

ОБЗОР РАБОТ ПО ПРИГОТОВЛЕНИЮ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И ЕГО СЖИГАНИЮ В КОТЛАХ

С.В. Алексеенко¹, Л.И. Мальцев^{1*}, И.В. Кравченко², А.А. Дектерев^{1,3}, В.А. Кузнецов^{1,3}

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, пр. Лаврентьева, 1, Новосибирск, Россия

²ООО «ПРОТЭН-К», ул. Твардовского, 3, Новосибирск, Россия

³Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, Красноярск, Россия

АННОТАЦИЯ

В процессе обогащения углей образуются огромные объемы отходов, которые, как правило, выбрасываются в окружающее пространство, загрязняя его. При этом отходы могут содержать до 50% углерода. Малая промышленная энергетика, муниципальные котельные используют преимущественно слоевое сжигание углей. При этом коэффициент выгорания углерода составляет 50–60%, и коэффициент полезного действия котлов нередко не превышает 60%, а их экологические показатели не удовлетворяют современным требованиям. Эффективным способом решения проблемы утилизации углеотходов может оказаться перевод котлов на сжигание углей в виде водоугольной суспензии (ВУС). В статье представлены результаты авторов по технологии приготовления водоугольного топлива (ВУТ) и его сжиганию в вихревых топках котлов. Представлены данные по новому оборудованию, необходимому для реализации технологии. Показано, что и рядовые угли, и антрацит, и угольные шламы, а также отходы углеобогащения могут служить основой для производства ВУТ. Приведены примеры опытно-промышленного применения водоугольной технологии. При этом коэффициент выгорания топлива достигает значений порядка 95%, а коэффициент полезного действия котлов превышает 85%.

Ключевые слова: водоугольное топливо (ВУТ), приготовление ВУТ, сжигание ВУТ, кавитационная обработка, углеотходы.

1. Введение

В системе мирового энергопотребления основным энергоносителем является нефть, однако в последние десятилетия темпы роста ее потребления уменьшились, а доля угля даже увеличилась [1,2].

Запасы угля в мире многократно превышают запасы других углеводородных топлив. В то же время уголь остается самым «грязным» видом топлива на всех этапах его жизни от добычи до сжигания. После добычи угля земная поверхность подвергается большой эрозии и требуются значительные усилия для ее рекультивации. К настоящему времени практически весь добытый уголь при первичной переработке подвергается сортировке и обогащению, в результате чего образуются большие объемы мелких угольных фракций

(отсевов, угольных шламов), имеющих повышенную влажность и зольность. Для энергетического использования таких угольных отходов по традиционным технологиям необходимо осуществить их обезвоживание. Однако термическая сушка обводненных угольных шламов экономически не оправдана. Обогащение углей на обогатительных фабриках производится преимущественно с использованием «мокрых» технологий и после обогащения остаются огромные объемы сильно обводненных мелкодисперсных отходов (кеков), которые содержат порой до 50% углерода и для которых традиционные технологии сжигания угля не применимы. В результате отходы выбрасываются в природу. При сжигании в котлах уголь не всегда используется на 100%, а процесс сжигания сопровождается вредными выбросами в окружающее пространство.

*Ответственный автор
E-mail: maltzev@itp.nsc.ru (Л.И. Мальцев)

Таким образом, необходимы технологии сжигания углей с максимально возможной полнотой сгорания топлива и минимальным воздействием на природу, позволяющие замещать другие, более дорогие виды топлива, использовать низкокачественные угли и отходы.

Одним из перспективных способов использования углеотходов и низкосортных углей может служить применение технологии сжигания углей в виде водоугольной суспензии (ВУС).

Исследования свойств ВУТ из различных углей, способов их приготовления, хранения, транспортировки и сжигания ведутся с 50-х годов прошлого столетия. Показано, что ВУТ-технология обладает рядом преимуществ по сравнению с другими способами сжигания твердого топлива: взрыво-пожаробезопасность; возможность транспорта по трубопроводу; возможность сжигания широкой гаммы топлив (низкосортных углей, сланцев, угольных шламов и отходов углеобогащения); высокая степень выгорания горючей массы (95–97%); высокий КПД котла (82–85%); зола после сжигания ВУТ – готовый продукт для стройматериалов; высокие экологические характеристики (по содержанию угольной пыли, золы, NO_x , CO ...).

В последние годы в мире снова пробудился интерес к водоугольному топливу, обусловленный, прежде всего, ростом цен на мазут и другие энергоносители и возрастанием требований по экологии окружающего пространства [3,4,5,6,7,8,9,10].

Наиболее заметные успехи в технологии ВУТ в настоящее время имеются в Китае [9,10,11,12,13,14,15,16,17,18]. Технология приготовления ВУТ в Китае – традиционная и состоит в комбинации мокрого помола угля

в шаровых и вибрационных мельницах в присутствии пластификаторов. Наряду с использованием ВУТ в собственной теплоэнергетике, Китай танкерами вывозит его в Японию.

Тем не менее, не смотря на определенные успехи, технологию ВУТ на данный момент нельзя назвать завершенной. Остается нерешенным целый ряд вопросов как по методам приготовления и сжигания ВУТ, так и по их практической реализации.

Ниже приводятся новые результаты по технологии приготовления и сжигания ВУТ, по моделированию горения ВУТ в вихревых топочных камерах, по разработке нового оборудования. Приводятся примеры внедрения технологии в практику.

2. Концепция применения ВУТ в малой теплоэнергетике

Наиболее востребованной на применение ВУТ – технологий является распределенная система производства тепловой энергии: малая промэнергетика, коммунальные системы и т.д., мощностью до 20–25 МВт. В этих условиях перспективной представляется кластерная структура применения водоугольных технологий, включающая приготовление ВУТ на отдельных специализированных предприятиях и распределение топлива автотранспортом по котельным, расположенным в окрестности предприятия.

На рис. 1 представлена технологическая линия приготовления и сжигания ВУТ. Из бункера угля с помощью ленточного транспортера твердое топливо подается в шаровую мельницу, туда же с использованием дозирующего оборудования подаются вода и реагенты-пластификаторы. Затем обработанное водоуголь-

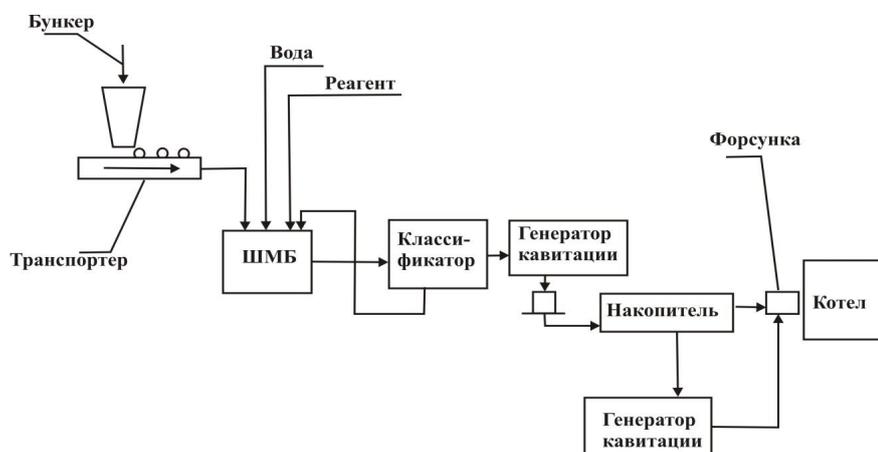


Рис. 1. Технологическая линия для производства водоугольного топлива и его сжигания.

