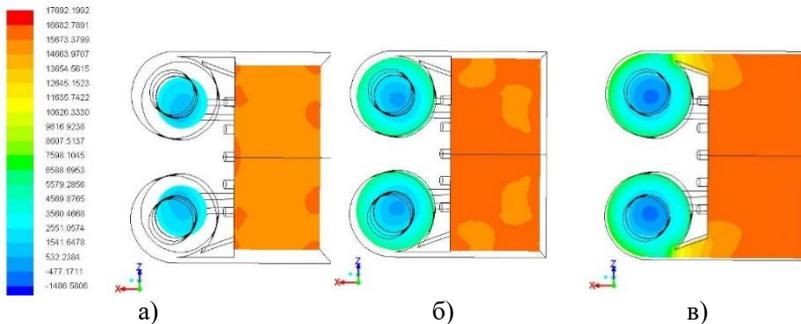


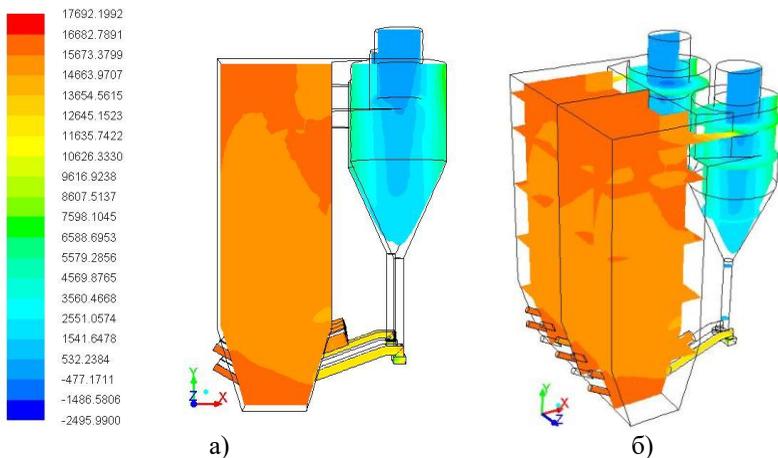
Рисунок 2 – Схематический чертеж котла с ЦКС (дымовые газы и воздух – сплошная линия, поток частиц – прерывистая линия)

На рисунках 3 и 4 изображены контурные графики распределения давления.



а – на высоте 15 м; б – на высоте 20 м; в – на высоте 23 м

Рисунок 3 – Контурный график распределения статического давления по объему котла с ЦКС (Па) в горизонтальных сечениях



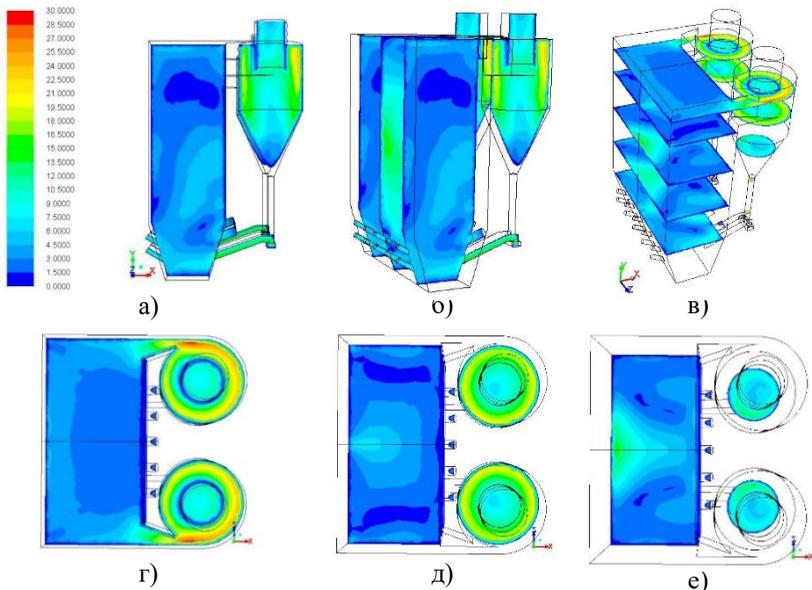
а – вертикальное сечение на расстоянии 2,75 метров от боковой стены;
б – изометрическая проекция с горизонтальными и вертикальными сечениями

Рисунок 4 – Контурный график распределения статического давления по объему котла с ЦКС (Па)

На рисунке 5 изображены контурные графики распределения скорости. Согласно картине распределения скорости видно, что максимальный скоростной поток вдоль центральной линии фронтальной стены. Чем выше горизонтальное сечение – тем более равномерной становится скорость по сечению топки. На входе в циклон скорость максимальна и чем ниже сечение, тем меньше скорость в циклоне. Также по мере снижения по горизонтальному сечению в циклоне происходит выравнивание скоростей.

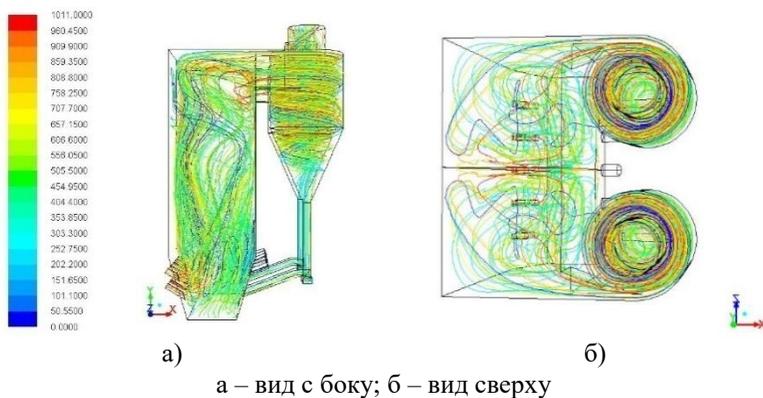
Скорость флюидизации при 850 °С составляет 4,6 м/с, но максимальная скорость в топке принимается с запасом, равная 7 м/с. Как видно из рисунка 5, средняя скорость движения среды по сечению топочной камеры составляет 7 м/с. На входе в циклон скорость движения частиц составляет 20 м/с. И в том, и в другом случае рассчитанные величины методом математического моделирования совпадают с осредненными литературными данными.

Рассмотрим подробнее траекторию движения частиц внутри объема котла. На рисунке 6 представлен график траектории частиц с цветовой индексацией по номеру частицы. Для наглядности картинка часть частиц исключена из демонстрации.



а, б – распределение в вертикальных плоскостях на расстоянии 2,75 метров от боковых стен; в – распределение в горизонтальных плоскостях (5, 10, 15, 20 и 23 метра соответственно); г, д, е – распределение скорости на отметке 23, 20 и 15 метров соответственно

Рисунок 5 – Контурный график распределения скорости по объему котла с ЦКС (м/с)



а – вид с боку; б – вид сверху

Рисунок 6 – Траектория движения частиц с цветовой индексацией по номеру частицы

Основной задачей парового котла является обеспечение номинальной температуры теплоносителя на выходе. Для этого необходимо обеспечить определённые объёмы тепловыделения, достаточные для нагрева теплоносителя и не допускающие чрезмерного перегрева поверхностей нагрева. Главной характеристикой для оценки тепловыделения принято считать плотность теплового потока. Распределение тепловых потоков по стенам представлено на рисунке 7. Как видно из соответствующего графика, в топочной камере наблюдается равномерное тепловыделение по всему объёму, характерное для котлов с ЦКС и равное в среднем 175 кВт/м^2 .

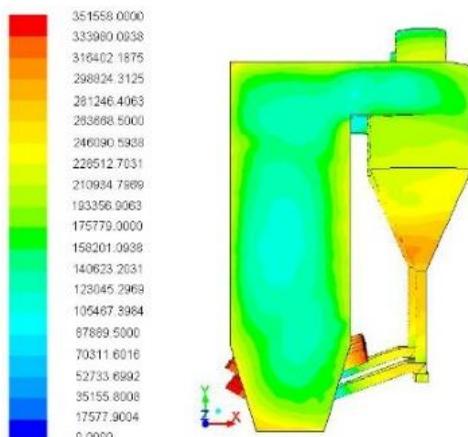


Рисунок 7 – Контурный график теплового потока (Вт/м^2)

Список литературы

1. Myöhänen, K., & Hyppänen, T. (2011). A three-dimensional model frame for modelling combustion and gasification in circulating fluidized bed furnaces. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 9, A25. <http://dx.doi.org/10.1515/1542-6580.2571>
2. Gidaspow, D. (1994). *Multiphase flow and fluidization: Continuum and kinetic theory descriptions*. Boston: Academic Press.
3. Lun, C. K. K., Savage, S. B., Jeffrey, D. J., & Chepurniy, N. (1984). Kinetic theories for granular flow: Inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *Journal of Fluid Mechanics*, 140, 223–256.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ СХЕМЫ СЖИГАНИЯ КОТЛА П-59 ЭНЕРГОБЛОКА 330 МВт

А. В. Копань, Ф. А. Серант, А. И. Цепенюк, А. М. Глушаков
ООО «ЗиО-КОТЭС»
г. Новосибирск

Ключевые слова: низкоэмиссионная схема сжигания, оксиды азота, NO_x , Канско-Ачинский угольный бассейн, котел П-59, CFD-моделирование.

Аннотация: Представлены основные результаты реконструкции котла П-59 ст. № 2 филиала ПАО «ОГК-2» Рязанской ГРЭС с целью перевода на сжигание непроектных Канско-Ачинских углей, повышения мощности и уменьшения выбросов оксидов азота в атмосферу. Приведены основные технико-экономические и экологические показатели работы котла. Оценена эффективность примененных методов проектирования и внедрения схемы низкоэмиссионного сжигания твердого топлива.

Актуальным вопросом в проектировании систем сжигания крупных пылеугольных котлов на сегодняшний день остается внедрение технических решений основанных на достижениях современной науки и техники, обеспечивающих наилучшие сочетания критериев надежности, эффективности и экологической безопасности.

Одним из эффективных способов борьбы с образованием оксидов азота (NO_x) при горении твердого топлива в топочной камере котла на сегодняшний день является организация ступенчатой низкоэмиссионной схемы факельного сжигания [1]. Решением такого рода задач занимается компания ООО «ЗиО-КОТЭС».

Одним из совместных с АО «Подольский машиностроительный завод» проектов по организации низкоэмиссионного сжигания твердого топлива является реконструкция котла П-59 (Пп-990-25-545/545 БТ) энергоблока ст. №2 филиала ПАО «ОГК-2» - Рязанская ГРЭС.

Проектным рабочим топливом являлся низкосортный подмосковный бурый уголь с $Q_i^f = 2530$ ккал/кг, $A^f = 22,4$ %, $W^f = 34$ %. На котле применена система пылеприготовления с прямым вдуванием с молотковыми мельницами и твердым шлакоудалением.

Проектным характеристикам подмосковный уголь соответствовал в первые годы эксплуатации. В дальнейшем калорийность угля снижалась, зольность увеличивалась. Сжигание высокозольного угля ухудшенного качества в течение длительного периода привело к ин-

тенсивному износу газоходов котла, лопаток дымососов, увеличению присосов в топку и конвективные шахты, что привело к ограничениям по тяге [2].

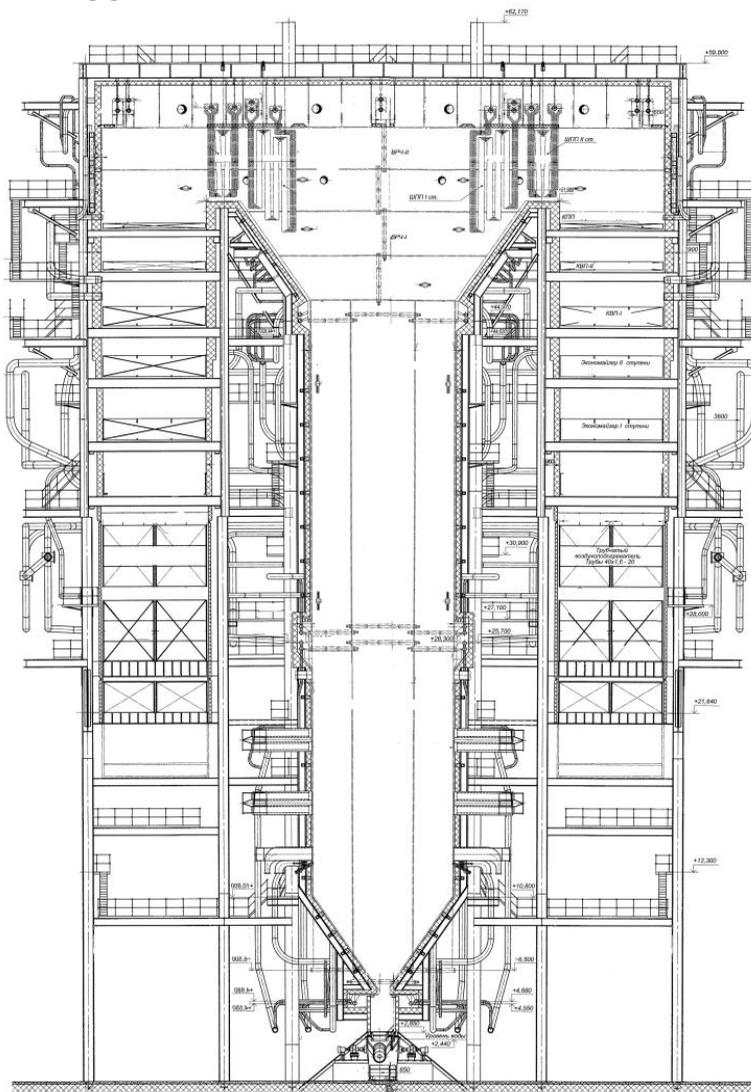


Рисунок 1 – Продольный разрез котла П-59

В 1990 г. была проведена перемаркировка энергоблоков 300 МВт первой очереди станции на энергоблоки 280 МВт по причине поставок топлива ухудшенного состава по сравнению с проектным.

В связи с изменением топливной политики на Рязанской ГРЭС с 1992 г. начали сжигать угли Канско-Ачинского угольного бассейна (таблица 1). Однако в процессе эксплуатации при работе котлов на Канско-Ачинских углях выявился ряд проблем при нагрузках энергоблоков выше 260 МВт.

На рисунке 1 представлен продольный разрез котла П-59.

Таблица 1 – Характеристики углей, сжигаемых на котле П-59 Рязанской ГРЭС

Наименование	Обозначение	Вид топлива		
		подмосковный	пересловский	березовский
Низшая теплота сгорания (раб.), ккал/кг, кДж/кг	Q_i^r	2530 10586	4400 18410	3740 15659
Влага гигроскопическая, %	$W_{ги}$	7–8	9–12	12–16
Выход летучих: на горючую массу, %	V^{daf}	47	46,6	45,7
Влага, %	W^r	34	28,6	34,8
Зола, %	A^r	22,4	5,1	3,7

Особенно обострились эти проблемы с поступлениями на Рязанскую ГРЭС с начала 2000 года больших количеств березовского угля. Сжигание этого угля с минимальными примесями подмосковного угля, на котлах П-59 привело к усиленному шлакованию конвективных поверхностей нагрева котлов и вынужденному снижению нагрузки блоков до 200 МВт при кампании непрерывной работы 2–4 недели. Для повышения бесшлаковочной нагрузки блоков в 2000–2001 годах Рязанской ГРЭС совместно с ОРГРЭС была определена близкая к оптимальной структура эксплуатационной смеси березовского и подмосковных углей (70–80 % березовского и 20–30 % подмосковного углей), при которой удалось увеличить бесшлаковочную нагрузку блоков до 250–260 МВт [2].

Для повышения бесшлаковочной мощности котлов на Канско-Ачинских углях в 2001 году руководством Рязанской ГРЭС было принято решение о модернизации топки котла ст. №2 по проекту ООО «Политехэнерго» г. Санкт-Петербург, с использованием низкоэмиссионной вихревой технологии сжигания углей. Объем модернизации включал:

- наклон горелочных устройств вниз на 20° верхнего яруса и нижнего яруса на 30°;
- модернизацию сепараторов мельниц для углубления помола пыли;
- монтаж специальных дефлекторно-сопловых устройств нижнего дутья;
- отключение с помощью заглушек каждого второго пылепровода верхнего яруса, с увеличением скорости потока до 36 м/с [3].

Выполненная реконструкция по схеме НТВ позволила повысить нагрузку блока до 260–280 МВт и улучшить экологические показатели котла, однако, при этом возникли ограничения, связанные с абразивным износом труб холодной воронки и пылепроводов, увеличением механического недожога топлива и др [4].

В связи со всеми вытекающими проблемами и ограничениями продолжились работы по реконструкции котла с доведением мощности блока до 330 МВт.

В период с 2011 по 2016 год была разработана, спроектирована и успешно внедрена схема низкоэмиссионного сжигания твердого топлива для котла П-59 ст. №2.

При определении технических решений важным аспектом являлось математическое моделирование процессов горения в топочной камере котла в программном комплексе ANSYSFLUENT на 100 %, 70 % и 50%-ной нагрузках при различном сочетании работающих мельниц при сжигании переясловского угля Канско-Ачинского бассейна.

CFD-моделирование позволило определить поля скоростей и температур во всем объеме топочной камеры, концентрации реагентов и оксидов азота, концентрации дискретной фазы, выгорание топлива (механический недожог), а также характер изменения средних температур и концентрации газов в сечениях и по высоте топки (рисунки 2, 3) [4].

Математическое моделирование процессов горения в топочной камере котлоагрегата П-59 подтвердило, что все необходимые условия надежной и экономичной работы котла при минимальных выбросах оксидов азота (NO_x) на различных нагрузках и при различном сочетании работающих механизмов, обеспечиваются в полном объеме.

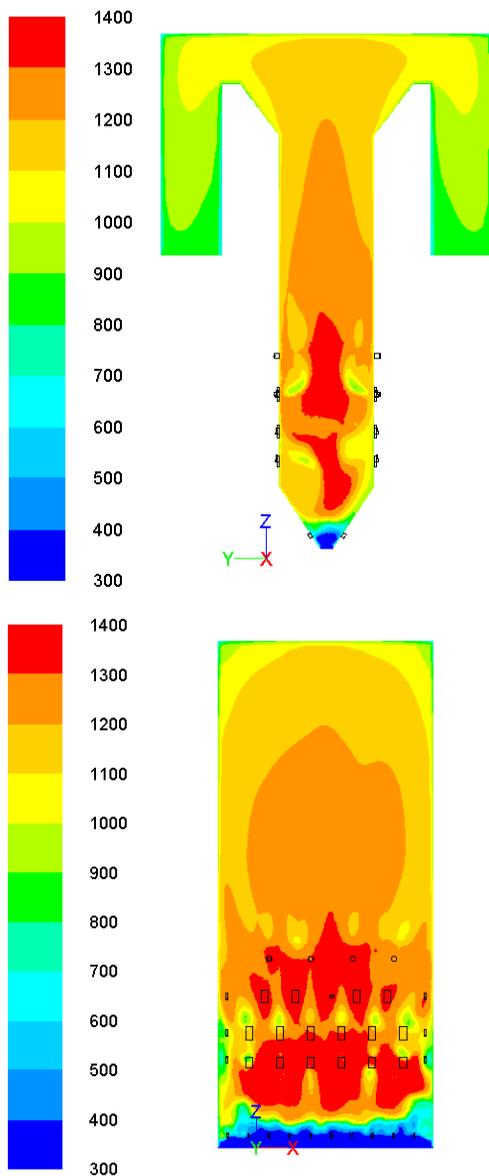


Рисунок 2 – Поле температур в осевых сечениях при номинальной нагрузке котла, °С

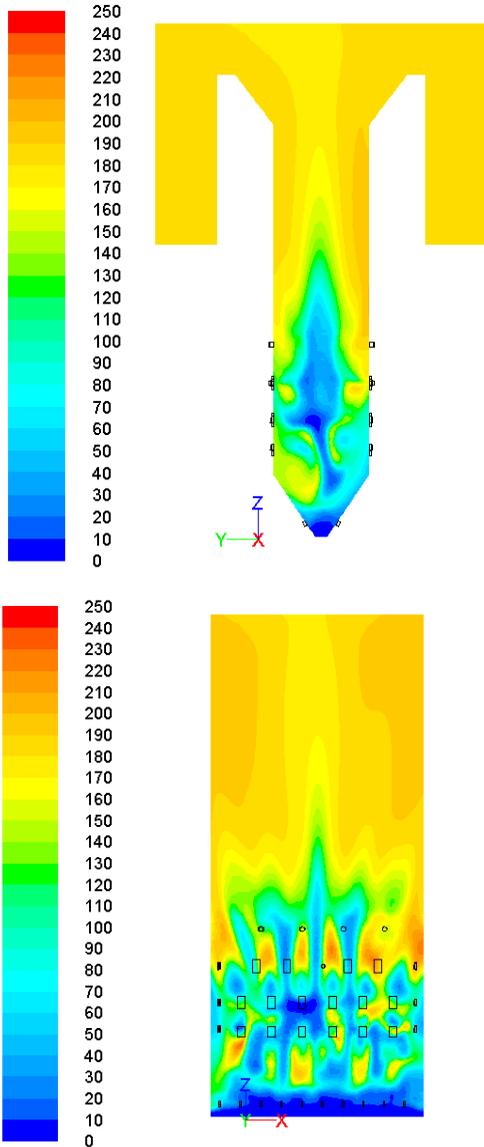


Рисунок 3 – Поле концентрации оксидов азота в осевых сечениях при номинальной нагрузке котла, ppm

Основываясь на результаты CFD-моделирования были приняты следующие технические решения (рисунок 4):

- организация вертикальной ступенчатости сжигания с подачей части вторичного воздуха через сопла третичного дутья ОФА и через сопла нижнего дутья. Нижнее дутье так же позволяет дожечь топливо в провале, защитить скаты холодной воронки и более полно использовать поверхности нагрева холодной воронки по всей высоте;
- ввод газов рециркуляции в топочную камеру за счет применения газовой сушки топлива, что снижает температуру факела и выравнивает температурные поля;
- организация горизонтальной ступенчатости за счет сохранения подачи вторичного воздуха в неработающие горелки, в том же количестве, что и в работающие;
- рассредоточенная по высоте топочной камеры подача пылевоздушной смеси и вторичного воздуха, что позволяет растянуть зону горения и снизить температуру в факеле;
- увеличение количества ярусов с 2 до 3 позволяет снизить теплонапряжение в ярусах горелок до допустимых (нормативных) значений и создать благоприятные условия по уменьшению шлакования поверхностей нагрева. Кроме того, повышение доли топлива на первые два яруса позволяет снизить избытки воздуха на выходе из каждого яруса, что важно по условию снижения оксидов азота (NOx);
- организация пристенного дутья снижает температуру газов вблизи фронтных и тыловых экранов топки, защищая их от шлакования и высокотемпературной коррозии в восстановительной среде;
- увеличение поверхности ширмового пароперегревателя 1-й ступени на 50 %, для снижения температуры газов перед конвективным пароперегревателем.

Завершающим этапом реконструкции котла П-59 ст. №2 филиала ПАО «ОГК-2» Рязанская ГРЭС была режимная наладка. Целью режимно-наладочных испытаний являлось определить экспериментальным путем эффективность внедренных технических решений по модернизации схемы сжигания котла.

По результатам режимной наладки были определены основные технико-экономические и экологические показатели котла. В таблице 2 представлены характеристики полученные опытным путем специалистами компании ООО «ЗиО-КОТЭС» в период испытаний, проводимых до реконструкции котлоагрегата и после организации ступенчатой низкоэмиссионной схемы факельного сжигания, а также расчетные значения по проекту реконструкции [2].

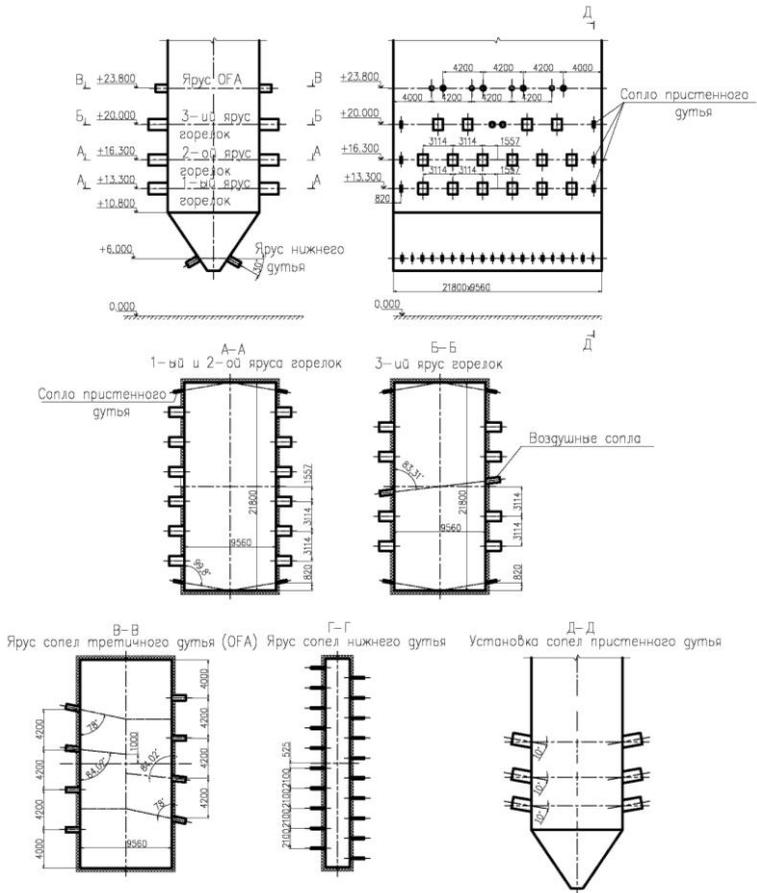


Рисунок 4 – Компонка топочно-горелочных устройств и воздушных сопел

Таблица 2 – Техничко-экономические и экологические показатели котла

Наименование	Экспериментальные данные			Расчетные значения по проекту реконструкции
	До реконструкции	После реконструкции	После выполнения доводочных мероприятий	
Номинальная нагрузка энергоблока, МВт	270	330	330	330
Номинальный массовый расход свежего пара, т/ч	890	990	990	990
Температура свежего / промежуточного пара за котлом, °С	545/545	545/545	545/545	545/545
Присосы в газовый тракт котла, %	68,0	70,3	25,0	25,0
Потери с химическим недожогом, q_3 , %	0,2	0	0	0
Потери от наружного охлаждения, q_5 , %	0,42	0,19	0,19	0,25
1	2	3	4	5
КПД котла брутто, $\eta_{бр}$, %	84,66	86,42	90,34	90,06
Концентрация выбросов оксидов азота (NO_x) при н.у. и $O_2=6\%$, мг/нм ³	380	385	370	370

Основным отрицательным фактором работы котла, влияющим на его основные технико-экономические и экологические параметры, является работа пылеприготовительных установок. Пыль, полученная за мельницей до выполнения доводочных мероприятий, имела неудовлетворительное качество: повышенное содержание влаги (более чем 1,5–2 раза выше расчетного значения); наличие грубой фракции $R_{1000} = 6–8\%$, при относительно низкой общей тонине помола $R_{90} = 40\%$,

что вызвано проскоком пыли через сепаратор, связанным с неполной реализацией всех проектных решений [2].

Стоит отметить, что значение тепловых потерь с уходящими газами несколько превышает расчетные. В первую очередь это связано с высокой температурой уходящих газов, на которую влияет целый ряд факторов таких как:

- повышенные перетоки горячего воздуха помимо 3-го хода ТВП-I и как следствие не эффективная его работа;
- высокая температура холодного воздуха перед воздухоподогревателем;
- сверхнормативные присосы в газовый тракт котла.

Для повышения экономических показателей и эффективности работы котла требуется выполнить мероприятия по доводке пылеприготовительного оборудования и уплотнения газового тракта.

Несмотря на выявленные недостатки, связанные с неполной реализацией проектных решений и монтажными недоделками, в целом проведенную реконструкцию можно считать успешной. Котел надежно работает на номинальной нагрузке 330 МВт.

Во всем проверенном эксплуатационном диапазоне нагрузок ($0,55-1,0 D_{\text{ном}}$) на котле обеспечиваются проектные показатели по производительности и параметрам пара.

Топочный режим котла обеспечивает устойчивое воспламенение и выгорание переясловского угля без видимого шлакования экранов топки и конвективных поверхностей нагрева во всем диапазоне нагрузок.

Температура газов на выходе из топки составляет $950-1000$ °С, что из опыта эксплуатации котлов при сжигании топлив с аналогичным составом обеспечивает беспшлаковочную работу поверхностей нагрева, расположенных в конвективной шахте.

Содержание оксидов азота за дымососами находится на уровне $370...385$ мг/м³ при работе в 7-, 8-мельничном режиме с содержанием кислорода в режимном сечении $O_2 = 3,5$ % при номинальной нагрузке котла [2].

Также применяемые новые методы проектирования (CFD-моделирование) низкоэмиссионных схем сжигания твердого топлива позволили наиболее точно определить необходимые технические решения для обеспечения экономичной работы котла с низкими выбросами NO_x .

Список литературы

1. Бабий, В. И. Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах [Текст] / В. И. Бабий, В. Р. Котлер, Э. Х. Вербовецкий // Энергетик. – 1996. – № 6. – С. 8 – 12.
2. Технический отчет по результатам режимно-наладочных и балансовых испытаний котла П-59 энергоблока ст. №2 филиала «ОГК-2» – Рязанская ГРЭС. Новосибирск: ООО «ЗиО-КОТЭС», 2016.
3. Модернизация котла П-59 (ст. №2) с переводом на низкоэмиссионное вихревое сжигание бурых углей. Рабочий проект. ООО «Политехэнерго». СПб. : 2001.
4. Технический отчет. Восстановление проектных показателей работы котельной установки с котлом П-59 энергоблока ст. №2 ОАО «ОГК-6» Рязанской ГРЭС. Технические решения по системе сжигания и топочно-горелочным устройствам. Рекомендации и схема установки обдувочных устройств для очистки топки и ширмо-конвективных поверхностей от золошлаковых отложений. Новосибирск: ЗАО «ЗиО-КОТЭС», 2012.
5. Методические указания по проведению эксплуатационных испытаний котельных установок для оценки качества ремонта. РД 153-34.1-26.303-98
6. Трёмбовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок [Текст] / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М., Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
7. Инструкция по обеспечению взрывобезопасности топливопадов и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. СО 153-34.03.352-2003.
8. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. (СО 153-34.20.501-2003 взамен РД 34.20.501-95).
9. AnsysFluent 12. TheoryGuide, 2009.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПЛОСКОФАКЕЛЬНОЙ ГОРЕЛКИ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

А. И. Корябкин, А. Э. Лейкам, Н. С. Шестаков, К. А. Григорьев
ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова»
(ОАО «НПО ЦКТИ»)
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: горелка плоскофакельная комбинированная, промышленные газы, численное моделирование.

Аннотация: Проведен анализ выбора модели при численном моделировании. Сформулирована задача для моделирования комбинированной плоскофакельной горелки с последующим моделированием горелки в топочном объеме в целях оптимизации процесса смесеобразования в горелке и анализа процесса теплообмена.

Энергетическое использование горючих газов, образующихся в результате металлургических производств (доменный и коксовый газы) и газификации твердых топлив (сланцев, углей, древесины и др.), является важным звеном в организации безотходного производственного цикла и политике энергосбережения. Как правило, горючие газы промышленных производств утилизируют в котельных установках. Внутрицикловая газификация твердых топлив нацелена на повышение эффективности энергетических установок и является одним из перспективных направлений в энергетике.

Однако при снижении качества и резко переменном составе горючих газов возникают осложнения: возможны проблемы с воспламенением и устойчивостью факела, снижается надёжность горелочных устройств и эффективность котельных установок, повышается уровень вредных выбросов.

Одним из традиционных направлений деятельности ОАО «НПО ЦКТИ» является исследование, разработка и внедрение высокоэффективных низкотоксичных горелочных устройств на различных видах топлива для энергетических и промышленных котлов [1–6]. В последние годы получили развитие новые конструкции малотоксичных горелок, которые показали хорошие результаты на природном (экологически чистом) газе [2, 3, 5]. Однако использование аналогичных горелок на низкосортных и «грязных» газах требует дополнительных исследований.

Сегодня разработку новых образцов техники невозможно представить без использования компьютерного моделирования. Численный эксперимент позволяет обосновать технические решения при модернизации действующих установок и создании новых конструкций на стадии проектирования.

Цель данной работы – разработка расчётной модели комбинированной плоскофакельной горелки, моделируемой в топочном объёме, для численного исследования влияния конструктивных и режимных параметров горелочного устройства на смесеобразование, а также анализа происходящих при этом топочных процессов, и оценки экономических и экологических показателей котельной установки.

В качестве объекта исследований выбрана модернизированная комбинированная плоскофакельная горелка (см. рисунок 1), опробованная при техническом перевооружении котла ТП-87 Западно-Сибирской ТЭЦ [6].

Подача воздуха осуществляется по двум каналам (верхнему и нижнему), расположенным навстречу друг к другу под углом 60° . На каждом подводе воздуха устанавливается регулирующий клапан.

Подача доменного газа разделена на два сопла. В верхнюю часть горелки подаётся до 70% доменного газа. В нижнюю часть горелки подаётся до 30% доменного газа. Сопла доменного газа в плоскофакельной горелке располагаются внутри воздушных сопел.

Подача коксового газа осуществляется через прямоточно-вихревой насадок в центральную часть горелки между верхним и нижним воздушными соплами.

Природный газ подаётся в нижнюю часть горелки через газораздающий насадок.

Подача доменного газа в таких горелках осуществляется в верхнее и нижнее сопла с возможностью перераспределения расходов. Подача горячего воздуха осуществляется в верхнее или нижнее сопло в зависимости от сжигаемого топлива. Такая подача топлива и воздуха позволяет поддерживать перегрев пара на оптимальных параметрах.

При сжигании природного газа предусмотрено использование рециркуляции дымовых газов, которые подаются в нижний объём топki котла [4].

Расчётные модели. Для численного моделирования выбран программный код ANSYS Fluent [7], широко используемый для подобных задач.

Геометрическая модель горелочного устройства предварительно создаётся в программе SolidWorks и затем импортируется в ANSYS,

где преобразуется в формат неструктурированной тетраэдрической сетки.

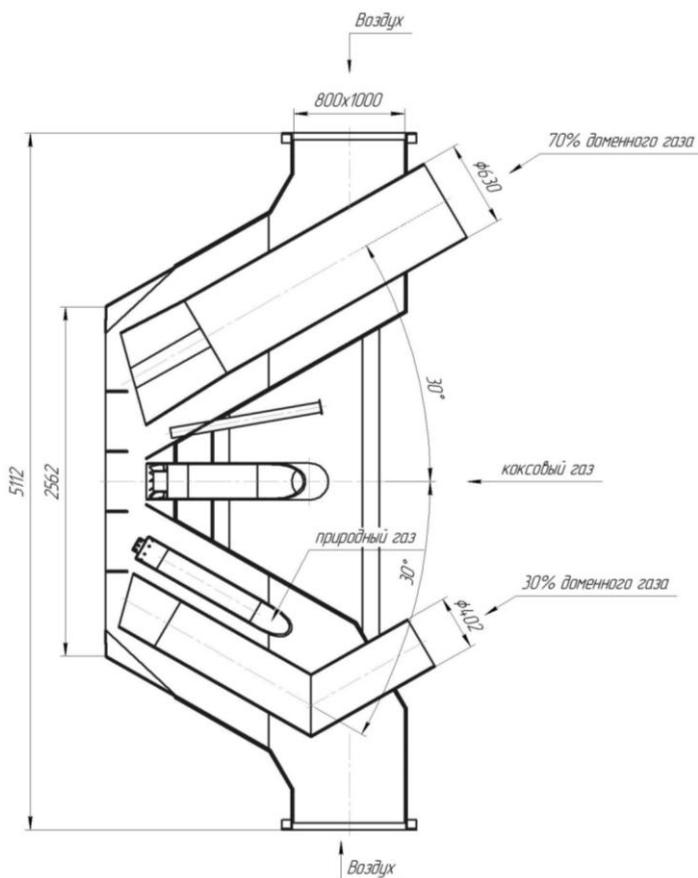


Рисунок 1 – Комбинированная плоскофакельная горелка

При математическом моделировании турбулентных потоков используют систему уравнений Навье – Стокса, в состав которой входит уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

и уравнения движения:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}. \quad (2)$$

Уравнения движения (2) представляют собой три уравнения переноса для проекций скорости, где ρ – плотность, u – скорость, p – давление, τ_{ij} – компоненты тензора сдвиговых напряжений, t – время, x – координата.

При решении практических задач, связанных с теплообменом, горением и распространением примесей требуется определение не только векторного поля скорости, но и скалярных полей, например, температуры или концентрации. Здесь необходимо учитывать обобщённую скалярную величину ϕ , в уравнении переноса которой отсутствуют источники и стоки (предполагается несжимаемое течение с постоянной плотностью):

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \phi}{\partial x_j} = \frac{\partial \rho}{\partial x_j} \rho D \frac{\partial \phi}{\partial x_j}, \quad (3)$$

где D – коэффициент диффузии, m^2/c . Скаляр ϕ , поле которого описывается уравнением (3), называют пассивным, поскольку его значение не влияет на остальные характеристики среды.

