

На правах рукописи



***БЕЛЯЕВ Евгений Николаевич***

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ И СЖИГАНИЯ  
ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КОТЛАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ  
С УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОВЫХ ВЫБРОСОВ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул 2010

Работа выполнена в Алтайском государственном техническом университете  
имени И.И. Ползунова

- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Сеначин Павел Кондратьевич
- Научный консультант:** кандидат технических наук  
Кисляк Сергей Марксинович
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Саломатов Владимир Васильевич  
кандидат технических наук, доцент  
Логвиненко Владимир Васильевич
- Ведущая организация:** ЗАО ПО «Бийскэнергомаш» (г. Бийск)

Защита состоится «29» апреля 2010 г. в 12-30 часов на заседании  
Диссертационного совета Д 212.004.03 при Алтайском государственном  
техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу:  
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, АлтГТУ.  
E-mail: [D21200403@mail.ru](mailto:D21200403@mail.ru), тел/факс (3852)260516.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АлтГТУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью Вашего  
учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секре-  
таря диссертационного совета.

Автореферат разослан «29» марта 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А.Е. Свистула

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе рассматриваются некоторые проблемы использования низкосортных топлив и вторичных энергоресурсов (ВЭР) в промышленной энергетике, в том числе новые перспективные технологии *сжигания водоугольного топлива* в котлах малой мощности, проблемы разработки *эффективных золоуловителей* центробежного типа и эффективности *утилизации ВЭР*.

**Актуальность работы.** Общемировая тенденция к увеличению цен на углеводородные топлива подталкивает потребителей к поиску более дешевых энергоносителей и эффективных методов энергосбережения.

Среди новых угольных технологий большой интерес представляют *технологии водоугольных суспензий (ВУС)*, возникшие в 50-60 годах прошлого века с появлением технологий гидротранспорта угля. Развитие технологий ВУС в настоящее время привело к *технологиям водоугольного топлива (ВУТ)* - искусственных композиционных жидких топлив (ИКЖТ) и ВУТ с кавитационными схемами получения (КаВУТ). Разработке технологии получения ВУТ, предназначенного для непосредственного сжигания топке котлов малой мощности, посвящен *первый раздел* работы.

Несмотря на то, что процесс сжигания ВУТ довольно легко реализуется на практике, из-за присутствия радикальных реакций с участием воды, и обычно протекает эффективно, однако не достаточно полно с точки зрения выгорания углеродной массы. Известно, что сжигание ВУТ, полученного из низкосортных, например, бурых углей и отходов углеобогащения, в котлах малой мощности обычно сопровождается значительным механическим и химическим недожегом (до 10-20 %). Поэтому при сжигании ВУТ необходимым условием организации эффективной работы котла является *улавливание частиц золотого уноса* с целью возврата в топку. Среди известных золоуловителей наиболее простыми по конструкции и надежными в эксплуатации являются золоуловители центробежного типа с взаимодействующими закрученными двухфазными потоками. Совершенствованию золоуловителей этого типа посвящен *второй раздел* работы.

В настоящее время проблемы энергоэффективности и энергосбережения приобретают характер планетарного масштаба, в связи с набирающими ускорение процессами глобального потепления, вызванными, в том числе, антропогенными выбросами в атмосферу парниковых газов, которые образуются при сжигании различных видов топлив при производстве тепловой и электрической энергии. Поэтому оптимизация и снижение энергопотребления развитыми странами, включая Россию, является насущной проблемой. Среди энергосберегающих технологий важное место имеют *технологии утилизации тепловой энергии*. Утилизация тепла сбросных газов в котлах малой мощности и в различных технологических процессах является энергоэффективным мероприятием, способным принести весомый экономический и экологический эффект. Техничко-экономической оценке эффективности утилизации тепловых выбросов посвящен *третий раздел* работы.

Таким образом, **основной целью работы** является развитие технологий производства и сжигания ВУТ, полученных из низкосортных топлив, в котлах малой мощности с утилизацией тепловых выбросов.

- Разработка технологии получения и сжигания ВУТ в котлах малой мощности.
- Исследование и совершенствование золоуловителей центробежного типа для возврата уносов.
- Техничко-экономическая оценка эффективности утилизации сбросной теплоты в котлах малой мощности и других объектах.

Для достижения этих целей решались **следующие задачи**.

- Анализ существующих технологий получения и сжигания водоугольного топлива и проведение исследований по их совершенствованию.
- Разработка устройства для получения водоугольного топлива, обладающего комбинированными свойствами, для котлов малой мощности.
- Исследование аэродинамики двухфазного потока и эффективности улавливания золоуловителей центробежного типа.
- Разработка экономико-математической модели и методики технико-экономической оценки эффективности рекуператоров сбросной теплоты в многоступенчатых схемах утилизации.

**Научная новизна** (положения, выносимые на защиту).

- Форкамерная горелка-диспергатор для получения и непосредственного сжигания ВУТ в котлах малой мощности.
- Результаты исследования аэродинамики потока и эффективности улавливания золоуловителей центробежного типа.

**Практическая значимость**.

- Разработана конструкция и технология изготовления форкамерной горелки-диспергатора для получения и сжигания ВУТ.
- Разработан золоуловитель центробежного типа с взаимодействующими потоками компактной конструкции, обладающий высокой эффективностью улавливания.
- Разработана методика технико-экономической оценки эффективности рекуператоров сбросной теплоты в многоступенчатых схемах утилизации и обобщен опыт соискателя по внедрению технологий утилизации ВЭР на промышленных предприятиях.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяется использованием достоверных данных и современных мировых достижений в рассматриваемой области, проведением модельных и натуральных исследований с применением современных экспериментальных методов.

**Апробация работы**. Результаты исследования докладывались на конференциях различного уровня: III Семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (Барнаул, 2003), V Всероссийской научно-техн. конф. «Проблемы повышения эффективности металлообработки

в промышленности на современном этапе» (Новосибирск, 2007), II Всероссийской научно-техн. конф. «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды» (Бийск, 2007), II Всероссийской научно-практ. конф. с междунар. участием «Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики - ЭЭТПЭ-2008» (Барнаул, 2008), Всероссийском семинаре кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике (Красноярск, 2009), 67-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов и проф.-преп. состава АлтГТУ (Барнаул, 2009), VI-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь», (Барнаул, 2009).