ное топливо направляют в гидроклассификатор, где происходит разделение ВУС на два потока, отличающихся размером частиц. Поток частиц размером больше 500 мкм подают в ре цикл обратно в шаровую мельницу вместе с исходным углем. Поток частиц меньших размеров подают на дальнейшее измельчение и химическую активацию в генератор кавитации.

Прошедшее кавитационную обработку ВУТ подается в аккумулирующую емкость с последующей подачей через пневматические форсунки в котлоагрегат. В том случае, если котлоагрегаты находятся на значительном расстоянии от места приготовления ВУТ, топливо до потребителя доставляется автотранспортом. При длительном хранении ВУТ на линии подачи ВУТ из аккумулирующей (или накопительной) емкости в топку котла может быть дополнительно установлен генератор кавитации.

3. Приготовление ВУТ

Одним из основных элементов в технологии приготовления ВУТ является помол угля. В ряде работ рассмотрены вопросы мокрого измельчения углей и угольно-жидкостных шламов, а также оборудование для этих целей. Показано, что при мокром измельчении углей образуются устойчивые суспензии, имеющие удовлетворительные реологические характеристики, повышенное содержание тонких фракций угля, улучшенные показатели при транспортировании и хранении ВУС. При сжигании такой ВУС, повышается интенсивность горения и снижается износ оборудования по сравнению с ВУС, полученной при сухом размолу угля и последующем его смешении с жидкостью.

Нами применяется двух-этапная технология приготовления ВУТ, включающая мокрый помол угля на шаровых барабанных мельницах на первом этапе и доизмельчение полученной суспензии на роторных гидродинамических генераторах кавитации на втором этапе.

Кавитация – это образование в жидкости полостей (пузырьков), занятых газом или паром. Паровые пузырьки образуются в том случае, если местное давление в жидкости опустится до давления парообразования. При этом если давление носит переменный характер, то пузырьки пульсируют. Переменное давление может быть создано путем наложения ультразвукового поля (в этом случае кавитацию называют ультразвуковой) или ги-

дродинамическим путем (гидродинамическая кавитация). Известно, что в случае кавитации в жидкостях при схлопывании парового пузырька, за счет воздействия звукового поля и сил поверхностного натяжения, локально возникают высокие давления и температуры, интенсивное перемешивание жидкости и т.д.

На первой стадии исследований акустической кавитации механизмы воздействия кавитации на вещество связывались с особенностями динамики схлопывания одиночных полостей и сопровождающими их рядом явлений, таких как ударные волны, кумулятивные микроструи, акустические течения. Однако более поздние исследования показали, что совместное схлопывание многих пузырьков (кластерная кавитация) приводит к повышению давления в два-три раза по сравнению со схлопыванием одиночной кавитации. В течение многих лет авторами проводились экспериментальные исследования по ультразвуковой и гидродинамической кавитации. На основе результатов этих исследований разработан роторный гидродинамический генератор кавитации [19] (см. рис. 2).

При работе данного генератора на твердые частицы суспензии воздействуют сразу три механизма их измельчения: ударный (при ударе частиц о стенки камеры и подвижные и неподвижные цилиндры); истирание (в силу больших градиентов скорости, особенно в моменты проскакивания подвижных цилиндров относительно неподвижных); кавитационный (в областях генерации и схлопывания паровых пузырьков в зонах отрыва потоков за подвижными и неподвижными цилиндрами).

На рис. 3 представлены гранулометрические составы угольной массы до и после кавитационной обработки суспензии. Здесь Q показывает содержание твердой массы с размером частиц менее данного значения. Как видно, наиболее заметное изменение размеров частиц произошло в верхней части спектра. Содержание частиц размером до 10 мкм увеличилось с 10% до 25%.

На рис. 4 проведено сравнение гранулометрических составов суспензии, приготовленной из антрацита путем помола на ШБМ, а также путем помола на ШБМ и дополнительной обработки суспензии (1) на дезинтеграторе или на кавитаторе. Как видно, дезинтегратор эффективнее действует в области средних и крупных частиц, а кавитационная обработка – в области частиц мелкой фракции.

На электронном лабораторном анализаторе

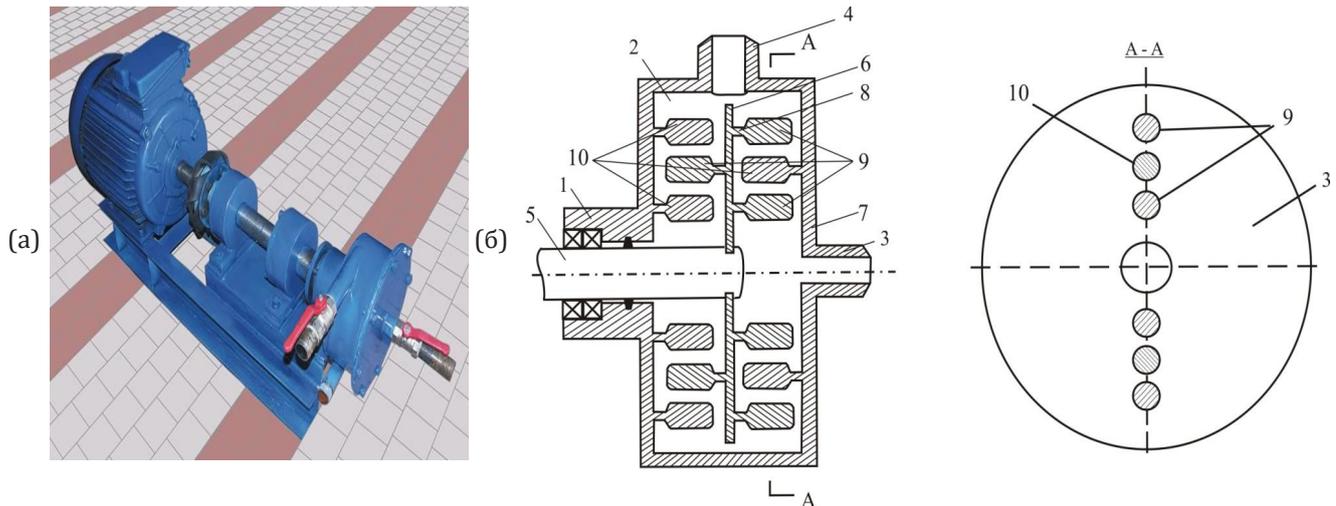


Рис. 2. Роторный гидродинамический генератор кавитации: (а) – общий вид, (б) – принципиальная схема: 1 – корпус; 2 – рабочая камера; 3 – входной патрубок; 4 – выходной патрубок; 5 – вал двигателя; 6 – диск; 7 – торцевая стенка рабочей камеры; 8 – обтекаемая стойка цилиндра; 9 – подвижные цилиндры; 10 – неподвижные цилиндры.