Классификация существующих подходов к численному моделированию турбулентных течений основана на степени детальности разрешения турбулентных пульсаций и их энергетического спектра. С учётом этого признака выделяют три основных подхода (DNS, LES и RANS). Кроме того, существуют и гибридные подходы. Общая классификация и взаимосвязь методов показана на рисунке 2.

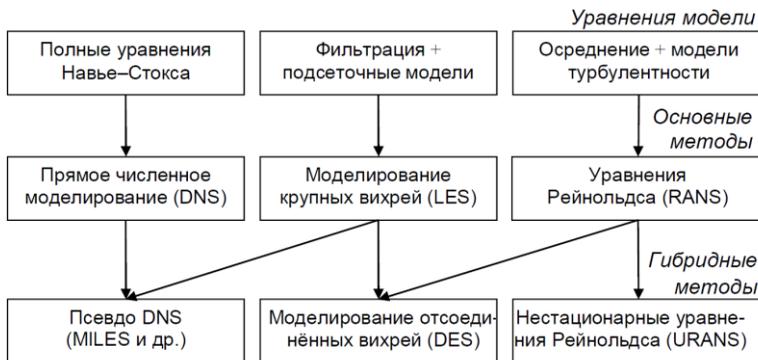


Рисунок 2 – Классификация методов моделирования турбулентных течений [8]

Для моделирования турбулентного потока необходимо выбрать модель турбулентности, задачей которой является определение рейнольдсовых напряжений.

Следует отметить, что ни одна модель турбулентности не является универсальной и удобной для решения любых задач. Выбор модели зависит от физических характеристик потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов и количества времени, затрачиваемого для моделирования. Для выбора оптимальной модели следует рассмотреть особенности и ограничения моделей, предложенных пакетом AnsysFluent.

Модели RANS предлагают наиболее экономичный подход для вычисления сложных турбулентных промышленных потоков. Типичными примерами таких моделей являются $k - \epsilon$ или $k - \omega$ модели в их различных формах. Эти модели сводят задачу к решению двух дополнительных уравнений переноса и вводят турбулентную вязкость для вычисления рейнольдсовых напряжений. Существуют также и более сложные модели RANS, которые решают индивидуальное уравнение для каждого из шести независимых напряжений Рейнольдса непосредственно (модель RSM) плюс уравнение масштаба. Модели RANS подходят для многих инженерных приложений и обычно обеспечивают требуемый уровень точности.

Модель Спаларта – Аллмареса (SA) является относительно простой моделью, которая рассматривает единственное уравнение переноса, записанное либо для кинетической энергии турбулентности, либо для турбулентной вязкости. Модель SA дает хорошие результаты при расчетах безотрывного обтекания и для течений с небольшими зонами отрыва. Однако при расчёте течений с большими зонами отрыва, свободных сдвиговых течений и затухающей турбулентности модель Спаларта – Аллмареса недостаточно точна.

Модели с двумя уравнениями являются исторически наиболее широко используемыми моделями турбулентности в промышленном компьютерном моделировании. Они решают два уравнения переноса и моделируют рейнольдсовы напряжения с использованием подхода вихревой вязкости. Надежность, экономичность и разумная точность для широкого спектра турбулентных потоков объясняют его популярность в симуляции промышленного потока и теплопередачи.

Наиболее распространённой моделью данного класса является модель $k - \epsilon$. В ней для расчёта турбулентной вязкости используется формула Колмогорова – Прандтля, а для k и ϵ решают уравнения переноса.

Стандартная версия $k - \varepsilon$ модели позволяет рассчитать некоторые турбулентные течения с точностью, достаточной для многих инженерных расчётов. Однако существуют определённые типы течений, где модель $k - \varepsilon$ приводит к большим ошибкам: закрученные потоки, течения с большими неблагоприятными (способствующими отрыву) градиентами давления, течения с большими зонами отрыва, осесимметричные струи и некоторые другие.

Для данной задачи была выбрана RNG $k - \varepsilon$ модель турбулентности, опыт применения которой показал улучшенное (по сравнению со стандартной версией $k - \varepsilon$ модели турбулентности) согласование расчётных и экспериментальных данных для некоторых типов течений, в частности при относительно малых числах Рейнольдса, большой кривизне линий тока и в областях больших деформаций поля скорости. Также данная модель справедлива для полностью развитого турбулентного течения с горением, т. е. для высоких чисел Рейнольдса, когда прямое влияние вязкости на структуру турбулентности пренебрежимо мало [8]. Окно выбора параметров модели RNG $k - \varepsilon$ приведено на рисунке 3.

В качестве модели горения была выбрана Non-premixed combustion (NPC). Её главное отличие от модели Premixed combustion – это топливо и окислитель, поступающие в зону реакций двумя отдельными потоками. Это позволяет значительно упростить модель и свести химическую кинетику процесса к одному параметру – фракции смеси. Фракция смеси, обозначаемая f , это массовая доля, происходящая из потока топлива, другими словами, это массовая доля горючих составляющих топлива (например, С, Н и т. д.) в общем потоке. Для нескольких потоков справедливо следующее уравнение:

$$f_{тл1} + f_{тл2} + \dots + f_{тлi} + f_{ок} = 1,$$

где $f_{тл1}$ – фракция смеси первого (основного) потока топлива, $f_{тл2}$ – фракция смеси вторичного потока топлива (при его наличии), $f_{тлi}$ – фракция смеси i -го потока топлива (при его наличии), $f_{ок}$ – фракция смеси потока окислителя.

Такой подход удобен, поскольку атомарные элементы сохранены в химических реакциях. Тем не менее, доля смеси представляет собой сохраняющееся скалярное значение, поэтому основное транспортное уравнение не имеет источниковых членов. Горение упрощено до проблем смешивания, трудности возникают только с нелинейными скоростями главных реакций.

Основным достоинством этой модели является Probability Density Function (PDF), которая учитывает попадание определённой величины

в заданные интервалы [8] и связана с компонентами топливного потока и распределением температур в зоне протекающих реакций.

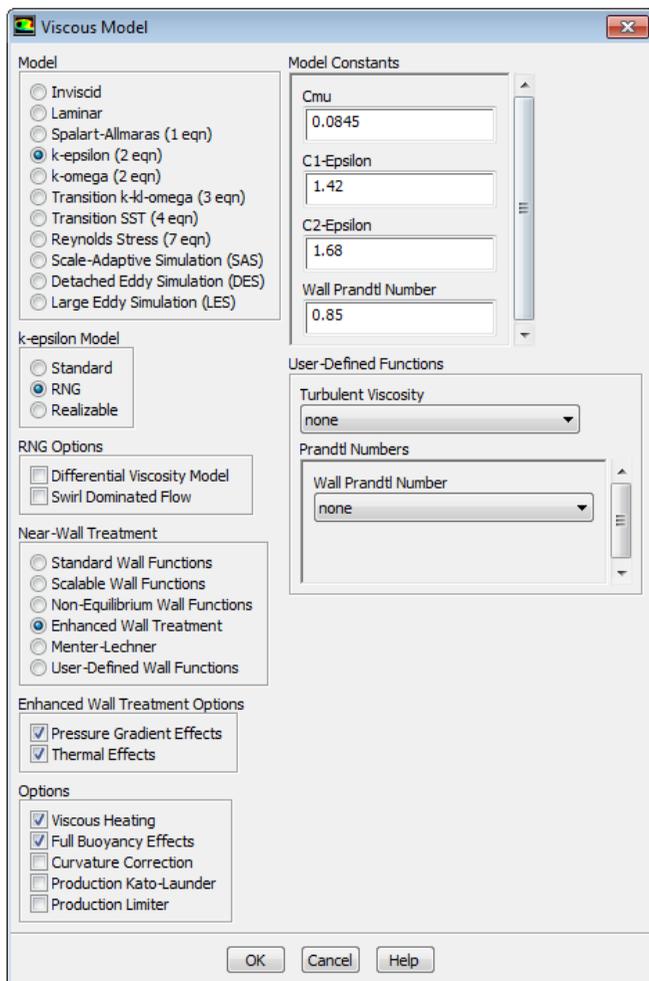


Рисунок 3 – Окно параметров модели RNG $k - \epsilon$

Для расчета лучистого теплообмена выбран метод Discrete Ordinates (DO), который позволяет решать уравнение лучистого теплообмена Radiative Transfer Equation (RTE) методом конечного числа дискретных углов, каждый из которых ассоциирован с направляющим вектором \mathbf{s}_i (рисунок 4), зафиксированных в глобальной картезианской системе ко-

ординат. Модель DO решает столько транспортных уравнений, сколько существует направлений векторов; метод решения идентичен тем, которые используются для уравнений потоков и энергии.

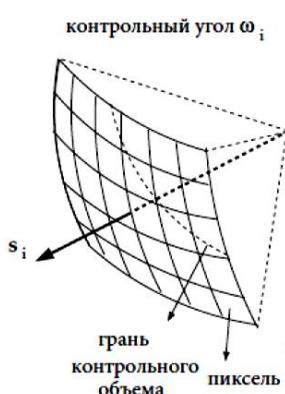


Рисунок 4 – Метод угловой дискретизации

Верификацию математических моделей предполагается выполнить на экспериментальных данных, полученных при испытании котла ТП-87 после технического перевооружения.

Заключение. В результате данной работы планируется получить верифицированную комплексную математическую модель, адекватно описывающую физику протекающих процессов в горелке и топке котла и позволяющую анализировать и совершенствовать (оптимизировать) как конструктивные, технологические и схемные решения, так и режимные параметры горелочно-сопловых и топочных устройств.

Список литературы

1. Шатиль А.А. Топочные процессы и устройства [Текст] / А.А. Шатиль. – СПб.: АОТ «НПО ЦКТИ», 1997. – 184 с.
2. Шестаков Н.С. Модернизация горелочных устройств энергетических котлов на газообразных и жидких топливах / Н.С. Шестаков, А.Э. Лейкам, В.А. Асосков, А.П. Сорокин // Теплоэнергетика. 2012. № 3. – с. 31–37.
3. Лейкин В.З. Современные технологии эффективного сжигания топлива на ТЭС / В.З. Лейкин, Н.С. Шестаков // Надёжность и безопасность энергетики. 2013. № 3 (22). – с. 20–27.

4. Бреус В.И. Разработка и совершенствование горелочных устройств для утилизации доменного и других низкокалорийных топлив в энергетических котлах металлургических производств / В.И. Бреус, С.П. Тупицын, Н.С. Шестаков, О.А. Коржикова, А.Э. Лейкам, О.Н. Федотова, Г.Ф. Чебакова // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 3 (83). – с. 45–47.

5. Бреус В.И. Разработка новых топочно-горелочных устройств для энергетики и промышленности / В.И. Бреус, Н.С. Шестаков, А.Э. Лейкам, А.П. Сорокин, К.Ю. Огоньков, В.А. Агеев, К.А. Григорьев, Г.Ф. Чебакова, О.А. Коржикова, С.П. Тупицын // Надёжность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. № 4. – с. 291–297.

6. Бреус В.И. Исследование, разработка и внедрение высокоэффективных низкотоксичных горелочных устройств на различных видах топлива для мощных энергетических и промышленных котлов / В.И. Бреус, Н.С. Шестаков, А.Э. Лейкам, А.И. Корябкин // Перспективы развития новых технологий в энергетике России : материалы II Международной научно-технической конференции (Москва, 26–27 октября 2017 г.) / под общ. ред. С.В. Сафронова. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – с. 111–124.

7. AnsysFluent 14.0: TheoryGuide.

8. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие [Текст] / А.Ю. Снегирев. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕВОДА БКЗ-220-100Ф НА НЕПРОЕКТНОЕ ТОПЛИВО

К. И. Мальцев, А. В. Гиль

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»

г. Томск

Ключевые слова: уголь, котел, топка, тепловой расчет.

Аннотация: В данной статье приведены результаты поверочного расчета теплового баланса котла и топочной камеры БКЗ-220-100Ф на различных нагрузках при сжигании проектного и принятых к замещению непроектных углей. Также проведен анализ теплотехнических характеристик проектного и принятых к замещению непроектных углей. И на основании обобщенных данных сделаны выводы о возможности перевода котла БКЗ-220-100Ф на непроектное топливо.

В качестве объекта исследования выбран котлоагрегат БКЗ-220-100Ф, используемый на Артемовской ТЭЦ и спроектированный для организации сжигания бурого угля Артемовского месторождения. Котлоагрегат БКЗ-220-100Ф (Е-220-100) изготовлен Барнаульским котельным заводом и предназначен для факельного сжигания пылевидного твердого топлива (рисунок 1).

Котел однобарабанный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией, однокорпусной, имеет П-образную компоновку и предназначен для работы с уравновешенной тягой.

Топка с твердым шлакоудалением, открытого типа, прямоугольного сечения с размерами 6656×9536 мм. Стены топочной камеры полностью экранированы трубами 60 мм. Верхняя часть заднего экрана для улучшения обтекания газами ширм имеет аэродинамический выступ.

Топочная камера выполнена в газоплотном исполнении. В нисходящем газоходе расположены водяной экономайзер и воздухоподогреватель, которые установлены в рассечку.

Топочная камера снабжена четырьмя двойными пылевыми щелевыми горелками, расположенными по углам топочной камеры и направлены по касательной к окружности диаметром 1330 мм.

В качестве непроектного топлива рассмотрены каменные угли Липовецкого и Ургальского месторождений. В таблицах 1–3 приведены показатели, принятые по данным [1, 2].

Содержание влаги и золы не является достаточной мерой энергетической ценности топлива, так как различные топлива с одинаковым содержанием золы или влаги могут иметь неодинаковую теплоту сгорания. Более полными являются приведенные характеристики, отражающие содержание влаги, золы и серы в топливе, отнесенное к единице низшей теплоты сгорания его рабочей массы. Таким образом, по приведенным характеристикам можно сравнивать различные топлива в сопоставимых единицах [3].

По приведенным характеристикам все угли являются малосернистыми ($S^{np} < 0,055$ (%·кг)/МДж). Липовецкий и ургальский угли относятся к маловлажным ($W^{np} < 0,7$ (%·кг)/МДж), среднезольным ($A^{np} = 0,5 \div 2,5$ (%·кг)/МДж). Артемовский уголь по приведенным характеристикам является высоковлажным ($W^{np} = 1,89 \div 6$ (%·кг)/МДж) и высокозольным ($A^{np} = 1,89 \div 6$ (%·кг)/МДж). Все угли являются высокорекреакционными ($V^{daf} = 42,3 \div 50$ %). Ургальский уголь относится к первой группе по взрывоопасности ($1 < K_r < 1,5$), артемовский и липовецкий относятся ко второй группе по

взрывоопасности ($1,5 < K_T < 3,5$). Липовецкий уголь обладает средней сопротивляемостью к размолу ($1,15 < K_{\text{ло}} < 1,4$), артемовский и ургальский относятся к трудноразмалываемым углям ($K_{\text{ло}} < 1,15$) [3,4].

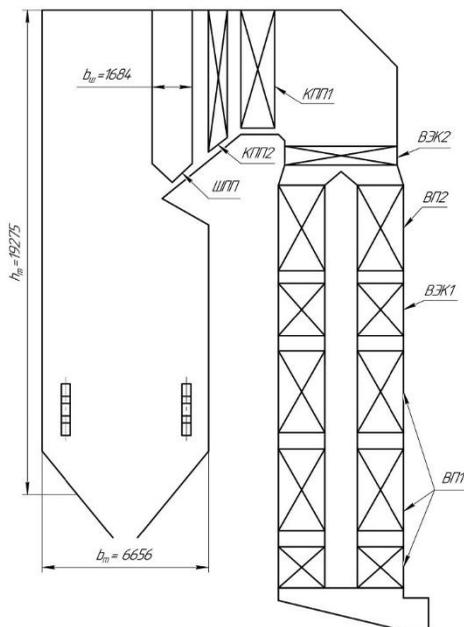


Рисунок 1 – Эскиз парового котла БК3-220-100Ф

Таблица 1 – Технические характеристики топлива

Уголь	Приведенные характеристики, (%·кг)/МДж			Коэффициент размолотоспособности $K_{\text{ло}}$	Критерий взрываемости K_T
	$W^{\text{пр}}$	$A^{\text{пр}}$	$S^{\text{пр}}$		
Артемовский ЗБ	2,065	2,971	0,0269	0,95	1,7-1,8
Липовецкий Д	0,484	2,227	0,0238	1,2	2,3
Ургальский Г	0,274	1,801	0,0192	0,84	1

Таблица 2 – Общие характеристики топлива

Показатель	Артемовский ЗБ	Липовецкий Д	Ургальский Г
Теплота сгорания на рабочую массу Q_1^r , МДж/кг	11,14	16,527	18,95352
Зольность A^r , %	33,1	36,8	34,128
Влажность W^r , %	23	8	5,2
Содержание, %:			
серы S^r	0,3	0,3864	0,364
углерода C^r	29,4	41,676	48,416
азота N^r	0,6	0,4968	0,728
водорода H^r	2,5	3,258	3,58
кислорода O^r	11,1	9,384	0,274
Выход летучих на го- рючую массу V^{daf} , %	50	50	42,3
Температурные показа- тели золы, °С:			
начало деформации t_a	1320	1400	1200
начало размягчения t_b	>1500	>1500	1480
начало жидкоплавкого состояния t_c	>1500	>1500	1500
Химический состав золы на буссульфатную массу, %:			
оксид кремния SiO_2	60,6	65,9	64,4
оксид алюминия Al_2O_3	25,8	29,6	25,1
оксид титана TiO_2	1,0	1,0	1,2
оксид железа Fe_2O_3	4,5	0,8	4
оксид кальция CaO	1,7	0,5	1,5
оксид магния MgO	1,7	0,9	1,0
оксид калия K_2O	3,4	0,8	1,6
оксид натрия Na_2O	1,3	0,5	1,2

Состав золы везде кислый ($\sum K / \sum O > 1$). Зола артемовского и ургальского углей классифицируется как зола топлива битуминозного типа ($Fe_2O_3 > CaO + MgO$), а зола липовецкого угля ($Fe_2O_3 < CaO + MgO$) – как зола топлива лигнитного типа [5].

Все угли обладают низкой склонностью к образованию железистых ($P_{Fe} < 0,4$), сульфатно-кальциевых отложений ($P_{Ca} < 0,42$) и к образованию отложений на основе активных щелочей ($P_{Na} < 0,42$)[4].

Таблица 3 – Загрязняющие и шлакующие свойства топлива

Уголь	P_{Fe}	P_{Na}	P_{Ca}	$\Sigma K / \Sigma O$	R_{st}	$t_{шл}$
Артемовский ЗБ	0,17	0,39	0,16	10,79	0,54	1030
Липовецкий Д	0,0	0,37	0,16	35,741	0,47	1068
Ургальский Г	0,1	0,32	0,15	17,113	0,38	1095

Проведен тепловой поверочный расчет теплового баланса котла и топочной камеры согласно [3]. Полученные результаты представлены в таблицах 4–6. Сходимость расчетов контролировалась по значениям температуры на выходе из топочной камеры, а также тепловосприятлию поверхностей нагрева.

Таблица 4 – Результаты расчетов (топливо – артемовский уголь марки ЗБ)

Параметр	Относительная нагрузка котла D, %		
	100	75	50
Расход угля В, кг/с	14,404	10,761	7,145
КПД котла η_k , %	91,46	91,817	91,247
Температура питательной воды $t_{п.в.}$, °C	215	215	215
Температура горячего воздуха $t_{г.в.}$, °C	342	322	312
Температура газов на выходе из топки v''_T , °C	1027,036	938,5	813,236
Температура уходящих газов за котлом $v_{ух.}$, °C	130	122,7	115

Таблица 5 – Результаты расчетов (топливо – липовецкий уголь марки Д)

Параметр	Относительная нагрузка котла D, %		
	100	75	50
Расход угля В, кг/с	9,885	7,385	4,891
КПД котла η_k , %	92,417	92,779	92,668
Температура питательной воды $t_{п.в.}$, °С	215	215	215
Температура горячего воздуха $t_{г.в.}$, °С	380	360	325
Температура газов на выходе из топki v''_T , °С	1099,317	1003,813	866,99
Температура уходящих газов за котлом v_{yx} , °С	130	122,7	110

Таблица 6 – Результаты расчетов (топливо – ургальский уголь марки Г)

Параметр	Относительная нагрузка котла D, %		
	100	75	50
Расход угля В, кг/с	8,42	6,29	4,17
КПД котла η_k , %	92,413	92,779	92,579
Температура питательной воды $t_{п.в.}$, °С	230	230	230
Температура горячего воздуха $t_{г.в.}$, °С	375	355	327
Температура газов на выходе из топki v''_T , °С	1110,552	1046,811	934,276
Температура уходящих газов за котлом v_{yx} , °С	130	122,7	112

Согласно полученным результатам можно сделать вывод, что сжигание рассматриваемых непроектных углей в котлах БКЗ-220-100Ф принципиально возможно.

Также были проведены расчеты на пониженных нагрузках, составляющие 75 и 50 % от номинальной паропроизводительности. Их результаты показали уменьшение температуры на выходе из топki с уменьшением нагрузки (рисунок 2).

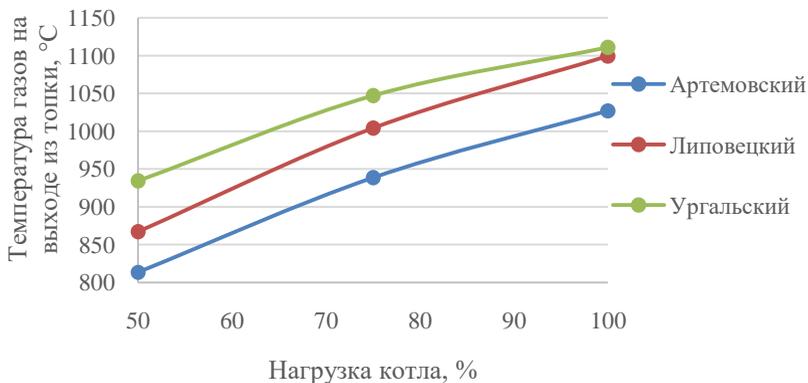


Рисунок 2 – Зависимость температуры газов на выходе из топки от нагрузки котлоагрегата

Значения КПД котла при сжигании рассматриваемых непроектных углей достаточно близки, а зависимости $\eta_k = f(D)$ качественно схожи. Во всех случаях они имеют максимум в диапазоне $D = 75\%$ (рисунок 3).

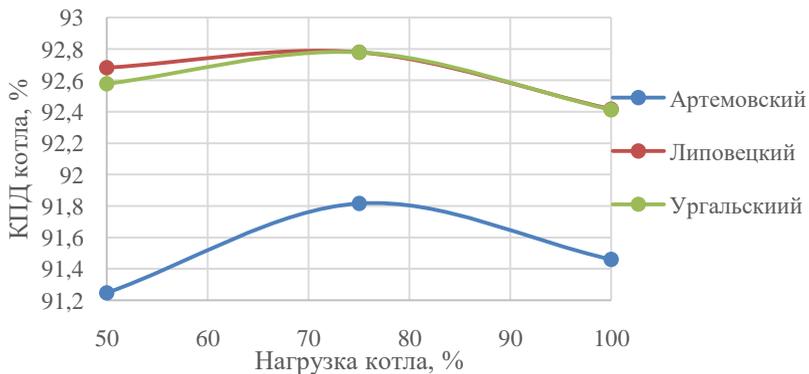


Рисунок 3 – Изменение КПД в зависимости от нагрузки котла

При уменьшении нагрузки, КПД сначала возрастает из-за снижения потери теплоты с уходящими газами (q_2), вследствие понижения температуры уходящих газов. Но при $D = 50$ % потери от механического недожога возрастают в 1,5 раза [6] и существенно увеличиваются потери тепла в окружающую среду (q_5). При дальнейшем снижении нагрузки после прохождения максимума КПД котла – снижается. В целом вид полученных зависимостей $\eta_k = f(D)$ является типичным для пылеугольных котлов [7].

В заключении следует отметить, что анализ состава топлива показал схожесть теплотехнических характеристик проектного и рассматриваемых непроектных углей. Выполненные расчетные исследования показали возможность работы котлов БКЗ-220-100Ф на рассматриваемых непроектных углях с учетом незначительной реконструкции котла.

Список литературы

1. Богомолов В.В. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справочник / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьев, А.Н. Алехнович и др. Челябинск: УралВТИ, 2004. – 304 с.
2. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание 3-е, переработанное и дополненное [Текст]. СПб. : Издательство НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
3. Хзмаян Д.М. Теория горения и топочные устройства. Учеб. пособие для студентов высш. учеб. заведений [Текст] / Д.М. Хзмаян, Я.А. Каган. М., «Энергия», 1976. – 488 с.: ил.
4. Алехнович А.Н. Характеристики и свойства энергетических углей [Текст] / А.Н. Алехнович. – Челябинск: Цицеро, 2012. – 549 с.: ил.
5. Жихар Г.И. Котельные установки тепловых электростанций: учебное пособие [Текст] / Г.И. Жихар. – Минск: Вышэйшая школа, 2015. – 523 с.: ил.
6. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: учебное пособие [Текст] / И.Д. Фурсов // Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 4-е издание, переработанное и дополненное – Барнаул. : Изд-во АлтГТУ, 2017. – 300 с.
7. Сидельковский Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий: Учебник для вузов [Текст] / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юрнев. – 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЛА

А. Н. Мацаков, А. В. Волчков, Е. Б. Жуков
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
г. Барнаул

Ключевые слова: древесное топливо, процесс горения, топочная камера, влажность.

Аннотация: Древесное топливо является возобновляемым источником энергии и одним из самых древних видов топлива. Эффективное и полное сгорание является необходимым условием использования древесины в качестве экологически приемлемого вида топлива.

Древесное топливо содержит 65–85 % летучих веществ на горючую массу, его термическое разложение начинается в диапазоне температур 150–250 °С. Кроме этого, древесное топливо имеет низкое содержание серы и азота [1].

Горение древесного топлива протекает в гетерогенном режиме. Процесс горения состоит из четырех основных стадий:

- 1 – сушка топлива и нагрев до температуры начала выхода летучих веществ;
- 2 – воспламенение летучих веществ и их выгорание;
- 3 – нагрев коксового остатка до воспламенения;
- 4 – выгорание горючих веществ из кокса.

На практике эти стадии накладываются одна на другую.

Рассматривая процесс горения древесного топлива в топочной камере котла, можно выделить три основные зоны. Первая зона, в диапазоне температур от 20 до 140 °С с потерей массы около 10 % , характеризуется испарением влаги. Дальнейший нагрев топлива приводит к разрушению органических соединений, сопровождающийся выходом летучих веществ. Максимальная потеря массы (от 45 до 60 % [2]) происходит в диапазоне температур от 250 до 400 °С. Этому диапазону соответствует вторая зона – зона активного пиролиза. Третья зона находится в диапазоне температур от 400 до 750 °С и характеризует процесс пассивного пиролиза, когда происходит длительное термическое разложение коксового остатка. Присутствие кислородфункциональных групп в коксовом остатке говорит о его типичной пористой структуре и более высокой реакционной способности. Только

пористые материалы могут самостоятельно поддерживать тлеющее горение. К таким материалам и относится древесное топливо [2].

Таким образом, процесс горения древесного топлива зависит от различных характеристик топлива. В основном это влажность, плотность, пористость, содержание летучих компонентов и размеров сжигаемых частиц. Различные виды древесного топлива в значительной степени отличаются по плотности материала, из которого и состоит топливо. Также имеются и значительные различия между твердыми и мягкими породами древесины. Древесина твердых пород, например березы, имеет высокую плотность, что оказывает непосредственное воздействие на характеристики горения топлива [3].

Специфические особенности процессов горения древесного топлива связаны с его влажностью. Повышенная влажность топлива приводит к уменьшению теплоты сгорания, к снижению температуры горения, создает проблемы при попытке достижения высокой эффективности сжигания и влияет на выбор технологии сжигания.

Древесное топливо обычно сжигается в котлах с вихревыми или словесными топочными камерами. Предпочтение отдается вихревым топкам, т. к. мелкие частицы не будут попадать в систему шлакоудаления, что приведет к уменьшению механического недожога. Вихревые топки обеспечивают оптимальный процесс горения с минимальными выбросами от неполноты сгорания, поддерживают высокую температуру горения, оптимально смешивают сжигаемое топливо с воздухом.

Список литературы

1. Бородин Р.Г. Использование кородревесных отходов в водогрейных котлах / Р.Г. Бородин, Н.Ю. Супрун, В.А. Устинов, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова // Современные тенденции котлостроения : материалы I Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2017. – с. 10–14.

2. Марьяндышев П.А. Термогравиметрическое исследование процесса термического разложения и горения древесного топлива, углей и гидролизного лигнина / П.А. Марьяндышев, А.А. Чернов, Е.И. Попова, В.К. Любов // Современные наукоемкие технологии. – 2015. – № 5. – с. 26–31.

3. Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов [Текст] / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденов. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 224 с.

4. Меняев К.В. Методы испытания углей : учебное пособие [Текст] / К.В. Меняев ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 63 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

**К. В. Меняев¹, Е. Б. Жуков¹, А. С. Лебедев², Д. Р. Таймасов¹,
Н. С. Гаврин³**

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова», г. Барнаул

²ООО «Летерм» г. Минск, Республика Беларусь

³ООО «Белэнергомаш-БЗЭМ», г. Белгород

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

Аннотация: В статье рассматриваются способы повышения технико-экономических и экологических показателей котлов малой и средней мощности, путем реализации вихревого способа сжигания альтернативных видов топлива (лузга, щепка, кородревесные отходы). Проведен анализ существующих технологий сжигания твердых видов топлива из растительной биомассы, а также выявлен ряд проблем при сжигании легких парусных частиц.

Одной из тенденций в малой и средней энергетике является использование низкосортных углей или совместное сжигание низкосортных углей и твердых видов топлива из растительной биомассы (кородревесных отходов) [1].

Под растительной биомассой, традиционно используемой в малой и средней энергетике, понимаются отходы сельскохозяйственной деятельности, такие как лузга подсолнечника, овса, гречихи. Данные виды отходов уже нашли широкое применение в энергетической отрасли в котлах сравнительно небольших мощностей. Другим видом растительной биомассы, наиболее распространённым в энергетике России и стран ближнего зарубежья, являются отходы деревообрабатывающей промышленности.

Сжигание в топках котлов большой и средней мощности измельченных древесных и растительных отходов представляет существенную проблему как из-за трудности удержания лёгких 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 возникает опасность периодических пожаров в дымоходах и золоуловителях котельной установки по мере накопления в них недожога. Существующие технологии совместного сжигания низкосортных топлив, таких как бурый уголь, высокозольный каменный уголь или высоковлажные кородревесные отходы (КДО), имеют целый ряд недостатков, не позволяющих полностью использовать заложенную в топливе энергию.

За рубежом все упомянутые виды топлива применяются в достаточно большом количестве. Таким образом решаются и экономическая и экологическая проблемы. В России же необходимые для этого технологии пока только развиваются.

Применение в энергетике альтернативных видов топлив осложняется недостаточной изученностью свойств этих топлив и процессов при их сжигании в топочных устройствах.

Древесные отходы (КДО) можно отнести к экологически чистым видам топлива, минимально загрязняющим окружающую среду. В древесном топливе практически отсутствует сера, а содержание азота не превышает 1 % от массы, то есть при сжигании древесины низка эмиссия окислов азота и серы. На основе практического опыта предложено для определения границ горения использовать треугольник (рисунок 1) с предельными значениями: горючих – более 25 %, влаги – менее 50 %, золы – менее 60 % по массе. Как видно на рисунке 1, зона автогенного горения заштрихована и в поле треугольника внесены данные, полученные для некоторых горючих отходов.

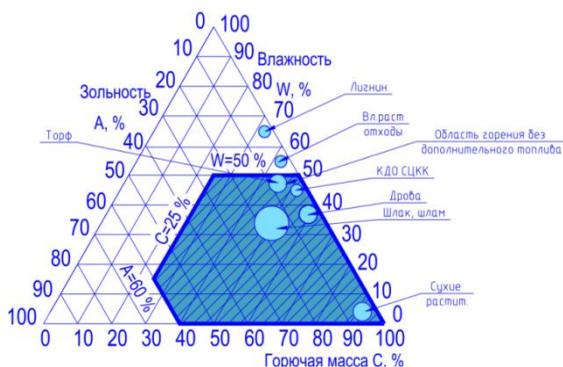


Рисунок 1 – Треугольник Таннера (такие отходы как КДО, торф и щепа могут утилизироваться прямым сжиганием, без дополнительной инициации)

Из рисунке 1 видно, что такие отходы как КДО, торф и щепа могут утилизироваться прямым сжиганием, а лигнин и влажные растительные и древесные отходы требуют специальных мер по организации их огневой утилизации или должны перерабатываться, например, в биобрикеты. Древесное топливо является низкотемпературным топливом. Существенным его недостатком может является высокая влажность, которая иногда достигает 60–70 %.

В целом КДО и растительные отходы можно отнести к высокоэффективным энергетическим биотопливам. Даже при достаточно высокой влажности древесина является вполне качественным топливом, практически не уступающим по теплоте сгорания торфу или сланцам ($Q_{\text{берез}} = 12304$ кДж/кг). По другим свойствам – зольности ($A = 0,5 \div 1,5$ %), содержанию серы ($S = 0,155$ %) и т. п. – древесина является лучшим из всех видов твёрдых топлив.

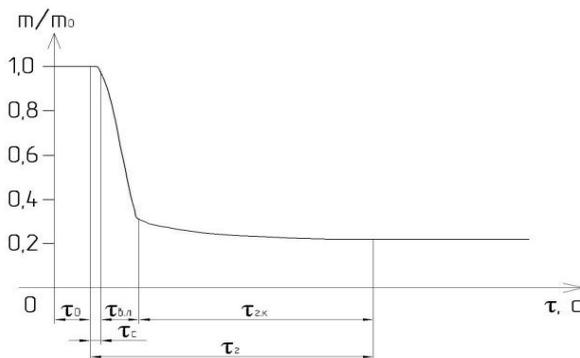
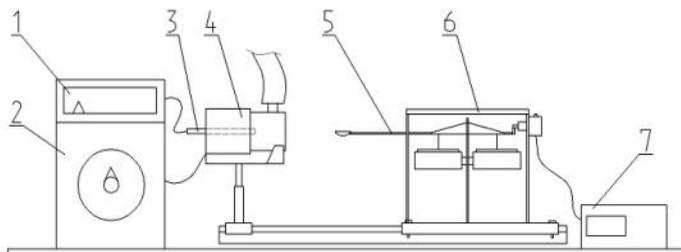
Несмотря на то, что древесные отходы являются легкодоступным и не требующим больших затрат на добычу и на специальные технические разработки источником энергии, использование ихна практике в качестве энергетического топлива связано с рядом существенных проблем. Существует целый ряд технологий сжигания древесных отходов и каждый из них имеют свои недостатки, не позволяющих полностью использовать заложенную в древесном топливе энергию.

Для решения проблемы организации более устойчивого горения потребовалось более детальное изучение кинетических характеристик всех стадий процесса горения КДО, начиная с прогрета и сушки и заканчивая выгоранием коксового остатка (рисунок 2).

В лаборатории кафедры «Котло- и реакторостроение» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова (АлтГТУ) проводились эксперименты по сжиганию одиночных частиц топлива на специальной установке для определения динамики термического разложения топлива. По результатам экспериментов определялись скорость выхода летучих веществ из частицы, время сушки частицы, время выхода летучих веществ и время горения углерода в топливе (рисунок 2). Эксперименты проводились с различными частицами массой 0,5–1,5 г при температурах 600–900 °С [2]. На рисунке 3 показана динамика термического разложения древесного топлива полученная на данной установке.

В специальной установке были выполнены исследования процессов на образцах древесины и получены графические зависимости изменения массы частицы от времени пребывания её в высокотемпературной зоне, (рис. 3). Исследования процессов сушки проводились на приборе «Дериватограф», были использованы березовые опилки.

Характер горения древесины из-за выхода и горения летучих в начальной стадии воспламенения существенно отличается от стадии горения кокса. Процесс выхода летучих, пиролиз, является суммой ряда последовательно и параллельно протекающих реакций. Состав и количество выделившихся летучих зависит от температуры других условий процесса.



τ_0 – время до разогрева частицы, τ_c – время сушки частицы,
 $\tau_{в.л.}$ – время выхода летучих из частицы, $\tau_{г.к.}$ – время горения коксового
остатка, $\tau_г$ – время выгорания частицы, $\tau_г = \tau_c + \tau_{в.л.} + \tau_{г.к.}$

Рисунок 2 – Установка Механотрон. Динамика термического разложения топлива

В сериях опытов установлена зависимость выхода летучих веществ от температуры бертенирования (термического разложения без доступа воздуха). По опытным данным построен график корреляции

низшей теплоты сгорания каждой аналитической пробы от температуры бертирования древесных отходов (рисунок 4).