Получен диплом лауреата конкурса 2009 года по энергетике и энергосбережению Ассоциации городов Сибири и Дальнего Востока за коммерческий проект «Комплекс машин и технология для производства водоугольного топлива».

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 1 статья в издании, рекомендованном ВАК, 3 статьи в периодических изданиях и тематических сборниках, 5 докладов и 2 тезиса докладов на конференциях различного уровня, 2 публикации в Интернет-ресурсах, 2 патента и учебное пособие.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Содержит **192 страницы, 114 рисунков, 34 таблицы и 93 цитированных источника.**

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показаны ее научное и практическое значения, изложены основные положения, выносимые на защиту.

### **1 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ И ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**

В конце XX века технологии водоугольного топлива (ВУТ) наибольшее распространение получили в Японии, Китае и России (рисунок 1). Основными аппаратами по производству ВУТ в традиционных технологиях являются шаровые барабанные мельницы (ШБМ) или стержневые мельницы мокрого помола, имеющие высокие показатели металлоемкости и низкий энергетический КПД на единицу продукции (90-250 кВтч/т и более).

Полученное традиционной технологией ВУТ есть двухфазная водно-дисперсная система со средним размером угольных частиц 50-100 мкм. Получение более мелкодисперсных частиц путем размола угля связано с большими энергетическими затратами. Основной недостаток ВУТ - низкая стабильность (устойчивость), обычно не превышающая одного-двух месяцев, из-за недостаточной прочности системы «жидкость-твердая фаза», даже при наличии фиксирующих добавок – пластификаторов в количестве 1-3 %.

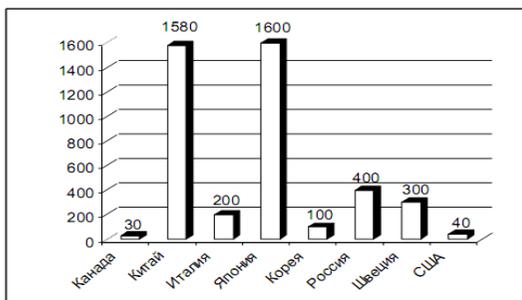


Рисунок 1 –  
Производство ВУТ  
в различных  
странах (тыс. тонн)  
в 1983-1995 гг.

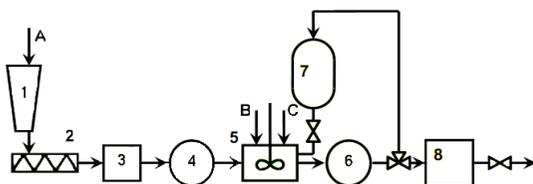


Рисунок 2 –  
Принципиальная схема  
технологической линии  
производства ИКЖТ  
Российской компании ЗАО  
«Компомаш-ТЭК»:  
1- угольный бункер;  
2- питатель-дозатор;  
3- дробилка; 4- дисперга-  
тор; 5- миксер; 6- кавитатор;  
7- буферный бак;  
8- бак готового ИКЖТ. А-  
уголь; В- вода; С- техноло-  
гические добавки

С целью повышения устойчивости ВУТ в настоящее время используют методы механоактивации компонентов смеси на специальных аппаратах (кавитаторах). С помощью этой технологии может быть получено активированное топливо – ИКЖТ и КаВУТ со сроком хранения более года (рисунок 2).

При такой технологии получается значительное количество частиц ультрадисперсной фракции 5-10 мкм. По данным компании ЗАО «Компомаш-ТЭК» имеем тонкость дисперсной фракции порядка 1-3 мкм и меньше. Энергопотребление в кавитаторах при помоле углей порядка 10 кВтч/т, то есть дезинтеграторы являются менее энергоемкими машинами.

В современных технологиях производства ВУТ обращает на себя внимание большой удельный износ металла кавитаторов  $g=0,117$  кг/г. Такой большой износ вызван тем, что в обычно применяемых схемах кавитатор нагружен несвойственной ему функцией размола твердых частиц с твердостью 4-5 единиц по шкале Мооса, в то время как кавитатор в схеме нужен, в первую очередь, для образования физико-химической топливной системы. Более рационально вместо дробленки с размерами частиц до 7 мм и воды на вход кавитаторов подавать смесь из тонкодисперсной угольной пыли 10-500 мкм и воды. Такой подход применен в установках ЗАО НПО «Сибэкотехника» (г. Новокузнецк).

Кавитатор, в сущности являющийся кавитационным насосом, работает следующим образом. В результате механических эффектов, обусловленных быстрым вращением ротора специальной конструкции в жидкой среде обра-

зуются множество мелких газовых пузырьков (паров жидкости), которые являются неустойчивыми состояниями системы и по истечению некоторого времени индукции исчезают (схлопываются) с образованием в жидкости ударных волн высокого давления. Последние воздействуют на взвешанные в жидкости (воде) угольные частицы, разрушают их и электризуют - наводят на них заряд статического электричества, вызванный трением и разрушением частиц. При этом происходит механоактивация как жидкой, так и твердой фазы топлива, которая, по-видимому, заключается в образовании двойного электрического слоя на поверхности частиц твердой фазы, являющейся диэлектриком. Второй электрический слой состоит из диполей жидкой фазы, которые образуют сложные конгломераты. Таким образом, около каждой частицы угля существует мощное дипольное окружение из жидкой фазы, причем эти диполи, возможно, образуют длинные цепи. В результате наличия сил отталкивания одноименных зарядов ВУТ становится устойчивым, не расслаивается, сохраняя реологические свойства в течение длительного времени.

Совместно с ООО «Радекс» (г. Барнаул) соискателем были проведены **испытания оборудования по приготовлению ВУТ без использования пластификаторов** и промежуточных емкостей перекачивания. В этой технологической схеме, в основном, подобной традиционным, после предварительного измельчения ВУС попадала в замкнутый контур (рисунок 2, элементы 5, 6 и 7) с кавитатором-диспергатором и буферной накопительной емкостью, из которой периодически производился отбор готового продукта. За основной экспериментальный параметр было принято количество проходов через кавитатор-диспергатор (кавитационный насос) системы «Петракова». В результате исследований были получены суспензии ВУТ высокой стабильности.

**Размер частиц** определяли ситовым методом. Данные представлены в виде распределения дифференциального остатка, который аналогичен плотности функции распределения массы частиц по размерам (рисунок 3). Последние восемь проходов были усреднены и обработаны с помощью распределения Розина-Раммлера-Беннета (рисунок 4).