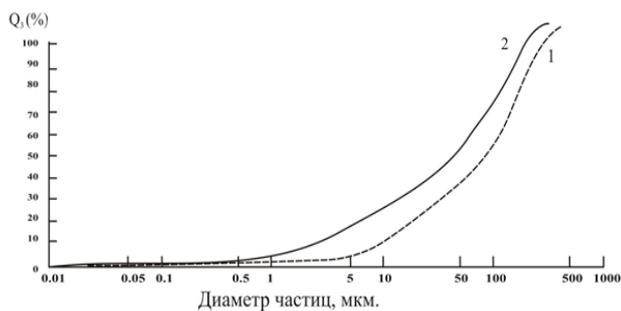


Рис. 3. Гранулометрический состав ВУТ, приготовленного из угля антрацит шлам до (1) и после (2) кавитационной обработки.

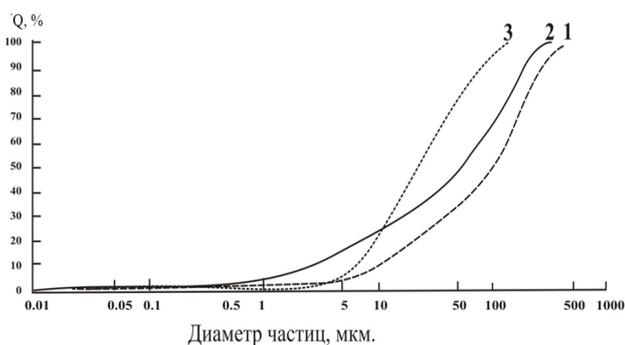


Рис. 4. Гранулометрический состав суспензии: 1 – приготовленной из антрацита на ШБМ; 2 – ШБМ + кавитационная обработка; 3 – ШБМ + дезинтегратор.

удельной поверхности марки *Flowsorb II 2300* американской фирмы *MICROMERITICS* были определены удельные поверхности углей: антрацит (Сибирский антрацит) и уголь (Беловский разрез) при различных способах их измельчения [20]. Обобщенные результаты этих измерений приведены в таблице 1.

Результаты показывают, что удельная поверхность антрацита после помола существенно выше, чем у угля из Беловского разреза. При доизмельчении углей, как на дезинтеграторе, так и путем кавитационной обработки, удельная поверхность обоих углей повышается, причем во 2-ом случае существенно больше.

4. Проблемы сжигания ВУТ в топочных камерах

4.1 Выбор камеры

Водоугольное топливо содержит более 30% воды и вопрос выбора топочного устройства для сжигания такого топлива исключительно важен. Топливо, в виде капель попавшее в топку, должно пройти несколько стадий: испарение воды, сушка частиц угля, их прогрев и воспламенение и, наконец, горение. Реактор, предназначенный для сжигания ВУТ, должен обеспечивать: достаточное время пребывания частиц топлива в камере горения; интенсивное перемешивание топлива и окислителя в объеме камеры и, наконец, поддерживать необходимо высокую температуру во всем объеме камеры горения.

Таблица 1. Удельная поверхность углей разных проб

Уголь (обработка)	Удельная поверхность, м ² /г	Уголь(обработка)	Удельная поверхность, м ² /г
А (ШБМ)	39.5	У (ШБМ)	4.8
А (ШБМ+Д)	65.9	У (ШБМ+Д)	5.2
А (ШБМ+К)	89.2	У (ШБМ+К)	7.8

Авторами предложено и опробовано вихревое топочное устройство, ориентированное на сжигание ВУТ в котлах малой и средней мощности [21,22] с кольцевой камерой горения. На рис. 5а и 5б показаны продольное и поперечное сечения предлагаемого топочного устройства. На фронтальной стенке 8, смонтированы форсунки 9, осуществляющие как раздельную, так и совместную подачу ВУТ и других видов топлива и первичного окислителя. На нижней стенке топки установлен золоуловитель 7. Внутри камеры сгорания установлены дутье-

вые сопла 6, с касательной подачей воздуха, и центральная огнеупорная вставка 4. Главное назначение вставки – поддержание однородного температурного поля в камере горения и, тем самым, обеспечение надежной работы котла, например, при падении качества топлива, вполне допустимого при использовании такого топлива, как ВУТ.

Запуск топочного устройства производится путем сжигания высокорекреакционного жидкого топлива, например, дизельного или печного, подаваемого в топку через те же форсунки 9. После разогрева стенок камеры до температуры 500–600 °С к дизельному топливу добавляются в малой пропорции водоугольное топливо. По мере дальнейшего повышения температуры внутри камеры сгорания, доля дизельного топлива в подаваемой смеси уменьшается, а доля ВУТ увеличивается вплоть до выхода котла на расчетный режим работы. Дутьевой газ попадает в камеру сгорания по касательной к ее стенкам и поддерживает закрутку потока внутри камеры. Таким образом, газ поступает в камеру сгорания тангенциально к ее стенкам и уходит из камеры через газоперепускные окна, расположенные на торцевых стенках камеры сгорания вблизи их осей симметрии. Поэтому скорости потока газа практически во всем объеме камеры имеют тангенциальную и радиальную составляющие. Капля ВУТ (или частица угля), попавшая в такой поток, под действием центробежных сил, стремится выбраться на стенку камеры сгорания, но радиальные потоки газа препятствуют такому движению. В результате происходит перераспределение потока капель (и частиц угля): наиболее крупные капли выносятся на внешние орбиты, мелкие располагаются ближе к оси камеры.

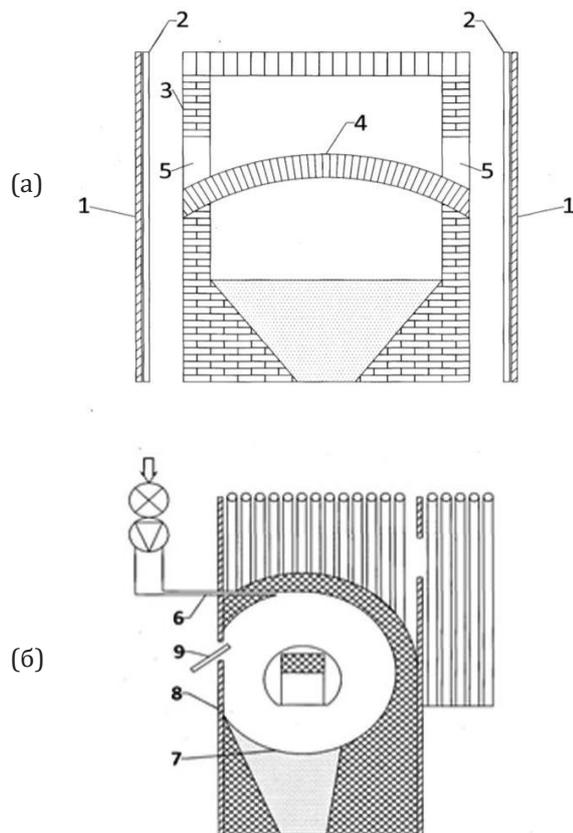


Рис. 5. Разрез топки: (а) – продольный; (б) – поперечный разрез топки: 1 – камера охлаждения; 2 – кипяточные трубы; 3 – торцевые стенки камеры сжигания; 4 – центральная вставка; 5 – газоперепускные окна; 6 – дутьевые сопла; 7 – канал шлакоудаления; 8 – фронтальная стенка камеры сгорания; 9 – топливные форсунки.