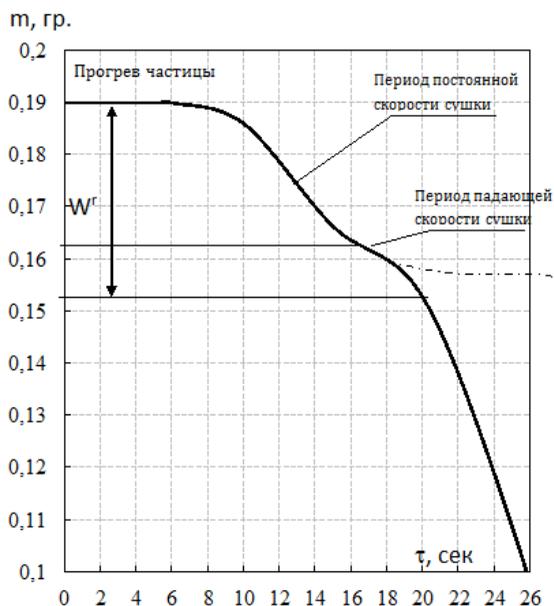


Рисунок 3 – Динамика сушки частицы березы при температуре 550 °C

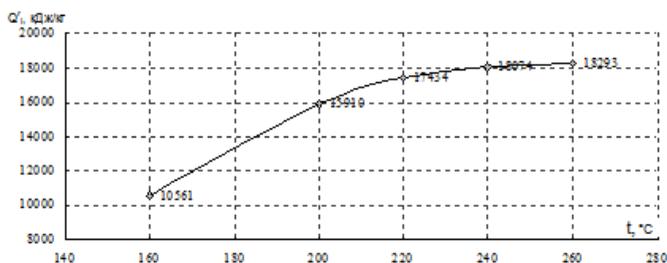


Рисунок 4 – Зависимость теплоты сгорания древесных отходов от температуры бертирования

По причине малой эффективности гравитационной сепарации древесных отходов, реализованной в большинстве существующих котлов, предложен такой профиль топочной камеры, в котором удержание частичек полифракционного топлива обладающих высокой парусно-

стью и низкой плотностью, основывается на инерционном принципе сепарации (рисунок 5).

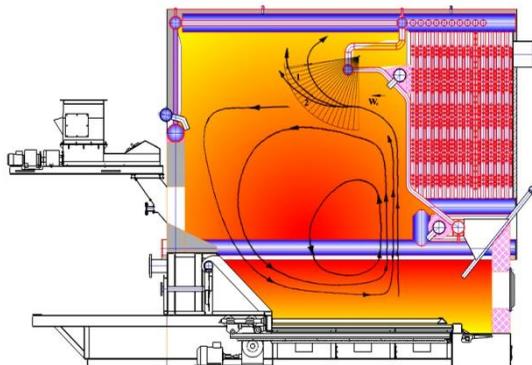


Рисунок 5 – Топочная камера котла KBM-5,0ДВО с топкой ТНФГ (топка наклонная форсированного горения)

На основании полученных расчетных и экспериментальных данных разработан ряд проектов котельных агрегатов с многократной циркуляцией топлива в топочной камере: котел KBM-5,0ДВО для сжигания древесных отходов (рисунок 5), с топочным устройством ТНФГ. И водогрейный блок котла KBM-5,0ДВО установленный на наклонно переталкивающую решетку производства Белорусского котельного завода (рисунок 6) [3].

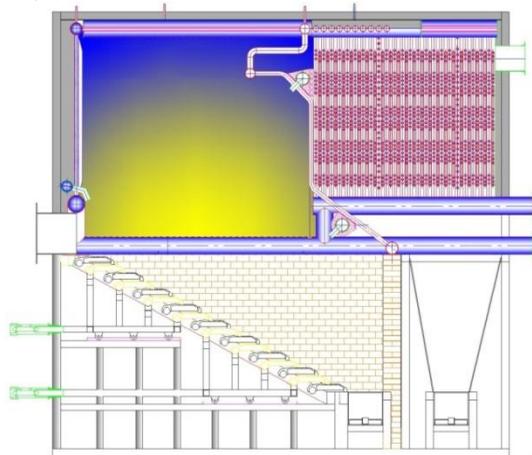


Рисунок 6 – Топочная камера котла KBM-5,0ДВО с наклонной топкой (Белорусский котельный завод)

Конструктивной особенностью первого исполнения котельного агрегата (рисунок 5) является использование топки ТНФГ. Аэродинамическая схема КВм-5,0ДВО представлена на рисунке 7.

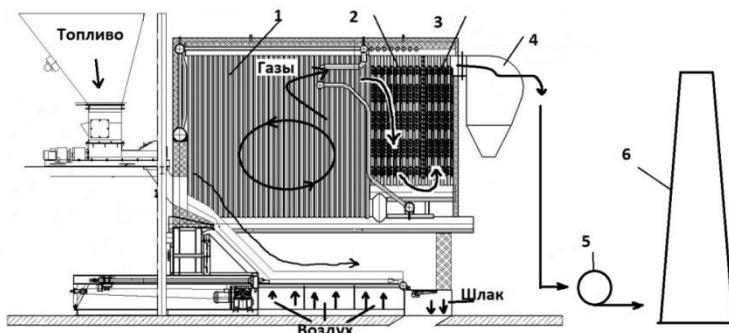


Рисунок 7 – Аэродинамическая схема КВм-5,0ДВО

Удержание частиц топлива в топке до их глубокого выгорания обеспечивалось за счет аэродинамики топки. Соответственно целью расчетов CFD являлось как выявление общей картины аэродинамической обстановки, так и её детализация, и выделение определяющих факторов по организации вихревого течения. Эти вопросы наиболее эффективно решаются при численном моделировании (рисунок 8).

Для анализа аэродинамической обстановки внутри топочной камеры использовалась компьютерная программа математического моделирования SigmaFlame. Результат работы представлен на рисунках 8 и 9.

Схема сжигания предлагается следующая: топливо в измельченном виде подается питателем в топочную камеру, горение в которой происходит факельно-слоевым способом (рисунок 5). Наиболее тяжелые частицы топлива сгорают на наклонной и горизонтальной колосниковой решетке, а мелкие, парусные частицы сгорают в вихре (рисунок 7). В такой топке с инерционным удержанием мелких частиц происходит практически полное выгорание, над механизированной топкой с шурующей планкой.

За счёт глубокого выжигания горючих 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 (рисунок 5).

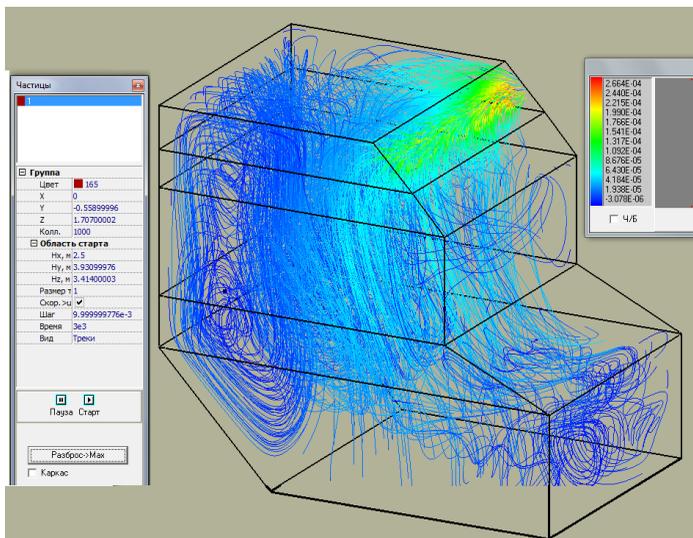
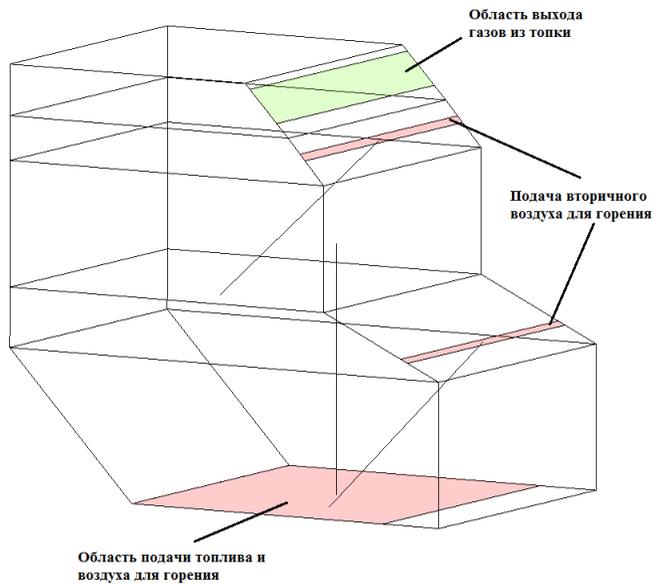


Рисунок 8 – Построение геометрической модели и траектория движения частиц топлива внутри топочной камеры

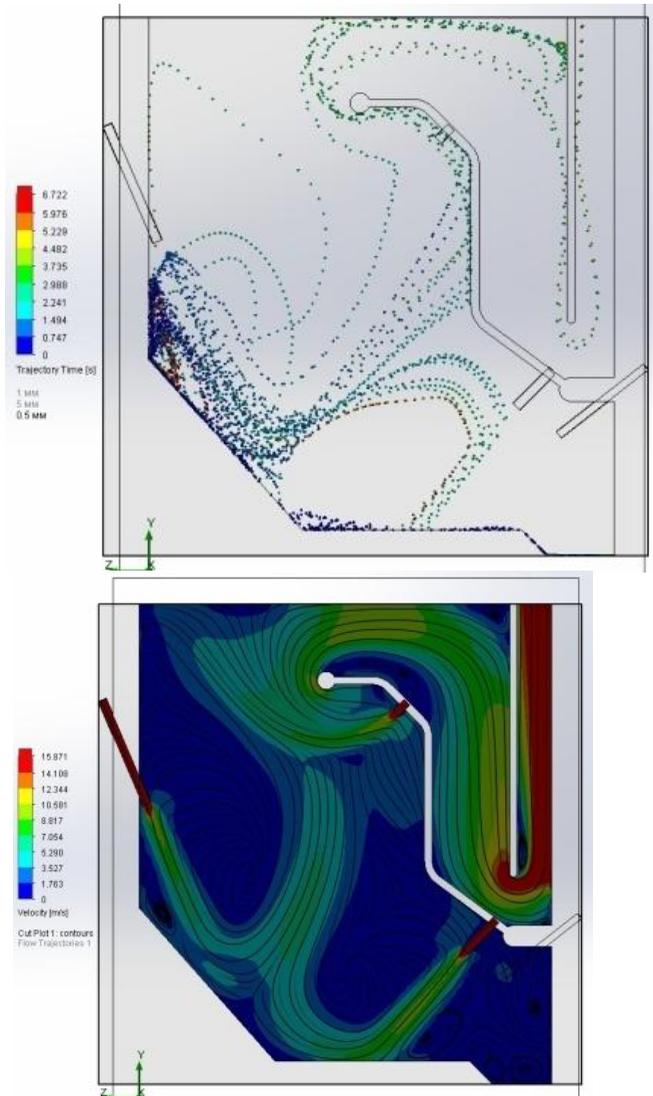


Рисунок 9 – Профиль топочной камеры котла КВм-5ДВО для сжигания КДО. Траектории движение частиц диаметром 0,5 мм в топке котла. Скорость движения частиц в топочном объеме котла

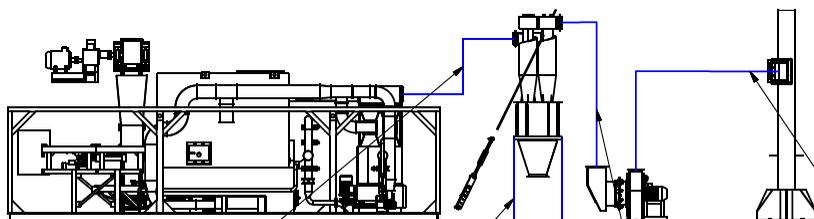


Рисунок 10 – Принципиальная схема котельной установки с котлов КВМ-2,0ДВО

Котлы КВМ-5,0ДВО тепловой мощностью 5,0 МВт а так же котлы КВМ-2,0ДВО (2,0 МВт) (рисунок 10) для сжигания кородревесных отходов изготовлены и установлены в Республике Беларусь (рисунок 11). Проведены пусконаладочные испытания котлов. При пусконаладочных работах на котле КВМ-2,0ДВО 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 11 – Водогрейный котел КВМ-2,0ДВО установленный в республике Беларусь

Для топлив с очень высокой влажностью выходящих за область автогенного горения треугольника Таннера и для котлов мощностью выше 20 МВт рекомендуется использовать топочное устройство с форсированным низкотемпературным кипящим слоем (ФКС). Технология эта характеризуется своей возможностью сжигать практически любые виды высоковлажных топлива и горючих отходов (отходы углеобогащения, шламы, фрезерный торф, растительные отходы, включая подсолнечную и гречневую лузгу, КДО высокой влажности, отходы производства мебели, опилки, щепа, лигнин) при относительно низкой температуре (800–1000 °С) без спекания слоя (рисунок 12).

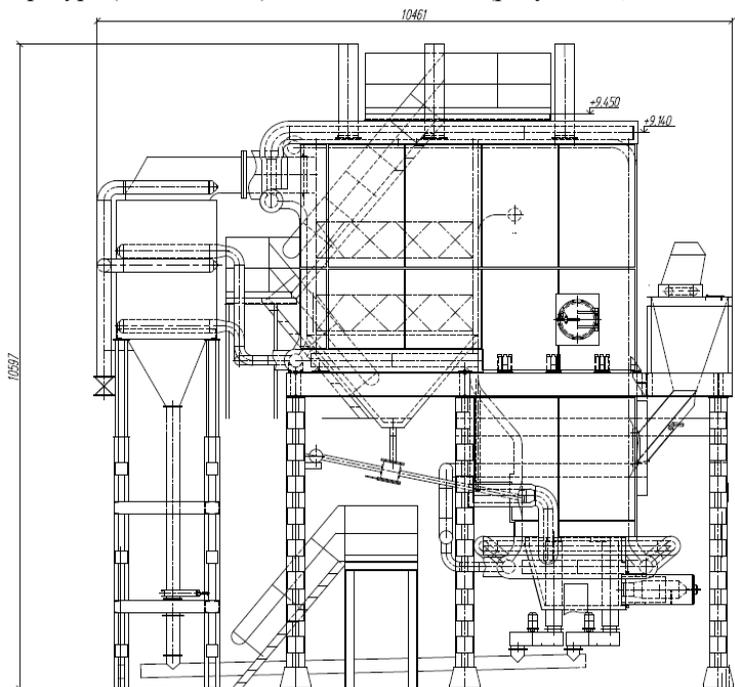


Рисунок 12 – Общий вид котла KV-29-150ФКС

Несмотря на то, что большей энергетикой эти продукты чаще всего относят к мусору, они могут заменить привычные энергоносители в среднем секторе энергетики. Дополнительно к тому, что сама технология ФКС оказывает существенное влияние на экологическую обстановку (при низкотемпературном сжигании существенно снижается эмиссия окислов азота), при компоновке котельной ячейки используется высокоэффективное золоулавливающее оборудование – батарей-

ные циклоны с дополнительной рециркуляцией дымовых газов для более глубокой их очистки от мелких золовых частиц (рисунок 13). На сегодняшний день на Алтае (внедрением высокоэффективных схем организации топочного процесса в ФКС, развитием которой сегодня занимаются специалисты ООО «НИЦ ПО «Бийскэнергомаш».) разработано большое количество конструкций котлоагрегатов, сжигающих нетрадиционное топливо, с различными типами топочных устройств. Установлены они более чем на сотне объектах.

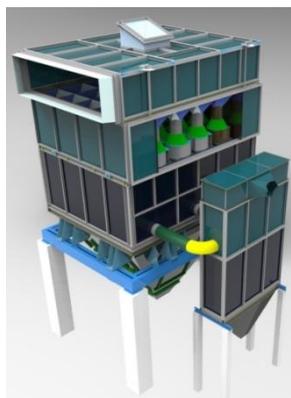


Рисунок 13 – Батарейные циклоны с дополнительной рециркуляцией дымовых газов

В работе рассмотрены предпосылки использования древесных отходов в качестве топлива в малой и средней 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. Жуков Е.Б. Исследование сжигания низкосортного угля / Е.Б. Жуков, И.Д. Фурсов, И.С. Якимова // Журнал «Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. MODERNSCIENCE: researches, ideas, results, technologies».: Днепропетровск: Издательство НПБК «ТРИАКОН», 2014. – с. 173 – 178.

2. Zhukov E.B. Co-combustion technology of coal and wood waste / Zhukov E.B., Puzirev E.M., Menyayev K.V. // The 8th International Symposium on Coal Combustion (8thISCC) Beijing, China, July 19-22, 2015

3. Гаврин Н.С. Технология сжигания древесных топлив и древесных отходов / Н.С. Гаврин, А.С. Лебедев, Е.Б. Жуков, К.В. Меняев // Современные тенденции котлостроения: Материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017 – с. 14–20.

4. Фурсов И.Д. Технология сжигания древесных отходов в котлах малой и средней мощности / И.Д. Фурсов, Е.Б. Жуков, Н.С. Гаврин, К.В. Меняев // Сборник статей I Международной заочной научно-практической конференции "Проблемы техносферной безопасности - 2015" (10 февраля 2015г.); Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015 – с. 206–209.

5. Красуцкий Е.В. Исследование сжигания сельскохозяйственных отходов. // Ползуновский вестник / Е.В. Красуцкий, И.Д. Фурсов, Е.Б. Жуков, И.С. Якимова, Е.М. Пузырев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. - № 3-1. – с. 47 – 50.

6. Бородин Р.Г. Использование кородревесных отходов в водогрейных котлах / Р.Г. Бородин, Н.Ю. Супрун, В.А. Устинов, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова // Современные тенденции котлостроения: Материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017 – с. 10–14.

7. Жуков Е.Б. Технология сжигания древесных топлив и древесных отходов / Е.Б. Жуков, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова // Ползуновский альманах. – 2017 – № 3. – Т. 1, с. 28 – 33

8. Жуков Е.Б. Технология совместного сжигания бурого угля и кородревесных отходов в энергетических котлах / Е.Б. Жуков, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова, Е.М. Пузырев // В сборнике: Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла. Материалы III Международной научно-технической конференции. ОАО "Всероссийский дважды Ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ"). 2016. с. 114 – 120.

9. Меняев К. В. Методы испытания углей : учебное пособие [Текст] / К. В. Меняев ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 63 с.

УТИЛИЗАЦИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ В ПАРОВЫХ КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

И. В. Платов¹, С. С. Голубев¹, В. А. Голубев²

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова» г. Барнаул,

²ООО «НПО «ПроЭнергоМаш», г. Барнаул

Ключевые слова: древесные отходы, паровые котлы, утилизация.

Аннотация: Рассмотрение возможности использования древесных отходов в качестве топлива в паровых котлах малой энергетики.

Объемы лесозаготовки в России огромны. После обработки древесины остается большое количество отходов рубки и пиления, непригодных для последующей переработки. Поэтому вопрос их утилизации сегодня важен как никогда, так как на решение данной проблемы осталось не так много времени: к 2022 году Министерство природных ресурсов РФ ужесточит законодательство, регламентирующее работу с отходами, и увеличит штрафы за его неисполнение.

На сегодняшний день лишь небольшая часть котельных работает на древесном топливе, рассматривается возможность перевода на данный вид топлива угольных и мазутных котельных. Многие лесозаготовители выражают согласие использовать древесные отходы на собственных теплоисточниках для обеспечения технологических процессов и попробовать себя в роли продавцов теплоэнергии. Такие проекты выгодны прежде всего самим производителям отходов – топливо будет для них практически бесплатным, потому что не требуются расходы на его покупку и транспортировку до места использования.

Однако есть свои сложности огневой утилизации данного вида отходов в обычных топочных устройствах. Первая проблема заключается в высоком содержании влаги, достигающей 50–60 %, что свидетельствует о низком качестве топлива, неэффективности сжигания и невозможности обеспечения полного выгорания. Вторая – трудность удержания легких парусных частиц древесины в процессе их выжигания в топочной камере. При выносе недогоревших частиц из топки они могут накапливаться в газоходах и золоуловителях, где возникает опасность периодических пожаров.

На основании оценочных расчетов, опыта производства и эксплуатации предложено решение по паровому котлу Е-6,5-1,4, работающему на древесных отходах, выполненному в газоплотном исполнении, единым

транспортбельным блоком в обшивке и изоляции. Котел оснащен вихревым топочным устройством которое включает в себя расположенную снизу механизированную слоевую топку с шурующей планкой и вторую ступень в виде вихревой камеры дожигания.

Предлагаемый топочный процесс сочетает слоевой и вихревой топочные процессы, что обеспечивает низкую требовательность топочного устройства к качеству подготовки топлива. Вихрь горячих продуктов сгорания удерживает в топке мелкие твердые частицы и искры, создает интенсивный перенос тепла из зон горения в зоны сушки топлива. Вихревой поток при этом обеспечивает интенсивный продув горячими газами свежих масс топлива, их быстрое искровое зажигание и изотермичность топочного объема.

Схема сжигания в данном котле выглядит следующим образом (рисунк 1): древесные отходы подаются с фронта специальными шнековыми питателями непрерывного действия 1 на охлаждаемый наклонный колосник 2 по которому они движутся самотеком на топку с колосниковым полотном 3, оборудованную нижним дутьем 4, шурующая планка 5 периодически сдвигает и продвигает нижний слой в сторону выгрузки золы которая производится шнековым дожигателем 6. Навстречу потоку топлива, располагаемому на наклонном колоснике, движется раскаленный вихрь, образованный соплами острого дутья 7 и разогретый от сгорания высушенной древесины и ее кокса, за счет которого мелкие частицы топлива удерживаются в объеме топки 8 до полного выгорания. При этом происходит сушка и выход летучих из вновь поступившей древесины. При помощи газовыпускного окна 9 топочный объем сообщается с камерой дожигания котла, где происходит дожиг вылетевших из топки недогоревших частиц топлива. Далее дымовые газы поступают в первый и второй конвективные пучки 10. Установленная система возврата уноса 11, служит для возврата в топочную камеру осевших частиц.

Кроме того, для стабилизации топочного процесса на отходах низкого качества и работы при перебоях в подаче основного топлива используется газомазутная горелка и резервное топливо.

За счет глубокого выжигания горючих предлагаемый топочный процесс обеспечивает повышенную экономичность и высокие экологические показатели котла.

При разработке данного котла были сделаны выводы на основе проведения численного моделирования, традиционно применяемого при выполнении проектов, которые повлияли на принятие более обоснованных технических решений по конфигурации топки и снизили

риск ошибок. На рисунках 2 и 3 показаны рассчитанные траектории движения частиц и поля скоростей в вихревой топке котла Е-6,5-1,4.

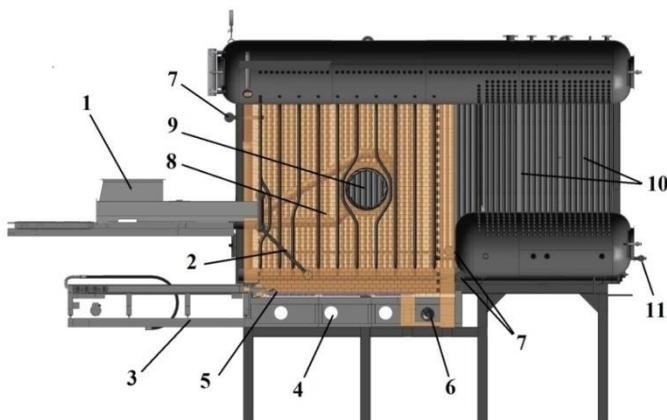


Рисунок 1 – Продольный разрез парового котла Е-6,5-1,4

Целью расчетов являлось выяснение картины аэродинамической обстановки, а также ее детализация в топочной камере и в дальнейших газовых трактах в пределах котла для выяснения проблемных участков и дальнейшего принятия мер по их устранению.

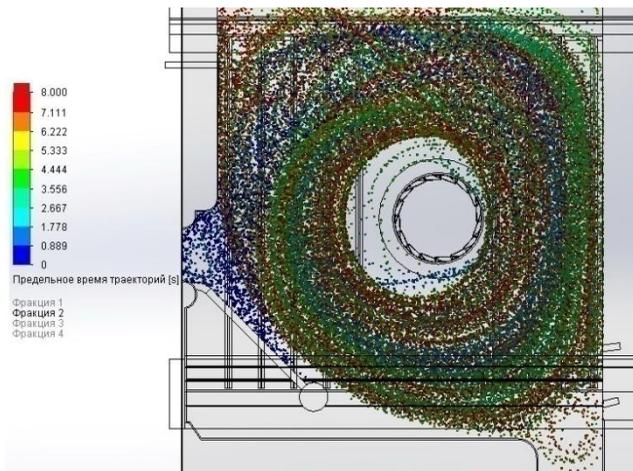


Рисунок 2 – Траектории движение частиц в топке котла Е-6,5-1,4

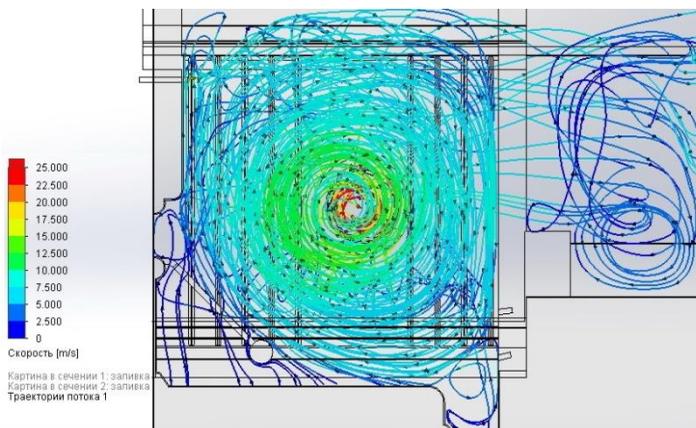


Рисунок 3 – Распределение скорости движения частиц в топочном объеме котла Е-6,5-1,4

Паровые котлы с естественной циркуляцией Е-6,5-1,4 паропроизводительностью 6,5 т/час и температурой перегретого пара 194 °С с вихревой топкой для сжигания древесных отходов были установлены в г. Иркутск на предприятии по производству пиломатериалов ООО «Ангара-Тимберлайн». Проведены пусконаладочные работы и испытания, котлы были выведены на режим, при котором показали проектные значения.

Список литературы

1. Головкин С. И. Энергетическое использование древесных отходов [Текст] / С.И.Головкин, И.Ф. Коперин, В.И. Найденев. – М.: Лесн. Пром-сть, 1987. – 224 с.
2. Пузырев Е.М. Разработка вихревых топок для древесных отходов / Е.М. Пузырев, А.М., Шарапов, М.А. Шарапов // Новости теплоэнергетики. 2005. – №5. – с 22–24.
3. Щуренко В.П. Моделирование и разработка низкотемпературных вихревых топочных устройств / В.П. Щуренко, Е.М. Пузырев, П.К. Сеначин // Ползуновский вестник. 2004. – №1. – с. 152 – 156.
4. Красилов К.А. Проблемы сжигания лузги подсолнечника в паровых котлах / К.А. Красилов, К.В. Меняев // Современные тенденции котлостроения: Материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017 – с. 36–42.

ПРЕВОД ПАРОВОГО КОТЛА НА СЖИГАНИЕ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА

М. Е. Пузырев¹, В. А. Голубев², Г. Н. Лихачева¹

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

²ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», г. Барнаул

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

Аннотация: Внедрена и опробована технология реконструкции типовых водотрубных паровых котлов с переводом на сжигание подсолнечной лужги. Реконструкция производится с установкой дополнительных поверхностей нагрева с образованием вихревой экранированной топочной камеры.

В технологическом цикле предприятия, перерабатывающие зерновые и масличные культуры, помимо выработки основного продукта происходит большой выход горючих отходов – шелухи. Валовая теплота сгорания образующихся отходов сопоставима с полным энергопотреблением предприятия, соответственно ее полезное использование позволяет существенно снизить себестоимость продукции.

Среди паровых котлов для промышленной теплоэнергетики наиболее популярны серийные двух барабанные водотрубные котлы производимые Бийским котельным заводом и другими предприятиями-изготовителями. Серия этих котлов, производительностью от 2,5 до 25 тонн пара в час унифицирована и комплектуется различными серийными топочными устройствами для работы на твердом, жидком и газовом топливе. Однако типовые топки не способны обеспечить хороших показателей работы котла при сжигании растительных отходов. Для адаптации котла под лужгу повсеместно проводят реконструкцию топочного устройства и топочной камеры.

Большое распространение за последние десятилетия получили циклонные топки и предтопки для сжигания лужги. Как правило циклонный предтопок имеет цилиндрическую форму и выполняется из огнеупорного кирпича. Внутри предтопка (циклонной топки) процесс горения проходит практически в адиабатических условиях при высоких температурах, далее дымовые газы попадают в топочную камеру типового водотрубного котла. При таком режиме происходит полное выжигание горючих веществ из лужги, однако, в связи с отсутствием поверхностей нагрева в зоне активного горения, происходит и нега-

тивный процесс – возгоняется значительная доля минеральных компонентов луговой золы. Испаренные легкоплавкие компоненты конденсируются и оседают в виде рыхлых первичных отложений на поверхностях нагрева котла и упрочняются при дальнейшей его работе. Срок работы котла в таком режиме до полного останова на очистку по причине нехватки тяги дымососа составляет от 3 до 15 дней. Стабильная работа возможна только со значительным снижением мощности котлоагрегата, от номинальной – не выше 30–50 %. Кроме того на высоких нагрузках происходит термическое разражение огнеупорного кирпича, котлы требуют ежегодного ремонта обмуровки.

Для примера. Котел КЕ-10-14 (рисунок 1), оборудованный циклонным предтопком из огнеупорного кирпича, имеет максимальную паропроизводительность 6 тонн пара в час, а срок работы до очистки 7 дней, при этом паропроизводительность к моменту очистки снижается до 3 тонн. При очистке из топочной камеры котла, котельного пучка и экономайзера вручную удаляется 400–500 килограмм золошлаковых отложений.



Рисунок 1 – Котлы КЕ-10-1,4 с кирпичными циклонным предтопками

Принципиально другой подход к проектированию котлов для сжигания сухих парусных топлив используется на предприятии «Про-ЭнергоМаш», г. Барнаул. В основе лежит использование экранированных 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.

Горение лузги в вихревой топке осуществляется преимущественно во взвешенном состоянии, во вращающемся газовом потоке, образующемся внутри камеры, имеющей форму, приближенную к цилиндрической за счет подачи дутьевого воздуха через тангенциальные сопла. Вихрь может располагаться в топочной камере с вертикальной или горизонтальной осью вращения. В результате вихревого процесса увеличивается время пребывания частиц лузги в топке и, соответственно, уменьшается их недожог. Вихревой факел равномерно заполняет экранированную топочную камеру, при этом температура в зоне горения значительно снижается.

На рисунке 2 реконструированный котел КЕ-10-1,4 с вихревой топкой «Торнадо» с вертикальной осью вращения. Кирпичный циклонный предтопок заменен на камерную вихревую топку «Торнадо», с вертикальной осью вращения вихря, образованную водотрубными панелями. Использование экранированной топки позволило снизить температуры в ядре факела, значительно уменьшив возгоны золотого остатка, тем самым позволяя вывести котел в режим длительной работы без остановов на очистку, и работой, при этом, с номинальной паропроизводительностью.

Еще лучшими показателями работы характеризуются реконструированные котлы, в которых установлена вихревая топка «Торнадо» с горизонтальной осью вихря. Степень удержания и заполнения объема такой камеры топливными частицами существенно выше. Топки с горизонтальной осью вращения могут работать в широком диапазоне нагрузок с хорошими экологическими показателями и минимальным шлакованием поверхностей нагрева. Расположение вихря в топочной камере способствует самоочищению стен камеры от отложений потоком свежего топлива.

При работе котла горящий слой топлива стабилизирует горение в вихре, т. е. в надслоевой части топки. И, наоборот, вихревой факел, дожигающий 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.



Рисунок 2 – Котлы KE-10-1,4 реконструированные с установкой вихревой топки «Торнадо»

Например, котел KE-6,5 реконструированный с установкой дополнительных поверхностей нагрева – фронтного экрана и среднего пережимного экрана с газовыпускным окном. Теплотехнические испытания котла KE-6,5-1,4, реконструированного с установкой вихревой топки с наладкой режимов работы проводились при сжигании подсолнечной лузги на нагрузках от 3 до 7 тонн пара в час. Пробная работа котла в течение 45 суток показала хорошую стабильность показателей. Конвективные пучки котла не забиваются отложениями.

Заполнение топочных камер вихревым факелом равномерное, Вынос искр из топок практически отсутствует (рисунок 3).



Рисунок 3 – Вид в камеру охлаждения, выход из вихревой топки

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. Патент РФ № 2582722. 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

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ БЕЗМАЗУТНОГО РОЗЖИГА (СБР) И ПОДСВЕТКИНА КОТЛАХ ТЭЦ ПАО «ИРКУТСКЭНЕРГО»

В. А. Разин, И. Ю. Белоруцкий, В. Ф. Буров, В. В. Линдт
ООО «ЗиО-КОТЭС», г. Новосибирск

Ключевые слова: котёл, пылеугольная горелка, мазут, плазменный розжиг, муфельная горелка, безмазутный розжиг, прямое дувание, промбункер.

Аннотация: В статье рассмотрены основные технические решения по оснащению системой безмазутного розжига и подсветки котлов

пылеугольных станций «Иркутскэнерго» на примере ТЭЦ-11 (г. Усолье-Сибирское) и Ново-Зиминской ТЭЦ (г. Саянск), с котлами 210÷500 т/ч. По предложенным решениям проведена предварительная экономическая оценка и анализ целесообразности внедрения СБР. Также в статье представлены результаты испытаний и опытные данные растопки котлов ТП-10 и ПК-24 Ангарской ТЭЦ-10 с установленной системой безмазутной инициации горения.

В настоящее время мазут является дорогостоящим топливом, стоимость которого превышает стоимость угля в 3–4 раза. Использование мазута требует наличия и функционирования на каждой ТЭЦ мощного мазутного хозяйства. Для повышения стабильности факела в пылеугольных котлах применяется совместное сжигание углей с мазутом, что неэкономично и зачастую приводит к возрастанию мех. недожога топлива, сажистым отложениям на конвективных поверхностях нагрева. Как следствие, снижается КПД котлов, повышаются выбросы оксидов азота, серы и канцерогенной пятиоксида ванадия, которая в основном содержится в мазуте и, соответственно, ухудшаются эколого-экономические показатели ТЭС. Совместное сжигание твердого и жидкого топлива приводит к высокотемпературной коррозии поверхностей нагрева и сокращению срока службы оборудования. Таким образом, для исключения указанных негативных факторов существуют экономические и технологические предпосылки к переходу на технологии безмазутного розжига и подсветки факела пылеугольных котлов.

На сегодняшний день основными технологиями безмазутной инициации горения пылеугольного топлива являются [1]:

1. *Плазменная технология*, в основе которой лежит термохимическая подготовка пылеугольного топлива с помощью электрической дуги, возникающей между электродами плазмотрона. Между электродами плазмотрона возбуждается мощная электрическая дуга в виде струи плазмы из воздуха, которая нагревает проходящую через неё азросмесь. Под воздействием высокотемпературной электродуговой плазмы из угольной пыли выделяются летучие и образуется двухкомпонентная смесь горючих газов и кокса, которая затем легко воспламеняется. При такой температуре происходит не только интенсивное термическое разложение топлива и воспламенение летучих, но и воспламенение коксовой составляющей [2].

Работа плазменных горелок требует высокой мощности источника электропитания 50–350 кВт и осуществляется при напряжениях от 50 до 400 В. Высокоамперные токи (до 3,5 кА), возникающие при этом, формируют плазменную струю.

Схематично примеры плазменно-топливных систем приведены на рисунках 1, 2.

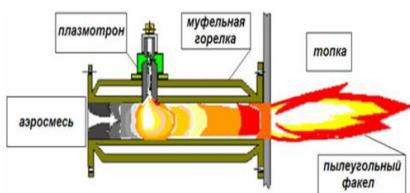


Рисунок 1 – Прямочная ПТС с муфелем

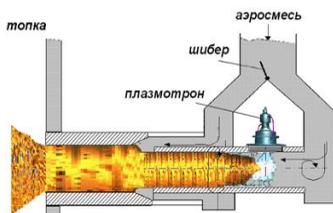


Рисунок 2 – Двухступенчатая вихревая ПТС

Основные недостатки плазменно-топливных систем следующие [2, 3, 4]:

- небольшой ресурс непрерывной работы $\sim 250 \div 1000$ ч (связано с заменой электродов);
- большое потребление электрической мощности – как правило, более 100 кВт;
- низкий КПД;
- высокое потребление охлаждающей химически очищенной воды;
- необходимо предусмотреть меры защиты персонала от поражения электрическим током.

Несмотря на наличие недостатков, данная технология получила наибольшее распространение в мире, преимущественно в Китае.

2. *Электрохимическая технология*, возникшая как развитие плазменной. Электрохимическая технология основана на ионизации аэроземеси путем воздействия на нее высокочастотных электрических полей в предпламенной зоне пылеугольного факела. В результате в аэроземеси протекают электрохимические процессы, топливо становится химически активным, самовоспламеняется и горит [5].

По сравнению с электродуговой плазменной технологией электрохимическая технология характеризуется:

- на порядок меньшим потреблением электрической мощности;
- не требует специальных систем охлаждения;
- длительным непрерывным ресурсом работы, исчисляемым месяцами, а, по мнению авторов, годами;
- в режиме растопки нет необходимости в прогреве топочной камеры и подогреве аэроземеси.

Система электрохимической растопки и стабилизации факела была опробована на двух из четырех улиточных горелках котла

К-50-14-250 (котельная, г. Бердск), а также в муфельной горелке котла ТП-10 и прямоточной горелке котла ПК-24 (ТЭЦ-10, г. Ангарск).