По результатам экспериментов принципиально неожиданным результатом было выделение метана при длительном (более полугода) хранении ВУТ в закрытой емкости. **Газ определяли** на хроматографе ЛХМ-80 [54-56]. Пробу отбирали шприцом непосредственно из бутылки через пробку (получено содержание метана 9% об.). В таблице 1 приведены результаты **термогравиметрического анализа** приборе В-70 фирмы Seteram (скорость нагрева  $w_{\text{нагр}}=10^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ ; максимальная температура  $t_{\text{max}}=1037^{\circ}\text{C}$ ; вес навески  $P_{\text{нав.}}=35,2$  мг). На кривой потери массы можно выделить несколько участков.

1) Температура от  $t_1=46^{\circ}\text{C}$  до  $t_2=108^{\circ}\text{C}$ . Потеря массы ( $\Delta P_1=8,3\text{мг}$  - 23,5%) связана с испарением не связанной с наполнителем воды.

2) Температура от  $t_2=108^{\circ}\text{C}$  до  $t_3=192^{\circ}\text{C}$ . Потеря массы ( $\Delta P_2=2,6\text{мг}$  - 7,3%) связана с испарением и десорбцией сорбированной воды (химически и физически связанной на поверхности частиц наполнителя).

3) Температура от  $t_3=192^\circ\text{C}$  до  $t_4=362^\circ\text{C}$ . Потери массы нет.

4) Температура от  $t_4=362^\circ\text{C}$  до  $t_5=553^\circ\text{C}$ . Интенсивная потеря массы ( $\Delta P_3=5,4\text{мг} - 15,2\%$ ) связана с окислением материала наполнителя.

5) Температура от  $t_5=553^\circ\text{C}$  до  $t_{\text{max}}=1037^\circ\text{C}$ . Скорость окисления наполнителя уменьшается до полного выгорания углерода ( $\Delta P_{\text{н}}=8,8\text{мг} - 24,9\%$ ).

После окончания эксперимента вес несгораемого остатка  $P_{\text{ост}}=10,1$  мг и составлял 28,6% от исходного веса навески. Цвет остатка светло-красный. Параллельно с термогравиметрией навески образца № 8 прокаливались в муфельной печи при температуре  $700^\circ\text{C}$  в течение 4-х часов.

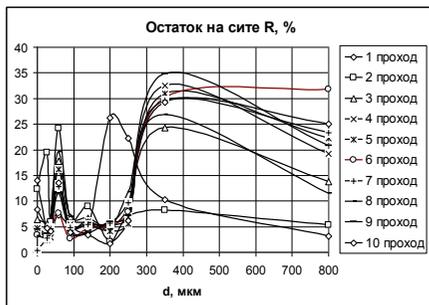


Рисунок 3 – Распределение дифференциального остатка на сите

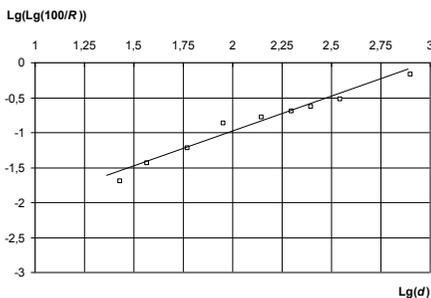


Рисунок 4 – Результаты ситового анализа в двойной логарифмической системе координат

Таблица 1 – Данные термогравиметрического анализа

№	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мг}$	$\Delta P, \text{мг}$	$\Delta P, \%$
0	20	35,2	0	0
1	46	35,2	0	0
2	108	26,9	8,3	23,6
3	192	24,3	2,6	7,4
4	362	24,3	0	0
5	553	18,9	5,4	15,3
max	1037	10,1	8,8	25,0

Несгоревший остаток представлял собой однородный светло-красный порошок. Вес остатка  $P_{\text{ост}}=3,5$  г и составляет 35% от исходной навески. Полученные несгораемые остатки анализировались рентгеновским микроанализатором с дисперсией по энергии фирмы Link-860 серия II. Несгораемый остаток содержал следующие элементы:  $Si$  (51-63 %),  $S$  (1,7-2,5 %),  $Ca$  (12,9-16,5 %),  $K$  (9,5-15,3 %),  $Fe$  (13,1-16,0 %).

Поскольку *существующие технологии получения ВУТ достаточно сложны*, в некоторых случаях, а именно при непосредственном сжигании приготовленного ВУТ, можно значительно упростить технологический процесс, который будем проводить в два этапа. *На первом этапе* сырой уголь после дробления измельчается на барабанной шаровой, стержневой или другой мельнице (сухого или мокрого помола) до среднего размера частиц по-

рядка 500 мкм (но не более 13-ти мм). **На втором этапе** измельченный уголь смешивается с водой, дополнительно размалывается и распыливается с помощью устройства, которое можно назвать форкамерной горелкой-диспергатором. На рисунке 5 приведены продольный и поперечный разрезы устройства. Устройство для приготовления водоугольной топливной смеси, содержит цилиндрический корпус 1 с крышкой 2. В корпусе 1, на торцевой части вала 3 электродвигателя (на рисунке 5 не показан), установлена рабочая камера с возможностью вращения вокруг центральной оси. Она образована закрепленными на её днище 4, выполненном в виде диска, кольцевой перфорированной ситовой вставкой 5, установленной на опорном колесе 6, и разделена на внутреннюю и внешнюю полости перфорированной обечайкой 7, расположенной коаксиально ситовой вставке 5.

На внешней стороне крышки 2 установлены штуцеры 11 и 12 для подвода в рабочую камеру воды и/или пара. На внутренней стороне крышки 2 закреплены отбойники-завихрители 13 с прижимными элементами 14, расположенные во внешней полости рабочей камеры, и отбойные элементы 15, расположенные во внутренней полости рабочей камеры. Отводной патрубком 16 готовой топливной смеси тангенциально подсоединен к корпусу 1 и снабжен патрубком 17 подвода газообразного окислителя (дутьевого воздуха). К выходу узла отвода 16 подсоединен вихревой распылитель топливной смеси с формирователем факела 18. Устройство может содержать металлоулавливатель 19, установленный в узле загрузки 8.

Исходный материал – уголь в виде смеси пыли и крошки или ВУС, с добавлением при необходимости нефтепродуктов или других добавок, подаются через узел загрузки 8 во внутреннюю полость рабочей камеры, которая приводится во вращение посредством вала 3 электродвигателя. Одновременно через штуцер 11 туда же подают жидкую фазу – воду и/или через штуцер 12 – горячий пар.