По мере выгорания угля, масса частиц уменьшается, уменьшаются центробежные силы, действующие на эти частицы, и частицы перемещаются на круговые орбиты с меньшим радиусом. При этом частицы с большей массой находятся в зоне горения больший интервал времени и, как результат, большинство

из них успевают сгореть в пределах топочного пространства.

4.2. Форсунка

В мире разработано большое число форсунок, использующих разные принципы распыливания жидкостей.

К форсункам, используемым для распыливания ВУТ, предъявляются особые требования. ВУТ представляет собой суспензию с содержанием мелкодисперсной твердой массы (угля) до 70%. При движении такой суспензии по узким каналам нередко происходит запыление каналов. Кроме того, ВУТ является высокоэрозийным продуктом. Отсюда следует, что конструкции форсунок для ВУТ не должны иметь узких каналов и больших скоростей движения топлива вблизи их стенок. В результате многовариантных исследований авторами разработан принципиально новый тип пневматической форсунки для распыливания жидких (в том числе, суспензионных) топлив, защищенный патентом [23], и описанный в работе [24]. На рис. 6 представлено схематическое изображение форсунки. Она содержит корпус 1 с патрубком 2 для вдува газа, трубку 3 для подачи топлива, переходящую в диффузорное сопло 4, и кольцевую насадку 5, формирующую совместно с корпусом кольцевое газовое сопло 6.

Предложенная форсунка работает следующим образом. Коническая струя газа, вытекающая из сопла 6, образует за пределами форсунки сходящийся струйный поток с точкой остановки на оси симметрии и формирования

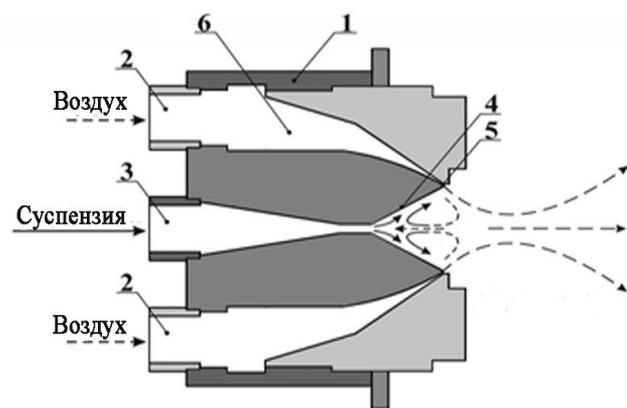


Рис. 6. Схема пневматической форсунки: 1 – корпус; 2 – патрубок для подачи газа; 3 – труба для подачи жидкости (водоугольной суспензии); 4 – диффузорное сопло; 5 – кольцевое газовое сопло; 6 – газовая камера.

ем прямого течения вдоль оси форсунки и возвратной кумулятивной струи. Подача по трубе 3 жидкого топлива под напором приводит к формированию струи, вытекающей из сопла 4. Благодаря эффекту Коанда, жидкость имеет тенденцию прилипать к стенкам диффузорного сопла и растекаться вдоль них тонкой пристенной струей. Однако процесс этот не является устойчивым. Высокоскоростная возвратная струя газа, внедряясь в топливную струю вдоль ее оси, нарушает целостность струи и заставляет жидкость равномерно распределяться тонкой струей по стенкам диффузора.

При этом возвратная газовая струя после соударения с топливной струей еще раз изменяет свое направление и смешивается с топливной струей. На выходе из диффузора трехкомпонентная струя (газ, жидкость, уголь) взаимодействует с газовым потоком, в результате чего внутри диффузора формируется торoidalный вихрь, а за пределами форсунки формируется газочапельный прямой поток.

При давлении в газовой камере 6, превышающем 2 атм., на выходе из сопла 5 образуется сверхзвуковой поток газа. Попадая в такой поток, капли топлива, вылетающие из диффузорного сопла 4, подвергаются дополнительному интенсивному разрушению.

5. Теоретические основы и моделирование процессов горения ВУТ

Использование математического моделирования при изучении горения ВУТ позволяет получать детальную информацию о процессах и быстро находить решения проблем.

В качестве математической модели для описания течения в камере сгорания выбрана модель многокомпонентного несжимаемого неизотермического газа, основанная на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье Стокса (*Reynolds-averaged Navier–Stokes*). Также решаются уравнения переноса энергии, лучистой энергии и компонент газа. При описании турбулентных характеристик течения используются *k-w SST* модель турбулентности с применением метода пристеночных функций. Вычисление коэффициентов поглощения газа основано на модели суммы серых газов. Для описания процесса горения летучих компонент топлива используется гибридная модель, состоящая из комбинации кинетической модели горения газовых компонент и модели «обрыва вихря» (*eddy break up model*).

ВУТ представляется дискретным набором

частиц, которые подаются через форсунки в топочную камеру. Частицы состоят из комплекса вода+уголь. В данном случае вода – это внешняя влага, которая была добавлена при изготовлении водоугольного топлива. Учитывается также внутренняя влага в составе топлива, которая определяется при техническом анализе. Движение частиц описывается уравнениями динамики материальной точки (метод Лагранжа) с учетом турбулентности потока, сил тяжести и сопротивления.

При описании горения отдельных капель учитываются стадии ее преобразования: нагрев капли, испарение внешней влаги (используется модель испарения капель), появление угольных частиц, испарение внутренней влаги, выход и воспламенение летучих компонент, горение коксового остатка. С использованием данной модели проведены расчеты горения ВУТ в топочной камере [25].

Ниже представлены результаты численного исследования процесса горения ВУТ в топочной камере, геометрия и размеры которой показаны на рис. 7. Топка футерована шамотным кирпичом толщиной 250 мм. Для расчета взят Кузнецкий (Д) уголь, технический состав данного угля представлен в таблице 2. Доля воды составляет 40% (масс.) от общей массы частицы. Теплотехнические параметры для расхода ВУТ 1500 кг/ч приведены в таблице 3.

Численные исследования были направлены на изучение стабильности горения в топочной камере в зависимости от расхода топлива, влияния геометрических факторов, теплотехнических параметров.