Принципиальная конструкция муфельной горелки конструкции «ЗиО-КОТЭС» с электрохимической технологией розжига представлена на рисунке 3.

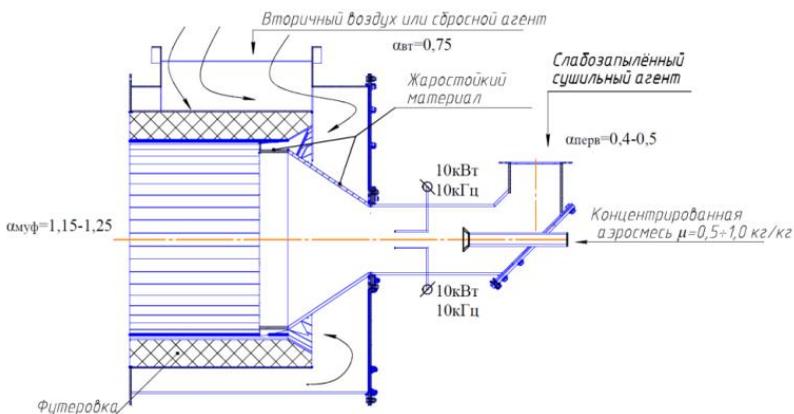


Рисунок 3 – Принципиальная конструкция муфельной горелки с электрохимическим розжигом

3. *Муфельная технология [1].* Основной принцип муфельной технологии – это термическая подготовка пылеугольного топлива в специальных предтопках (муфельных горелках) перед подачей в топочную камеру котла.

Термическая подготовка аэрсмеси в муфеле производится за счет предварительно разогретых стенок муфеля. Это может достигаться несколькими способами, например:

- разогревом высокорекреакционным топливом (мазутом, газом);
- специальными электрическими нагревателями (ТЭН), которые встраиваются в футеровку;
- токами высокой частоты, воздействующими на металлическую стенку обоймы муфеля.

Принципиальная конструкция муфельной горелки с электронагревом конструкции «ЗиО-КОТЭС» представлена на рисунке 4.

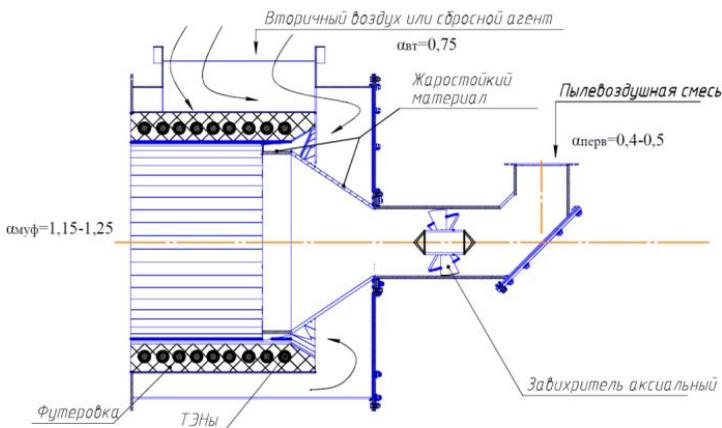


Рисунок 4 – Принципиальная конструкция муфельной горелки с электронагревом

4. *Технология микропомола угля.* Применение технологии микропомола угля для растопки котла основано на механической активации угольной пыли. Механоактивация – процесс образования химически более активного вещества с помощью предварительной механической обработки. Механоактивация происходит за счет возникновения дефектов в структуре пылинок угля, если скорость накопления дефектов превышает скорость их исчезновения.

Основными недостатками применения технологии ультратонкого помола (микропомола) являются:

- необходимость размещения системы приготовления ультратонкой пыли, которая включает в себя дезинтегратор или измельчитель другого типа, непосредственно перед горелками котла, поскольку эффект активации сохраняется лишь непродолжительное время;
- требуется инициатор воспламенения (газ, двухступенчатые горелочные устройства с плазмотронами);
- наличие в системе изнашивающихся частей (била мельниц или пальцев в дезинтеграторе), требующих частой замены (срок службы пальцев дезинтегратора 300 часов).

Следует отметить, что технология с микропомолом была испытана на одной горелке (2 т/час) Беловской ГРЭС с положительными результатами, однако промышленного внедрения системы пока нет.

ООО «ЗиО-КОТЭС» была выполнена проработка основных технических решений по установке систем безмазутного розжига для ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго» [6]. Система безмазутного розжига подразуме-

вает установку на котле специальных устройств безмазутной инициации горения угольной пыли, а также возможность получения горячего воздуха и подсушенной угольной пыли в период растопки.

Суммарная мощность растопочных горелок принимается равной 10–15 % от тепловой мощности котла, при которой обеспечивается необходимая температура в поворотной камере, исходя из соображений взрывобезопасности по конвективной шахте.

Количество растопочных горелок на котле зависит от условий их компоновки, возможности обслуживания, а также от выбранной единичной мощности муфеля.

В таблице 1 представлено котельное оборудование ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго», объединенное в несколько групп в зависимости от типа системы пылеприготовления.

В настоящей статье рассмотрены принципиальные технические решения для двух основных вариантов пылесистем: с промбункером и с прямым вдуванием.

Котлы с промбункером пыли (Основные технические решения приводятся на примере котлов II очереди ТЭЦ-11 г. Усолье-Сибирское).

II очередь ТЭЦ-11 (г. Усолье-Сибирское) состоит из трёх котлов ТП-81 и двух котлов ТП-85. Все котлы ТЭЦ-11 оборудованы двумя индивидуальными системами пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами (ШБМ) и промежуточным бункером пыли. Сушка топлива в ШБМ производится горячим воздухом с присадкой слабо подогретого.

В качестве основного топлива используется рабочая смесь 70 % Мугунского и 30 % Черемховского бурых углей с $Q_i^f = 4288$ ккал/кг. Уголь относится к III-IV группе взрывоопасности (по шкале ВТИ).

Для организации безмазутной растопки на котлах с промежуточным бункером пыли рассмотрены два варианта:

– *Вариант А.* С пуском и работой собственной пылесистемы от общего коллектора горячего воздуха и сбросом сушильного агента через рукавный фильтр в атмосферу;

– *Вариант Б.* С перебросом пыли в бункер пыли растапливаемого котла из-под пылевых циклонов работающих пылесистем соседних котлов.

Таблица 1 – Основные группы оборудования ПАО «Иркутскэнерго»

№ п/п	Тип СПП и подачи угольной пыли в топку	Марка котла	Станция	Количество котлов
1	Замкнутая с промбункером (с мельницами ШБМ, ММТ)	БКЗ-320-140	ТЭЦ-6	10
		ТП-85, ТП-81	ТЭЦ-9	11
		БКЗ-160-100	ТЭЦ-11	2
		БКЗ-210-140	ТЭЦ-11	2
		ТП-85, ТП-81	ТЭЦ-11	5
		ПК-10	Уч. №1 ТЭЦ-9	7
		ТП-10	ТЭЦ-10	2
		ПК-24	ТЭЦ-10	14
	БКЗ-420-140	Усть-Илимская ТЭЦ	7	
2	Прямого вдувания (с мельницами ММТ)	БКЗ-420-140-6(7)	Ново-Зиминская ТЭЦ	4
		БКЗ-420-140-6	Ново-Иркутская ТЭЦ	4
	Прямого вдувания (с мельницами М-В)	БКЗ-500-140-1С		3
		БКЗ-820-140-1С	1	
3	С шахтно-мельничной топкой (мельницы ШМТ)	БКЗ-75-39ФБ	ТЭЦ ТИ и ТС ТЭЦ-6 (ТЭЦ-7)	9
			ТЭЦ-12	3
			ТЭЦ-16	5
			Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭЦ	7
			ЦРГК ТИ и ТС ТЭЦ-6 (РГК)	2

По *Варианту А* для котлов ТП-81 были предложены следующие решения:

- 1) на территории котельного цеха прокладывается общий коллектор горячего воздуха, к которому подключаются все котлы II-очереди;

2) для отбора горячего воздуха с общего коллектора и подачи его на пылесистему, а также на горелки и сопла растапливаемого котла в главном корпусе на отм. 0,000 устанавливаются 6 вентиляторов горячего дутья (ВГДН-21). В режиме растопки каждого котла предполагается работа двух ВГД с двухсторонним подводом горячего воздуха от общего коллектора в воздухопроводы котла;

3) в свободном месте главного корпуса устанавливаются 3 турбовоздуходувки ТВ-50-1,6 (одна в работе, одна в резерве, одна в ремонте), а на территории котельного цеха прокладывается общий коллектор сжатого воздуха, с подводящими трубопроводами к котлам II-очередности для транспортирования угольной пыли в муфели посредством системы ПВКд;

4) на котёл устанавливаются 4 муфельные растопочные горелки (рис. 5) единичной тепловой мощностью $Q_m = 9,6$ МВт с системой безызлучательной инициации горения (электронагрев, электрохимический или плазменный розжиг). Две муфельные горелки устанавливаются на боковых стенах топки, а две на фронте в амбразуры существующих основных горелок, как показано на рисунке 5;

5) реконструкция систем подготовки, хранения и подачи угольной пыли к муфелям котла, а именно:

- питатели пыли основных горелок, заменяемых муфелями, демонтируются, а на их место устанавливаются новые питатели пыли с двумя пылевыводящими патрубками для подачи пыли на 4 муфеля;
- точки пыли новых питателей соединяются со смесителями (рисунок 6), в которые подводится сжатый воздух от турбовоздуходувок для транспортирования угольной пыли в муфели посредством системы ПВКд;

6) на каждый котёл II-очередности предусматривается установка рукавного фильтра для очистки запыленного сушильного агента (СА), поступающего из пылевых циклонов работающих котлов, с последующим сбросом очищенного воздуха в атмосферу.

Для *Варианта Б* основные технические решения, такие как: прокладка общего коллектора горячего воздуха, установка вентиляторов горячего дутья для транспорта горячего воздуха к системам СБР, оборудование котла муфельными горелками и реконструкция систем подготовки и подачи угольной пыли к муфелям аналогичны решениям, принятым по *Варианту А*, за исключением установки дорогостоящих рукавных фильтров. Кроме того, предусматривается:

1) схема переброса пыли из-под циклонов работающих соседних котлов в бункеры растапливаемого котла, с применением системы

пневмотранспорта с высокой концентрацией под давлением (ПВКд);

- 2) прокладывается пылеперебросной трубопровод (рисунок 7);
- 3) устанавливаются эжекторы для подачи угольной пыли из-под циклонов работающей пылесистемы по пылеперебросному трубопроводу к растопочному котлу. Транспорт пыли осуществляется сжатым воздухом, подаваемым через общий коллектор сжатого воздуха от специально установленных компрессоров-турбовоздуходувок (рисунок 7);
- 4) над бункером пыли предусматривается установка малого пылеочищающего циклона, в который подводится перебросный пылепровод ПВКд, для очистки воздуха и сброса пыли в бункеры котлов (рисунок 7);

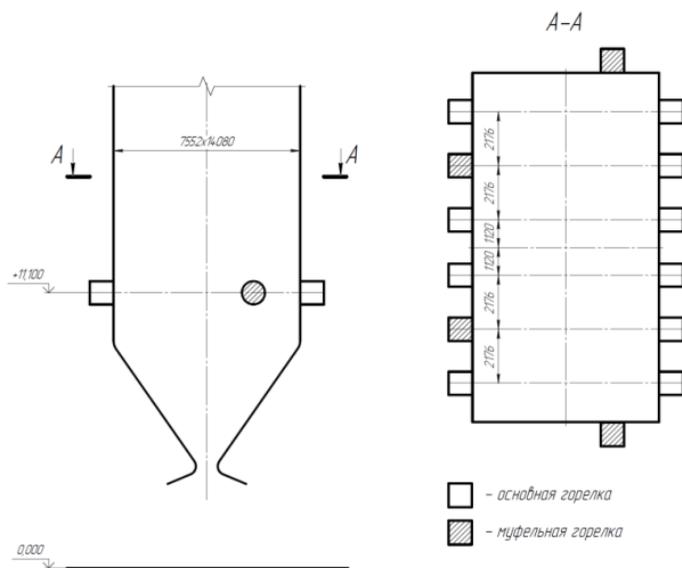


Рисунок 5 – Эскиз котла ТП-81. Места предполагаемой установки муфельных растопочных горелок

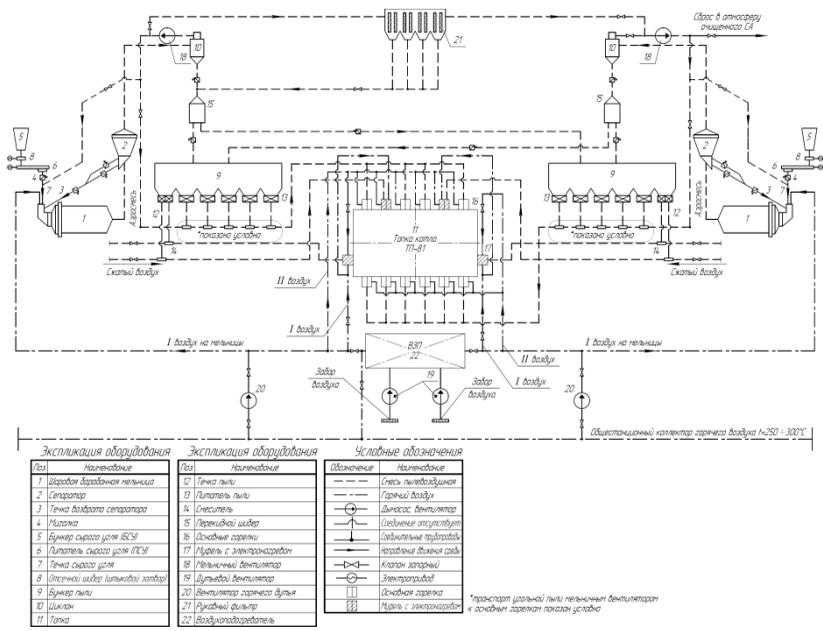


Рисунок 6 – Схема переброса пыли из-под циклонов работающих котлов в бункер пыли растапливаемого котла

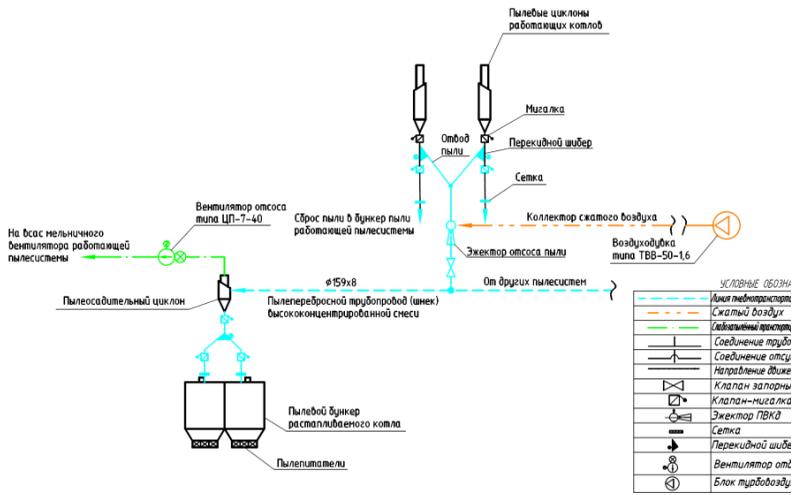


Рисунок 7 – Схема переброса пыли из-под циклонов работающих котлов в бункер пыли растапливаемого котла

5) из пылеочищающего циклона вентилятором ЦП7-40 (рисунок 7) очищенный воздух сбрасывается в растапливаемый муфель, либо на всас мельничного вентилятора работающего котла.

На станции «Ново-Зиминская ТЭЦ» установлены три котла БКЗ-420-140-6 (ст. № 1–3) и один котел БКЗ-420-140-7 (ст. № 4). Все котлы Ново-Зиминской ТЭЦ оборудованы четырьмя индивидуальными системами пылеприготовления с прямым вдуванием и молотковыми мельницами (ММТ-1500/2510/750). На котлах ст. № 1–3 дополнительно к основным выхревым горелкам установлено по две муфельные горелки для подсветки котла пылеугольным топливом на пониженных нагрузках $D_{\text{ном}} = 30 \%$. Розжиг муфелей при пуске котла из холодного состояния может производиться высокорреакционным топливом (мазутом).

В качестве основного топлива используется рабочая смесь Мугунского и Азейского бурых углей с преобладанием Мугунского бурого угля, $Q_i^r = 4262$ ккал/кг. Уголь относится к III группе взрывоопасности (по шкале ВТИ).

Основные решения по системе СБР для котлов Ново-Зиминской ТЭЦ следующие:

1. На территории котельного цеха прокладывается общий коллектор горячего воздуха, к которому подключаются все котлы.

2. Для отбора горячего воздуха с общего коллектора и подачи его в воздухопроводы растапливаемого котла в котельном цехе на отм. 0,000 устанавливаются 6 вентиляторов горячего дутья (ВГДН-21). В режиме растопки на каждый котел предполагается работа двух ВГД с двухсторонним подводом горячего воздуха от общего коллектора в воздухопроводы котла.

3. Одна из четырех систем пылеприготовления котла выделяется для растопки. Для этого на выходе из сепаратора мельницы монтируются четыре новых пылепровода к устанавливаемым муфельным горелкам.

4. Для регулирования температуры СА за растопочными мельницами в котельном цехе прокладывается общий коллектор холодного воздуха. Для забора воздуха из цеха устанавливается вентилятор ВДН-11,2-150.

5. На котёл устанавливаются 4 муфельные растопочные горелки (рисунок 8) единичной тепловой мощностью $Q_m = 11,6$ МВт с системой безмазутной инициации горения (электронагрев, электрохимический или плазменный розжиг). С учетом двух существующих муфелей на котел потребуется установка лишь двух дополнительных на второй ярус, как показано на рис. 8. Существующие муфели переоборудуются на безмазутную растопку.

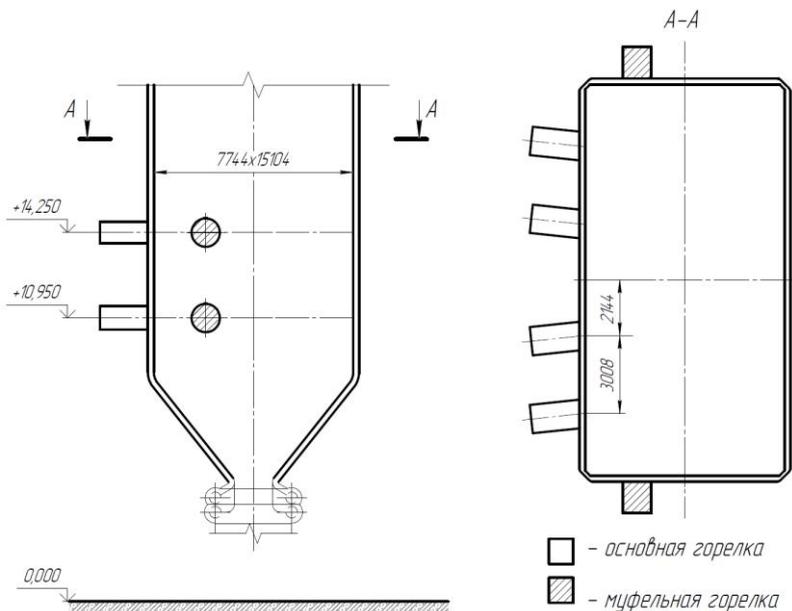
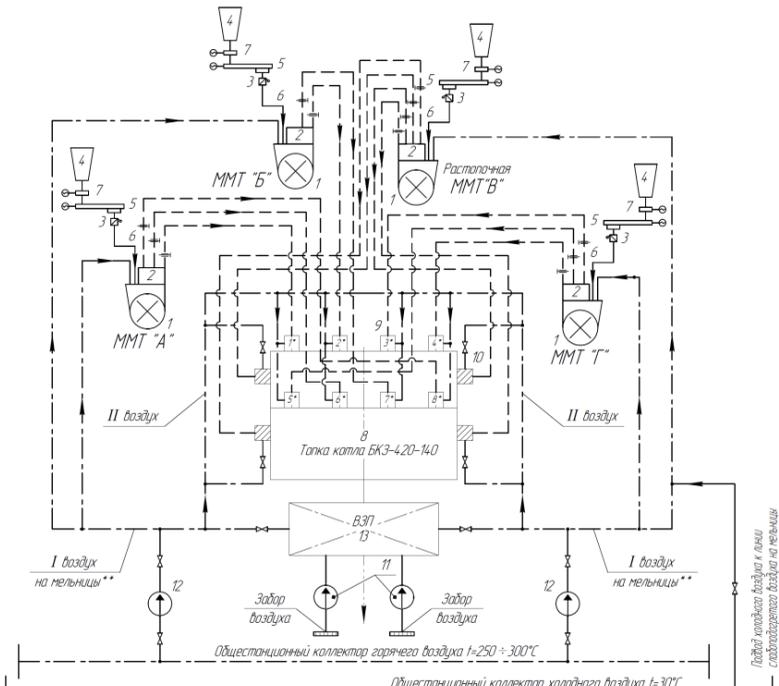


Рисунок 8 – Эскиз котла БКЗ-420 ст. №1-3. Места предполагаемой установки муфельных растопочных горелок

6. Горелки, ранее получавшие угольную пыль от выделенной для растопки мельницы, переподключаются к двум крайним мельницам. Для этого после сепараторов указанных мельниц организуется выход на три пылепровода вместо двух, и устанавливаются пылепроводы меньшего диаметра с целью обеспечения требуемых скоростей аэро-смеси (рисунок 9).

7. В качестве опции растопочная мельница может быть оснащена более совершенным динамическим сепаратором пыли вместо существующего инерционного для обеспечения благоприятных условий воспламенения угольной пыли в начальный период растопки.



Экспликация оборудования		Условные обозначения	
Позв	Наименование	Обозначение	Наименование
1	Малотонная мельница тангенциальная	---	Дымовые газы
2	Сепаратор	---	Смесь пылевоздушная
3	Мылетка	---	Горячий воздух
4	Бункер сырого угля (БСУ)	⊙	Дымосос, вентилятор
5	Питатель сырого угля (ПСУ)	—	Соединение отсутствует
6	Топка сырого угля	⊕	Соединительные трубопроводы
7	Отсечный шибер (штыковой затвор)	→	Направление движения среды
8	Топка	⊘	Клапан запорный
9	Основные горелки	⊙	Электропривод
10	Распашная муфельная горелка	⊙	Основная горелка
11	Дутьевой вентилятор	⊕	Распашная муфельная горелка
12	Вентилятор горячего дутья	⊕	Ремонтный шибер
13	Воздухоподогреватель		
14	Вентилятор холодного воздуха		

Общестанционный коллектор горячего воздуха $t=250-300^{\circ}\text{C}$

Общестанционный коллектор холодного воздуха $t=30^{\circ}\text{C}$

Линейный холодный воздух к вентилятору сепаратора

Линейный холодный воздух к вентилятору мельницы

* нумерация основных горелок №1-4 – горелки первого яруса, №5-8 – горелки второго яруса.
 ** подача I-го воздуха на сушку в мельнице показана условно. Сушка топлива осуществляется горячим воздухом с присадкой холодного воздуха для регулирования температуры азроосмеси.

Рисунок 9 – Принципиальная схема приготовления и подачи угольной пыли в муфельные растопочные горелки

По предложенным техническим решениям проведена экономическая оценка целесообразности внедрения СБР. Капитальные затраты на внедрение описанных систем для различных котлов ПАО «Иркутскэнерго» представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Стоимость оборудования СБР на котёл

№ п/п	Станция	Тип котла	Тип СПП	Стоимость оборудования СБР на котел, млн. руб. (в т. ч. поставка и монтаж)
1.	ТЭЦ-11 Усолье-Сибирское	БКЗ-160-100	с промбункером	24,89
		БКЗ-210-100	с промбункером	32,00
		ТП-81, ТП-85	с промбункером	54,45
2.	Ново-Зиминская ТЭЦ	БКЗ-420-140	с прямым вдуванием и ММТ	50,63
3.	Ново-Иркутская ТЭЦ	БКЗ-420-140	с прямым вдуванием и ММТ	50,63
		БКЗ-500-140	с прямым вдуванием и М-В	51,31
		БКЗ-820-140	с прямым вдуванием и М-В	84,15
4.	Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭЦ	БКЗ-75-39ФБ	ШМТ с прямым вдуванием	20,27
5.	ТЭЦ-10 Ангарск	ТП-10	с промбункером	34,55
		ПК-24	с промбункером	45,06

СБР даёт преимущество в части значительного снижения условно-постоянных затрат, таких как:

- отказ от использования мазута;
- эксплуатационные затраты, включая затраты на подогрев мазутного хозяйства, ремонт и фонд оплаты труда.

Для существующих станций «Иркутскэнерго» затраты на внедрение СБР могут быть компенсированы в перспективе до 20 лет и более. При этом для вновь строящихся станций, ввиду возможности отказа от строительства мазутного хозяйства, эффективность внедрения СБР значительно выше. В любом варианте разработанные СБР позволяют исключить использование мазута, как для растопки, так и для подсвет-

ки факела на пониженных нагрузках до $0,3D_{\text{ном}}$ в широком диапазоне используемых углей.

Результаты испытаний и опыт эксплуатации. Технология замены мазута пылеугольным топливом в настоящий момент уже довольно хорошо отработана. В период с 2011 по 2014 год на ряде пылеугольных котлов ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго» установлены муфелизированные предтопки. В 2013 году на ТЭЦ-10 (г. Ангарск) по проекту «ЗиО-КОТЭС» на барабанном котле ТП-10 ст. № 2 (а в дальнейшем и на котле ст. № 1), была установлена вихревая муфельная горелка мощностью 8 МВт с мазутным разогревом стенок. Целью данной работы было обеспечение работы котла на пониженных нагрузках вплоть до $0,3D_{\text{ном}}$ без использования для подсветки факела мазута в качестве основного топлива. В 2014 году был выполнен пробный пуск котла ТП-10 ст. № 2 ТЭЦ-10 ПАО «Иркутскэнерго» из холодного состояния с использованием системы муфельной подсветки (рисунок 11). После предварительного разогрева муфеля мазутом в течение 1 часа до температуры $430\text{ }^{\circ}\text{C}$ была включена подача пыли. Затем подача мазута постепенно исключалась. При этом расход мазута на весь период растопки составил не более 0,6 т. Воспламенение угольной пыли в муфеле было стабильным и протекало без нарушений. Длительность растопки составила 4 часа.

Как показывают результаты испытаний, работа муфелизированных предтопок обеспечивает подачу в топочную камеру горящего пылеугольного факела (рисунки 10, 11), который прогревает топочную камеру и способствует воспламенению факела основных горелок. Работа предтопок гарантировано обеспечивает нагрузку котла $0,3D_{\text{ном}}$ без подсветки мазутом [7].



Рисунок 10 – Распространение факела муфельной горелки в топку котла ТП-10



Рисунок 11 – Работа муфельной горелки при растопке котла ТП-10 из холодного состояния

На рисунках 12, 13 представлены фотографии расположения оборудования в условиях станции на котлах БКЗ-75-39ФБ и котлах БКЗ-420-140, соответственно.



Рисунок 12 – Фото оборудования системы муфельной подсветки котла БКЗ-75-39ФБ



Рисунок 13 – Фото установки муфельной горелки на боковой стене топки котла БКЗ-420-140

Позже в муфельную горелку котла № 1 была установлена система электрохимического сжигания топлива (ЭХТС). В марте 2017 года была проведена безмазутная растопка котла ТП-10 ст. № 1 из холодного состояния на муфельной горелке, оснащенной системой ЭХТС. Сжигаемое топливо при растопке – угольная пыль, хранящаяся в промежуточном бункере систем пылеприготовления котла ст. № 1. Длительность растопки составила 5 часов. Нарушений в работе системы ЭХТС в процессе растопки не было. Мазут в топку не подавался в течение всего времени растопки. Нарушений в процессе растопки отмечено не было, отсутствовали замечания по факелу муфельной горелки, а также наброс факела на стенки самого муфеля.

Также были проведены мероприятия по организации безмазутной растопки барабанного котла ПК-24, на котором в существующие прямоточные горелки была установлена система ЭХТС («Сибтхэнерго»).

Осенью 2017 года по проекту ООО «ЗиО-КОТЭС» на котлах БКЗ-75-39ФБ Шелеховского участка Ново-Иркутской ТЭЦ начался монтаж системы муфельной подсветки факела совмещенной с ЭХТС. Пуск системы планируется в начале 2018 года.

Выводы:

1. Выполненные «ЗиО-КОТЭС» работы по внедрению систем безмазутного розжига и подсветки факела на пылеугольных котлах

ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго» показали, что СБР позволяют исключить использование мазута, как для растопки, так и для подсветки факела на пониженных нагрузках до $0,3D_{ном}$.

2. По результатам расчетно-аналитических и экспериментальных работ разработаны варианты установки систем безмазутного розжига на разные типы котлов. Схемы предусматривают возможность растопки без использования мазута при наличии горячего воздуха от соседних работающих котлов или электровоздухоподогревателей:

2.1. Для систем с промбункером в качестве основного варианта предложена схема транспортировки ПВКд и накопления угольной пыли от соседних работающих котлов в бункеры растапливаемых котлов. Также рассмотрен вариант с установкой рукавных фильтров в схеме со сбросом отработанного СА в атмосферу;

2.2. В системах с прямым вдуванием предложена схема безмазутной растопки от собственной пылесистемы растапливаемого котла при наличии горячего воздуха.

3. В каждом конкретном случае состав оборудования СБР определяется индивидуально на основании технической и экономической эффективности. Состав оборудования может быть различным:

3.1. Установка муфельных горелок или других систем инициации горения пылеугольного факела для снижения расхода мазута на станции до 70 % и более. Экономически эффективно для большинства ТЭЦ для работы в летнем режиме;

3.2. Установка комплексных систем безмазутного розжига с полным отказом от мазутного хозяйства. Экономически эффективно для вновь строящихся ТЭЦ и станций с повышенной стоимостью мазута.

Список литературы

1. Предпроектные проработки с укрупненной оценкой технических решений по внедрению системы безмазутного розжига (СБР) котлов ПАО «Иркутскэнерго». Этап 1. Литературный обзор, Новосибирск, 2016 г.

2. Дубровский В.А. Энергосберегающие системы растопки и подсветки факела топочных камер котлов [Текст]: Монография / В.А. Дубровский, М.В. Зубова. Красноярск, СФУ. – 2012. – 186 с.

3. F X. Lu et al. / Diamond and Related Materials 7 (1998) 737 – 741.

4. Моссэ А.Л. Плазменные технологии и устройства для переработки отходов [Текст]: Монография / А.Л. Моссэ, В.В. Савчин. – Минск: Беларуская навука, 2015. – 411 с.

5. Бурдуков А. П. Использование механоактивированных углей

микрופомола в энергетике / А.П. Бурдуков, В.И. Попов, В.А. Фалеев, Т.С. Юсупов // Ползуновский вестник, 2010. – № 1. – с. 93 – 98.

6. Предпроектные проработки с укрупненной оценкой технических решений по внедрению системы безмазутного розжига (СБР) котлов ПАО «Иркутскэнерго». Этап 2. Укрупненная оценка технических решений, Новосибирск, 2017 г.

7. Цепенюк А.И. Опыт использования муфелизированных предтопков для снижения технического минимума пылеугольных котлов / А.И. Цепенюк, Ф.А. Серант, А.В. Шихотинов и др. // Горение твердого топлива: тезисы докладов 8-ой всероссийской конференции с международным участием, Новосибирск, 13 – 16 ноября 2012 г. – Новосибирску.: Изд-во ИТ СО РАН, 2012. – 164 с.

БЛОЧНО-МОДУЛЬНЫЕ КОТЕЛЬНЫЕ НА ГАЗООБРАЗНОМ ТОПЛИВЕ

А. С. Роговой, И. А. Попов, Е. Б. Жуков
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
г. Барнаул

Ключевые слова: блочно-модульная котельная, газообразное топливо, системы удаленной диспетчеризации.

Аннотация: Рассмотрены блочно-модульные котельные на газообразном топливе их конструкции и достоинства.

Блочно-модульная котельная (БМК) – это паровая или водогрейная котельная частичной или полной заводской готовности, состоящая из одного или нескольких модулей [1].

БМК предназначены для теплоснабжения жилых, общественных и промышленных объектов. В качестве топлива в котельных используется [2]:

- уголь,
- природный газ,
- сжиженный газ (пропан – бутан),
- жидкое (дизельное) топливо.

В комплекс БМК на газообразном топливе входят [1]:

- блочно-модульное здание, состоящее из транспортабельных блок-модулей;
- котлы с горелочными устройствами;- внутреннее газовое и оборудование;

- блок внутреннего контура сетевой воды;
- блок приготовления горячей воды (ГВС);
- блок насосов сетевой воды (возможны варианты для нескольких независимых контуров);
- блок насосов горячего водоснабжения (ГВС);
- блок химводоподготовки исходной воды для подпитки и поддержания статического давления в тепловой сети;
- вспомогательное оборудование котельной;
- щит электропитания;
- щит управления работой котельной (может объединяться со щитом электропитания);
- электрооборудование;
- система отопления и приточно-вытяжной вентиляции;
- пожарно-охранная сигнализация;
- сигнализация загазованности по метану и СО;
- узлы коммерческого учета отпускаемой тепловой энергии, расхода водопроводной воды, расхода подпиточной воды, расхода топлива и потребляемой электроэнергии;
- диспетчерский щит для дистанционного контроля за работой котельной;
- дымовые трубы.

Блочно-модульное здание котельной состоит из одного или нескольких транспортабельных блок-модулей, в зависимости от тепловой производительности котельной, модели и количества устанавливаемых котлов. Блок-модули выполнены из легких строительных конструкций на основе жесткого металлического каркаса со смонтированными системами отопления, вентиляции и осветительной сетью. Каждый блок-модуль состоит из конструктивных элементов: основания, каркаса и покрытия (стен и кровли). Каркасом модуля является металлическая пространственная конструкция, выполненная на основании-платформе [1]. Конструкция модуля позволяет воспринимать снеговые, ветровые нагрузки, вес сэндвич - панелей и усилия, возникающие при подъеме модуля. Стойки, балки и прогоны изготовлены из стальных гнутых замкнутых квадратных труб. Все узлы выполнены на сварке [2].

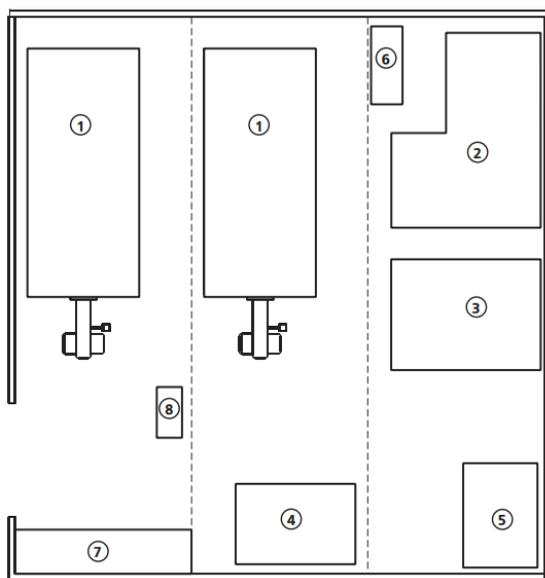
БМК оборудованы автоматикой управления и безопасности, позволяющей эксплуатировать их в автоматическом режиме без присутствия обслуживающего персонала [2]. В контуре отопления температура теплоносителя регулируется в зависимости от температуры наружного воздуха (погодозависимое управление), что обеспечивает существ-

венную экономию топлива и комфортный режим в отапливаемых помещениях [1].

Пример расположения оборудования в блочно-модульной котельной на газообразном топливе представлен на рисунке 1.

Основные достоинства БМК [2]:

- возможность монтажа и безопасность в сейсмоопасных районах;
- высокая скорость монтажа на участке заказчика;
- возможность модернизации и реконструкции котельной добавлением или заменой модулей котельной;
- котельная, хоть и относится к объектам капитального строительства, может быть демонтирована и перевезена в другое место (ТКУ);
- котельная может работать без обслуживающего персонала и быть полностью автоматизирована, с качественной системой диспетчеризации и телеметрии [4].



1 – котел водогрейный с горелочным устройством; 2 – блок теплообменников сетевой воды; 3 – блок сетевых насосов; 4 – блок теплообменников горячего водоснабжения; 5 – блок насосов горячего водоснабжения; 6 – блок химводоподготовки; 7 – узел учета газа; 8 – щит электропитания и управления

Рисунок 1 – План расположения оборудования БМК

Подводя итог всех представленных выше факторов, можно с уверенностью утверждать, что именно блочно-модульные котельные являются оптимальным решением для многих потребителей. Это оборудование практически не имеет пределов в плане тепловой мощности, а также очень удобно в плане обслуживания: с ним с лёгкостью справится среднестатистический современный человек. Профильные специалисты рекомендуют выбирать для своей котельной именно представленное оборудование по многим причинам. Очень важно, что эти рекомендации в одинаковой мере носят как технический, так и эстетический характер.