При вращении цилиндрической рабочей камеры компоненты смеси, поступившие во внутреннюю полость рабочей камеры, перемешиваются под действием центробежных сил, образуя смесь. Смесь прижимается к внутренней стенке перфорированной обечайки 7 и распределяется по ней, при этом она тормозится отбойными элементами 15, образуя вихревой поток, обеспечивающий интенсивное перемешивание и аэрирование. По мере достижения частицами смеси размера менее перфорации обечайки 7 она выводится (выдавливается) через перфорацию во внешнюю полость рабочей камеры, где происходит тонкое измельчение частиц.

При создании опытных образцов устройства возникла необходимость в разработке технологии изготовления (метода механической обработки отверстий ротора для уменьшения абразивного износа), что отражено в диссертации и соответствующих публикациях по теме работы [3-7].

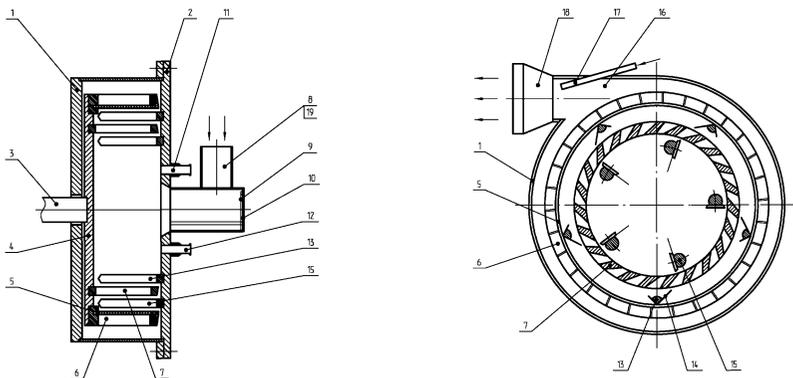


Рисунок 5 - Форкамерная горелка-диспергатор для получения и сжигания ВУТ

На базе ООО «ВАГА» совместно с ЗАО ПО «Бийскэнергомаш» при участии соискателя были проведены испытания опытно-промышленного образца РСМ.Ф-0,5 (горелки-диспергатора) - диспергирующего распыляющего устройства на экспериментальной установке – стенде (рисунок 6).

Согласно литературным данным, форма кривой для исходного угля, которая имеет минимум и не имеет ярко выраженных максимумов, соответствует продуктам измельчения на щековой дробилке.

Форма кривой измельченного продукта – левосторонне асимметричная кривая – соответствует полутонкому помолу в дезинтеграторах, шаровых и трубчатых мельницах. Результаты гранулометрического ситового анализа представлены на рисунке 7. После проведения соответствующих вычислений, получаем значения параметров распределения  $C = -3,97$ ;  $a = 1,49$ ;  $\delta_e = 262$  мкм. Кроме характерного размера  $\delta_e$  часто пользуются характерным размером частиц  $\delta_{50}$ . Построив распределение интегрального остатка на ситах  $R(\delta)$  (рисунок 8), получим  $\delta_{50} = 160$  мкм. Структура угольных частиц определялась на растровом микроскопе типа JSM-840.

Как следует из полученных результатов испытаний при заданных параметрах настройки внутренней конфигурации рабочих элементов (ситовая обечайка с продольной перфорацией в 0,5 мм и углах наклона завихрителей в 15° и 90° соответственно) устройство устойчиво работало с производительностью 0,3 т/ч при размере измельчённых частиц угля < 90 мкм (при исходном размере < 13 мм) и при удельных затратах 25 кВт.ч/т. После наработки 100 часов (с перерывами) с производством и сжиганием ВУТ из бурого угля горелка-диспергатор была разобрана для осмотра, при этом на ней не было обнаружено существенных повреждений рабочих поверхностей.

Испытания показали, что предложенное устройство позволяет одновременно измельчать исходный уголь, производить ВУТ и распылять её в топку котла с помощью воздуха, подаваемого в заданной стехиометрии. Установка

может быть рекомендована для применения в системах углеподготовки и сжигания угольной топливной смеси в виде ВУТ в котлах малой мощности. Основные технические характеристики форкамерной горелки-диспергатора (типа ФГР-В) приведены в таблице 2.

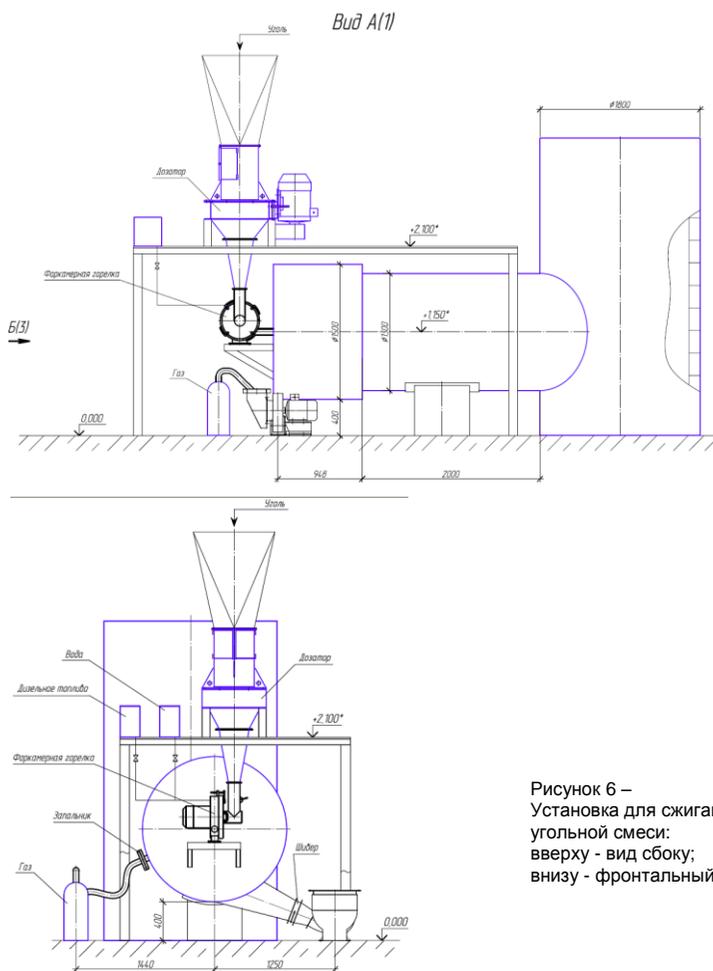


Рисунок 6 –  
Установка для сжигания водо-  
угольной смеси:  
вверху - вид сбоку;  
внизу - фронтальный вид