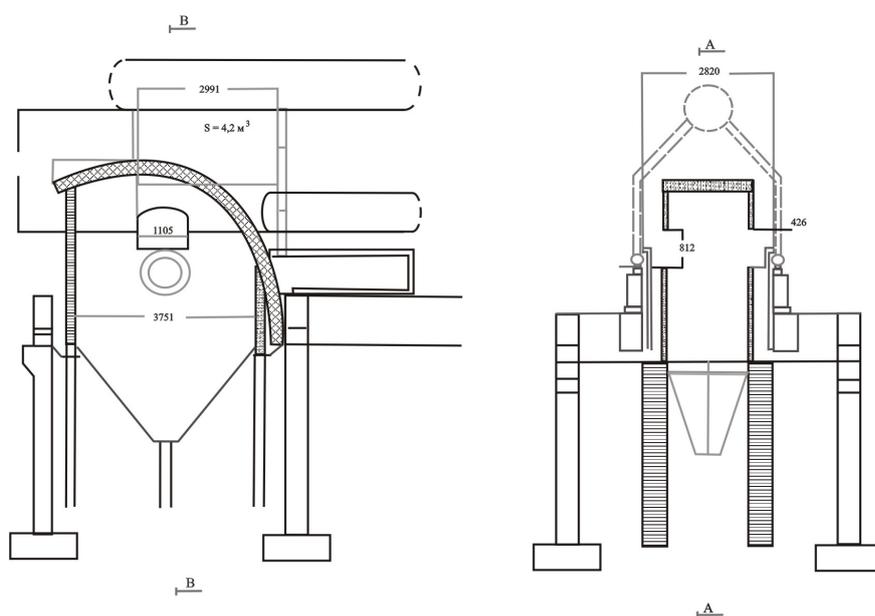


Рис. 7. Геометрия топочной камеры.

Таблица 2. Технический и элементный состав Кузнецкого (Д) угля

Технический и элементный состав, % МДж/кг							
W ^r	A ^r	V ^{daf}	C ^r	H ^r	S ^r	N ^r	Q ^r
12.0	3.2	0.2	8.7	4.2	0.3	1.9	22.835

Таблица 3. Теплотехнические параметры

Расход топлива	1500 кг/ч
Расход воздуха	6480 м ³ /ч
Температура вторичного воздуха	25 °С
Температура первичного воздуха	25 °С
Коэффициент избытка воздуха	1.2
Теоретическое количество воздуха на 1 кг угля (Кузнецкий)	6.0 м ³ /кг

На рис. 8 представлены результаты расчетов с расходом топлива $G = 1500$ кг/ч. При подаче воздуха через верхнее сопло наблюдается образование устойчивого закрученного течения вокруг центрального тела. Вследствие этого частицы топлива достаточно долго находятся в топочной камере, что позволяет достичь наиболее полного выгорания топлива. Тепло, выделяющееся при сгорании, равномерно распределяется по объему.

Анализ результатов расчетов на других режимах с вариацией расхода топлива и воздуха, площади выходных сечений сопел вторичного воздуха и их расположения и т.д. позволяет оптимизировать работу топочной камеры котла.

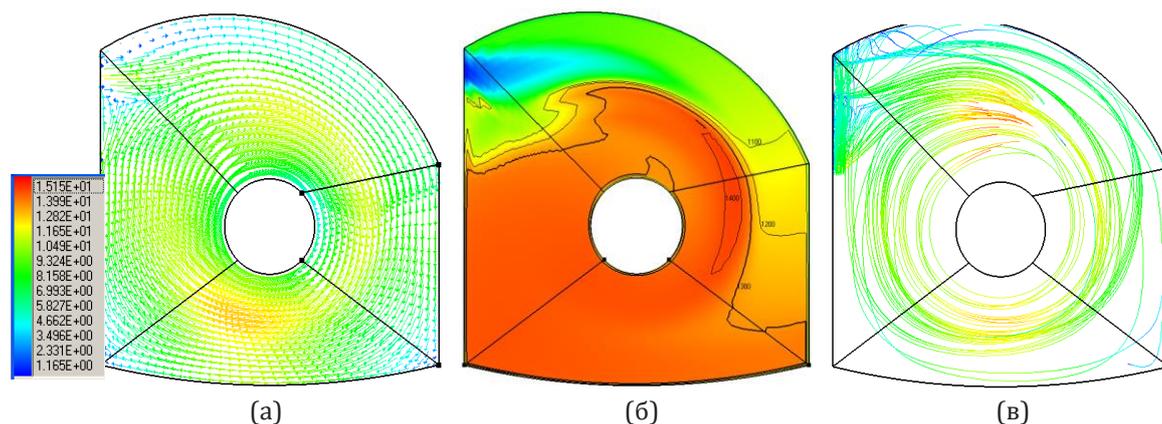


Рис. 8. Результаты расчета с расходом топлива $G=1500$ кг/час: (а) – температура; (б) – траектория движения водоугольных частиц; (в) – векторное поле скорости.

Исследование влияния количества воздуха, подаваемого из форсунок и площади воздушного сопла, на аэродинамику и процессы горения в модельной топочной камере показали, что улучшение выгорания топлива и стабилизации горения можно добиться при определенном соотношении между импульсом, вносимым воздухом через воздушное сопло, и воздухом подаваемого вместе с ВУТ через форсунки. При этом данное соотношение зависит от расхода ВУТ.

6. Двух-камерная топка котла на ВУТ

Как уже было отмечено выше, технология сжигания угля в виде ВУТ открывает возможность использования в теплоэнергетике низкосортных углей и угольных отходов. Однако калорийность таких суспензий невысока, устойчивость их горения снижается и, как показывает опыт, наиболее успешные результаты получаются лишь в тех случаях, когда сжигание ВУТ производят в муфельных топочных камерах при достаточно высоких температурах [26]. В связи с этим, были выполнены промышленные испытания (Пос. Сибирцево, Приморский край; пос. Барзас Кемеровской обл.)

котлов со сжиганием ВУТ при температуре в топке порядка 1500 °С и жидким золошлакоудалением. При этом горячие газы из камеры сгорания сразу уходят в камеру охлаждения с конвективным пучком труб. Испытания показали успешную работу таких котлов, однако расплавленные частицы золы уноса, попадая на трубки конвективного пучка, налипают на них и затвердевают. Со временем межтрубные пространства зарастают затвердевшим шлаком и камера с конвективным пучком труб выходит из строя. С целью решения возникающих проблем выполнены расчетные исследования работы котла, содержащего муфельную камеру сгорания ВУТ с системой жидкого шлакоудаления и дополнительную камеру, оснащенную экранными трубами, где одновременно происходит дожигание топлива и снижение температуры газов перед их поступлением в конвективный пучок. Ниже показаны результаты расчетов для условий, приведенных в таблицах 4, 5 и рис. 9-10.

Расчеты проводились с использованием программы *SigmaFlame* (данная программа протестирована ранее и продемонстрировала достоверность получаемых результатов).