Список литературы

1. Справочник «Интерма-2010»: Изд-во ГК «Интерма», 2010. – 70 с.
2. Санцевич В.И. Блочно-модульная водогрейная котельная [Электронный ресурс]: практическое пособие/ Санцевич В.И. – Электрон. текстовые данные. – Минск: ТетраСистемс, 2013. – 64 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/28055.html>. — ЭБС «IPRbooks»
3. Роддатис К.Ф. Котельные установки [Текст] / К.Ф. Роддатис.: М. «Энергия», 1977. – 432 с.
4. Паутова Е.Е. Система удаленной диспетчеризации на примере модульной котельной установки / Е.Е. Паутова, А.А. Гладких, Е.Б. Жуков, К.В. Меняев, М.В. Тиханов // Современные тенденции котлостроения: Материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017 – с. 58–67.

УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА КАФЕДРЕ «КОТЛО- И РЕАКТОРОСТРОЕНИЕ» АЛТГТУ ИМ. И. И. ПОЛЗУНОВА

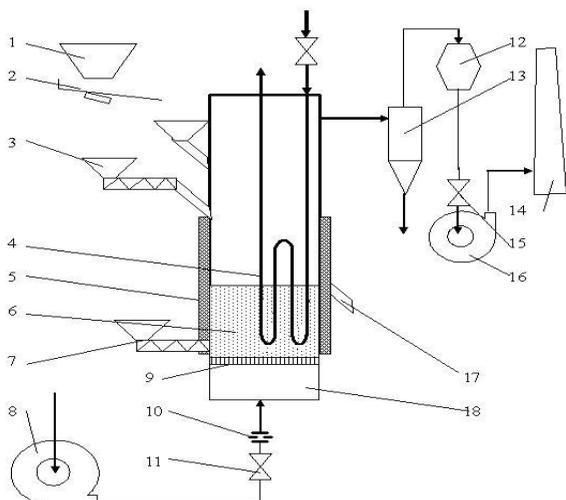
**Е. К. Сарсембенов, А. А. Саковский, К. И. Пономаренко,
Н. В. Шарков, К. В. Меняев**
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
г. Барнаул

Ключевые слова: экспериментальная установка, кипящий слой, вихревое сжигание, слоевое сжигание.

Аннотация: В данной статье рассмотрена огневая экспериментальная установка с различными способами сжигания органических топлив.

Кафедра «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ занимается исследованием различных способов сжигания альтернативных и твердых топлив.

Для глубокого и качественного познания теплофизических процессов, происходящих при сжигании топлива лаборатории топочных процессов функционирует огневая установка с кипящим слоем мощностью 0,5 МВт (рисунок 1).



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

Рисунок 1 – Схема огневого стенда с кипящим слоем (FB-2)

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 подрешеточную камеру подается холодный воздух высоконапорным вентилятором. Подача топлива в 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 [1].

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

Помимо режима с кипящим слоем в установке можно организовать слоевое сжигание различных видов топлива, а также вихревое сжигание.

На данной огневой установке можно проводить исследования и вести разработки по следующим вопросам и проблемам [2]:

- оптимизация системы ожигения слоя (конструкция газораспределительной решетки, колпачков, сепаратора слива слоя, параметры газовых струй, равномерность ожигения);
- надежность методов растопки топочного устройства;
- эффективность выгорания твердого топлива (механизм образования механического недожога, возврат уноса, способы дожигания);
- применение грануляции (грануляция уноса, мелкого топлива, всего топлива);
- сжигание нетрадиционных топлив в кипящем слое (отходы цветной металлургии, деревообработки, хим. промышленности, органические и сельскохозяйственные отходы, ил водоотстойников и др.);
- слоевое сжигание различных видов топлива;
- вихревое сжигание различных видов топлива.

Список литературы

1. Меняев К.В. Экспериментальное исследование топочных устройств с кипящим слоем / К.В. Меняев, Е.Б. Жуков, Е.Е. Паутова, Е.К. Сарсембеков // Ползуновский альманах. – 2017. – Т. 1. – № 3. – с. 44–53.

2. Пронь Г.П. Экспериментальные исследования теплофизических процессов и аппаратного оформления топочных устройств кипящего слоя при сжигании твердого топлива в лабораториях кафедры Котло- и реакторостроения АлГТУ / Г.П. пронь, И.Д. Фурсов // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – с. 106 – 109.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ

Е. К. Сарсембенов, К. В. Меньев, Е. Е. Паутова, Е. Б. Жуков
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
г. Барнаул

Ключевые слова: псевдоожигение, кипящий слой, скорость ожигающего агента, сопротивление слоя, экспериментальная установка.

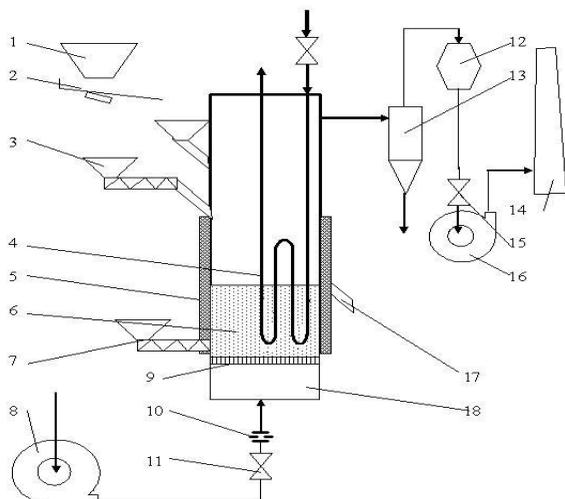
Аннотация: В статье представлены результаты экспериментальных исследований аэродинамики топочных устройств с кипящим слоем на огневой экспериментальной установке FB-2 кафедры «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ.

Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик топочных устройств с кипящим слоем проводилось на малогабаритной камере сгорания FB-2 (150) (рисунок 1). Широкий диапазон регулирования режимных параметров позволяет широко варьировать высоту слоя, а также топливо с различным составом [1, 2, 3].

На рисунке 2 изображена гистограмма распределения состава инертного наполнителя слоя до использования в стенде в качестве наполнителя и после растопки стендовой установки.

В ходе проведения экспериментов использовались крупные частицы слипшегося песка и шлака размер которых составлял 10–25 м. В ходе проведения экспериментов слой, неоднократно, зашлаковывался. Наибольший интерес представляют два эксперимента.

Слой был зашлакован в результате недостаточной для нормального процесса псевдоожигения подачи воздуха, расход составлял 0,005 м³/кг, что недостаточно для нормального процесса псевдоожигения слоя при высоте его высоте в 100 мм. Размер образовавшихся агломератов достигал 30 мм, рисунок 3.



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

Рисунок 1 – Схема огневого стенда с кипящим слоем (FB-2)

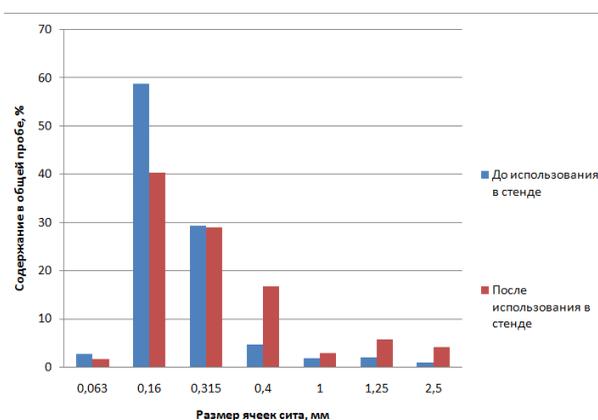


Рисунок 2 – Гистограмма распределения состава инертного наполнителя

Слой был зашлакован в результате добавления в него крупных частиц в виде слипшегося песка и шлака размером 10–25 мм. Крупные частицы добавлялись постепенно, замеры производились после достижения содержания в 10 %, 20 %. Высота слоя при этом оставалась постоянной, и составляла 200 мм, т. е. слой при этом сливался. После добавления 10 % крупных частиц процесс псевдооживления происходил равномерно, визуально не наблюдалось застойных зон. При добавлении 20 % крупных частиц слой был зашлакован. На рисунке 4 изображены частицы зашлакованного слоя, размер которых составлял до 100 мм.



Рисунок 3 – Агломераты слоя, образованные в результате не достаточной подачи воздуха

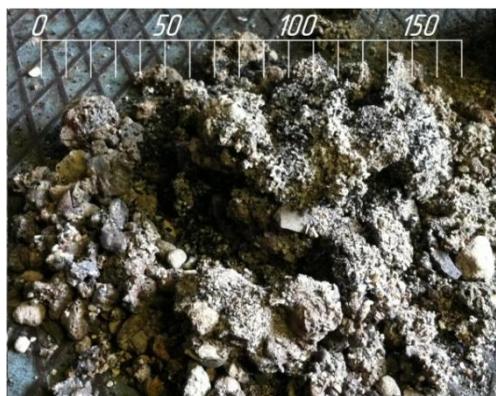


Рисунок 4 – Агломераты слоя, образованные в результате добавления крупных частиц

При экспериментальных работах также проводилось исследование влияния крупных частиц на сопротивление слоя (рисунок 5). Анализируя полученный график можно сделать вывод о линейной зависимости сопротивления псевдооживленного слоя и его высоты, что соответствует выражению $\Delta P = \rho gh$.

При анализе графиков изображенных на рисунке 9 сделан вывод, о том что с увеличением содержания крупных частиц в слое в виде шлака сопротивление слоя уменьшается, скорости начала оживления при этом так же уменьшаются, как и скорости начала уноса частиц из слоя. Это вызвано меньшей плотностью шлака $\rho_{ш} = 1507,7 \text{ кг/м}^3$ по сравнению с плотностью песка $\rho_{п} = 1832,9 \text{ кг/м}^3$. Слою с большей концентрацией крупных частиц в виде шлака нужен меньший расход воздуха, для того чтобы он был полностью сжижен, следовательно требуется меньший расход воздуха для достижения скорости уноса, количество которого может быть не достаточно чтобы полностью сжечь топливо.

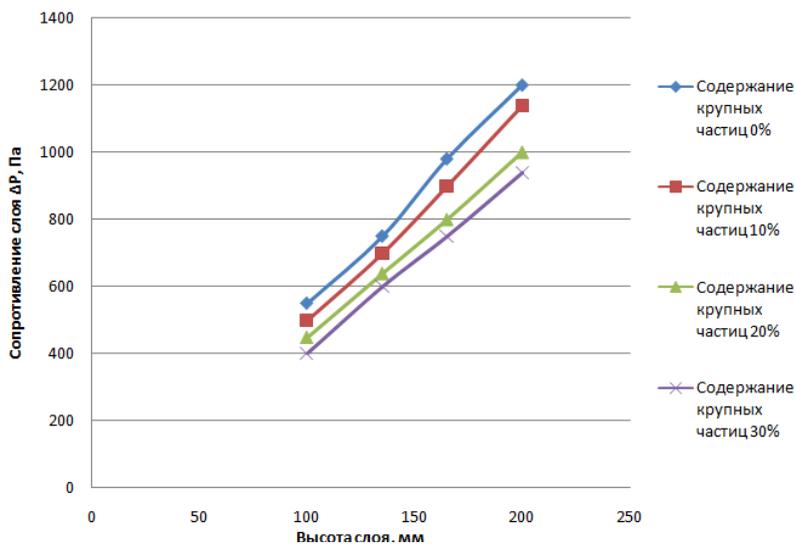


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления псевдооживленного слоя от высоты слоя

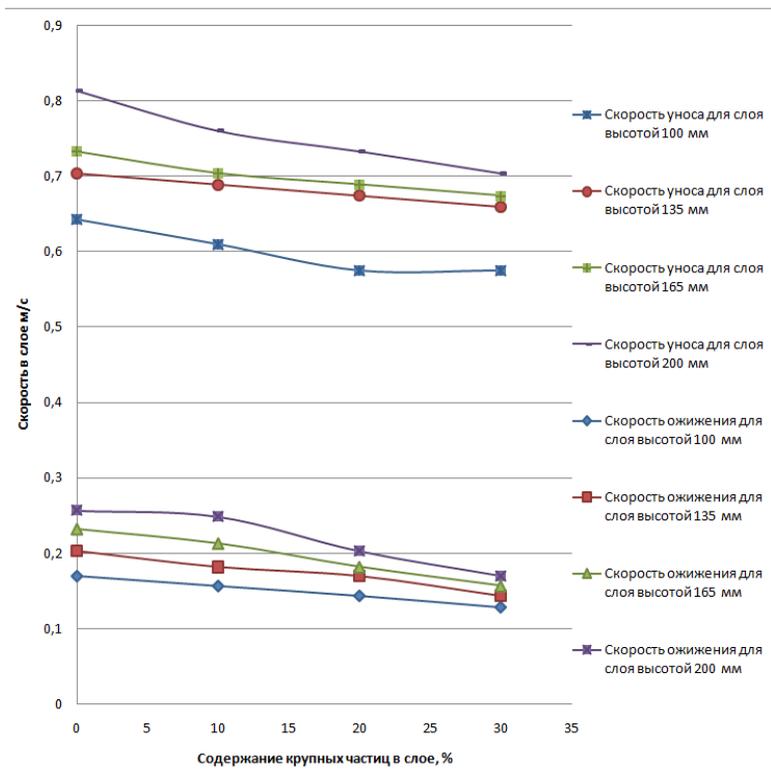


Рисунок 6 – Скорость псевдоожигения и уноса инертного материала из слоя

Проводя анализ данных полученных при растопке огневого стенда можно сделать вывод о том, что при скоростях близких, но больших чем скорость начала псевдоожигения горение невозможно, вследствие недостаточного объема подаваемого воздуха, который меньше теоретически необходимого для полного выгорания топлива. Топливо в слое выгорает полностью при скоростях близких к скоростям уноса материала из слоя (рисунки 6, 7).

Рассмотрены параметры слоя при растопленной огневой установке (рисунок 8), Высота псевдоожигенного слоя $H = 105$ мм, содержание крупных частиц 0 %. При скорости ожигающего агента $W_{ож} = 0,54$ м/с, коэффициент избытка воздуха $\alpha_{ср} = 0,96$, топливо выгорает не полностью, вследствие недостаточного объема воздуха, это сопро-

вождается интенсивным выходом летучих, происходит газификация топлива.

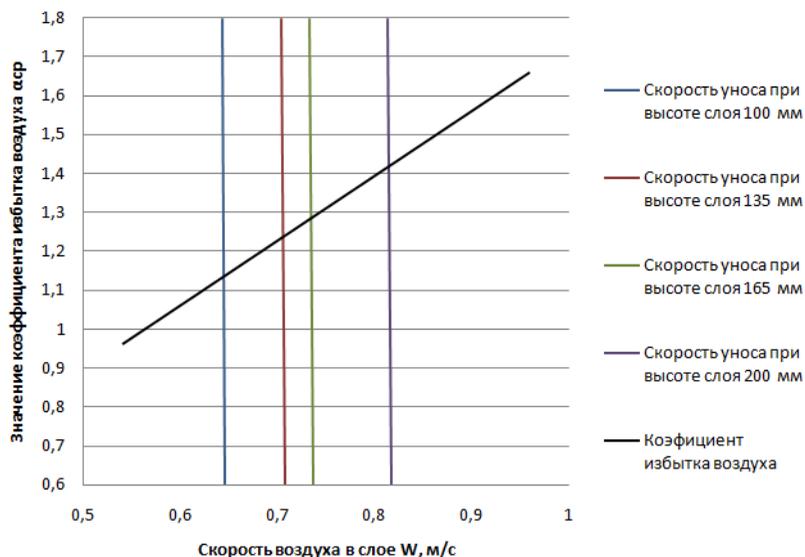


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента избытка воздуха от скорости оживающего агента без содержания в слое крупных частиц

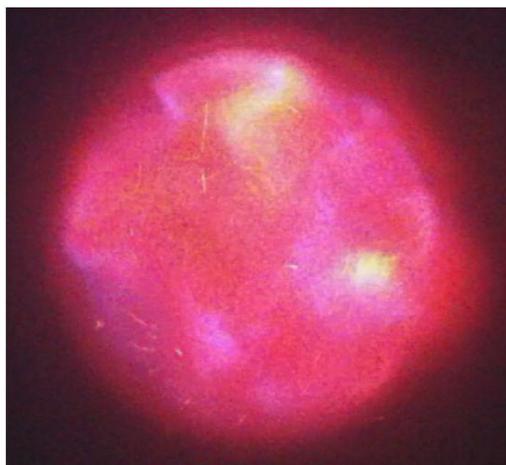


Рисунок 8 – Фотография кипящего слоя с интенсивной газификацией топлива

Увеличивая скорость оживающего агента до $W_{ож} = 0,64$ м/с, коэффициент избытка воздуха принимает значение $\alpha_{ср} = 1,14$, газификация при этом значительно уменьшается. Температура слоя повышается. Процесс изображен на рисунке 9.

При большем увеличении скорости оживающего агента $W_{ож} = 0,69$ м/с, коэффициент избытка воздуха принимает значение $\alpha_{ср} = 1,21$, температура при этом увеличивается и достигает своего максимального значения в 850 °С. При данной скорости наблюдается унос материала слоя и топлива из установки (рисунок 10).

Добавляя в слой крупные частицы размером 10–25 мм в количестве 10 % от объема слоя, скорости уноса материала из слоя уменьшаются, следовательно, уменьшается диапазон скоростей воздуха, в котором может существовать псевдооживенный слой и сгорать в полном количестве топливо. Это затрудняет эксплуатацию вследствие уменьшения возможности регулирования параметров слоя.

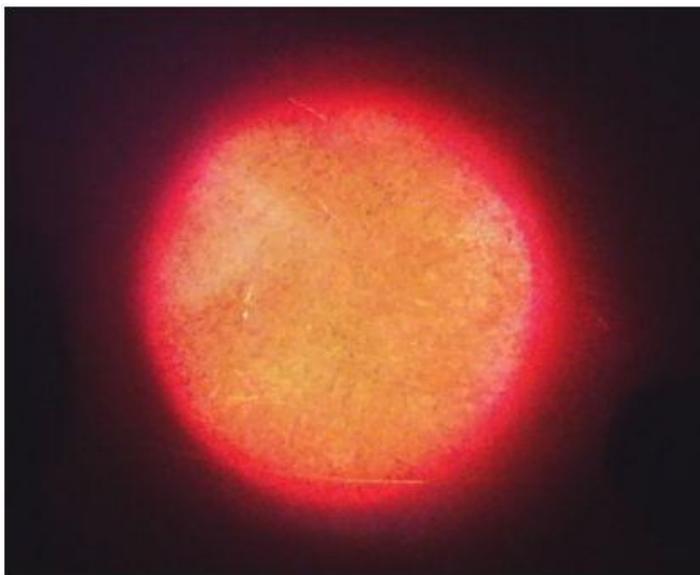


Рисунок 9 – Фотография кипящего слоя с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{ср} = 1,14$

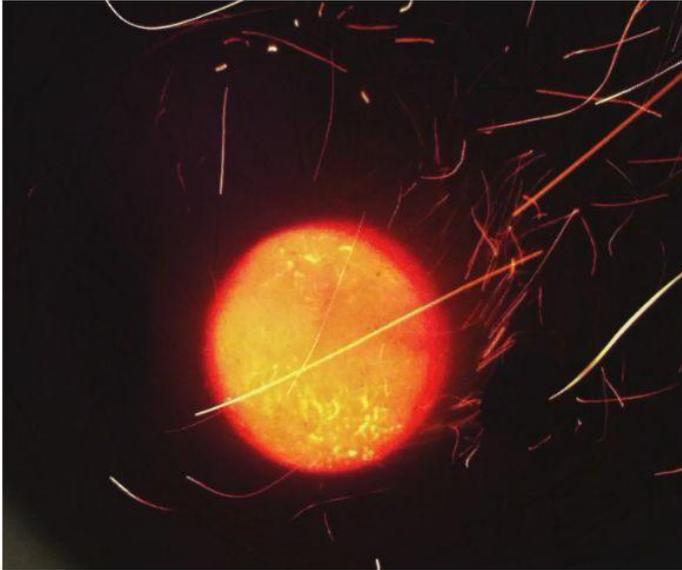


Рисунок 10 – Фотография кипящего слоя с коэффициентом избытка воздуха $\alpha_{\text{ср}} = 1,21$

Зависимость коэффициента избытка воздуха от скорости ожигающего агента, при содержании в слое 10 % крупных частиц изображена на рисунке 11, на котором так же изображены скорости начала уноса частиц из слоя.

Содержание крупных частиц в слое 10 % (штриховыми линиями обозначены скорости ожигающего агента при соответствующих высотах слоя, без содержания крупных частиц в нём)

При добавлении в слой 20 % крупных частиц в виде шлака слой был зашлакован не зависимо от его высоты. Крупные частицы попадая в слой затрудняли его равномерное перемешивание, происходило налипание более горячих частиц горящего топлива, мелких частиц песка, крупные частицы слипались между собой.

На рисунке 12 представлены фотографии камеры сгорания. Слева – при сжигании в слое топлива, без содержания крупных частиц. По снимку видно, что в слое наблюдается равномерное распределение температур по высоте и по сечению камеры. Справа – слой зашлакован в результате добавления в него крупных частиц, здесь наблюдается не равномерное распределение температур по высоте и сечению:

- Нижняя часть камеры сгорания зашлакована полностью, после остановки стенда в нижней части наблюдались объемы, ничем не заполненных пустот и крупные частицы топлива (рисунки 12, 13, 14).

- Верхняя половина слоя зашлакована в центральной части сечения камеры сгорания. По краям сечения происходило интенсивное ожигание и горение топлива (рисунки 12, 13, 14).

- В правой верхней части области горения наблюдался максимум температур (рисунки 12, 13, 14).

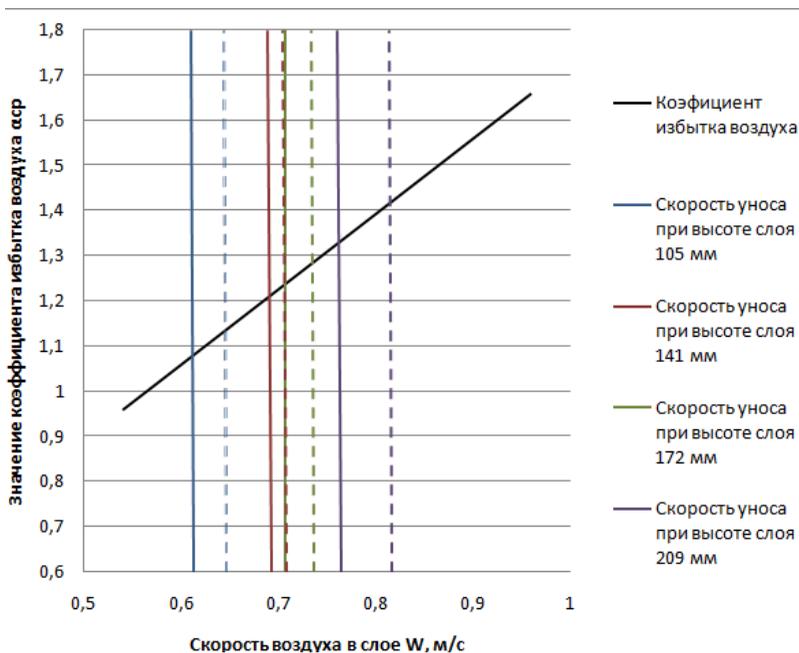


Рисунок 11 – Зависимость коэффициента избытка воздуха от скорости оживающего агента

Обобщая вышеуказанные факторы, можно утверждать, что крупные частицы меньшей плотности, чем сам наполнитель слоя, оказывают отрицательное влияние на общую реологическую картину топочно-го устройства с кипящим слоем, нарушают его однородность, а, значит, крупные частицы вызывают проблемы в эксплуатации котлоагрегата, с которыми нужно уметь бороться.



Рисунок 12 – Распространение поля температур на стенках камеры сгорания огневого стенда (слева – слой без содержания крупных частиц в нём, справа зашлакованный слой)

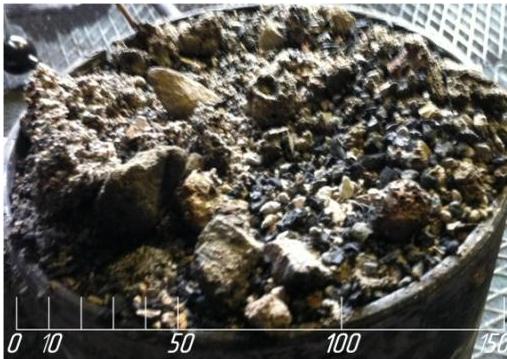
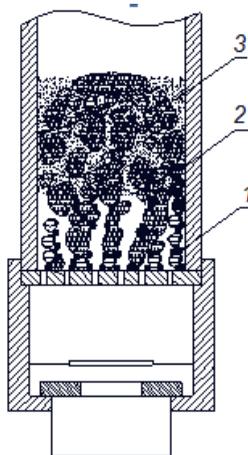


Рисунок 13 – Нижняя часть зашлакованного слоя



1 – частицы топлива, 2 – агломераты песка и шлака,
3 – псевдооживленный слой

Рисунок 14 – Схема расположения частиц в зашлакованном слое

Список литературы

1. Меняев К.В. Экспериментальное исследование топочных устройств с кипящим слоем / К.В. Меняев, Е.Б. Жуков, Е.Е. Паутова, Е.К. Сарсембе-нов // Ползуновский альманах. – 2017. – Т. 1. – № 3. – с. 44–53.

2. Меняев К. В. Псевдооживление как решение экологических проблем в энергетике / Меняев К. В., Паутова Е.Е. // В сборнике: Проблемы техносферной безопасности – 2015 I Международная заочная научно-практическая конференция: сборник статей. Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова". 2015. с. 78 – 81.

3. Сарсембе-нов Е.К. Явление псевдооживления в работе экспериментальной установки ФВ-2 / Е.К. Сарсембе-нов, К.В. Меняев // Современные тенденции котлостроения: Материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017 – с. 74–80.

4. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления [Текст] / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша, В. Б. Гельперин. – М. : Химия, 1967. – 664 с.

5. Басакаов А.П. Котлы и топки с кипящим слоем [Текст] / А.П. Басакаов, В.В. Мацнев, И.В. Распопов, – М.: Энергоатомиздат, 1995 . – 349 с.

6. Басакаов А.П. Расчеты аппаратов кипящего слоя : Справочник [Текст] / [А.П. Басакаов и др.] ; Под ред. И.П. Мухленова и др. – Л. : Химия, 1986 . – 350 с.

7. Кубин М. Сжигание твердого топлива в кипящем слое : Пер. с чешск [Текст] / Под ред. В.Р. Котлера – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.

8. Бувеч Ю.А. Струйное псевдоожигение [Текст] / Ю.А. Бувеч, Г.А. Минаев. – Москва : Химия, 1984. – 133 с.

ОГНЕВАЯ УТИЛИЗАЦИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА

**М. С. Скворцов¹, К. Ф. Коробова¹, С. Н. Хуторненко², А. А.
Гладких², Е. Б. Жуков¹, К. В. Меняев**

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова», г. Барнаул

²Барнаулский филиал ОАО ТКЗ «Красный котельщик»

Ключевые слова: нетрадиционное топливо, древесные отходы, сельскохозяйственные отходы, технология сжигания.

Аннотация: В статье проанализированы свойства древесных и сельскохозяйственных отходов как энергетического топлива, а так же рассмотрены существующие способы и проблемы их сжигания.

Для сокращения финансовых затрат на топливную составляющую, многие предприятия жилищно-коммунального сектора пытаются внедрять в топливный баланс своих котельных различные отходы и другие низкосортные виды топлив. Кроме того, отмечается увеличение количества переводов коммунальной энергетики с традиционных (ископаемых) видов топлива на альтернативное, возобновляемое с целью снижения выбросов парниковых газов в атмосферу.

На сегодняшний день на предприятиях деревообрабатывающей и лесозаготовительной промышленности, образуется большое количество кородревесных отходов, которые уже непригодны для вторичной переработки и сваливаются в отвалы. Использование таких отходов в качестве энергетического топлива, в исходном виде или в виде пеллет, имеет ряд преимуществ: данный ресурс является возобновляемым;

минимальные затраты на его доставку от поставщика; исчезает необходимость утилизации отходов в отвалах. Однако в исходных древесных отходах содержание влаги может достигать 60 %, что характеризует данный вид топлива как низкокачественное, поэтому сжигание его в обычных топочных устройствах неэффективно и необходимо применение специальных методов сжигания и соответствующих топочных устройств [1].

Ценность древесного топлива с экологической и технологической точки зрения состоит в малой зольности, отсутствии фосфора и незначительном содержании серы (за исключением хвойной коры) и большом содержании летучих веществ (до 85 %).

Как известно, основной потерей тепла в любом котлоагрегате является потеря тепловой энергии с уходящими газами, которая определяется температурой дымовых газов на выходе из котла. При сжигании топлив, содержащих серу, во избежание сернокислотной коррозии (сернистой кислотой H_2SO_3) хвостовых поверхностей нагрева температура дымовых газов поддерживается не ниже 200 °С. При сжигании древесного топлива, не содержащего серу, температура уходящих дымовых газов может быть понижена до 110 °С, что позволит существенно повысить КПД котлоагрегата.

Высокий выход летучих при сжигании древесного топлива позволяет иметь большую протяженность факела, в котором осуществляется сгорание выходящих из слоя горючих компонентов. Это создает условие для более равномерного распределения температур по высоте топочного пространства и, следовательно, для более эффективной работы радиационных поверхностей котлоагрегата.

Продукт коксования древесной биомассы – древесный уголь отличается высокой реакционной способностью по сравнению с ископаемыми углями. Высокая реакционная способность древесного угля обеспечивает возможность работы топочных устройств при низких значениях коэффициента избытка воздуха, что положительно влияет на эффективность работы котельных установок.

Недостаток древесного топлива – невысокая теплота сгорания, которая значительно снижается при увеличении влажности и зольности топлива. Влажность древесных отходов может изменяться в довольно широких пределах. В мебельном производстве и на деревообрабатывающих предприятиях этот показатель составляет 10–12 %, на лесозаготовительных предприятиях 45–55 %, влажность коры доходит до 80 %.

Энергетическое использование древесных отходов путем сжигания является одним из эффективных способов ее утилизации на терри-

тории деревообрабатывающих предприятий. Однако отличительной особенностью древесной массы является способность интенсивно поглощать влагу из внешней среды. При длительном хранении за счет атмосферных осадков и других факторов древесные отходы быстро увлажняются (причем влажность древесных отходов может превысить влажность свежесрубленной древесины более 50 %), что снижает эффективность их сжигания. Повышение влажности топлива на 10–15 % приводит к снижению КПД котла на 0,5–0,6 %.

Вследствие повышения влажности топлива снижается температура горения, что приводит к сокращению тепловосприятия радиационными и конвективными поверхностями нагрева и в результате к повышению потерь тепла с уходящими газами и перерасходу топлива.

Содержание внутренней золы в древесине не превышает 2 %. Однако внешние минеральные включения у древесных отходов иногда достигают 20 %. Наличие золы приводит к увеличению расхода топлива за счет затраты дополнительного тепла на ее нагрев и плавление, а также к росту потерь от механического недожога топлива. Зола чистой древесины тугоплавка, и ее удаление из зоны горения не представляет трудностей. При сжигании древесных отходов с большими внешними минеральными включениями образуется спекшийся шлак, удаление которого затруднено. Образование шлака приводит к загрязнению поверхностей нагрева, ухудшению теплообмена и снижению КПД котла.

Следовательно, очень важным процессом при сжигании древесного топлива является качественная подготовка и переработка исходного сырья, обеспечивающего низкую влажность и малое содержание внешних минеральных примесей в древесных отходах [2].

Основными методами огневого сжигания древесных и растительных отходов являются:

1. Слоевой способ сжигания (рисунок 1). Сущность слоевого процесса сжигания твердого топлива заключается в том, что воздух непрерывно продувается через слой горящего кускового топлива, взаимодействует с ним, в результате чего получают нагретые до высокой температуры топочные газы, зола и шлак. Топочные газы омывают поверхности нагрева топочного пространства и передают им часть своего тепла. Поверхности нагрева топки воспринимают тепло, излучаемое раскаленными частицами топлива и пламенем, возникающим при сгорании горючих газов, выходящих из слоя топлива. Зола и шлак удаляются из зоны горения либо вручную, либо посредством механического колосникового устройства того или иного типа.

Пространство в слоевом топочном устройстве, где происходит взаимодействие топлива с воздухом и продуктами сгорания, называют активной зоной или зоной горения. Активная зона в топке состоит из кислородной зоны, зоны восстановления, зоны возгонки летучих и сушки топлива.

Кислородная зона – это нижний слой топлива, в который подводится воздух. В газах, проходящих через этот слой, содержится кислород. В этой зоне происходит взаимодействие кислорода воздуха с углеродом топлива, в результате чего образуется одновременно оксид углерода CO и углекислый газ CO_2 . Верхней границей кислородной зоны является сечение слоя, в котором температура достигает максимального значения, а содержание кислорода становится незначительным. Протяженность кислородной зоны по высоте слоя не зависит от скорости воздушного дутья и определяется размером кусков топлива и его природой. Чем выше реакционная способность топлива, тем меньше протяженность кислородной зоны, и чем больше средний размер куска, тем больше ее протяженность. Если по технологии сжигания топлива высота слоя больше протяженности кислородной зоны, то над ней располагается зона восстановления.

Зона восстановления – это пространство, в котором происходит взаимодействие углекислого газа CO_2 с поверхностью раскаленного топлива, в результате чего в продуктах сгорания увеличивается содержание оксида углерода CO . Взаимодействие углекислого газа с углеродом топлива происходит с поглощением тепла, вследствие чего температура слоя по высоте восстановительной зоны уменьшается.

Над зоной восстановления расположена зона возгонки летучих и сушки топлива. При большой высоте слоя содержание горючих компонентов в топочных газах увеличивается и возникает необходимость подвода воздуха сверху слоя для их дожигания. Воздух, подводимый за слоем топлива для дожигания горючих компонентов топочных газов, называют вторичным воздухом [3].

2. Вихревой способ сжигания (рисунок 2). Вихревой процесс сжигания твердого топлива заключается в том, что внутри объема топки создается устойчивое вихревое вращательное движение газозадушной смеси и частиц топлива, которые движутся по круговым или петлевым траекториям, находясь во взвешенном состоянии и сгорая при движении в газовом объеме. Большая скорость движения частиц и их развитая поверхность создают условия для ускоренного протекания процессов нагревания, подсушки, возгонки летучих и сгорания частиц, витающих в топочном объеме. Для сжигания отдельных крупных частиц вихревые топки снабжаются дожигательными колосниковыми ре-

щетками.

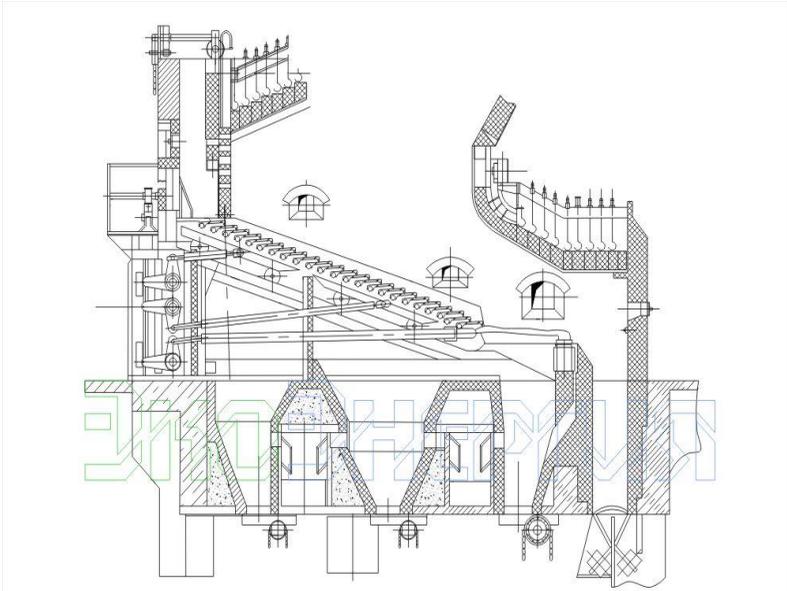


Рисунок 1 – Слоевой способ сжигания

Вихревое движение газовой смеси достигается соответствующим подводом воздушного дутья и отводом продуктов горения. Оно организуется так, что наиболее крупные частицы топлива попадают периодически в область, где газозвушная смесь или воздух движутся с большой скоростью, подхватываются ими и вновь выносятся в топочный объем. Этот цикл повторяется до тех пор, пока частицы топлива, постепенно обгорая, не достигнут размеров, обеспечивающих их полное сгорание за один виток движения газозвушной смеси.

При вихревом процессе сжигания топлива не требуется очень тонкого измельчения кускового топлива. Вихревой процесс дает возможность сжигать каменный уголь с размерами частиц 0,5–3 мм, фрезерный торф и т. п. Многие виды древесных отходов, например опилки, стружки и т. п., могут сжигаться при этом процессе без дополнительного измельчения.

Однако при всех процессах сжигания мелкого топлива во взвешенном состоянии следует иметь в виду, что интенсивность массо- и теплообмена между газовой средой и поверхностью взвешенных частиц определяется не абсолютной скоростью их движения, а скоростью

движения частиц относительно газовой среды, которая при равномерном движении не может превышать скорости витания частиц среды в газовом объеме и ограничена, таким образом, не столь высокими для мелких частиц пределами.

В отличие от слоевого процесса сжигания применение вихревого процесса связано с необходимостью при изменении теплопроизводительности топки регулировать как количество подводимого воздуха, так и количество топлива, подаваемого в топку. Это обстоятельство усложняет автоматизацию работы топочных устройств вихревого типа [3].