Рисунок 7 –  
диаграмма распределения  
частиц угля по размерам

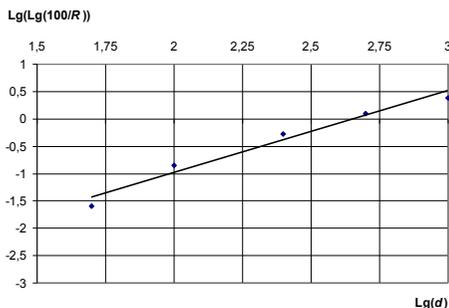


Рисунок 8 –  
Распределение интеграль-  
ного остатка в двойной  
логарифмической  
сетке координат

Таблица 2 - Основные технические характеристики ФГР-В

Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	1000
Давление воздуха в коллекторах:	
- концентраторах – камер I и II ступеней, мм. вод. ст.	250
- вихревого кольцевого распылителя, МПа	0,1 – 0,15
Расход энергоносителя (жидкого топлива), кг/ч	до 20
Расход топливной смеси, т/ч	1,5
Габариты, м	0,5x0,5x1,0
Вес, кг	250

## 2 РАЗРАБОТКА ЗОЛОУЛОВИТЕЛЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА

Одним из методов исследований в области теплоэнергетики является экспериментальное изотермическое моделирование аэродинамики двухфазных потоков в камере сгорания (топке) котла или другом его элементе. Моделирование аэродинамики проводилось по следующим критериям подобия:

$$\Delta = \frac{\delta(\rho_2 - \rho_1)}{L\rho_1}, \quad Re' = \frac{w\delta}{\nu}, \quad Fr = \frac{w^2}{Lg}, \quad Re = \frac{wL}{\nu}, \quad \mu, \quad (1)$$

где  $w$  и  $L$  — абсолютная скорость и характерный размер потока;  $\rho_1$  и  $\nu$  — плотность и кинематическая вязкость среды;  $\rho_2$  и  $\delta$  — плотность и диаметр частицы;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\mu$  — концентрация частиц в жидкости или газе.

Система описывает движение монодисперсного потока, но мы имеем дело с полидисперсными материалами. Поэтому обозначим через  $M$  с соответствующим индексом отношение сходных величин в модели и объекте:

$$M_L = \frac{L_{\text{мод}}}{L_{\text{об}}}, \quad M_w = \frac{w_{\text{мод}}}{w_{\text{об}}}, \quad \text{и т.д.} \quad (2)$$

При автомодельности газового потока, равенстве концентраций частиц объекта и модели  $M_u = 1$  из условия равенства критериев  $\Delta$ ,  $Re'$  и  $Fg$  получим три уравнения для определения масштабов модели (с учетом, что  $\rho_2 \gg \rho_1$ ):

$$\frac{M_{\rho_2} M_{\delta_0}}{M_{\rho_1} M_L} = 1, \quad \frac{M_w M_{\delta_0}}{M_v} = 1, \quad \frac{M_w^2}{M_L} = 1. \quad (3)$$

В эти три уравнения входят шесть масштабов - три из них выбираем произвольно. При изотермическом моделировании на воздухе масштабы параметров газа  $M_{\rho_1}$  и  $M_v$  заданы, тогда остальные масштабы определяются

$$M_L = \left( \frac{M_v M_{\rho_2}}{M_{\rho_1}} \right)^{2/3}, \quad M_{\delta_0} = \left( \frac{M_{\rho_2}}{M_v^2 M_{\rho_1}} \right)^{-1/3}, \quad M_w = \left( \frac{M_v M_{\rho_2}}{M_{\rho_1}} \right)^{1/3},$$

откуда для топочных газов получим масштабы моделирования

$$M_L = 0,317 \left( M_{\rho_2} \right)^{2/3}, \quad M_{\delta_0} = 0,607 \left( M_{\rho_2} \right)^{-1/3}, \quad M_w = 0,563 \left( M_{\rho_2} \right)^{1/3}. \quad (4)$$

**Проведены исследования аэродинамики потока и эффективности улавливания золоуловителей центробежного типа.**

Золоуловителей с тангенциальным входом (сечение 300×600мм и высотой – 600мм), содержащий две ячейки: *без вытеснителей потока; с вытеснителями потока; с раскруткой выходящего потока; с взаимодействием закрученных входящих потоков.* Золоуловителей с осевыми закручивателями потока: *с карманным закручивателем; с безударным закручивателем лопаточного типа; с плоским закручивателем лопаточного типа; с упрощенной конструкцией карманного закручивателя; с несимметричным вводом потока и уменьшенным числом каналов вывода.*

**Характеристики и основные параметры** наиболее эффективной и компактной конструкции центробежного золоуловителя приведены в выводах по работе. Моделирование проводилось на двух материалах: кварцевом песке, имеющим большой размер частиц ( $\delta_{50} = 200$  мкм), и золовом уносе ( $\delta_{50} = 30-60$  мкм), имеющем меньшую плотность частиц. Поле скоростей потока измерялось пневмометрическими зондами. Кроме трубки Прандтля в опытах использовалась трубка ВТИ диаметром 16 мм, позволявшая регистрировать динамический напор в двух направлениях без перестановки самой трубки.

**Исследование аэродинамики и эффективности улавливания** дают представление о характере движения запыленного потока в разработанном уловителе, который сводится к следующему.