Таблица 4. Результаты элементного и технического анализа кека

Технический состав					
Топливо	W_r , %	Ad , %	V^{daf} , %	$Q_{s,v}^a$, ккал/кг	Q_r , ккал/кг
Кек «К», состав №2	50,06	21,50	28,76	6570	2804
Элементный состав					
Топливо	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	
Кек «К», состав №2	82,80	4,289	0,01	0,493	

Таблица 5. Параметры подачи топлива и окислителя

Варианты	1	2	3
Расход ВУТ, кг/ч	500	500	500
Расход воздуха через форсунку, м ³ /ч	160	160	160
Общий расход воздуха, м ³ /ч	1852	1852	1852
Температура вторичного дутья, °С	280	280	280
Коэф. избытка воздуха (α)	1,2	1,2	1,2
Температура внешней среды, °С	-	300	300
Коэффициента теплоотдачи, Вт/м ² К	0	30	50

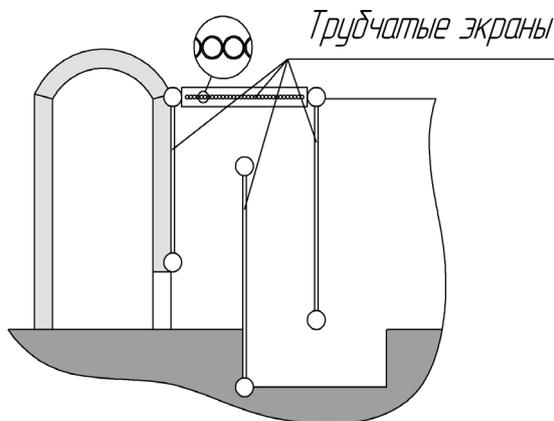


Рис. 10. Схема котла с камерой охлаждения.

На рис. 11 представлены результаты расчета при наличии теплоотвода на стенках температура внешней среды равна 300 °С, коэффициент теплоотдачи составляет 50 Вт/м²К. По двум диагональным сечениям, построенным на выходе из охлаждающей камеры, видно, что данные условия обеспечивают охлаждение дымовых газов до 750–800 °С (рис. 11) в сравнении с адиабатным случаем, когда температура на выходе достигает 1500 °С.

7. Опыт авторов по сжиганию ВУТ и угольных шламов

На заводе стеновых блоков (Новосибирск, РФ) построены три опытно-промышленные котельные установки мощностью 1,5, 3 и 7 МВт на водоугольном топливе. Последняя установка (7 МВт) создана на базе Бийского котла КЕ 10/14.

В 2011 году в поселке Мошково Новосибирской области в котельной, обеспечивающей

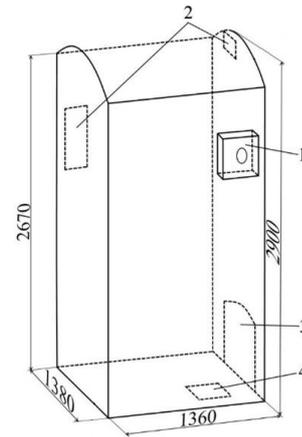


Рис. 9. Схема топки котла (размеры в мм): 1 – короб форсунки; 2 – окна для подачи воздуха; 3 – вывод дымовых газов; 4 – летка ШЗУ.

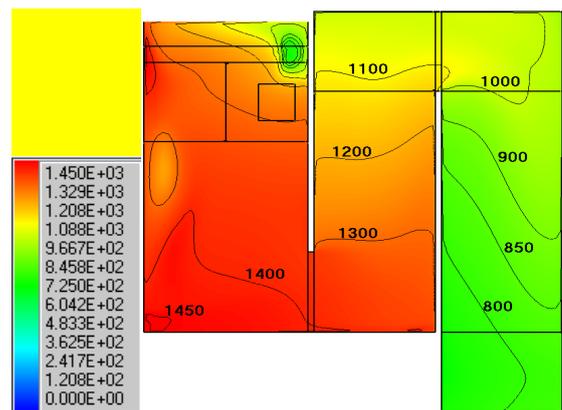
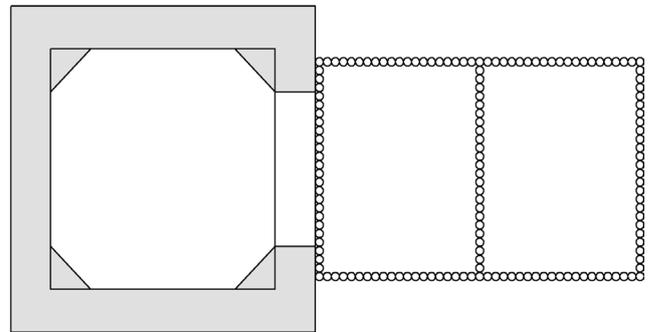


Рис. 11. Температура в центральном сечении, °С.

поселок теплом, котел КЕ 10/14 был также переведен на сжигание углей в виде водоугольной суспензии.

В указанных котлах было организовано сжигание ВУТ, приготовленного из кузнецких углей марки Г и Д, антрацита, угольных шламов и шламов антрацита, отходов углебога-

щения кузнечных углей. Испытания показали, что каждый из перечисленных продуктов может быть принят в качестве исходного материала для приготовления ВУТ. Коэффициент выгорания углерода составляет 95–97%. Коэффициент полезного действия котлов достигает значений 85–87%. Характеристики уходящих газов приближаются к характеристикам мазутных котельных.

В 2016 году в муниципальной котельной поселка Барзас Кемеровской области построен котел мощностью 1 МВт на ВУТ. Для приготовления ВУТ использовались кеки с ОФ «Северная», расположенной в г. Березовский Кемеровской области.

8. Заключение

Разработаны и реализованы в опытно-промышленном варианте все основные компоненты модульной технологии подготовки и сжигания ВУТ:

- организован мокрый помол угля на модернизированной шаровой барабанной мельнице;

- создан гидродинамический генератор кавитации, позволяющий повысить дисперсность угля, обеспечить гомогенность водоугольной суспензии, увеличить химическую активность ВУТ;

- подобраны пластификаторы, позволяющие получить высокореактивные пластичные ВУТ с концентрацией угля порядка 60–70%, сохраняющие устойчивое состояние до 30 дней;

- созданы специализированные топочные устройства, осуществляющие сжигание ВУТ в вихревом потоке;

- разработаны, изготовлены и испытаны на опытно-промышленных котлах специальные горелочные устройства (форсунки) для распыливания суспензионных топлив;

- создан вычислительный комплекс программ по расчету топочных процессов при сжигании ВУТ в модернизированных котлах. Комплекс прошел апробацию в опытно-промышленных испытаниях и показал высокую эффективность.

Выполненные научно-исследовательские и опытно-промышленные разработки позволяют сделать вывод о перспективности перевода котельных малой промэнергетики и ЖКХ на сжигание ВУТ. Особого внимания заслуживает перевод на ВУТ котельных агрегатов малой производительности, работающих на твердом топливе с низким уровнем механизации

и автоматизации. Такой перевод позволит улучшить эколого-экономические показатели, экономить до 30–50% топлива в неэффективно работающих котельных, сократить расходы качественных топлив (топочный мазут, природный газ), использовать отходы углеобогащения.