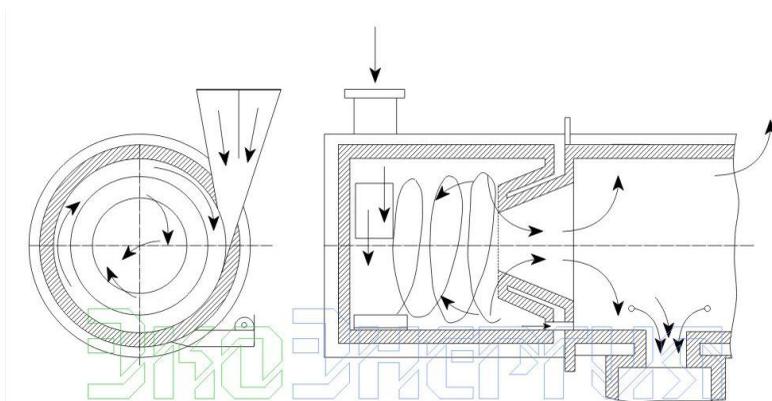


Рисунок 2 – Вихревой способ сжигания

3. Циклонный способ сжигания. Циклонный процесс сжигания по своему принципу аналогичен вихревому процессу. 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. Как правило, выходное отверстие камеры имеет диаметр существенно меньше диаметра циклонной камеры. Вследствие этого крупные частицы пребывают в топочной камере до тех пор, пока их размер не уменьшится до пределов, обеспечивающих их вынос вместе с нагретыми до высокой температуры продуктами горения. В циклонных топках наилучшим образом реализуются возможности повышения эффективности массо- и

теплообмена между поверхностью взвешенных частиц топлива и газовой средой за счет увеличения скорости вихревого движения воздуха и продуктов сгорания и допустимого уменьшения внутреннего диаметра топочной камеры [3].

4. Факельный способ сжигания (рисунок 3). Факельный процесс сжигания пылевидного топлива состоит в том, что пылевоздушная смесь подается через горелку в топочное пространство и сгорает во взвешенном состоянии, образуя факел ярко светящегося пламени.

Для обеспечения устойчивости горящего факела частицы топлива должны предварительно измельчаться до таких размеров, чтобы полностью сгореть в короткое время пребывания их в объеме факела. В связи с этим сжигать в факеле можно только топливо с высокой степенью измельчения. Практически без дополнительного измельчения в факеле можно сжигать только один вид древесных отходов – шлифовальную пыль.

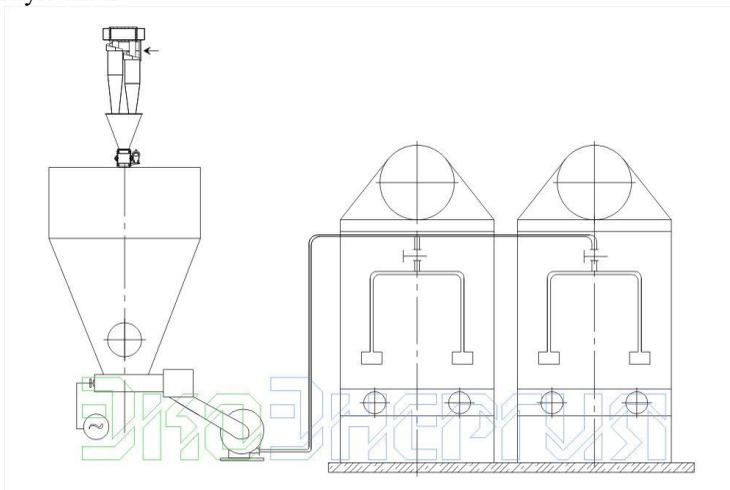


Рисунок 3 – Факельный способ сжигания

Особенностью факельного процесса является весьма незначительный запас топлива в топочной камере, отчего процесс горения малоустойчив и весьма чувствителен к изменению режима. Регулировать мощность топки можно лишь одновременным изменением количества подаваемых в топку топлива и воздуха. При факельном процессе наблюдается золотой износ поверхностей нагрева, высаживание на кирпичных стенках топки твердого сплавленного шлака. Факельный процесс требует точного соблюдения мер взрывобезопасности [3].

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.
2. Сухоцкий А.Б. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Курс лекций [Текст] / А.Б. Сухоцкий, В.Н. Фарафонов. – Минск: БГТУ, 2009. – 246 с.
3. Головкин С.И. Энергетическое использование древесных отходов [Текст] / С.И. Головкин, И.Ф. Коперин, В.И. Найденков. – М.: Лесн. пром-ть, 1987. – 224 с.
4. Жуков Е.Б. Технология совместного сжигания бурого угля и кородревесных отходов в энергетических котлах / Е.Б. Жуков, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова, Е.М. Пузырев // В сборнике: Использование твёрдых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла. Материалы III Международной научно-технической конференции. ОАО "Всероссийский дважды Ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт" (ОАО "ВТИ"). 2016. с. 114 – 120.

ЭЛИМИНАЦИЯ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ КОТЛА КВ-10 (ПОСЕЛОК МОРОН, МОНГОЛИЯ)

Д. С. Смыкалов¹, В. А. Голубев²

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова» г. Барнаул

²ООО «ПроЭнергоМаш», г. Барнаул

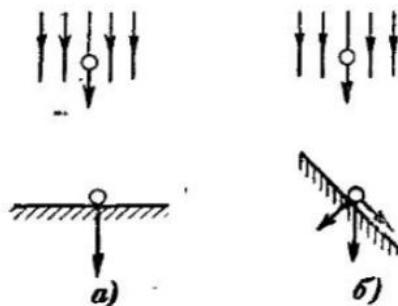
Ключевые слова: элиминация эрозионного износа, численное моделирование, водогрейный котел.

Аннотация: В статье рассмотрен пример использования численного моделирования эрозийного износа конвективной поверхности котла КВ-10 поселка Морон (Монголия).

При проектировании водогрейных котлов необходимо уделять внимание исключению процесса эрозийного износа труб поверхностей

нагрева частицами золы и несгоревшего топлива. Неправильный выбор скоростей газов в газоходе и конвективных пакетах может вызвать активное истирание металла трубы на отдельных участках по периметру, утонение стенки и аварийный разрыв [1].

Сущность эрозийного износа заключается в том, что крупные частицы золы, обладающие достаточной твердостью и остротой граней, при ударах о стенку трубы непрерывно срезают с поверхности микроскопически малые слои металла, постепенно уменьшая в этом месте толщину стенки трубы (рисунок 1). Частицы несгоревшего топлива (чаще у антрацитов и полуантрацитов) также вызывают истирание поверхности [1].



а – прямой удар; б – скользящий удар
Рисунок 1 – Механизм абразивного износа

Механизм износа труб летучей золой. В зависимости от угла, под которым поверхность встречается с набегающей струей запыленных газов, различают прямые и косые удары. Угол между осью потока и касательной к поверхности называют углом атаки. При угле атаки меньше 90° имеет место прямой удар, а при угле, меньшем 90° – косой или скользящий удар [1].

При прямом ударе сила, с которой твердое тело воздействует на поверхность, направлена по нормали. Эта сила вызывает ударный износ. При косом ударе вектор силы может быть разложен на два: по нормали и по касательной (рисунок 1). Последняя сила вызывает износ истиранием. Таким образом, при косом ударе имеет место как ударный, так и истирающий износ, соотношение между которыми зависит от угла атаки и свойств поверхности и твердых частиц в потоке [1].

Износ прежде всего определяется эрозионностью частиц золы. Последняя зависит от содержания в золе ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$), % и заметно увеличивается, когда $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) > 60$ % [2].

Интенсивность износа определяется:

1) Кинетической энергией отдельных частиц золы топлива, которая зависит от квадрата скорости газов – w_z^2 [2];

2) Количеством частиц (концентрацией μ_{zn}), проходящих у поверхности в единицу времени, которое зависит от зольности топлива и является возрастающей функцией от скорости w_z [2];

3) неравномерностью концентрации золы в потоке k_μ и скоростей газов в сечении k_w [2];

4) плотностью расположения труб в поперечно-омываемых пучке, т. е. относительным шагом труб s_1/d [2].

В поселке Морон (Монголия) установлен водогрейный котел KB-10, работающий на твердом топливе, водотрубный котел состоит из: топочного и конвективного блоков котла и механической топки. Топочная камера имеет горизонтальную компоновку, экранирована трубами, входящими в коллекторы. Для данного котла было проведено численное моделирование в программе Fier3D. Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Компьютерные модели проще и удобнее исследовать в силу их возможности проводить вычислительные эксперименты, в тех случаях когда реальные эксперименты затруднены из-за финансовых или физических препятствий или могут дать непредсказуемый результат. Логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта оригинала (или целого класса объектов), в частности, исследовать отклик моделируемой физической системы на изменения ее параметров и начальных условий.

Построение компьютерной модели базируется на абстрагировании от конкретной природы явлений или изучаемого объекта-оригинала и состоит из двух этапов - сначала создание качественной, а затем и количественной модели. Компьютерное же моделирование заключается в проведении серии вычислительных экспериментов на компьютере, целью которых является анализ, интерпретация и сопоставление результатов моделирования с реальным поведением изучаемого объекта и, при необходимости, последующее уточнение модели и т. д.

В данном водогрейном котле наблюдался интенсивный износ конвективных поверхностей нагрева (рисунок 2). Из-за неравномерно расположения конвективных пучков по газовому тракту котла в

местах увеличения сечения для прохода газов наблюдается повышенный износ труб около задней стенки котла. Так как происходит отжим газового потока к стенке газохода котла, ввиду неравномерного поля скоростей по газоходу происходит присос потока к стенкам, что ведет в свою очередь повышению концентрации частиц и сильному износу крайних труб конвективного пучка (рисунок 3).

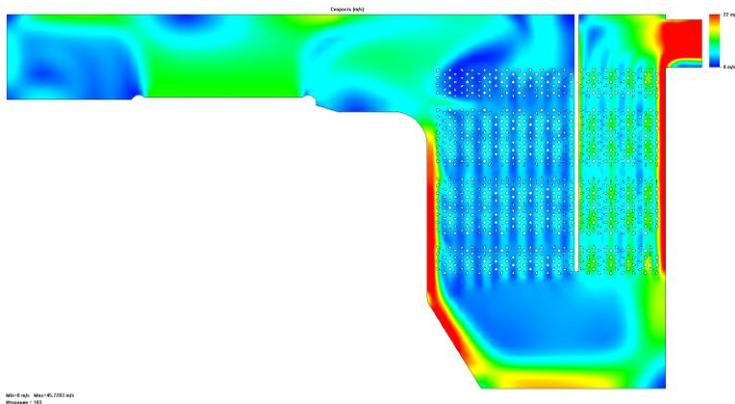


Рисунок 2 – Распределение скорости продуктов сгорания в газовом тракте водогрейного котла КВ-10 (поселок Морон, Монголия)

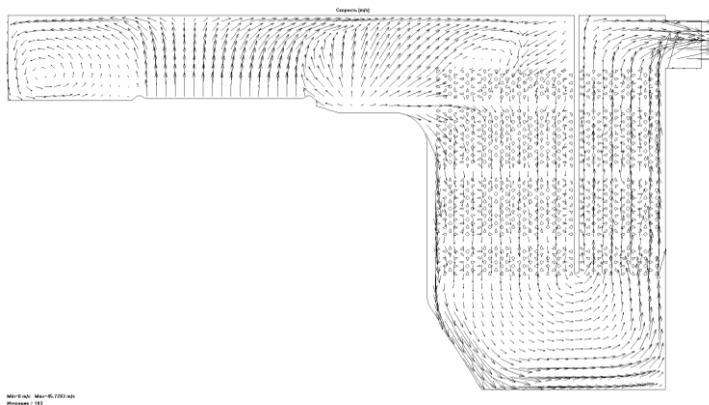


Рисунок 3 – Распределение векторов скорости продуктов сгорания в газовом тракте водогрейного котла КВ-10

(поселок Морон, Монголия)

Для решения данной проблемы было предложено два способа по уменьшению эрозийного износа конвективных пучков. Это установка листов между трубой конвективного пучка и задней стенкой котла, что дает в этом месте уменьшение скорости потока газа и соответственно уменьшение эрозийного износа поверхности нагрева (рисунок 4).

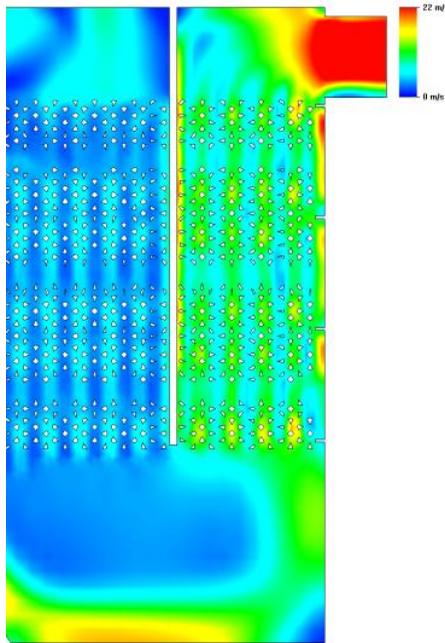


Рисунок 4 – Распределение скорости продуктов сгорания в газовом тракте водогрейного котла КВ-10 (поселок Морон, Монголия) с установкой листов

Второй способ устранения износа конвективных пучков котла заключался в следующем: это уменьшения сечения для прохода газового потока путем перемещения задней стенки на величину устраняющую не равномерность омывание конвективного пучка (рисунок 5).

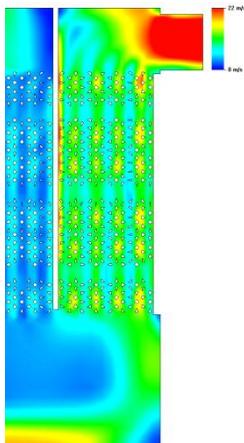


Рисунок 5 – Распределение скорости продуктов сгорания в газовом тракте водогрейного котла КВ-10 (поселок Морон, Монголия) с перемещением задней стены

Из данных предложенных способов, устранения эрозийного износа труб конвективных пакетов водогрейного котла КВ-10, был выбран второй способ, который позволяет гораздо лучше организовать движение газового потока в котле. В практическом использовании этот способ не нашел нареканий и был признан успешным.

Список литературы

1. Стырикович М.А. Парогенераторы электростанций [Текст] / М.А. Стырикович. М.: – Л. , изд-во “Энергия”, 1966. – 384 с.
2. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: учебное пособие [Текст] / И.Д. Фурсов // Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 4-е издание, переработанное и дополненное – Барнаул. : Изд-во АлтГТУ, 2017. – 300 с.
3. РД 10-249-98. Нормы расчета на прочность стационарных котлов и трубопроводов пара и горячей воды. – М. : Госгортехнадзор России, 1999.- 228 с.
4. Резников, М. И. Паровые котлы тепловых электростанций : Учебник для вузов по специальности "Тепловые электрические станции" [Текст] / М. И. Резников, Ю. М. Липов . – М. : Энергоиздат, 1981 . – 240 с.
5. Роберт Д. Порт Практическое руководство компании НАЛКО по анализу причин повреждения котлов [Текст] / NalcoChemicalCompany, 1991. – 271 с.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕПАРАТОРОВ ПЫЛИ

Д. А. Титов¹, К. А. Григорьев²

¹ ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого», г. Санкт-Петербург

² ОАО «Научно-производственное объединение по исследованию и
проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова»
(ОАО «НПО ЦКТИ»), г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: сепаратор пыли, пылеприготовление, регулирование помола угля, тонкодисперсная угольная пыль, численное моделирование.

Аннотация: Приведены результаты разработки и верификации расчётной модели динамического сепаратора пыли на основе программного продукта ANSYS-Fluent. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расчётная модель использована для обоснования проектов модернизации и разработки новых конструкций сепараторов различного типа.

Подготовка угольной пыли к сжиганию в энергетических котлах является важным этапом, который влияет на эффективность и экологические показатели котельных установок. Развитие технологий сжигания твердого топлива обуславливает потребность в совершенствовании оборудования пылеприготовительных систем (ППС). Сепараторы пыли являются важным звеном в ППС.

По разным причинам в отечественной энергетике образовался пробел в области подготовки тонкодисперсной угольной пыли (с остатком на сите 90 мкм менее 10 %), которая используется для “экологически чистой” reburning-технологии сжигания, получившей широкое распространение за рубежом. В ППС для котлов с reburning-технологией используют среднеходные мельницы, оснащённые динамическими сепараторами. В последние годы ОАО “НПО ЦКТИ” совместно с заводом АО “Тяжмаш” (г. Сызрань) проводят комплекс работ по разработке отечественных динамических сепараторов для ТЭС.

Сегодня разработку новых образцов техники невозможно представить без использования компьютерного моделирования. Численный эксперимент позволяет обосновать технические решения при модернизации действующих установок и создании новых конструкций на стадии проектирования.

Цель данной работы – разработка расчётной модели сепаратора для численного исследования его работы.

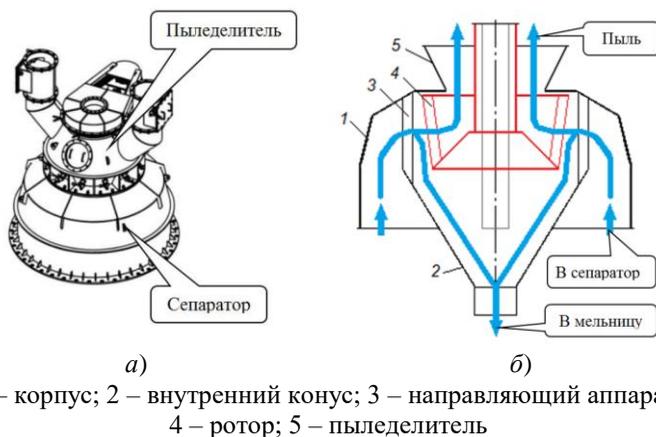


Рисунок 1 – Общий вид (а) и схема (б) динамического сепаратора

В качестве объекта моделирования выбран пилотный образец динамического сепаратора, разработанный при участии ОАО “НПО ЦКТИ” и апробированный на угольном котле ТПЕ-223 энергоблока 225 МВт Черепетской ГРЭС [1].

Динамический сепаратор в комплекте с пыледелителем (рисунок 1, а) установлен на корпусе мельницы сверху. Сепаратор (рисунок 1, б) состоит из корпуса 1, внутреннего конуса 2 и ротора 4. Между корпусом и внутренним конусом сепаратора смонтирован направляющий аппарат 3, представляющий собой равномерно распределённые по окружности и неподвижно закреплённые под углом 45° к радиусу окружности лопатки. На вертикально расположенном валу ротора закреплена корзина с конусообразным основанием, по периметру которого равномерно и под углом 45° к радиусу окружности установлены лопатки 4. Внутри полого вала ротора, соосно размещена труба для подачи сырого топлива в мельницу. На выходе сепаратора установлен пыледелитель 5.

Сушильный агент транспортирует измельчённое и подсушенное в мельнице топливо к входному сечению сепаратора. В сепараторе дисперсный поток огибает внутренний конус, проходит через направляющий аппарат, затем между лопатками вращающегося ротора и далее уходит из сепаратора в пыледелитель. Основное отделение крупных

частиц топлива от дисперсного потока происходит в зазоре между направляющим аппаратом и динамической корзиной ротора. Здесь крупные частицы под воздействием центробежной силы отбрасываются на периферию, теряя скорость, и под воздействием силы тяжести ссыпаются во внутренний конус и возвращаются в мельницу на дополнительное измельчение. Мелкие частицы под действием силы давления потока проходят между лопатками динамической корзины и выносятся потоком из сепаратора в пыледелитель.

Расчётные модели. Для численного исследования работы сепаратора (конструктивных особенностей, гидродинамики и процессов сепарации топлива) был выбран программный комплекс ANSYS-Fluent, который широко используется для решения аналогичных задач.

Исследуемый сепаратор представляет собой пространственную конструкцию, осложнённую лопаточной решёткой направляющего аппарата и динамическими элементами ротора. Рабочая среда – двухфазный поток (“газ – твёрдые частицы”), в котором газовая фаза состоит из смеси воздуха, дымовых газов и водяных паров, а твёрдая фаза представлена совокупностью полидисперсных (различных по размеру) твёрдых частиц.

Предполагалось, что процессы сушки и измельчения топлива завершились в мельнице, конденсация водяных паров в сепараторе отсутствует, и тепловыми потерями в окружающую среду от наружного охлаждения сепаратора можно пренебречь. В этих условиях моделирование изотермического турбулентного течения смеси “газ – твёрдые частицы” рассматривалось в трёхмерной постановке.

Геометрическая модель проточной части сепаратора была предварительно создана в программе SolidWorks и затем импортирована в ANSYS, где преобразована в формат неструктурированной тетраэдрической сетки.

Для описания двухфазного потока использован DPM (Discrete Phase Model) модуль, в котором реализован известный подход Эйлера – Лагранжа к описанию движения непрерывной (газ) и дискретной (частицы) фаз. Выбор модуля DPM обусловлен тем, что в данной задаче объёмная доля твёрдого материала в двухфазной смеси не превышает критического для данного модуля значения 10 %. Для описания течения газа используются уравнения неразрывности и сохранения импульса, замыкаемые с помощью стандартной двухпараметрической $k - \varepsilon$ -модели турбулентности. Для описания движения твёрдых частиц используется модель дискретной фазы, взаимодействующей с газовым потоком (обмен импульсами, массой и энергией). Вращение ротора описывается при помощи модуля MRF (Multiple Reference Frame).

В качестве граничных условий задаются: массовые расходы фаз – на входе и статическое давление потока – на выходе из сепаратора. Взаимодействие твёрдых частиц со стенкой учитывается с помощью экспериментально определённых коэффициентов отскока, равных 0,2 – для нормального и 0,8 – для тангенциального [2].

Верификация расчётной модели выполнена на экспериментальных данных, полученных сотрудниками ОАО “ВТИ” в результате пусконаладочных испытаний среднеходной мельницы типа МВС-195 с динамическим сепаратором [1].

В период испытаний характеристики кузнецкого каменного угля марки Д, поступавшего в мельницу, изменялись в следующих пределах: влажность 10–13,2 %, зольность 14–20 % и удельная теплота сгорания (низшая) 20,6–24,5 МДж/кг (4900–5860 ккал/кг).

Режимные показатели мельницы варьировались следующим образом: расход сырья топлива 2,36–4,17 кг/с (8,5–15 т/ч); объёмная концентрация кислорода в сушильном агенте на входе в мельницу 10–15,5 %; температура сушильного агента после сепаратора 65–90 °С и частота вращения ротора сепаратора 0–2,93 с⁻¹ (0–176 мин⁻¹).

Влажность пыли после сепаратора (3,4–3,8 %) была более близка к гигроскопической влажности этого угля (3,0–3,6 % [3]), нежели к проектной величине (1,6 %). Тонина помола (по величине R_{90}) изменялась в пределах 5,8–49 %.

В численных расчётах состав, расход и плотность сушильного агента принимались по результатам поверочных расчётов ППС в увязке с экспериментальными данными. Предполагалось, что процессы сушки и измельчения топлива завершились в полости мельницы.

Гранулометрический состав угля (дискретной фазы) на входе в сепаратор предварительно задавался ($R_{90} = 50$ % и $R_{1000} = 13$ %) и затем уточнялся в зависимости от доли возврата топлива в мельницу. Кажущаяся плотность топлива определялась по его составу и варьировалась в пределах 1730–1760 кг/м³.

Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными (таблица 1) проводилось по контрольной характеристике пыли на выходе из сепаратора (величине R_{90}) и показало удовлетворительное как качественное, так и количественное согласование расчёта и опыта (рисунки 2 и 3). Расхождение расчёта с опытом (от –2,7 до +4,5 %) находилось практически в пределах погрешности опытного определения величины R_{90} .

Таблица 1 – Сопоставление результатов численного моделирования с экспериментом

Режимные параметры (по данным эксперимента)			Характеристика пыли на выходе из сепаратора R_{90} , %		Расхождение расчётного и опытного значений величины R_{90} (абсолютное), %
Расход угля B_m , кг/с	Расход су- шильного агента G_g , кг/с	Обороты ротора n_r , c^{-1}	Опыт [1]	Расчёт	
3,33	7	1,98	38	36,3	-2,7
3,33	7	2,08	33	34,9	+1,9
4,17	7	2,93	5,8	8,2	+2,4
3,33	7,3	2,08	36	36,4	+0,4
2,36	6,1	2,08	24,8	29,3	+4,5
2,36	4,3	2,08	11,5	15,6	+4,1

Вычислительный эксперимент. Численное моделирование на номинальной нагрузке мельницы ($B_m = 4,08$ кг/с) в вариантах статического сепаратора (при отключённом роторе $n_r = 0$ c^{-1}) и динамического сепаратора (при максимальной частоте вращения ротора $n_r = 3,33$ c^{-1}) позволило оценить влияние режима работы ротора на гидродинамику двухфазного потока в сепараторе [4]. Некоторые результаты расчётов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Условия и результаты численного моделирования при отключённом и работающем роторе динамического сепаратора

Наименование	Частота вращения ротора n_r , c^{-1} :	
	0	3,33
Расход угля на мельницу B_m , кг/с	4,08	4,08
Расход сушильного агента на входе в сепаратор G_g , кг/с	7,0	7,0
Максимальная результирующая скорость потока w_{max} , м/с: на входе в сепаратор в зазоре между направляющим аппаратом и лопатками ротора на выходе из сепаратора	2,1	3,7
	4,7	13,5
	12,2	13,0
Коэффициент неравномерности потока a на входе в сепаратор	1,06	1,75
Максимальный размер частиц за сепаратором δ_{max} , мкм	375	286
Коэффициент полидисперсности пыли за сепаратором n	1,3	0,9
Характеристика пыли на выходе из сепаратора R_{90} , %	46,0	9,2

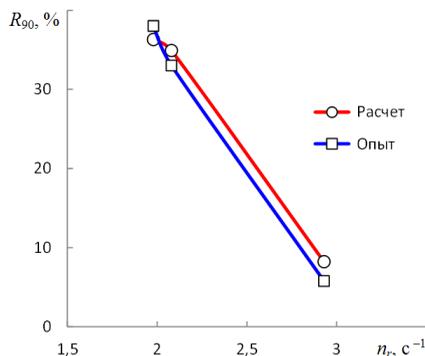


Рисунок 2 – Изменение характеристики пыли R_{90} на выходе из сепаратора в зависимости от частоты вращения ротора n_r при расходе сушильного агента $G_g = 7 \text{ кг/с}$

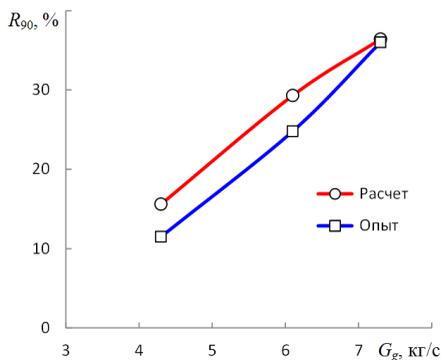


Рисунок 3 – Изменение характеристики пыли R_{90} на выходе из сепаратора в зависимости от расхода сушильного агента G_g при частоте вращения ротора $n_r = 2,08 \text{ c}^{-1}$

Расчёты показали (рисунки 4–6), что лопадки направляющего аппарата формируют крутку потока вокруг вертикальной оси сепаратора и влияют на гидродинамику потока уже на входе в сепаратор, причём это влияние усиливается при включённом роторе. Так, на входе в сепаратор (см. таблицу 2 и рисунок 4) максимальное значение скорости потока достигает 2,1 м/с при отключённом роторе и возрастает до 3,7 м/с при включённом роторе. Коэффициент неравномерности потока a , определённый как отношение значений максимальной и осреднённой

скоростей, для этих режимов составил 1,06 и 1,75 соответственно. Треки наиболее крупных частиц на входе в сепаратор (рисунок 6) указывают на наличие крутки потока и сепарации этих частиц из потока.

Картина течений в области направляющего аппарата и лопаток ротора существенно различается в зависимости от режима работы сепаратора (рисунок 5).

В статическом режиме (рисунок 5, *a*) неподвижные лопатки ротора практически не влияют на структуру потока, сформированного в каналах направляющего аппарата. Здесь поле скоростей достаточно равномерно. Максимальное значение скорости в зазоре между направляющим аппаратом и ротором не превышает 4,7 м/с.

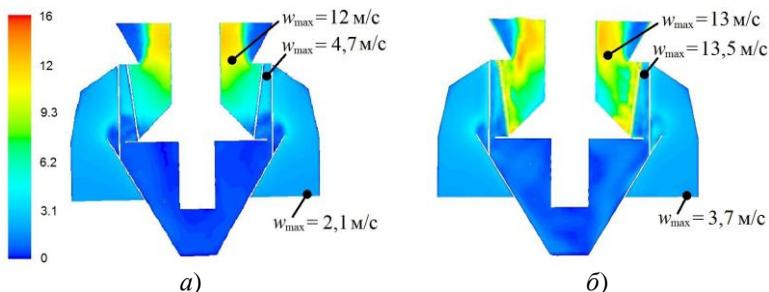


Рисунок 4 – Распределение результирующей скорости газовой фазы в вертикальном сечении сепаратора в статическом (*a*) и динамическом (*б*) режимах

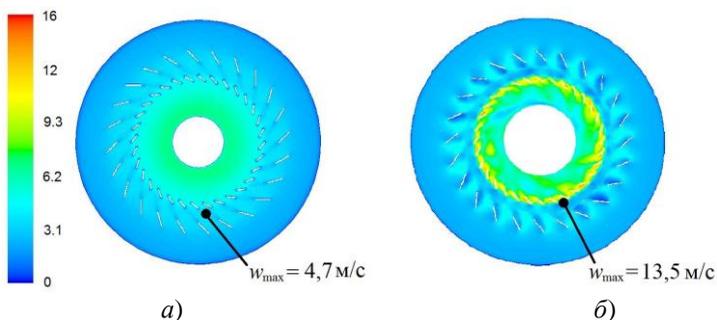


Рисунок 5 – Распределение скорости газовой фазы в горизонтальном сечении сепаратора в статическом (*a*) и динамическом (*б*) режимах

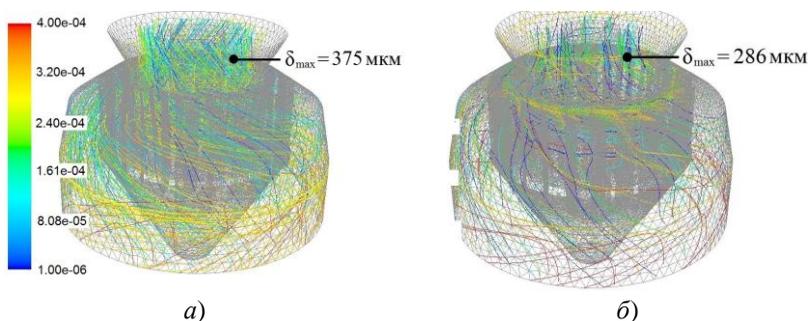


Рисунок 6 – Траектории частиц в сепараторе при статическом (а)

В динамическом режиме (рисунок 5, б) поле скоростей имеет резко выраженную неравномерность. Вращение лопаток ротора повышает крутку потока в зазоре между направляющим аппаратом и ротором, при этом локальные значения скорости возрастают до 13,5 м/с, что положительно влияет на процессы сепарации крупных частиц из потока и возврата их в мельницу.

Динамический режим по сравнению со статическим режимом улучшает структуру дискретной фазы на выходе из сепаратора (снижает максимальный размер частиц δ_{\max} и коэффициент полидисперсности пыли n) и позволяет снизить значения контрольного показателя качества пыли R_{90} с 46 до 9,2 %, что удовлетворяет требованиям.

В заключение следует отметить, что предложенная математическая модель была использована при расчётном обосновании модернизации инерционного сепаратора мельницы-вентилятора (предназначенной для измельчения lignита) на ТЭЦ Костацац-Б в Сербии, а также при разработке динамического сепаратора для валковой мельницы горизонтального типа (предназначенной для выработки цементной пыли) для АО “Ахангараншифер” в Узбекистане и динамического сепаратора для угольной мельницы типа XRP для заказчика в Индии.

Список литературы

1. Штегман А. В. Получение тонкой пыли с помощью мельницы с динамическим сепаратором / А. В. Штегман, И. А. Рыжий, Д. В. Сосин, Е. А. Фоменко // Электрические станции. – 2017. – № 8. – С. 29–35.
2. Пономарев В. С. Экспериментальные исследования параметров удара угольных частиц о стенку: материалы научно-практической конференции с международным участием “XLI Неделя науки СПбПУ” (Санкт-

Петербург, 3–8 декабря 2012 г.) / В. С. Пономарев, А. П. Парамонов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. Ч. III. – С. 41–42.

3. Энергетические угли восточной части России и Казахстана: Справочник [Текст] / В. В. Богомолов, Н. В. Артемьева, А. Н. Алехнович, Н. В. Новицкий, Н. А. Тимофеева. – Челябинск: УралВТИ, 2004. – 304 с.

4. Григорьев К. А. Исследование работы динамического сепаратора пыли на основе численного моделирования / К. А. Григорьев, Д. А. Титов, Н. С. Клепиков, А. П. Парамонов, А. В. Штегман // Перспективы развития новых технологий в энергетике России : материалы II Международной научно-технической конференции (Москва, 26–27 октября 2017 г.) / под общ. ред. С. В. Сафронова. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – С. 104–110.

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В КОТЛОСТРОЕНИИ

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

Ключевые слова: САД, параметризация, трехмерное моделирование, коллектор.

Аннотация: При реальном проектировании конструктор нередко сталкивается с тем, что меняются какие-либо исходные данные на том этапе, когда уже выполнена рабочая документация. Даже при небольшом изменении конструкции, конструктору приходится проверять всю документацию, затрачивая на это много времени. Инструмент, дающий возможность автоматически произвести изменения в документации, при изменении начальных условий позволит существенно сократить время проверки, практически полностью исключит вероятность ошибки при оформлении чертежа и тем самым выведет процесс проектирования на новый уровень. Таким инструментом является параметрическое проектирование.

При трехмерном проектировании традиционным способом создания сборок является моделирование «снизу вверх»: создаются детали, которые укрупняются в сборочные единицы и, затем, из созданных элементов собирается конечная сборка. Недостатком данного способа является то, что между отдельными компонентами нет зависимостей, и изменение какого-либо элемента не приведет к изменению дру-

гих элементов. Этот факт исключает возможность параметризации при данном подходе к проектированию.

При проектировании «сверху вниз» процесс создания изделия начинается с «прорисовки» уже конечной сборки, которая в процессе проектирования прорабатывается: проставляются необходимые размеры и, самое главное, зависимости между отдельными компонентами сборки. Именно этот факт позволяет говорить о параметризации при данном подходе к проектированию.

В статье рассмотрен процесс создания параметрической сборки раздающего коллектора опускной системы с торцевым подводом и радиальным отводом рабочего тела. Имеется множество возможных вариантов исполнения данного коллектора, так и многих других, поэтому в условиях несерийного производства целесообразно не создавать библиотеки компонентов, а пользоваться инструментом, позволяющим адаптировать уже созданную деталь под конкретные условия.

Для демонстрации процесса создания нового изделия на основе уже созданного введены некоторые изменяемые параметры изделия. Данные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменяемые параметры изделия

Изменяемый параметр	1 вариант	2 вариант
Диаметр отверстий в коллекторе, мм	121	113
Внутренний диаметр штуцера, мм	124	118
Диаметр штуцера в расточке, мм	131	129
Высота штуцера, мм	167	172
Радиус сопряжения штуцера, мм	140	130
Толщина доньшка, мм	55	60
Углы расточки доньшка под сварку, град	10/35	15/45
Дренажное отверстие в доньшке, мм	33	29
Толщина коллектора, мм	36	30
Глубина проточки торца коллектора, мм	50	70
Углы расточки торца коллектора, град	15/45	22/17

При выполнении данной работы, автор использовал систему автоматизированного проектирования Autodesk Inventor. Именно в дан-

ной системе удачно реализован подход к проектированию «сверху вниз» и она находится в свободном доступе для студентов ВУЗов.

Как и оговаривалось ранее, процесс создания сборки начинается с «прорисовки», где на деталь накладываются размеры и зависимости. Размеры удобнее занести в таблицу, где к ним можно добавить комментариев и где их легко редактировать. Возможности программы позволяют установить связь с электронными таблицами Excel, что открывает еще большие возможности для параметризации.

Зависимости при «прорисовки» следует накладывать таким образом, чтобы при изменении конфигурации одного компонента, логично менялась и конфигурация другого. Например: при изменении диаметра отверстия в коллекторе должны поменяться и соответствующие диаметры штуцера и наружный диаметр подкладного кольца, или при изменении толщины стенки коллектора должен измениться присоединительный диаметр доннышка и т. д.

Стандартного набора зависимостей вполне достаточно для реализации любых целей. В Inventor поддерживаются следующие зависимости [1]:

Совпадение: выбранные грани, кромки, вершины разделяют одну и ту же бесконечную линию. Две вершины касаются друг друга.

Параллельность: выбранные элементы одинаково направлены и находятся на постоянном расстоянии друг от друга.

Перпендикулярность: выбранные элементы расположены под углом 90 градусов друг к другу.

Касательность: выбранные элементы касаются друг друга (как минимум один элемент должен быть цилиндрический, конический или сферический).

Концентричность: выбранные элементы разделяют центральную точку или ось вращения.