Пройдя направляющий аппарат, запыленный поток приобретает вращательное движение, центр которого совпадает с осями выхлопных труб уловителя. Установка вытеснителей потока увеличивает скорость его закрутки. Вращающийся поток одновременно обладает опускным движением. У дна уловителя опускное движение потока сменяется подъемным, которое происходит по внешней поверхности выхлопных труб до входа в них. Частицы, вошедшие с потоком воздуха, силами инерции отбрасываются к стенкам уловителя. Часть из них попадает во входные щели улавливающих карманов. Внутри карманов наблюдается образование вторичных вихревых потоков. За счет этого некоторые частицы теряют скорость и оседают. Другие частицы проскакивают через улавливающие карманы в выходные щели и вновь попадают в поток. Наибольшее количество частиц скапливается в придонной области (50 мм) уловителя. В этой области и происходит наиболее интенсивная сепарация частиц в улавливающих карманах. Во вращающихся потоках происходит интенсивный обмен частицами. Это проявляется в том, что когда материал вводится в одну из ячеек, он сразу же перераспределяется между двумя ячейками, причем довольно равномерно. Это обстоятельство делает устойчивым такой уловитель к неравномерной запыленности на входе, в отличие от изолированных друг от друга циклонных элементов. Кроме того взаимодействие закрученных потоков увеличивает эффективность устройства. Испытанный уловитель является сложной аэродинамической системой. Это проявилось в нетривиальной зависимости сопротивления и эффективности улавливания  $\eta$  от величины заглубления выхлопных труб  $a$  и скорости потока  $w_{cp}$ . В общем случае зависимости давления от скорости оказались неквадратичными. Характер сепарации частиц сильно зависит от фракционного состава материала.

Имеется возможность значительно понизить сопротивление уловителя путем установки в выхлопные трубы раскручивающих устройств. Однако это приводит к снижению эффективности улавливания.

По результатам испытаний одинаково эффективны как тангенциальный, так и осевой вход. Среди осевых направляющих аппаратов предпочтение следует отдать карманному закручителю потока, так как он имеет наименьшее сопротивление при той же эффективности. Кроме того, он более простой в изготовлении, и характеристики уловителя практически не изменяются при модификации входных карманов закручителя.

Взаимодействие закрученных потоков приводит не только к перераспределению частиц, но и выравниванию скорости потоков. Экспериментально проверена возможность вывода материала из одного улавливающего кармана. Это позволяет значительно сократить число выводящих устройств.

Разработанный уловитель имеет эффективность, достаточную для улавливания частиц, образующихся при сжигании ВУТ, и может устанавливаться до низкотемпературных поверхностей нагрева в силу своей компактности и небольшого аэродинамического сопротивления (таблица 3).

Таблица 3 – Геометрические и аэродинамические характеристики циклонов

Марка циклона	Отношение высоты к поперечному размеру $H/D$	Коэффициент сопротивления при скорости 3 м/с
Циклоны ВЦНИИОТ	5	-
Циклон ОЭКДМ	2,95	-
Циклон СНОТ	2,85	-
Циклон ЦКТИ	2,8	-
Циклон ЦН11-ЦН24	3,31-4,56	-
ЦН-11	-	250
ЦН-15	-	163
ЦН-15У	-	170
СДК-ЦН-33	-	600
СК-ЦН-34	-	1150
СК-ЦН-34М	-	2800
Прямоточный циклон ЦКТИ	1,67	-
Циклон Меркушева	4,62	-
<b>Разработанный уловитель центробежного типа</b>	<b>1,5-2,0</b>	<b>180-220</b>

### 3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

Приблизительно половина всей тепловой и электрической энергии, расходуемой в промышленности, выбрасывается в виде отходящего тепла в воздушный и водный бассейны. По ценности отходящая энергия может классифицироваться применительно к трем диапазонам: высокотемпературный - выше 650°C; среднетемпературный – 230-650°C; низкотемпературный - менее 230°C. Высокотемпературное и среднетемпературное отходящее тепло используется для производства технологического пара, выработки электроэнергии, сушки, подогрева воздуха, подаваемого в горелки или для ответственных технологических нужд. Низкотемпературное тепло может быть использовано для отопления зданий, подогрева воды и воздуха.

*Экономико-математическая модель и алгоритм расчета* эффективности рекуперативного утилизатора сбросной теплоты в многоступенчатых схемах утилизации. Основные положения модели состоят в следующем.

1. Вводятся исходные данные для года начала проекта: инфляция, процент кредита, налоговая ставка, заемные инвестиции, срок службы объекта.

2. Вводятся исходные данные для первого года начала эксплуатации объекта: инфляция, процент кредита, налоговая ставка, тариф на тепловую энергию, норматив амортизационных отчислений, численность дополнительного штата, средняя зарплата одного работника, цена топлива, удельный расход топлива, мощность оборудования и число часов его использования.

3. Рассчитывается количество и стоимость произведенной за год тепловой энергии.

4. Рассчитывается эксплуатационные затраты на топливо и дополнительные штаты.

5. Рассчитывается налогооблагаемая прибыль.

6. Рассчитывается балансовая прибыль.

7. Рассчитывается чистая бухгалтерская прибыль при условии максимально короткого срока выплаты кредита (вся прибыль после трех лет с начала проекта направляется на выплату кредита для скорейшего его погашения).

8. Вводятся исходные данные для каждого последующего года эксплуатации объекта вплоть до окончания срока службы: тариф на тепловую и электрическую энергию; средняя зарплата работника штатного персонала; цена топлива (с учетом инфляции); удельный расход топлива; индекс инфляции; процентная кредитная ставка; процентная налоговая ставка; норматив амортизационных отчислений; численность штатов дополнительного персонала.

9. Рассчитывается коэффициент дисконтирования, выплата кредита с нарастающим итогом, чистая бухгалтерская прибыль с нарастающим итогом для каждого года эксплуатации объекта.

10. Рассчитывается срок окупаемости проекта, внутренняя норма прибыли и рентабельность.

Рассмотрим последовательную многоступенчатую (двухступенчатую) схему рекуператора сбросной теплоты (рисунок 9).

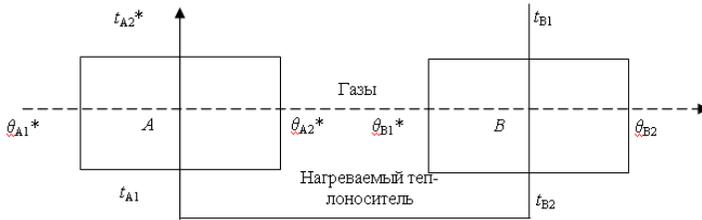


Рисунок 9 – Расчетная схема двухступенчатого рекуператора: А– высокотемпературная ступень; В– низкотемпературная ступень

Для оптимального разбиения утилизатора по ступеням рекуперации используется следующее условие минимизации функционала

$$\Phi = \sum_k C_k F_k = C_A F_A + C_B F_B = \min, \quad (5)$$

где  $C_k$  – удельные стоимости поверхностей нагрева первой ( $C_A$ , площадью  $F_A$ ) и второй ( $C_B$ , площадью  $F_B$ ) ступеней утилизатора.