Литература

- [1]. Мариничева О. Уголь возвращается в генерацию // Энергетика и промышленность России. – 2012. – Т.11, №199. – С.1–4.
- [2]. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy. London: BP, –2018. – P.56.
- [3]. Munawer M.E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes // Journal of Sustainable Mining. – 2018. – Vol.17, №2. – P.87–96.
- [4]. Franco A., Diaz A.R. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control // Energy. – 2009. – Vol.34, №3. – P.348–354.
- [5]. Баранова М.П., Кулагин В.А. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, – 2011. – 160 с. ISBN 978-5-7638-2116-1
- [6]. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Chernetskii M.Y. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) // Therm. Eng. – 2016. – Vol.63, №10. P.707–717.
- [7]. Nyashina G.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals // J. Clean. Prod. – 2018. – Vol.172. – P.1730–1738.
- [8]. Няшина Г.С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив из отходов углеобогащения и биомассы. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Томск, 2018. – С.201.
- [9]. Fan W., Li Y., Guo Q., Chen C., Wang, Y. Coal-nitrogen release and NO_x evolution in the oxidant-staged combustion of coal // Energy. – 2017. – Vol.125. – P.417–426.
- [10]. Zhang H., Liu J., Shen J. A combined experimental and theoretical study of micronized coal reburning // Front. Energy. – 2013. – Vol.7. – P.119–126 (2013).
- [11]. Ma J., Shen J., Liu J., Ma Y., Jiang X. Reburning study of superfine pulverized coal in high CO₂ concentration // Fuel. – 2018. – Vol.220. – P.25–31.
- [12]. Chang S., Zhuo J., Meng S., Qin S., Yao Q. Clean Coal Technologies in China: Current Status and

- Future Perspectives // Engineering. – 2016. – Vol.2. №4. – P.447-459.
- [13]. Guan G. Clean coal technologies in Japan: a review // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2017. – Vol.25, №6. – P.689-697.
- [14]. Wang G., Xu Y., Ren H. Intelligent and ecological coal mining as well as clean utilization technology in China: Review and prospects // International Journal of Mining Science and Technology – 2019. – Vol.29, №2. – P.161-169.
- [15]. Cheng J., Zhou J., Li Y., Liu J., Cen K. Effects of pore fractal structures of ultrafine coal water slurries on rheological behaviors and combustion dynamics // Fuel. – 2008. – Vol.87, №12. – P.2620-2627.
- [16]. Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang J., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry // Powder Technology. – 2020. – Vol.366. – P.552-559.
- [17]. Chen X., Wang C., Wang Z., Zhao H., Liu H. Preparation of high concentration coal water slurry of lignite based on surface modification using the second fluid and the second particle // Fuel. – 2019. – Vol.242. – P.788-793.
- [18]. Liu F., Lyu T., Pan T., Wang F. Influencing factors of public support for modern coal-fired power plant projects: An empirical study from China // Energy Policy. – 2017. – Vol.105. – P.398-406.
- [19]. Патент 2635142 РФ В01F7/0066. Генератор кавитации // Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Карташова Л.В., Кравченко А.И. – Оpubл. 2017
- [20]. Mal'tsev L.I., Belogurova T.P., Kravchenko I.V. Influence of high-energy impact on the physical and technical characteristics of coal fuels // Thermal Engineering. – 2017. – Т.64, №8. – С.585-590.
- [21]. Патент 2518754. РФ МПК F23C3/00. Устройство для сжигания водоугольного топлива (Варианты) // Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Карташова Л.В. – Оpubл. 10.06.2014
- [22]. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Богомолов А.Р., Чернецкий М.Ю., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Шевырев С. А., Лырщиков С.Ю. Результаты опытно-эксплуатационного сжигания водоугольного топлива в водогрейном котле малой мощности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – №12. – С.16-28.
- [23]. Патент №2523816. РФ В05В7/08. Мальцев Л.И., Алексеенко С.В., Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И. // Пневматическая форсунка. – Оpubл. 27.07.2014
- [24]. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., Kuznetsov V.A., Maltsev L.I., Minakov A.V., Chernetskiy M.Yu., Shadrin E.Yu., Sharypov O.V. Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension fuel // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2019. – Vol.77. – P.288-298.
- [25]. Kuznetsov V.A., Maltsev L.I., Dekterev A.A., Chernetskiy M.Y. Numerical investigation of the influence of operating conditions on the description of the nitrogen oxides formation in combustion chamber of low-power boiler during the combustion of water-coal fuel // J. Phys.: Conf. Ser. – 2018. – P.012042.
- [26]. Kuznetsov V.A., Maltsev L.I., Dekterev A.A. Numerical investigation of coal-water fuel combustion in two-chamber furnace of a low-power boiler // XXXVI Siberian Thermophysical Seminar (STS 36) 2020, Journal of Physics: Conference Series 1677 (2020) 012110 IOP Publishing.

References

- [1]. Marinicheva O (2012) Energy and Industry of Russia [Energetika i promyshlennost' Rossii] 11(199):1-4. (in Russian)
- [2]. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy. London: BP, –2018. – P.56.
- [3]. Munawer ME (2018) Journal of Sustainable Mining. 17(2):87-96. DOI: 10.1016/j.jsm.2017.12.007
- [4]. Franco A, Diaz AR (2009) Energy. 34(3):348-354. DOI: 10.1016/j.energy.2008.09.012
- [5]. Baranova MP, Kulagin VA (2017) Physical and chemical bases for obtaining fuel water-coal suspensions [Fiziko-himicheskie osnovy polucheniya toplivnyh vodougol'nyh suspenzij] Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia. ISBN 978-5-7638-2116-1 (in Russian)
- [6]. Glushkov DO, Strizhak PA, Chernetskii MY (2016) Therm. Eng. 63(10):707-717. DOI:10.1134/S0040601516100037
- [7]. Nyashina GS, Kuznetsov GV, Strizhak PA (2018) J. Clean. Prod. 172:1730-1738. DOI:/10.1016/j.jclepro.2017.12.023
- [8]. Nyashina GS (2018) Investigation of ways to reduce the impact of thermal power plants on the environment when burning suspension fuels from coal enrichment waste and biomass. [Issledovanie sposobov snizheniya vliyaniya teplovyh elektricheskikh stancij na okruzhayushchuyu sredu pri szhiganii suspenzionnyh topliv iz othodov ugleobogashcheniya i biomassy] Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Tomsk, Russia. P.201. (in Russian)
- [9]. Fan W, Li Y, Guo Q, Chen C, Wang Y (2017) Energy. 125:417-426. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.130
- [10]. Zhang H, Liu J, Shen J (2013) Front. Energy.