Равенство: выбранные элементы имеют одинаковый определяющий элемент (длина, угол и т. д.).

Горизонтальность (вертикальность): выбранные элементы располагаются вдоль одной горизонтальной (вертикальной) прямой.

Привязаться к геометрии соседнего компонента позволяет инструмент «проекционная геометрия». Этот инструмент позволяет проецировать ребра, вершины, точки и криволинейные элементы в плоскость эскиза с сохранением зависимости с проецируемым объектом, т. е. проецируемая геометрия изменится в случае изменения проецируемого объекта.

В случае, если в сборке присутствуют одинаковые элементы (в данном случае это штуцеры и подкладные кольца), в файле «прори-

совки» создается только 1 элемент, а оставшиеся элементы добавляются уже на этапе формирования файла сборки. Это требуется для корректного формирования спецификации.

После того, как создан файл «прорисовки» перейдем к процессу формирования файлов деталей. Для этого во вкладке «Управление» выбираем команду «Создать компоненты». Далее выбираем все твердые тела и присваиваем им имена в соответствии с принятой системой классификации. Эти имена попадут в основную надпись чертежа. Из созданных файлов деталей необходимо сформировать файл сборки. Процесс создания модели заканчивается тем, что детали присваиваются некоторые атрибуты (материал, данные организации, разработчика и т. д.). Эти данные будут использоваться для оформления документации.

Далее следует процесс оформления документации (чертежи и спецификации). В Inventor имеется удобный инструмент для создания необходимых видов, разрезов деталей и нанесения аннотации.

Одним из требований ЕСКД [2] является простота и хорошая читаемость чертежей. В связи с этим документом предусмотрен ряд упрощений и условностей. Например: допускается не изображать мелкие фаски и проточки на основных видах, а показывать их на выносных; допускается утрировать размер мелких элементов в сторону увеличения и т. д.

Так как при оформлении чертежа виды, разрезы и сечения формируются на основе 3D модели, то на них присутствуют все мелкие элементы. В различных системах проектирования подобного класса эта проблема решается различными способами. В основном решение проблемы сводится к разрыву связи между моделью и чертежом и ручной доработки чертежа.

В Inventor имеется удобный инструмент для выполнения подобного рода упрощений [1]. Имеется возможность скрыть видимость ненужных элементов и дорисовать недостающие элементы, сделав это так, чтобы не разрушилась ассоциативная связь с моделью. На рисунке 1 показан пример упрощения. На основном виде сборочного чертежа расточка под приварку доньшка и штуцера и линии проточек штуцера ухудшают читаемость чертежа, и их следует изображать утрировано.

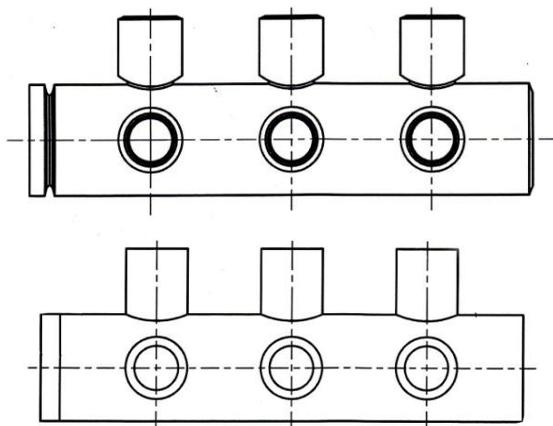


Рисунок 1 – Пример упрощения

Еще одна трудность, с которой может столкнуться конструктор, оформляя чертеж на основе модели – изображение сварных швов. Согласно ЕСКД [2] границу сварного шва изображают сплошной основной линией, а конструктивные элементы в шве – сплошными тонкими линиями. Штриховка в шве не изображается.

Решить эту проблему поможет наложение эскиза на вид, на котором можно скрыть ненужные элементы и показать необходимые. Обычно размеры сварного шва определяются исходя из размеров и конфигурации свариваемых деталей, поэтому, следует сварному шву присвоить зависимости и размеры так, чтобы при изменении конфигурации деталей шов менялся соответствующим образом (рисунок 2).

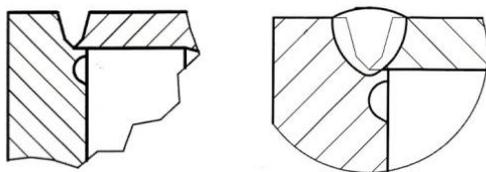


Рисунок 2 – Изображение сварного шва

После того как чертежи, с нанесенными на них необходимыми видами, разрезами и аннотациями, оформлены, необходимо сохранить весь комплект документации вместе с файлом модели и «прорисовки». Если появится необходимость создания другого типоразмера этой детали, дос-

точно будет сохранить все элементы под новыми именами и ввести нужные значения в параметрическую таблицу. Все виды, разрезы и аннотации на чертежах поменяются автоматически. Далее будут представлены изображения некоторых видов и узлов в двух вариантах. Второй вариант сформирован автоматически на основе данных таблицы 1.

На рисунке 3 представлен главный вид коллектора.

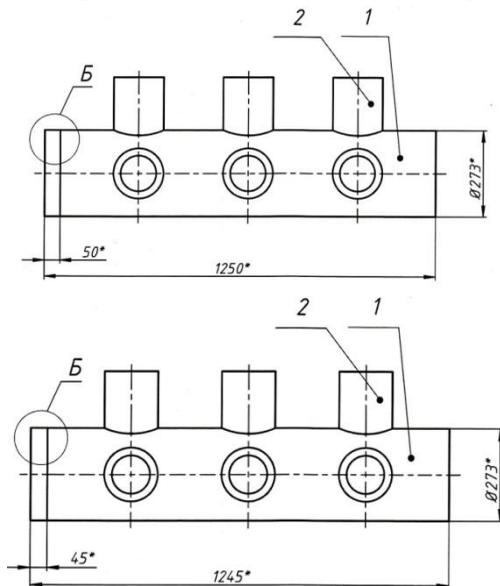


Рисунок 3 – Главный вид коллектора

На рисунке 4 представлен узел приварки доньшка.

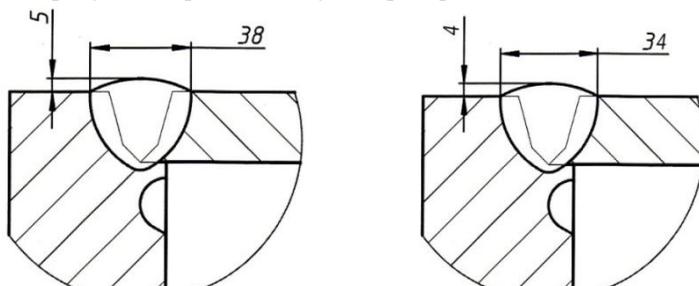


Рисунок 4 – Узел приварки доньшка

На рисунке 5 изображен узел приварки штуцера в двух проекциях. Наличие двух проекций данного узла определяется сложностью траектории сварного шва.

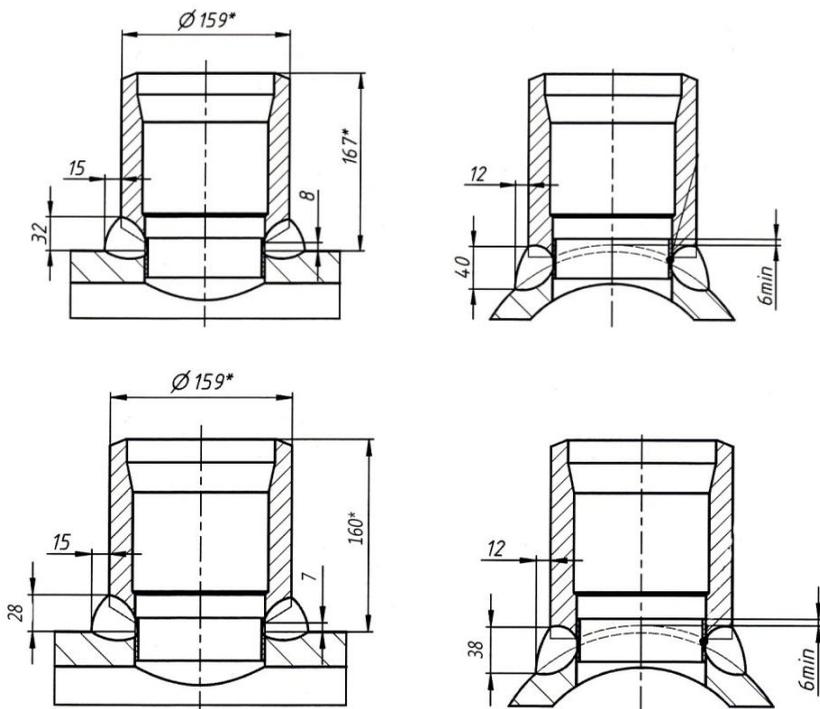


Рисунок 5 – Узел приварки штуцера

На рисунке 6 представлены вид спереди и вид слева штуцера.

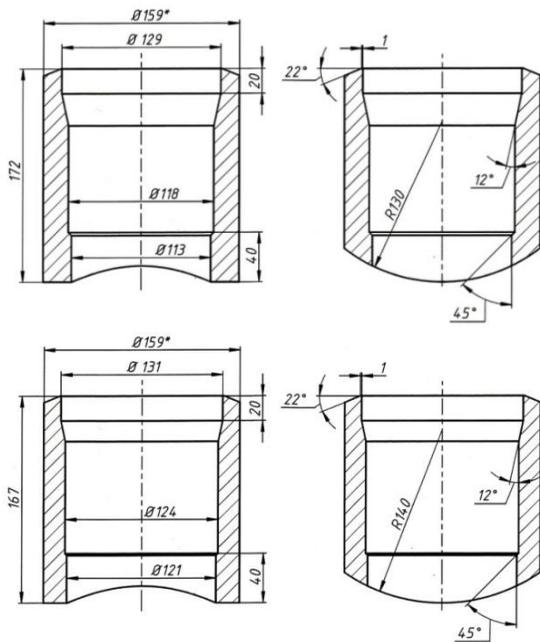


Рисунок 6 – Штуцер

На рисунке 7 изображен главный вид доньшка.

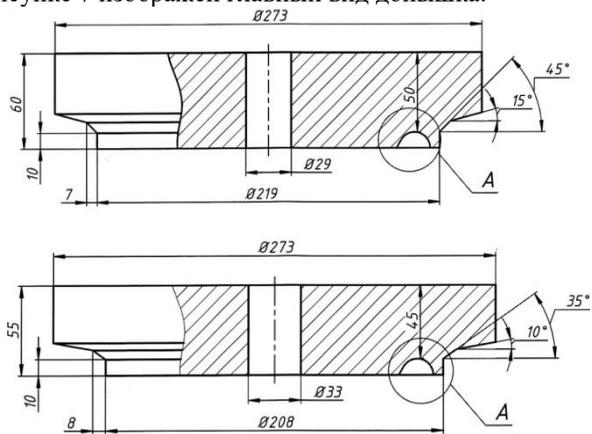


Рисунок 7 – Доньшко

На рисунке 8 представлена труба коллектора и разрез, показывающий отверстия в коллекторе.

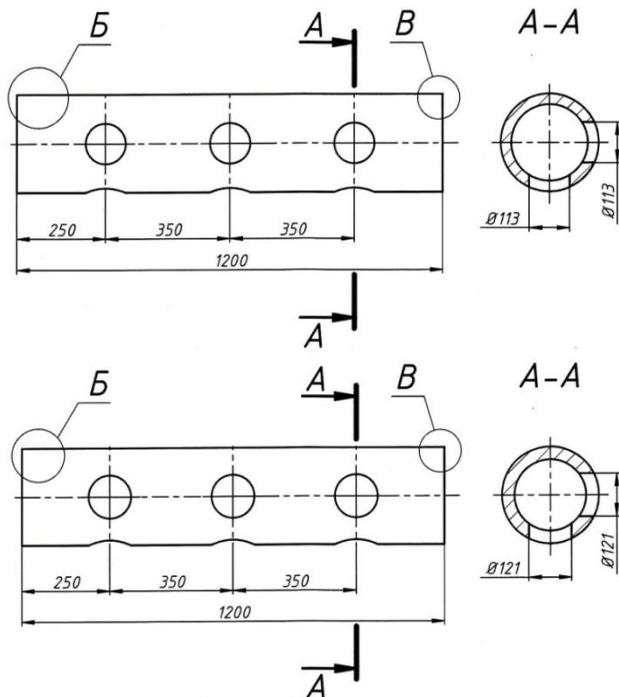


Рисунок 8 – Труба коллектора

На рисунке 9 показаны узлы обработки торцов коллектора для стыкового соединения с опускной трубой (слева) и под приварку доннышка (справа).

Полное описание возможностей параметрического моделирования выходит за рамки данной статьи, но уже на основе сказанного можно сделать вывод: описанный выше подход к проектированию принципиально отличается от традиционного. Параметрическое моделирование в перспективе позволит сократить сроки создания конструкторской документации, уменьшить количество ошибок при оформлении и тем самым вывести конструирование на новый уровень. При использовании такого метода проектирования возможен отказ от громоздких библиотек однотипных элементов, достаточно будет хранить исходные файлы детали, и уже на их основе формировать необходимый типоразмер изделия.

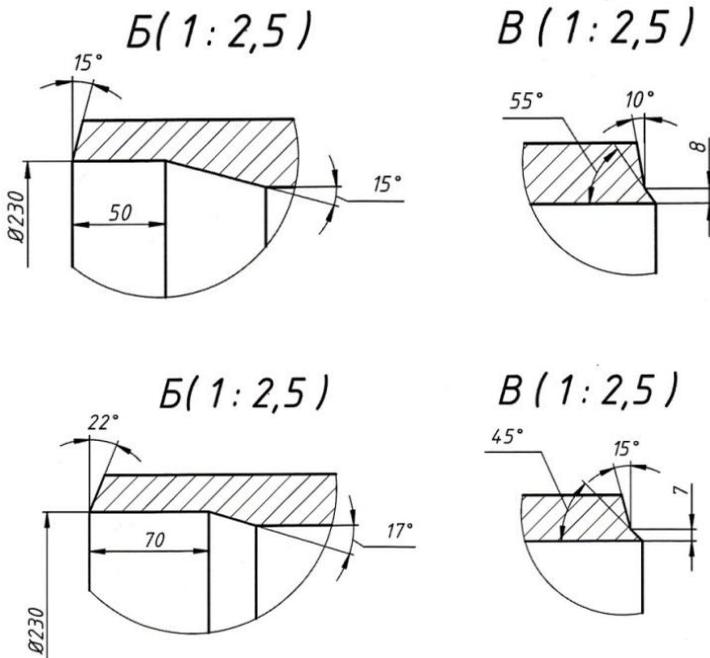


Рисунок 9 – Узлы обработки торцов коллектора

На первых этапах освоения данного метода конструктор неизбежно столкнется с трудностями, так как параметрическое моделирование требует определенной культуры взаимодействия. При этом не стоит забывать о том, что в период перехода от кульманов к AutoCAD, конструкторы, работающие на кульмане, выполняли свою работу быстрее тех, кто начал работать в AutoCAD.

Список литературы

- 1 Алиева, Н.П. Построение моделей и создание чертежей деталей в системе Autodesk Inventor: учебное пособие [Текст] / Н.П.Алиева, П.А. Журбенко, Л.С.Сенченкова. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 112 с.
2. ГОСТ 2.001-2013. Единая система конструкторской документации. Общие положения.
3. Жуков Е.Б. Применение САПР для решения прочностных задач в котлостроении / Е.Б. Жуков, К.В. Меняев, Е.Е. Паутова, М.В. Тиханов // Ползуновский альманах, 2017. – № 3. – Т.1. – с. 39–43

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ДИОКСИНОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТВЁРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ, ПУТИ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ДИОКСИНОВ

Е. В. Тихонов, К. В. Меняев

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

г. Барнаул

Ключевые слова: диоксины, твердые бытовые отходы, перспективные технологии сжигания.

Аннотация: Рассмотрен процесс образования и пути снижения выбросов диоксинов при сжигании твёрдых бытовых отходов.

В мире и в России в частности, общественность и некоторые официальные лица привыкли считать, что термическое обезвреживание (сжигание) твёрдых бытовых отходов (далее ТБО) намного хуже и опаснее других способов утилизации (переработка, компостирование, рециклизация или вторичное использование, складирование), в том числе из-за загрязнения атмосферного воздуха и почвы газообразными отходами и диоксинами. Этими аргументами часто апеллируют люди не желающие проживать рядом с мусоросжигательными заводами, т. к. по их мнению отказ от строительства мусоросжигательных заводов и сжигание ТБО может принести большой вред окружающей среде и ухудшить санитарно гигиеническую обстановку в целом.

Если говорить о диоксинах это полихлорированные дибензодиоксины (ПХДД) к ним относится большая группа ароматических трициклических соединений, содержащих от 1 до 8 атомов хлора (брома) в качестве заместителей. Источниками диоксинов и диоксинподобных соединений могут быть отходы предприятий металлургической, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной и нефтехимической промышленности. Диоксины являются побочными продуктами производства пластмасс, пестицидов, бумаги, дефолиантов; диоксиноподобные вещества могут возникать даже при приготовлении пищи. А так же заражение почв диоксинами происходит при применении пестицидов 2,4-Д и 2,4,5-Т.

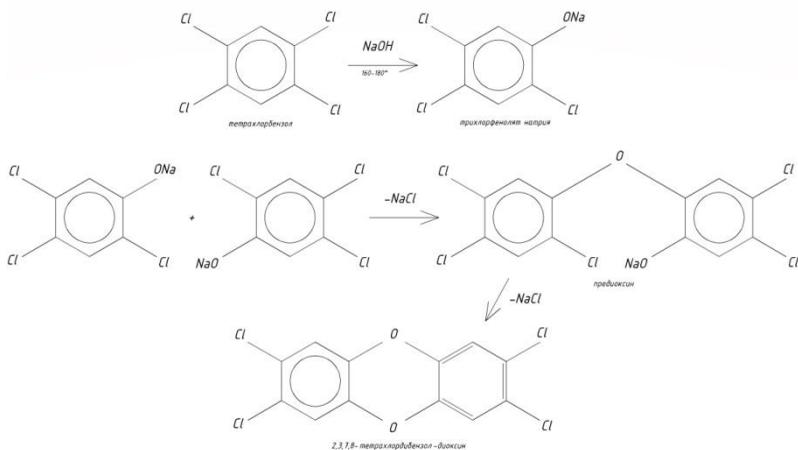


Рисунок 1 – Образование 2,3,7,8 – тетрахлорбидензол - диоксина

Опыт переработки ТБО термическими методами и многочисленные публикации свидетельствуют, что медленный нагрев и низкотемпературный режим сжигания отходов при температуре 600–900 °С при недостатке кислорода благоприятствуют интенсивному образованию диоксинов. Высокотемпературное сжигание (переработка) отходов в диапазоне 1150–1250 °С окислительная среда и пребывание газов при этой температуре в течение 4–5 секунд, позволяют сократить до минимума вероятность образование диоксинов в топке, если не совсем предотвратить их образование. Это облегчает очистку уходящих газов образованных при сжигании ТБО. Что в свою очередь уменьшает затраты на использование дорогостоящих газоочистных фильтров. Этих параметров позволит достичь новое оборудование и высокоэффективные экологичные технологии.

Наиболее перспективные технологии сжигания:

1. Технология кипящего слоя. В процессе горения частицы слоя под действием струй воздуха начинают активно перемещаться, так что это поведение напоминает поведение жидкости и так же подчиняется законам гидростатики. Этот способ позволяет снизить эмиссию токсичных веществ при сгорании, а также эффективно связывать оксиды серы (КПД составляет 80 % и более), хлориды и фториды с помощью добавки известняка, что сокращает выбросы в атмосферу. Существенно уменьшить выбросы оксидов азота из-за низких температур сжигания.

2. Коксование и сжигание ТБО (инсенерация). Коксование и сжигание ТБО включает в себя несколько стадий. В первой стадии ТБО нагревается до высокой температуры (порядка 600–900 °С) без доступа кислорода в котел или печь. В результате происходит процесс коксования, и образуются твердые (кокс) и газообразные продукты, служащие впоследствии топливом. Вторая стадия заключается в сжигании (или более точно – в дожигании) получившихся от процессов коксования продуктов с большими объемами кислорода при температуре 1100–1200 °С. Это делается для нейтрализации загрязняющих выбросов при первой стадии сжигания. Таким образом, при выбросе исходящих газов от такой утилизации ТБО, уже часть загрязняющих веществ нейтрализуется еще до стадии газоочистки, такая технология сжигания используется в инсенераторах.

3. Газификация. Газификация представляет собой использование ТБО в качестве твердого топлива и переработка его в продукт-газ, смолы и шлака. Газификация является термохимическим высокотемпературным процессом взаимодействия органической массы с газифицирующими агентами, в результате чего органические продукты превращаются в горючие газы. ТБО обезвреживаются и перерабатываются за счет поступления в специальный реактор (газификатор) воздуха и водяного пара, а так же при использовании кислорода, диоксида углерода и их смеси. Полученный продукт-газ используется в газотурбинной, паротурбинной или газопоршневой установке для выработки энергии и тепла. Смола используется либо как топливо, либо как химическое сырье. Но особенно важно, что газификация уменьшает затраты на газоочистку, т. к. в получаемых отходах содержится малое количество сернистых соединений и золы. Так же при газификации происходит частичное разложение азотсодержащих органических соединений в бескислородной среде, что дает меньшее количество оксидов азота в дымовых газах.

4. Плазменный пиролиз. В установках на основе плазменного пиролиза (электродуговых плазмотронах) используется электрический ток, который ионизирует инертный газ и формирует электрическую дугу с температурой выше 6000 °С. ТБО подвергается полному разложению без горения и окисления. Термическое разложение происходит без доступа воздуха, следовательно нет условий для образования токсичных соединений как диоксины, фураны. Метод дает возможность использовать выделяемое при сжигании отходов тепло для производства электроэнергии и централизованного теплоснабжения или направлять его на технологические нужды.

В настоящее время ни одна технология не гарантирует полного отсутствия диоксинов при сжигании, однако можно свести их выбросы в окружающую среду к минимуму, используя современные способы очистки уходящих газов.

Список литературы

1. Скворцов Д.И. Экологические аспекты очистки исходящих газов при сжигании ТБО на мусоросжигательном заводе №2 [Электронный ресурс] / Д.И. Скворцов // Вопросы философии, 2014. – №9. Режим доступа: <http://www.scienceforum.ru/2013/pdf/8742.pdf#1> (дата обращения: 21.10.2017).
2. Инсinerаторы для сжигания отходов: [Электронный ресурс]. URL: <http://xlom.ru/oborudovanie/insineratory-dlya-szhiganiya-otxodov/> (дата обращения: 25.10.2017).
3. Федоров Л.А. «Диоксины как экологическая опасность: ретроспектива и перспективы»: [Электронный ресурс], 1993. URL: <http://levfedorov.ru/dioksiny/> (дата обращения: 28.10.2017).

УГОЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

В. А. Устинов, К. В. Меньев

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

Ключевые слова: уголь, энергетика.

Аннотация: В данной статье рассматривается использование угля в современной мировой энергетике, а также современные технологии сжигания твёрдого топлива.

Уголь является одним из старейших топлив в промышленности и энергетике. Его широкое использование началось в 18 веке во время индустриальной революции в качестве топлива для паровых машин и доменных печей.

Сейчас запасы угля оцениваются в 1,1 триллиона тонн, и при текущем использовании его хватит примерно на 150 лет, в то время как нефти и газа на 50 и 52 года соответственно [1]. Лидерами по добыче угля являются такие страны как Китай, Индия и США (см. рисунок 1).

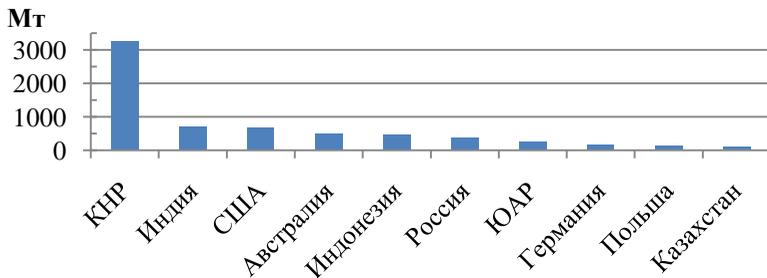


Рисунок 1 – Лидеры по добыче угля в 2016 г. [2]

Уголь считается самым дешевым традиционным энергетическим топливом, поэтому он является самым доступным топливом для развивающихся стран. Обобщая, можно сказать, что уголь имеет стоимость в 2 раза ниже, чем газ. Цена на уголь определяется его свойствами и методом добычи. Транспортировка угля может осуществляться поездами и баржами, также существуют технологии транспортировки угольной суспензии по трубопроводам. Крупнейшими экспортерами угля являются Австралия, Индонезия и Россия, крупнейшими импортерами являются Китайская Народная Республика, Индия и Япония (см. рисунок 2).

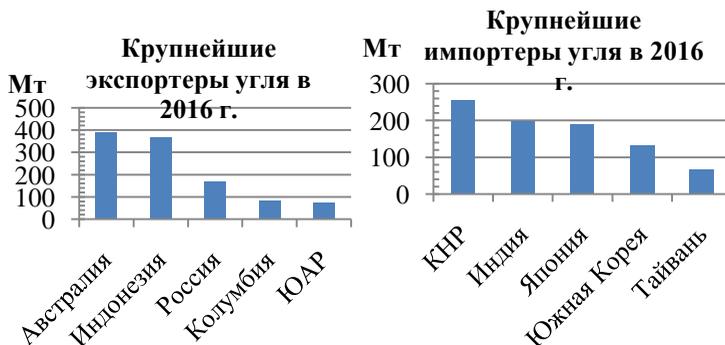
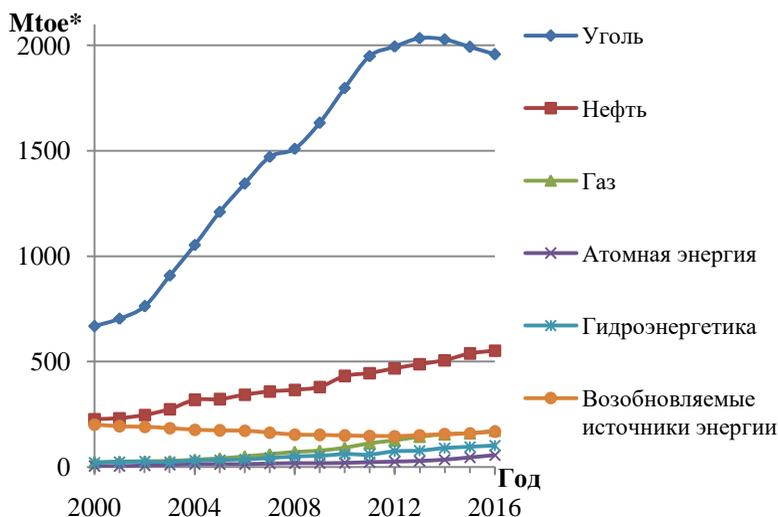


Рисунок 2 – Импорт и экспорт угля в 2016 году [3]

Сегодня 27 % энергии в мире вырабатывается при помощи угля [4]. По данным международного энергетического агентства (IEA), из-за преобладания природного газа в энергетике и быстрого роста доли возобновляемых источников в производстве энергии доля угля в мировой энергетике снижается, несмотря на рост производства энергии в развивающихся странах [5]. Из-за серьезных проблем с экологией, крупнейший мировой потребитель угля – Китай, объявил о курсе на снижение загрязнений окружающей среды, что влечет за собой переход на природный газ и возобновляемые источники энергии (динамика производства энергии в Китае по видам топлива изображена на рисунке 3). По мнению МЭА, такое решение может повлиять на общемировое развитие энергетики [5]. В то же время всемирная угольная ассоциация (WCA) заявляет, что потребление угля в будущем не снизится, а только будет увеличиваться, но общая доля в мировой энергетике снизится из-за увеличения доли производства энергии от других источников [6].



Примечание: * Mtoe – мегатонна нефтяного эквивалента.
Рисунок 3 – Производство энергии в Китае по видам топлив [5]

Одним из весомых сдерживающих факторов активного использования угля является его вредное воздействие на окружающую среду.

При этом вред причиняется не только при сгорании угля, но и при хранении и транспортировке.

Угольная пыль очень вредна для здоровья человека из-за содержащихся в ней минеральных примесей. Активное пыление угля на перевалке в г. Находка в 2017 году является примером этого негативного явления.

При горении угля образуются зола, основные продукты сгорания (CO_2 , H_2O), токсичные вещества (SO_x , NO_x) и продукты неполного сгорания (недогоревшее топливо, сажа, CO и др.).

Летучая зола и золоотвалы являются неотъемлемой частью угольной промышленности. В наши дни эти проблемы легко решаемы. Современные золоуловители имеют коэффициент улавливания золы около 99%, а из шлака можно изготавливать строительные материалы.

Существует множество способов снижения выбросов токсичных веществ ТЭС. Их можно разделить на два основных направления: предотвращение образования вредных веществ и очистка дымовых газов от вредных примесей. Распространенным способом снижения концентрации оксидов серы является их поглощение водой или известняковым раствором в мокрых скрубберах. Выбросы оксидов азота обычно снижают ещё на этапе их образования путем оптимизации горения угольных частиц, например использованием топки с циркулирующим низкотемпературным кипящим слоем. Также возможен перевод угля в газообразное топливо, что существенно облегчает его сжигание и снижает выбросы вредных веществ.

Продукты неполного сгорания образуются лишь при нестабильном горении. При устранении причин такого горения, выбросы вредных веществ снижаются.

Также существуют технологии улавливания и использования углекислого газа, который образуется при горении любого топлива: отобранный углекислый газ предполагается перекачивать в землю для хранения [7]. Имеется возможность использовать CO_2 для повышения давления в старых нефтяных месторождениях.

Уголь на данный момент является важной составляющей современной энергетики и имеет высокий спрос на рынке энергоресурсов. Имеются технологии, позволяющие использовать его эффективно. В то же время, для снижения выбросов вредных веществ необходимы большие капиталовложения, что при невысокой разнице в цене между углём и природным газом, возможно выгоднее будет отказ от угля и переход на газообразное топливо.

Список литературы

1. Where is coal found? | World Coal Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worldcoal.org/coal/where-coal-found>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 18.01.2018).
2. Coal mining | World Coal Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worldcoal.org/coal/coal-mining>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 18.01.2018).
3. Coal market & pricing | World Coal Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worldcoal.org/coal/coal-market-pricing>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 18.01.2018).
4. WCA responds to IEA's Coal 2017 report | World Coal Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worldcoal.org/wca-responds-iea's-coal-2017-report>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 18.01.2018).
5. WEO 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.iea.org/weo2017/>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 18.01.2018)
6. The role of coal - an inconvenient truth | World Coal Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worldcoal.org/role-coal-inconvenient-truth>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 18.01.2018)
7. Carbon capture, use & storage | World Coal Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.worldcoal.org/reducing-co2-emissions/carbon-capture-use-storage>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 18.01.2018)

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛИСТЬЕВ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА ДЛЯ КОТЛОВ

**Е. Е. Филатова, А. С. Малыгина, Ф. Н. Скляров, Е. В. Юрченко,
Д. Р. Таймасов**
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
г. Барнаул

Ключевые слова: альтернативное топливо, экологическое сжигание, древесная листва.

Аннотация: Выявление преимуществ и недостатков при использовании древесной листвы в качестве топлива.

Листья падают во дворах, в лесах, на улицах. Опавшая листва является местом обитания вредителей, которые причиняют ущерб здоровью человека или его хозяйству. С другой стороны, листва представляет собой хорошее удобрение и не дает почве промерзнуть. Иногда сжигают опавшую листву, как мусор.

Если посмотреть на опавшую листву совсем под иным углом, то она окажется источником альтернативной энергии и потенциального дохода, что позволит решить сразу несколько задач служб коммунального городского хозяйства. Можно превратить сброшенную деревьями листву в «дрова».

Главные преимущества опавших листьев — это их доступность, возобновляемость, экологичность. Существуют компании, которые уже занимаются таким топливом. Компания BioFuels International, превращает сброшенную деревьями листву в «дрова» — Leaf Log.[1]

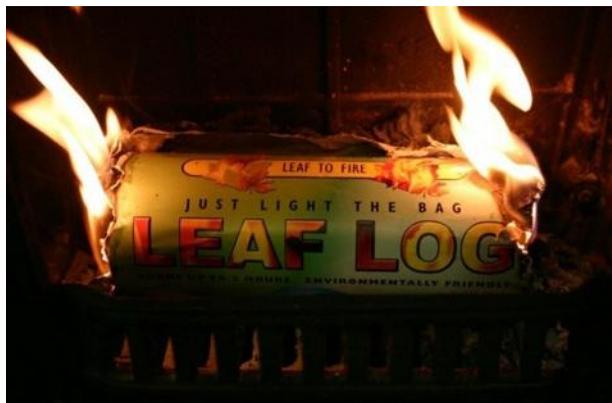


Рисунок 1 – Сжигание в котле брикета Leaf Log

В Бирмингеме построен завод по выпуску брикетов Leaf Log, который занимается переработкой опавшей листвы из города и окружающих лесов. Прежде коммунальные службы ежегодно вывозили отсюда на свалки по 16 тысяч тонн осенних листьев. Теперь они используют их с пользой и выгодой [1].

Опавшая листва, или брикеты удобны для перемещения и хранения. Недостатки такого топлива заключаются в сезонной цикличности, так как деревья сбрасывают листву раз в год. Целесообразность такого топлива есть в том случае, если нет возможности использовать другое

топливо, но есть возможность и место хранения, спрессованных опавших листьев.

Для сжигания необходимы специальные, спроектированные под данный вид топлива котлы, но можно также переоборудовать и работающую котельную установку. При реконструкции котла, необходимо сконструировать топку так, чтобы на выходе из неё 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.

Для пересчета параметров водогрейного котла ВКр-1,5 на донецком каменном угле Ж; Р в топливной лаборатории АлтГТУ были определены следующие характеристики:

- влажность (характеризует содержание воды в топливе);
- выход летучих (характеризует воспламеняемость топлива);
- зольность (характеризует содержание негорючих минеральных веществ в топливе);
- низшая теплота сгорания (характеризует количества тепла, которое выделяется при сжигании 1 кг топлива).

Исследование характеристик проводились по специальным методикам [2].

Таблица 1 – Теплотехнические характеристики несортированной листвы для расчетов водогрейного котла

Характеристика	Ед. изм.	Сухие, опавшие листья	Донецкий каменный уголь
Влажность, W^f	%	5,3	6,0
Зольность, A^f	%	55,8	30,1
Выход летучих, V^{daf}	%	90,6	32,0
Низшая теплота сгорания, Q_i^f	МДж/кг	7,253	21,14

Для оценки эффективности использования опавшей листвы деревьев выполнен тепловой расчет водогрейного котла ВКр-1,5 на донецком каменном угле Ж; Р, имеющего следующие параметры:

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.

Таблица 2 – Параметры водогрейного котла

Параметры	Ед. изм.	Значение
Мощность, Q_k	МВт	1,5
Температура воды на входе в котёл, t'_B	°С	70
Температура воды на выходе из котла, t''_B	°С	95
Давление воды, P_B	МПа	0,5

В результате расчета теплового баланса расход рабочего топлива равен $V_p = 0,263$ кг/с.

В тепловом расчете получили следующие значения:

- температура газов на выходе из топки $\vartheta''_T = 830$ °С;

- температура газов на выходе из 1КПЕ $\vartheta''_{1кпе} = 570$ °С при скорости газов $W_T = 5,22$ м/с;

- температура газов на выходе из 2КПЕ $\vartheta''_{2кпе} = 300$ °С при скорости газов $W_T = 2,66$ м/с.

В результате расчета, было выявлено, что при сжигании сухих листьев, расход топлива в котле, при сравнении с котлом, работающим на угле (донецкий каменный Ж,Р), увеличился на 18 %.

Несмотря на такое увеличение расхода топлива, экономически это может быть выгодно, транспортировка листьев обойдется существенно дешевле.

Также в ходе расчета определено, что котел имеет недостаточную поверхность нагрева для охлаждения газов, потребуется принять меры по утилизации теплоты дымовых газов.

Список литературы

1. Брикеты из опавших листьев [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://seashipment.ru/brikety-iz-opavshix-listev-novaya-nisha-na-gynke-biotopliva.htm>. (Дата обращения 10.01.2018 г.).

2. Меняев К. В. Методы испытания углей [Текст] : учебное пособие / К.В. Меняев ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 63 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕВЕРСИВНОЙ ТОПКИ

А. П. Шевцов, Д. Р. Таймасов

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

г. Барнаул

Ключевые слова: реверсивная топка, САПР

Аннотация: В данной статье предложена упрощенная методика расчета температуры на выходе из реверсивной топки и проведено сравнение полученной температуры с результатами расчета в САПР.

В настоящее время все большую популярность набирают реверсивные топки. Использование топки данного типа имеет ряд преимуществ перед другими топками. Во-первых, интенсификация конвективного теплообмена в топке, в результате чего достигается равномерное распределение тепловых потоков через поверхность стен. Во-вторых, снижается образование оксидов азота за счет рециркуляции части продуктов сгорания к ядру факела.