**Экономико-математическая модель**, кроме (5), включает:

- уравнения теплового баланса, теплопередачи (в виде формул для площади поверхностей) и температурных напоров для каждой ступени утилизатора

$$Q_A = (J_{A1}^* - J_{A2}^*) \eta_A = cG(t_{A2}^* - t_{A1}), \quad (6)$$

$$Q_B = (J_{B1}^* - J_{B2}^*) \eta_B = cG(t_{B2} - t_{B1}), \quad (7)$$

$$F_A = Q_A B_p / (C_A \Delta t_A^{cp}), \quad (8)$$

$$F_B = Q_B B_p / (C_B \Delta t_B^{cp}), \quad (9)$$

$$\Delta t_A^{cp} = \Psi_A \left[ (\theta_{A1}^* - t_{A2}^*) - (\theta_{A2}^* - t_{A1}) \right] \ln \left( \frac{\theta_{A1}^* - t_{A2}^*}{\theta_{A2}^* - t_{A1}} \right), \quad (10)$$

$$\Delta t_B^{cp} = \Psi_B \left[ (\theta_{B1}^* - t_{B2}) - (\theta_{B2} - t_{B1}) \right] \ln \left( \frac{\theta_{B1}^* - t_{B2}}{\theta_{B2} - t_{B1}} \right). \quad (11)$$

Здесь  $Q$ – тепловосприятие рекуператора, кДж/кг (топлива);  $\theta$ – температура греющих газов, °С;  $t$ – температура нагреваемого теплоносителя, °С;  $\eta$ – коэффициент сохранения теплоты рекуператора;  $J$ – энтальпия греющих газов, кДж/кг (топлива);  $c$ – удельная теплоемкость нагреваемого теплоносителя, кДж/(кг·К);  $G$ – массовый расход нагреваемого теплоносителя, кг/с (звездочкой отмечены величины, имеющие технологические ограничения).

Дополнительно в модель входят экономико-математические условия (неравенства и равенства)

$$ЧДС = \Pi - K \geq 0, \quad (12)$$

$$\Pi = \sum_{j=1}^T \Pi_j \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^j, \quad (13)$$

$$K = \sum_{j=1}^T \Pi_j v_j. \quad (14)$$

Здесь  $\Pi_j$ – номинальная (в ценах базового периода) прибыль от инвестиций, получаемая в  $j$ -м году;  $r$ – номинальная годовая процентная ставка;  $i$ – годовая степень инфляции;  $K$ – размер инвестиций в ценах базового периода;  $ЧДС$ – чистая дисконтированная стоимость проекта утилизации.

В модели используются, полученные в работе, эмпирические зависимости (точность аппроксимации  $R^2 = 0,93-0,99$ )

$$C_A^{стал} = 23670 F_A^{-0,3464}, \quad (15)$$

$$C_A^{угл} = 15420 F_A^{-0,2934}, \quad (16)$$

$$C_B^{кал} = 682,7 F_B^{-0,2178} \quad (17)$$

и интерполяционная формула для скорости серноокислой коррозии поверхностей нагрева стальных утилизаторов (18)

$$\delta_{кор} = -3,73 \cdot 10^{-10} t^6 + 2,45 \cdot 10^{-7} t^5 - 6,52 \cdot 10^{-5} t^4 + 0,00898 t^3 - 0,672 t^2 + 25,8 t - 396$$

Для расчета срока окупаемости  $\tau$  проекта используется уравнение

$$\sum_{j=1}^{\tau} \Pi_j \left( \frac{1+i}{1+r} \right)^j = K. \quad (19)$$

На основе модели (5)-(18) **разработана программа** (численное Excel-приложение) «Инвестиции в утилизацию ВЭР».

Из приведенных в работе расчетных данных следует, что по удельной стоимости преимущество имеют калориферы, кроме того, они наиболее ком-

пактны. Единственной проблемой этих утилизаторов является ограничение по максимальной температуре (180-190°C) и недолговечность из-за возможной сернистой коррозии. С технической точки зрения наиболее важно выполнить анализ второй низкотемпературной ступени утилизатора, так как данная ступень работает в наиболее тяжелых условиях, связанных, прежде всего, с низким температурным напором.

Далее в работе обобщен опыт соискателя по внедрения технологий утилизации ВЭР (сбросной теплоты и АБгазов) на различных промышленных предприятиях.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

### **Основные результаты работы состоят в следующем.**

1. Анализ существующих технологий получения водоугольного топлива показал, что, несмотря на ряд имеющихся эффективных технологий, в настоящее время отсутствуют простые комбинированные схемы и устройства производства и сжигания ВУТ. Получены новые данные о методах производства и свойствах ВУТ с высокой стабильностью водоугольной суспензии.

2 Разработана конструкция и технология изготовления форкамерной горелки-диспергатора для получения и распыливания ВУТ и проведены исследования по его опытному сжиганию, показавшие эффективность устройства.

3. Проведены исследования аэродинамики потока и эффективности улавливания золоуловителей центробежного типа (с тангенциальным входом и с осевыми закручивателями потока). Для прямоточного уловителя с вертикальным входом фракционная эффективность улавливания составила: для мелких частиц ( $d_{50} = 30$  мкм) были получены следующие значения эффективности: 52,0 % - уловитель с тангенциальным входом; 45,5 % - уловитель с упрощенным карманым закручивателем; 42,1 % - уловитель с лопаточным безударным закручивателем).

4. Определены основные параметры наиболее эффективной и компактной конструкции центробежного золоуловителя:

- *отношение ширины ячейки к ее высоте  $c/b=0,5$ ;*

- *отношение диаметра выхлопных труб к ширине ячейки  $d/c=0,6$ ;*

- *отношение заглубления выхлопных труб к их диаметру  $a/d=1,1$ ;*

- *отношение входного сечения к сечению уловителя при тангенциальном входе  $S_{вх}/S_{ул}=0,2$ ;*

- *отношение выходного сечения карманов закручивателя к сечению уловителя  $S_{вых}/S_{ул}=0,27$ ;*

- *отношение выходного сечения карманов к их входному сечению  $S_{вых}/S_{вх}=0,77-0,80$ .*

5. Разработаны методика технико-экономического анализа, экономико-математическая модель и программное приложение для расчета эффективности многоступенчатых рекуперативных утилизаторов теплоты.

6. Обобщен опыт соискателя по внедрению технологий утилизации ВЭР на ряде промышленных предприятий России.