- 7:119–126. DOI:10.1007/s11708-012-0226-6
- [11]. Ma J, Shen J, Liu J, Ma Y, Jiang X (2020) Fuel. 220:25–31. DOI:10.1016/j.fuel.2018.02.011
- [12]. Chang S, Zhuo J, Meng S, Qin S, Yao Q (2016) Engineering. 2(4):447–459. DOI: 10.1016/J.ENG.2016.04.015
- [13]. Guan G (2017) Chinese Journal of Chemical Engineering. 25(6):689–697. DOI: 10.1016/j.cjche.2016.12.008
- [14]. Wang G, Xu Y, Ren H (2019) International Journal of Mining Science and Technology. 29(2):161–169. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.005
- [15]. Cheng J, Zhou J, Li Y, Liu J, Cen K (2008) Fuel. 87(12):2620–2627. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.01.028
- [16]. Zhang Y, Xu Z, Tu Y, Wang J, Li J (2020) Powder Technology 366:552–559. DOI:10.1016/j.powtec.2020.03.005
- [17]. Chen X, Wang C, Wang Z, Zhao H, Liu H (2019) Fuel 242:788–793. DOI:10.1016/j.fuel.2019.01.007
- [18]. Liu F, Lyu T, Pan T, Wang F (2017) Energy Policy 105:398–406. DOI:10.1016/j.enpol.2017.03.017
- [19]. Mal'tsev LI, Kravchenko IV, Kartashova LV, Kravchenko AI (2017) Cavitation generator [Generator kavitacii] Patent of the Russian Federation 2635142
- [20]. Mal'tsev LI, Belogurova TP, Kravchenko IV (2017) Thermal Engineering 64(8):585–590. DOI:10.1134/S0040363617080069
- [21]. Alekseenko SV, Mal'tsev LI, Kravchenko IV, Kravchenko AI, Kartashova LV (2014) Device for burning water-coal fuel (options)[Ustrojstvo dlya szhiganiya vodougol'nogo topliva (varianty)] Patent of the Russian Federation 2518754.
- [22]. Alekseenko SV, Maltsev LI, Bogomolov AR, Chernetskiy MYu, Kravchenko IV, Kravchenko AI, Shevyrev SA, Lyrshchikov SYu (2017) Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov] 12:16–28. (in Russian)
- [23]. Mal'tsev LI, Alekseenko SV, Kravchenko IV (2014) Pneumatic nozzle [Pnevmaticheskaya forsunka] Patent of the Russian Federation №2523816.
- [24]. Alekseenko SV, Anufriev IS, Dekterev AA, Kuznetsov VA, Maltsev LI, Minakov AV, Chernetskiy MYu, Shadrin EYu, Sharypov OV (2019) International Journal of Heat and Fluid Flow. 77:288–298 DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013
- [25]. Kuznetsov VA, Maltsev LI, Dekterev AA, Chernetskiy MY (2018) Numerical investigation of the influence of operating conditions on the description of the nitrogen oxides formation

in combustion chamber of low-power boiler during the combustion of water-coal fuel. J. Phys.: Conf. Ser. P.012042. DOI: 10.1088/1742-6596/1105/1/012042

- [26]. Kuznetsov VA, Maltsev LI, Dekterev AA (2020) Numerical investigation of coal-water fuel combustion in two-chamber furnace of a low-power boiler. XXXVI Siberian Thermophysical Seminar (STS 36) Journal of Physics: Conference Series 1677:012110 IOP Publishing

Review of works on the preparation of coal water fuel and its combustion in boilers

S.V. Alekseenko¹, L.I. Maltsev^{1*}, I.V. Kravchenko², A.A. Dekterev^{1,3}, V.A. Kuznetsov^{1,3}

¹Institute of Thermal Physics, RAS, S.S. Kutateladze SB RAS, Lavrentiev Ave., 1, Novosibirsk, Russia

²ООО «ПРОТЕН-К», st. Tvardovsky, 3, Novosibirsk, Russia

³Siberian Federal University, 79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, Russia

Abstract

In the process of coal enrichment, huge volumes of waste are generated, which, as a rule, are thrown into the surrounding space, polluting it. The waste may contain up to 50% carbon. Small industrial power generation, municipal boiler houses mainly use layered combustion of coal. At the same time, the carbon burnout coefficient is 50–60%, the efficiency of boilers often does not exceed 60%, and their environmental performance does not meet modern requirements. An effective way to solve the problem of coal waste disposal can be the conversion of boilers to the combustion of coal in the form of coal-water suspension (CWS). The article presents the results of the authors on the technology of preparation of water-coal fuel (WCF) and its combustion in vortex furnaces of boilers. The data on new equipment necessary for the implementation of the technology is presented. It is shown that ordinary coal, anthracite, coal sludge, as well as coal preparation waste can serve as the basis for the production of CWF. Examples of pilot-industrial application of water-coal technology are given. At the same time, the fuel burnup coefficient reaches values of the order of 95%, and the efficiency of the boilers exceeds 85%.

Keywords: coal-water fuel (WCF), WCF preparation, WCF combustion, cavitation treatment, coal waste.

Көмір-су отынын дайындау және оның қазандарда жағу жұмыстарына шолу

С.В. Алексеенко¹, Л.И. Мальцев^{1*}, И.В. Кравченко²,
А.А. Дектерев^{1,3}, В.А. Кузнецов^{1,3}

¹Жылу физикасы институты, С.С. Кутателадзе РҒА
СБ, Лаврентьев даңғ., 1, Новосибирск, Ресей

²ОО «ПРОТЕН-К», Твардовский көш., 3, Новоси-
бирск, Ресей

³Сібір федералды университеті, Свободный даңғ.,
79, Красноярск, Ресей

Аңдатпа

Көмірді байыту процесінде үлкен көлемдегі қалдықтар түзіледі, олар әдетте қоршаған кеңістікке лақтырылып, оны ластайды. Қалдықтың құрамында 50% көміртегі болуы мүмкін. Шағын өнеркәсіптік электр энергиясын өндіру, коммуналдық қазандықтар негізінен көмірді қабатты жағуды пайдаланады. Сонымен қатар, көміртектің жану коэффициенті 50-60% құрайды, ал қазандықтардың ПӘК жиі 60% -дан аспайды және олардың экологиялық көрсеткіштері заманауи талаптарға

сәйкес келмейді. Көмір қалдықтарын кәдеге жарату мәселесін шешудің тиімді жолы қазандықтарды көмір-су суспензиясы (КСС) түріндегі көмірді жағуға айналдыру болуы мүмкін. Мақалада су-көмір отынын (СҚҚ) дайындау және оны қазандықтардың құйынды пештерінде жағу технологиясы бойынша авторлардың нәтижелері берілген. Технологияны енгізуге қажетті жаңа техникалар туралы мәліметтер берілген. Қарапайым көмір, антрацит және көмір шламы, сондай-ақ көмір дайындау қалдықтары КҚҚ өндіру үшін негіз бола алатыны көрсетілген. Су-көмір технологиясын тәжірибелік-өнеркәсіптік қолдану мысалдары келтірілген. Бұл ретте отынның жану коэффициенті 95% деңгейіндегі мәндерге жетеді, ал қазандықтардың тиімділігі 85% -дан асады.

Кілт сөздер: көмір-су отыны (КСО), КСО дайындау, КСО жағу, кавитациялық өңдеу, көмір қалдықтары.