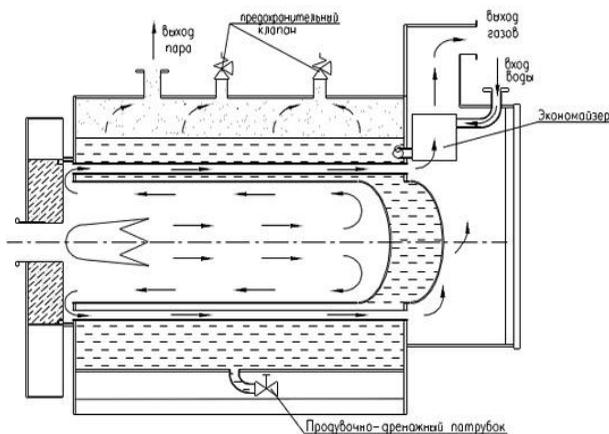


Рисунок 1 – Схема реверсивной топки

Однако данная конструкция топки нуждается в более серьезной проработке в ходе проектирования, т. к. существуют некоторые проблемы, требующие особых конструктивных решений. Эти проблемы: мощная горелка, способная выпустить топливную смесь со скоростью достаточной, для преодоления всей высоты или длины топочной каме-

ры; возможные перетечки дымовых газов; преждевременный выход дымовых газов в газоход и т. д. [1] На рисунке 1 представлен пример реверсивной топочной камеры.

Главной проблемой, при расчете котлов с реверсивной топочной камерой является отсутствие методики ее расчета, вся разработка ведется с использованием стендовых, либо математических моделей. Это приемлемо для крупных котлостроительных компаний, но затруднительно для малых, начинающих компаний, поэтому существует необходимость в методике расчета реверсивной топочной камеры.

Для решения данной проблемы была разработана методика расчета реверсивной топки, основанная на введении стенки, не воспринимающей тепло, но, разделяющей топку на две секции (рисунк 2).

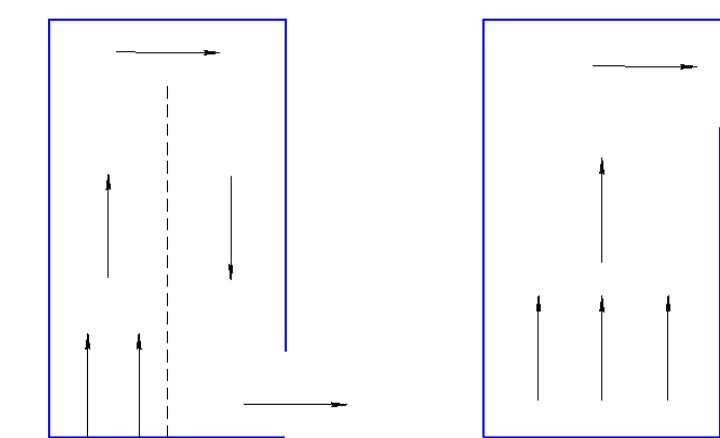


Рисунок 2 – Схема движения дымовых газов в: топке со стенкой (слева); камерной топке (справа)

Данная методика приближает расчет камерной топки к расчету реверсивной топки.

При выбранных конструктивных характеристиках топки весь тепловой расчет заключается в определении температуры газов на выходе из топки

$$\vartheta_{\Gamma}'' = \frac{T_a}{1 + M \cdot B \bar{u}^{0,3} \left[\frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \psi_{\text{ср}} \cdot F_{\text{ср}} \cdot T_a^3}{\varphi \cdot B_p \cdot (V \epsilon)_{\text{ср}}} \right]^{0,6}} - 273. \quad [2]$$

При введении дополнительной стенки произойдет изменение показателей, зависящих от площади поверхности стен топки: эффектив-

ное значение коэффициента Бугера \overline{Bu} , сама площадь поверхности стен топки $F_{ст}$, и коэффициент тепловой эффективности экранов ки $\psi_{ср}$.

При введении дополнительной стенки произойдет увеличение площади поверхности стен топки. Эффективное значение коэффициента Бугера зависит от самого значения коэффициента Бугера

$$\overline{Bu} = 1,6 \cdot \ln \left(\frac{1,4 \cdot Bu^2 + Bu + 2}{1,4 \cdot Bu^2 - Bu + 2} \right),$$

который в свою очередь зависит от значений k , p и s .

$$Bu = k \cdot p \cdot s,$$

где k – коэффициент поглощения лучей топочной средой, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$;
 p – давление в топочной камере, МПа;
 s – эффективная толщина излучающего слоя, м.

В данном случае величиной, зависящей от поверхности стен топки, является эффективная толщина излучающего слоя

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_T}{F_{ст}},$$

где V_T – объем топочной камеры, м^3 ;
 $F_{ст}$ – площадь поверхности стен топки, м^2 .

От нее, в свою очередь, зависит коэффициент поглощения лучей топочной средой k .

Для газа формула для расчета коэффициента поглощения лучей топочной средой имеет вид:

$$k = k_r + m \cdot k_c,$$

где k_r – коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания.

$$k_r = k_r^0 \cdot r_n = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{10 \cdot p \cdot r_n \cdot s}} - 1 \right) (1 - 0,37 \cdot 10^{-3} \cdot T_T'') \cdot r_n,$$

где r_n – суммарная объемная доля трехатомных газов;
 r_{H_2O} – объемная доля водяных паров;
 T_T'' – температура на выходе из топки, К;
 k_c – коэффициент поглощения лучей частицами сажи (не зависит от величины s);
 m – коэффициент, характеризующий относительное заполнение топочной камеры светящимся пламенем.

Последняя величина, зависящая от площади поверхности стен топки, $\psi_{ср}$ – средний коэффициент тепловой эффективности топки находится по формуле:

$$\psi_{ср} = \frac{\sum \psi_i \cdot F_i}{F_{ст}},$$

где $\psi_i \cdot F_i$ – произведение коэффициента тепловой эффективности и площади поверхности для определенной поверхности нагрева.

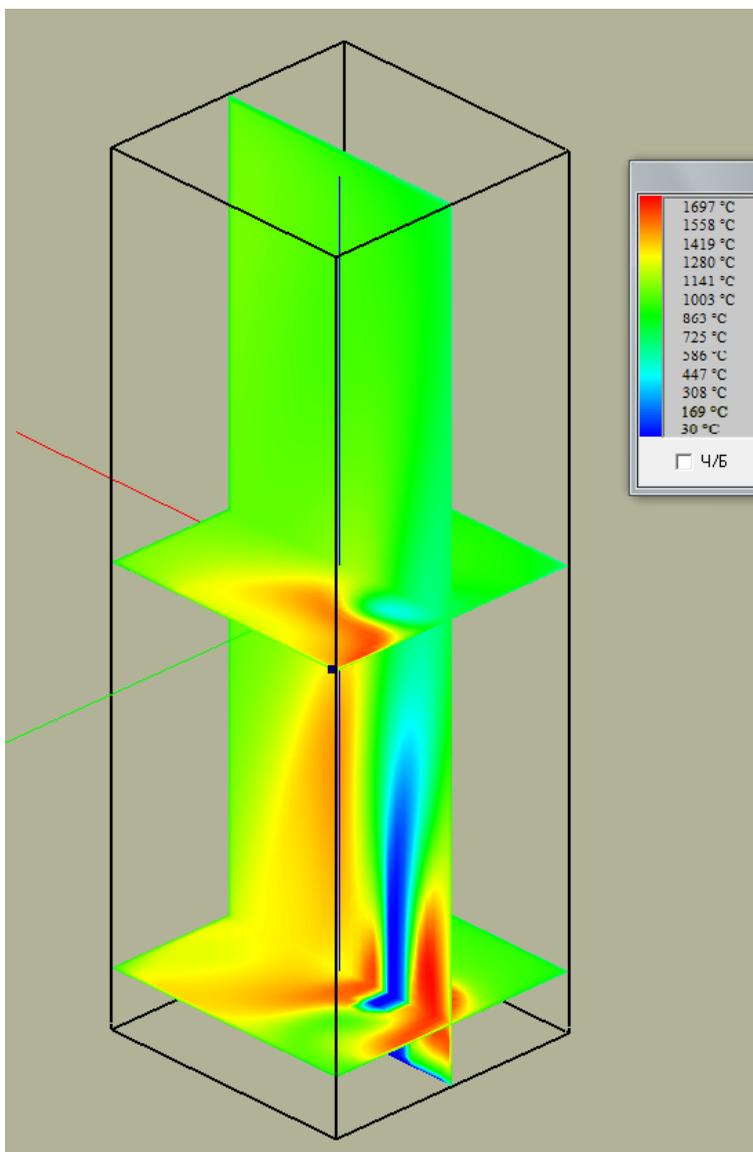


Рисунок 3 – Поле температур

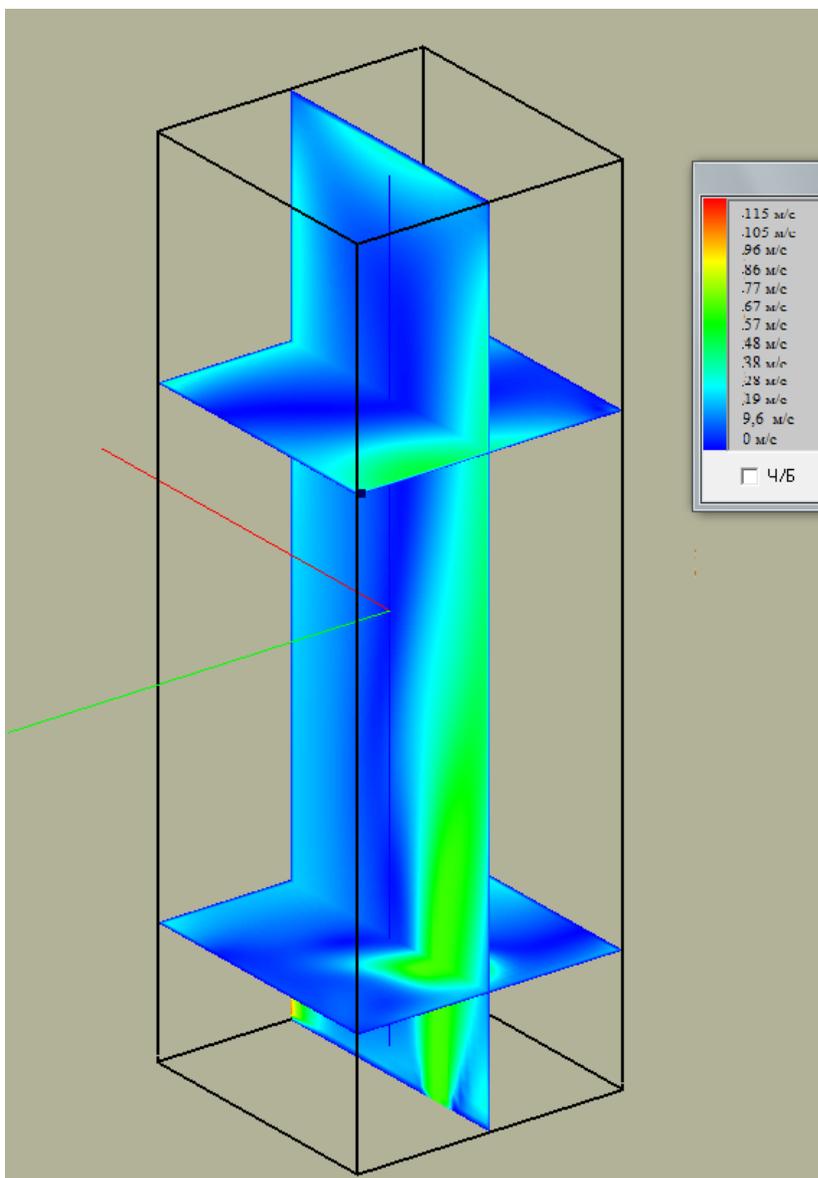


Рисунок 4 – Поле скоростей

В данной формуле из-за принятого для введенной стенки коэффициента тепловой эффективности $\psi = 0$ эта стенка будет учитываться только как дополнительная площадь поверхности стен топки, но не как тепловоспринимающая поверхность, т. е. изменится значение только в знаменателе.

На рисунке 3 и 4 представлены результаты расчета топки котла ДЕ-4-25-14ГМ-0 с реверсивной топкой на программе Sigma Flame. Данные рисунки наглядно показывают распределение температур и скоростей дымовых газов по объему топки. На рисунке 4 видно отсутствие движения дымовых газов в вертикальном сечении в области предполагаемой расчетом не воспринимающей тепло стенки (синяя область, в которой скорость равна 0).

После проведенных расчетов по данной методике определено значение температуры дымовых газов на выходе из топки, которая равна 1005 °С (против 1041 °С без введенной стенки). Сделано предположение, что такой результат обусловлен большим временем нахождения газов в топке за счет изменения направления движения в тупиковой части.

Список литературы

1. Хаустов С.А. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов / С. А. Хаустов, А.С. Загорин // Вестник науки Сибири, 2014. - № 2 (12). – с. 21–27.
2. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов: учебное пособие [Текст] / И.Д. Фурсов // Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – 4-е издание, переработанное и дополненное – Барнаул. : Изд-во АлтГТУ, 2017. – 300 с.
3. Михайлов А.Г. Расчетные характеристики для реверсивной топки газотрубного котла / А.Г. Михайлов, Э.Э. Новикова, С.В. Тербилов // Омский научный вестник, 2015. – №3 (143). – с. 78–80.

БАЛАНСОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВОДОГРЕЙНОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

**А. В. Шпехт, М. В. Тиханов, Р. Г. Бородин, В. А. Устинов,
П. С. Филимонов, Н. Ю. Супрун, К. В. Меняев**
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический
университет им. И. И. Ползунова»
г. Барнаул

Ключевые слова: балансовые испытания, уголь, коэффициент полезного действия, потери тепла.

Аннотация: Рассмотрены балансовые испытания огневой водогрейной котельной установки FB-2, проведенные в рамках дисциплины «Водогрейные котлы и котлы-утилизаторы».

К наиболее часто проводимым теплотехническим испытаниям паровых и водогрейных котлов относятся балансовые, режимно-наладочные и экспресс испытания.

Балансовые испытания имеют целью установление типовых энергетических характеристик котлов. Балансовые испытания котельных агрегатов выполняются для проверки работы установки в эксплуатационных условиях с целью контроля основных показателей и качества работы эксплуатационного персонала. Балансовые испытания производят систематически после каждого капитального ремонта или внесения конструктивных изменений в отдельные узлы оборудования.

Балансовые испытания котлов в зависимости от поставленных задач могут быть разделены на две группы:

1. Испытания, проводимые с целью определения теплотехнических характеристик работы котла (КПД, производительности, потерь тепла, расхода топлива и т. д.), выявления их эксплуатационных особенностей и недостатков конструкций.

2. Испытания, проведение которых вызывается необходимостью обработки или проверки новых конструкций, их элементов, использования новых закономерностей и т. д., т. е. имеющих исследовательский характер. Эти испытания не подлежат типизации и поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Испытания первой группы в зависимости от цели проводятся по трём категориям сложности.

К первой категории сложности относятся приёмсдаточные (гарантийно-сдаточные) испытания, которые проводятся, как правило, для проверки гарантийных показателей работы установки. В этом слу-

чае проверяются: производительность, КПД, параметры котла, параметры работы вспомогательного оборудования, составляющие потерь тепла, воздушный баланс топки, тепловосприятие поверхностей нагрева в рабочем диапазоне нагрузок и др.

Ко второй категории сложности относятся эксплуатационные (балансовые) испытания, проводимые для установления нормативных эксплуатационных характеристик при номинальных параметрах работы котла после его реконструкции, в связи с переходом на сжигание нового вида или новой марки топлива, и при систематическом отклонении параметров от нормативных.

В задачи испытаний могут входить:

- выявление оптимальных значений коэффициента избытка воздуха, распределение воздуха и топлива по горелкам и их ярусам и т. п. при различных нагрузках котла;

- определение максимальной и минимальной нагрузки оборудования при различном составе работающего вспомогательного оборудования;

- определение фактической экономичности агрегата и отдельных составляющих потерь тепла;

- выявление причин превышения потерь тепла над расчетными значениями, разработка мероприятий по их уменьшению и достижению расчетного КПД;

- определение аэродинамических характеристик газо-воздушного тракта;

- составление типовой энергетической (нормативной) и расходной характеристик котла, а также характеристики относительного прироста расхода топлива.

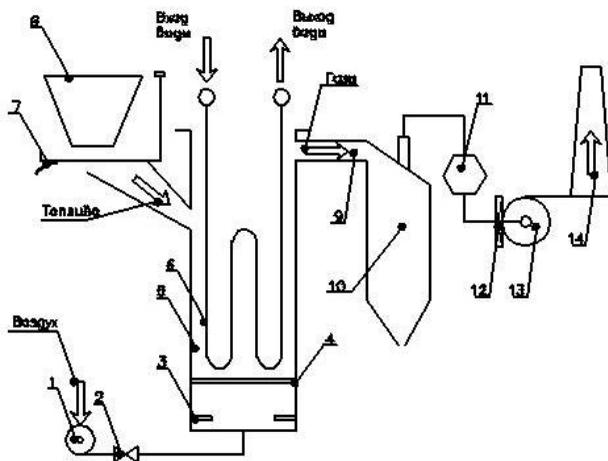
К третьей категории сложности относятся режимно-наладочные и доводочные испытания, проводимые с целью наладки режима работы котла и определения его отдельных показателей; определение оптимальных значений коэффициентов избытка воздуха и тонкости пыли, оптимального распределения воздуха по горелкам, максимальной нагрузки при различном составе вспомогательного оборудования и др. По этой категории сложности проводятся и эксплуатационные испытания после типовых капитальных ремонтов котла с целью определения их качества и уточнения характеристик оборудования в результате проведения ремонтных работ.

Перечисленные виды испытаний различаются количеством опытов и точностью измерений основных показателей. Испытания по первой и третьей категориям сложности проводятся при установившемся тепловом состоянии системы с обязательным сведением теплового

баланса котлоагрегата. При этом предусматривается использование аппаратуры с повышенной точностью (класс 0,5 и 1,0).

В результате балансовых испытаний определяют КПД нетто котла. КПД брутто котла представляет собой отношение количества полезно использованного тепла к подведённому. Он характеризует совершенство передачи тепла от топлива к воде или пару. КПД нетто учитывает расходы тепловой и электрической энергии на собственные нужды. Тепловой баланс котлоагрегата, необходимый для определения его КПД, составляют на единицу количества топлива (1 кг или 1 м³).

Балансовые испытания водогрейной котельной установки с кипящим слоем проводились в лаборатории топочных процессов кафедры «Котло- и реакторостроение». Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.



- 1 – вентилятор; 2 – вентиль; 3 – шайба; 4 – решетка; 5 – топка;
6 – змеевик; 7 – вибратор; 8 – бункер топлива; 9 – газоход; 10 – циклон;
11 – тканевый фильтр; 12 – шибер; 13 – дымосос; 14 – труба

Рисунок 1 – Принципиальная схема стенда FB-2

В ходе проведения испытаний были произведены замеры параметров работы котла для определения коэффициента полезного действия и определения расхода топлива на котел прямым и обратным балансом. Газовый анализ проводился газоанализатором Testo 340, измерение расхода воздуха дифференциальным манометром Testo 510, замер температуры стен топочной камеры – тепловизором Testo 870. Анализ технических характеристик сжигаемого угля, а также содержа-

ние горючих в шлаке и уносе проведены в топливной лаборатории кафедр «Котло- и реакторостроение». В результате проведенной работы получилось, что расход топлива во время испытаний при определении обратным балансом, т. е. расчете всех тепловых потерь и полезно использованного тепла в топке совпал с замеренным расходом во время испытаний с погрешностью 2 % и составил 4 г/с. Потери тепла с уходящими газами $q_2 = 4$ % (при температуре уходящих газов 140 °С), потери тепла с механическим недожогом топлива q_4 составили 5 %, потери тепла в окружающую среду $q_5 = 15.5$ %, т. к. стенки топочной камеры выполнены без изоляции, потери тепла со шлаком – $q_6 = 0.045$ %. КПД брутто котла составил 75,705 %. Полезно использованное тепло в топке получилось также 75.405 %. Прямой и обратный тепловые балансы сведены достаточно точно, что говорит о точности проведенных расчетов и замеров параметров работы котла.

Список литературы

1. Трёмбовля В.И. Теплотехнические испытания котельных установок [Текст] / В.И. Трёмбовля и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.
2. Меняев К.В. Балансовые испытания водогрейного котла. Методические указания к лабораторной работе для студентов направления 13.03.03 «Энергетическое машиностроение» / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – 48 с.
3. Меняев К. В. Методы испытания углей [Текст] : учебное пособие / К.В. Меняев ; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2014. – 63 с.
4. Меняев К.В. Экспериментальное исследование топочных устройств с кипящим слоем / К.В. Меняев, Е.Б. Жуков, Е.Е. Паутова, Е.К. Сарсембе-нов // Ползуновский альманах. – 2017. – Т. 1. – № 3. – с. 44–53.
5. Меняев К. В., Паутова Е. Е. Псевдоожигение как решение экологических проблем в энергетике / Меняев К. В., Паутова Е.Е. // В сборнике: Проблемы техносферной безопасности – 2015 I Международная заочная научно-практическая конференция: сборник статей. Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова". 2015. С. 78–81.
6. Сарсембенов Е.К. Явление псевдоожигения в работе экспериментальной установки ФВ-2 / Е.К. Сарсембенов, К.В. Меняев // Современные тенденции котлоостроения: Материалы международной научно-практической конференции студентов и аспирантов / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2017 – с. 74–80.

КАФЕДРА КОТЛО- И РЕАКТОСТРОЕНИЯ АЛГГТУ ИМ. И. И. ПОЛЗУНОВА

Е. Б. Жуков, К. В. Меняев, И. Д. Фурсов, А. А. Гладких

Первый набор на специальность «Котло- и реакторостроение» был проведен в 1964 г. Всего за это время в АлггТУ подготовлено более 1600 инженеров по котло- и реакторостроению, более 120 бакалавров и 25 магистров по направлению «Энергетическое машиностроение».



Первые годы специалистов-котельщиков готовила многоплановая кафедра, объединявшая самостоятельные направления теоретических основ тепло техники, гидравлики и гидромашин, котло- и реакторостроения. Возглавлял кафедру в течение десяти лет (1962-1972 гг.) к.т.н., доцент В.В. Макаров.

Самостоятельная профилирующая кафедра «Котло- и реакторостроение» образована в 1972 г. Ее возглавил к.т.н., профессор И.Д. Фурсов. В период с 1979 по 1997 гг. кафедру возглавляли к.т.н., доценты Л.И. Дураченко и Б.М. Малкин. С 2013 года кафедрой заведует

к.т.н., доцент Е.Б. Жуков.

В становлении кафедры как профилирующей и в последующей работе большую и всестороннюю помощь оказывали и продолжают оказывать ООО «СибЭнергоМаш-БКЗ» и Барнаульские ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3. Среди первых преподавателей профилирующих дисциплин на кафедре были ведущие специалисты Барнаульского котельного завода: главный инженер В.Д. Зоричев, главный конструктор Н.В. Павлов, заместитель главного технолога Б.В. Добротин и др. Смена поколений руководителей этих предприятий не ослабила деловых связей с кафедрой. По-прежнему конструкторские отделы, вычислительные центры, цеха и лаборатории ООО «СибЭнергоМаш-БКЗ», ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 остаются для кафедры полигонами научно-исследовательских работ и учебного процесса.

В 2010 году на кафедре начата двухуровневая подготовка специалистов по направлению «Энергетическое машиностроение»: бакалавров по профилю «Котлы, камеры сгорания и парогенераторы» и магистров по программе «Технология и экология сжигания органических топлив».

Направление подготовки кафедры «Котло- и реакторостроение» всегда было и до сих пор остается очень востребованным на рынке труда г. Барнаула и Алтайского края в целом. Поэтому была и до сих пор остается тенденция к 100 % трудоустройству выпускников.



Для реализации программ бакалавриата и магистратуры направления «Энергетическое машиностроение» были привлечены ведущие специалисты отрасли из ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», ООО «СибЭнергоМаш-БКЗ», ООО «Энергомаш инжиниринг», ООО «БарналЭнергоМаш», ООО «НПО «БЗКО», Бар-

наульского филиала ОАО Таганрогский котельный завод «Красный котельщик» и др.

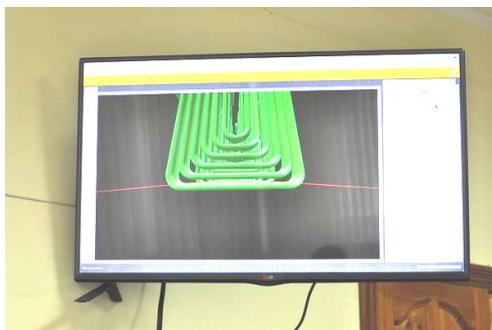
Связи с работодателями развиваются через практики и научно-исследовательскую работу. Сегодня на рынке труда востребован не только инженер, но и инженер-исследователь, поэтому научная составляющая магистерской подготовки является очень актуальной. Для этого созданы и функционируют базовые кафедры на предприятиях г. Барнаула ООО «ПроЭнергоМаш-Проект», ООО «НПО «СибЭнергоАльянс».

Кафедра «Котло- и реакторостроение» располагает комплексом учебных и научно-исследовательских лабораторий, оснащенных современными приборами и вычислительной техникой для экспериментального



исследования и математического моделирования процессов в теплоэнергетике и смежных с ней отраслях, в т. ч.:

- лаборатория аэродинамики газовоздушных трактов и котлов;
- лаборатория топочных процессов (огневые и изотермические стенды, камеры сгорания, коксовая печь, пылеприготовительные установки);
- лаборатория термодинамики и тепломассообмена;
- испытательная лаборатория топлива АлтГТУ;
- лаборатория химического анализа топлива и воды;
- компьютерный класс;
- лаборатория теплотехнических измерений и автоматического регулирования энергоустановок;
- лаборатория 3-D прототипирования.



Сочетание мощной методической базы с мощной материальной базой делает подготовку специалистов качественной и максимально приближенной к реальному положению на предприятиях.

Обновление материальной базы кафедры идет активно благодаря

нашим спонсорам ООО «СибЭнергоМаш-БКЗ» и Сибирской генерирующей компании. Это обновление позволяет идти в ногу со временем, используя и развивая современные подходы и методы к перспективным технологиям проектирования котельных установок и агрегатов. Так совсем недавно была организована лаборатория 3-D прототипирования, в которой студенты могут не только проектировать, но и изготавливать спроектированные ими элементы котлов.



В рамках реализации магистерской программы ведутся переговоры с одним из флагманов современного САПР в области проектирования промышленных объектов AVEVA. Введение в программу подготовки магистров получения навыков работы с системами трехмерного проектирования уровня AVEVA 3D повысит ценность выпускников, имеющих специфические компетенции и позволит быть им более востребованным. Следует отметить, что подобное предложение компания AVEVA сделала небольшому количеству кафедр ВУЗов России, в число которых в ближайшее время войдет кафедра «Котло- и реакторостроения». Такие мероприятия позволяют выпускающей кафедре идти в ногу со временем, используя и развивая современные подходы и методы к перспективным технологиям проектирования.



Направления научных исследований:

- Разработка теоретических основ и практической реализации сжигания органических топлив.
- Сжигание топлива в низкотемпературном стационарном и циркулирующем кипящем слое.
- Утилизация отходов сельскохозяйственного производства и деревообрабатывающей промышленности на основе технологии сжигания в кипящем слое и в вихревых топочных устройствах.
- Комплексное энерготехнологическое использование топлива.
- САПР в энергомашиностроении.

Также на кафедре «Котло- и реакторостроения» организована переподготовка и повышение квалификации специалистов отрасли по различным программам.

Не смотря на то, что кафедра является самой молодой из котельных кафедр России, скоро у кафедры 50-летний юбилей и к этому событию мы подходим с достойными результатами и показателями работы. Так кафедра в 2016 и 2017 гг. занимает по итогам рейтинговой оценки деятельности 2 место в АлтГТУ, являясь лидером в учебно-методической, научно-исследовательской и воспитательной работе.

СИБИРСКАЯ ГЕНЕРИРУЮЩАЯ КОМПАНИЯ

И. В. Лузанов, Е. Б. Жуков, К. В. Меняев

«Сибирская генерирующая компания» (СГК) – энергетический холдинг, осуществляющий свою деятельность на территории Алтайского края, Кемеровской области, Красноярского края, Новосибирской области, Республики Хакасия, Республики Тыва. Основные виды деятельности – производство тепло- и электроэнергии, передача и поставка тепла и ГВС потребителям. В состав группы входят 4 ГРЭС, 1 ГТЭС и 18 ТЭЦ общей установленной электрической мощностью – 10 ГВт и тепловой мощностью – 23,9 тыс. Гкал/час, а также тепловые сети общей протяженностью 8700 км, ремонтные и сервисные компании, крупнейшая управляющая компания Красноярска. На долю станций СГК приходится порядка 23–25 % выработки тепла и электроэнергии энергосистемы Сибири. Численность персонала компаний Группы СГК составляет более 31000 человек.

Алтайский филиал включает в себя энергопредприятия, расположенные на территории Алтайского края. Их суммарная установленная мощность по электроэнергии – 720 МВт, по теплу – 3338,3 Гкал/час.

Генерирующие компании:

- ОАО «Барнаульская генерация» — Барнаульская ТЭЦ-2
- ОАО «Барнаульская ТЭЦ-3»
- Южная тепловая станция
- Теплосетевые компании
- АО «Барнаульская теплосетевая компания»
- АО «Барнаульская тепломагистральная компания»

Барнаульская ТЭЦ-2 – одно из важнейших звеньев в работе огромной системы, отвечающей за тепло и комфорт в домах барнаульцев.

ТЭЦ-2 ввели в эксплуатацию в 1955 году. Строить теплоэлектростанцию начали в 1950 году по решению совета Министров СССР. Потребность в ней назрела еще со времен Великой Отечественной войны – в краевую столицу перевезли целый ряд крупных предприятий, эвакуированных с западных территорий страны. Городу нужны были новые мощности, способные обеспечить теплом и электроэнергией промпредприятия и жилой фонд.

Три первых котла и турбины были введены на станции в эксплуатацию спустя пять лет после начала строительства. Производительность котлов составляла по 170 тонн пара в час, а турбины имели суммарную мощность 75 МВт. На проектную мощность предприятие вышло только почти 20 лет спустя, в 1973 году.

Постепенно ТЭЦ-2 стала основой энергетического комплекса Барнаула и положила начало созданию единой энергосистемы края.

К 2011 году на ТЭЦ-2 работали 18 котлов и 9 турбоагрегатов, большая часть которых уже не отвечала современным требованиям. В этом же году на станции была начата масштабная реконструкция в рамках программы модернизации энергетики – договоров предоставления мощности.

В феврале 2014 года в эксплуатацию был введен восьмой энергоблок, а в декабре – девятый. В результате основные фонды предприятия были обновлены на 30 %, а мощность станции увеличилась – до 275 МВт по электроэнергии и 1087 Гкал/ч – по тепловой энергии.



Завершившаяся реконструкция ТЭЦ-2 стала одним из крупнейших инвестиционных проектов в энергетике Алтайского края за последние годы.

ТЭЦ-2 имеет стратегическое значение для обеспечения краевого центра теплом и электроэнергией, на ее долю приходится около 45 % от общего числа потребителей СГК в Барнауле.

Директор Барнаульской ТЭЦ-2 Александр Серафимович Лукьянов в 1995 году окончил Алтайский политехнический институт по специальности «Котло- и реакторостроение». Также является выпускником Президентской программы подготовки специалистов по направлению «Менеджмент».

Свою трудовую деятельность Александр Лукьянов начал на Барнаульской ТЭЦ-3 в должности машиниста-обходчика по турбинному оборудованию. Затем работал начальником смены станции, позже – заместителем главного инженера БТЭЦ-3.

В 2010 году назначен начальником – главным инженером Барнаульской ТЭЦ-2. В 2013 году работал в исполнительном аппарате ОАО «Сибирьэнергоремонт» – заместителем главного инженера, затем директором Кемеровского филиала.

В 2011 году награжден почетной грамотой Управления Алтайского края по промышленности и энергетике.

Барнаульская ТЭЦ-3 – самая большая и современная станция в Алтайском крае. Она обеспечивает половину краевого центра теплом и горячей водой, а также некоторые предприятия – промышленным паром.

Установленная электрическая мощность станции составляет 445 МВт, тепловая – 1462 Гкал/ч. Она оборудована пятью энергетическим и семью водогрейными котлами, тремя турбогенераторами.

Строительство Барнаульской ТЭЦ-3 было начато в 1973 году с монтажа пиковой водогрейной котельной.

Первый блок станции запустили 19 декабря 1981 года. Он выдавал 420 тонн пара в час и имел электрическую мощность в 80 МВт – тогда это был самый крупный блок на Алтае. В 1983 году ввели в действие второй блок, который давал уже 200 МВт. Строительство I очереди ТЭЦ-3 завершилось в декабре 1987 года.



Ежегодно Барнаульская ТЭЦ-3 вырабатывает треть электрической энергии в масштабах региона. Станция вошла в десятку самых эффективных генерирующих предприятий России. По итогам 2014 года она поднялась с 24 на 9 место по данным рейтинга АИС «Рынки электроэнергетики и мощности».

ТЭЦ-3 является не только флагманом региональной энергетики, но и признанным лидером в сфере социальной ответственности. В 2015 году администрация Барнаула отметила заслуги предприятия в решении социальных проблем территории и развитии корпоративной благотворительности, а также в формировании здорового образа жизни коллектива. В муниципальном этапе конкурса «Лучший социально ответственный работодатель года» предприятие заняло в данных номинациях первое и второе места соответственно. Кроме того, ТЭЦ-3 регулярно удостоивается призовых мест в конкурсах на лучшую организацию работы по охране труда.

Директор Алтайского филиала Сибирской генерирующей компании Игорь Викторович Лузанов работает в энергетике 20 лет.

Весь его трудовой путь связан с Барнаульской ТЭЦ-3. Завершая обучение в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова по специальности "Котло- и реакторостроение" со специализацией «Тепловые электрические станции», Игорь Викторович уже начал работать в должности машиниста-обходчика по турбинному оборудованию станции, старшего машиниста паровых турбин турбинного цеха. Трудился начальником смены, заместителем началь-

ника этого цеха. В 2000 году Игорь Лузанов стал начальником турбинного цеха Барнаульской ТЭЦ-3. В 2010 году он был назначен заместителем главного инженера по производству, затем заместителем главного инженера по эксплуатации. С 2012 года Игорь Лузанов работал начальником-главным инженером станции, а с 1 января 2013 года является директором БТЭЦ-3.

С 1 октября Игорь Лузанов возглавил Барнаульский филиал Сибирской генерирующей компании, который с конца 2016 года стал Алтайским.

В 2005 году Игорь Викторович получил второе высшее образование по специальности "Менеджмент организации" в Московском государственном университете экономики, статистики и информатики.

СГК предлагает для каждого города своей ответственности масштабные инвестиционные проекты по созданию современного теплоснабжения. В течение последних пяти лет СГК на практике доказала свою компетентность и ответственность, показала умение решать самые сложные задачи, продемонстрировала заметное улучшение качества теплоснабжения. При этом тарифы последние два года оставались в пределах утвержденных Правительством страны, на среднем уровне сибирских городов и существенно ниже тарифа для городов европейской части России.



Особенность работы СГК – предлагать оптимальные технические решения, использовать внутренние резервы отрасли, опираться на долгосрочную стратегию развития. В рамках предыдущей модели резервы исчерпаны, необходимо сделать шаг вперед, как того и требует новая государственная политика в сфере теплоснабжения. СГК готова: на Петербургском международном экономическом форуме 2017 года компания представила восемь инвестиционных проектов для городов присутствия. Первый из них – в Рубцовске – уже реализуется и доказывает свою состоятельность на практике.

По сложившейся традиции подразделения Сибирской генерирующей компании (СГК) ОАО «Барнаульская генерация» и ОАО «Барнаульская ТЭЦ-3» являются базами учебных и производственных практик студентов направления «Энергетическое машино-

строение», а в течение нескольких последних лет развивается сотрудничество и по обновлению лабораторной базы кафедры "Котло- и реакторостроение" АлтГТУ.

Благодаря спонсорской помощи, оказываемой СГК кафедре «Котло- и реакторостроение» АлтГТУ, удается повышать качество обучения студентов. Ни для кого не секрет, что основное лабораторное оборудование устарело, а

проводить занятия на высоком технологическом уровне со старым оборудованием очень сложно. Главным аспектом работы высшей школы по обучению студентов является связь с производством, новыми инновационными технологиями в промышленности, для которой и готовятся выпускники университета. А промышленность не стоит на месте, а развивается вместе с технологическим прогрессом.



Работая с новым и современным оборудованием, у студентов появляется возможность получить знания и навыки, соответствующие требованиям отрасли, а также по опыту преподавания увеличивается интерес к изучаемым дисциплинам.

Оказывая поддержку образовательному процессу, СГК получает более качественных специалистов для работы на своих предприятиях, затрачивая меньше ресурсов для адаптации к реальному рабочему процессу. ОАО «Барнаульская генерация» и ОАО «Барнаульская ТЭЦ-3» являются постоянными потребителями выпускников кафедры "Котло- и реакторостроение" АлтГТУ.

Научное издание

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ КОТЛОСТРОЕНИЯ

**Материалы II международной научно-практической конференции
студентов и молодых ученых**

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 20.02.2018. Формат 60x84 1/16.

Печать – ризография. Усл.п.л. 12,32.

Тираж 60 экз. Заказ 2018.

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