### **Результаты исследования были использованы:**

- при разработке проекта утилизации уходящих газов кузнечной печи Барнаульского завода механических прессов;

- при разработке проекта утилизации тепловых выбросов сушильной печи предприятия ООО «СибТрансСтрой» (г. Новоалтайск, Алтайского края);
- при проектировании и проведении пуско-наладочных работ по сжиганию АБгазов на котельной Сафоновского битумного завода (г. Сафонов, Смоленской обл.).

### **Основные результаты опубликованы в работах:**

#### ***статьи в изданиях, рекомендованных ВАК -***

**1. Беляев, Е.Н.** Исследование модели прямоточного батарейного цикла со взаимодействующими потоками / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк // *Ползуновский вестник*. - 2009. - № 1-2. - С. 293-297.

#### ***публикации в других изданиях -***

**2. Беляев, Е.Н.** Возможности и перспективы применения водоугольного топлива / Е.Н. Беляев, Г.М. Фокин, М.А. Шараров, П.К. Сеначин // III Семинар вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике: Тезисы докладов / Ин-т теплофизики им. С.С.Кутателадзе СО РАН, АлтГТУ им. И.И.Ползунова, г. Барнаул, 18-20 сентября 2003 г. - Новосибирск: ИТ СО РАН, 2003. С. 54.

**3. Беляев, В.Н.** Управление отклонением формы поверхности деталей накатыванием / В.Н. Беляев, **Е.Н. Беляев**, А.М.Фирсов, А.Ф. Шатохин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе / Материалы 5-ой Всерос. научно-техн. конф. - Новосибирск, 28 марта 2007 г. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. - С. 17-20.

**4. Беккер, Д.В.** Разработка комбинированного инструмента для обеспечения качества обрабатываемых отверстий / Д.В. Беккер, В.Н. Беляев, **Е.Н. Беляев**, А.М. Фирсов // Управление качеством образования, продукции и окружающей среды / Материалы 2-ой Всерос. научно-техн. конф. - Бийск, 5-6 июля 2007 г. - Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2007. - С. 171-172.

**5. Фирсов, А.М.** Обработка отверстий раскатыванием / А.М. Фирсов, В.Н. Беляев, **Е.Н. Беляев** // *Обработка металлов*. - 2007. - № 1 (34). - С. 16-17.

**6. Беккер, А.В.** Инструмент для совмещенного резания и поверхностного пластического деформирования / А.В. Беккер, В.Н. Беляев, **Е.Н. Беляев**, А.М. Фирсов // Патент на полезную модель РФ № 66264, 10.09.2007, МПК В24В39/02.

**7. Беляев, Е.Н.** Способ комбинированной обработки деталей / Е.Н. Беляев, В.Н. Беляев // Патент на изобретение РФ № 2355826, 20.05.2009, МПК С25D5/22.

**8. Беляев, Е.Н.** Технологии производства и сжигания водоугольного топлива / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, П.К. Сеначин // Проблемы совершенствования энергетических установок: Сб. статей / Под ред. А.А. Мельберг / Российский союз научных и инженерных организаций, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. - С. 95-99.

**9. Беляев, Е.Н.** К оценке эффективности утилизации теплоты сушильной камеры ООО «СибТрансСтрой» / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, П.К. Сеначин, М.Ю. Хлутчин. // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008): Матер. II Всерос. научно-практ. конф. с междунар.

участием / 1-4 октября 2008, АлтГТУ им. И.И.Ползунова, г. Барнаул. – Барнаул: ОАО «Алтайский Дом печати», 2008.- С. 183-185.

**10. Беляев, Е.Н.** Утилизация тепла уходящих АБ-газов с выработкой насыщенного пара / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, П.К. Сеначин // Энергетические, экологические и технологические проблемы экономики (ЭЭТПЭ-2008): Матер. II Всерос. научно-практ. конф. с междунар. участием / 1-4 октября 2008, АлтГТУ им. И.И.Ползунова, г. Барнаул. – Барнаул: ОАО «Алтайский Дом печати», 2008.- С. 304-307.

**11. Беляев, Е.Н.** Мельница-горелка для сжигания дисперсного топлива в котлах малой мощности / Е.Н. Беляев, Е.Н. Жирнов, С.М. Кисляк // Всероссийский семинар кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике: Тезисы докладов / Ин-т теплофизики СО РАН, Сибирский Федеральный ун-т, 13-15 мая 2009, г. Красноярск.- Новосибирск: Ин-т теплофизики СО РАН, 2009.- С. 12.

**12. Беляев, Е.Н.** Технология сжигания водоугольного топлива и ее современное использование / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, П.К. Сеначин // Научное творчество студентов и сотрудников Автотранспортного факультета: Сборник тезисов и докл. 67-й научно-техн. конф. студентов, аспирантов и проф.-преп. состава АлтГТУ. Ч. 2.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2009.- С. 37-41.

**13. Беляев, Е.Н.** Особенности сжигания водоугольного топлива в котлах небольшой мощности / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, А.П. Наумов // VI-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь», 23-24 апреля 2009. Сборник тезисов докладов. Изд-во АлтГТУ, г. Барнаул (электронное издание).

**14. Беляев, Е.Н.** Основные технические решения по утилизации теплоты отходящих газов нагревательной печи кузнечного цеха / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, А.П. Наумов // VI-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь», 23-24 апреля 2009. Сборник тезисов докладов. Изд-во АлтГТУ, г. Барнаул (электронное издание).

**15. Беляев, Е.Н.** Выбор условий и масштабов физического моделирования аэродинамики прямооточного батарейного циклона / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, Е.М. Пузырев, П.К. Сеначин // Проблемы совершенствования энергетических установок: Сб. статей / Под ред. А.Л. Новоселова / Российский союз научных и инженерных организаций, АлтГТУ им. И.И. Ползунова.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010.- С. 4-8.

**16. Беляев, Е.Н.** Эффективность утилизации вторичных энергетических ресурсов: Учебное пособие / Е.Н. Беляев, С.М. Кисляк, П.К. Сеначин; под ред. П.К. Сеначина / Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова.- Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010.- 80 с.

---

Подписано в печать 29.03.2010. Формат 60×84 1/16. Печать – цифровая.

Усл.п.л. 1,39. Тираж 100 экз. Заказ 271 / 2010.

Отпечатано в типографии АлтГТУ, 656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46.

Лицензия на полиграфическую деятельность № 28-35 от 15.07.97.