Практические результаты сжигания водоугольного топлива

К.т.н. А.Г. Морозов, генеральный директор, ООО «Амальтеа», г. Москва

Введение

Для развития современной угольной энергетики необходимы новые экологически чистые и экономически выгодные технологии использования углей. Главной задачей внедрения таких технологий в энергетику страны является снижение механического недожога угля и снижение эмиссии вредных веществ. Одной из перспективных программ развития энергоэффективной экологически чистой угольной энергетики является использование водоугольного топлива (ВУТ).

Водоугольное топливо представляет собой мелкодисперсную смесь измельченного угля, воды и в ряде случаев стабилизирующей добавки (пластификатора), с содержанием угля – 59-64%, воды - 36-41% (с учетом внутренней влаги угля). Типовые теплотехнические и реологические свойства водоугольного топлива представлены в табл.1.

Таблица 1. Характеристики водоугольного топлива.

Показатель	Значение
Массовая доля твердой фазы (угля), %	58-65
Гранулометрический состав (100% фракции), мкм	менее 120
Плотность, кг/м^3	около 1200
Зольность твердой фазы (зависит от марки угля), %	5-30
Низшая теплота сгорания (зависит от марки исходного сырья), ккал/кг	2300-4600
Вязкость, при скорости сдвига 81 с$^{-1}$, мПа·с	до 1000
Температура воспламенения, °С	450-650
Температура горения, °С	900-1100
Статическая стабильность, сут.: – без применения добавок – возможно применение добавок – с применением добавок и дополнительной обработки	 до 5-10 от 10 от 30
Температура замерзания (без добавок), °С	0

На сегодняшний день наиболее известной является технология получения водоугольной суспензии (ВУС) - смеси веществ, где твердое вещество распределено в виде мельчайших частиц в жидком веществе во взвешенном (неосевшем) состоянии.

По внешнему виду ВУС соответствует жидкому топливу с вязкостью, близкой к мазуту, и может быть использовано для выработки тепловой и электрической энергии, как на угольных, так и на газомазутных котлоагрегатах взамен газа и мазута.

Водоугольное топливо обладает рядом существенных преимуществ:

- возможно изготовление топлива из угольных шламов, бурого угля, сланцев и торфа;
- высокая глубина выгорания угля (не ниже 98%);

■ горение с газификацией (образование и горение $CO+H_2$);
■ простота транспортировки и хранения (необходимый нагрев емкостей с ВУС составляет 10 ^{O}C, против 70 ^{O}C для мазута);
■ взрыво- и пожаробезопасность;
■ снижение эмиссии оксидов азота и серы с возможностью полной утилизации отходов;
■ значительно снижается вероятность шлакообразования, уменьшающего теплопроводность трубной части котлов.

Вода в любом топливе обычно является балластом, которого стараются избегать, следовательно, намерение добавить воду в топливо вызывает вопрос: «Зачем?». В случае ВУС более правомерным является вопрос: «Откуда?». В 60-х годах 20-го века ВУС планировалось использовать, прежде всего, для утилизации угольных шламов [1, 3], которые изначально обладают собственной влагой 25% и более. По консистенции такие шламы представляют собой глину черного цвета с включениями угля до нескольких миллиметров. Любая дозированная подача таких шламов в топку котла для сжигания в обязательном порядке подразумевает процесс предварительной подготовки. Классический помол шламов до среднего размера частиц 90 мкм, как это принято для пылеугольных энергетических котлов, требует проведения предварительной сушки сырья, т.е. испарения имеющейся влаги в объеме не менее 25%. Иными словами, просто измельчение шламов выходит за рамки классического сухого помола.

Альтернативой сухому измельчению является мокрый помол с одновременной гомогенизацией полученной суспензии. Использование мокрого помола для измельчения шламов решает несколько технологических задач:
■ вместо сухого взрывоопасного порошка получается жидкая суспензия, перекачиваемая насосами и равномерно подаваемая в топку котла. Дозированная подача сухой пыли является более сложным процессом, а для котлов и малой, и средней мощности еще и более затратным;
■ исчезает необходимость предварительной сушки шлама с затратами на испарение выше, чем просто испарение воды;
■ улучшается общая чистота участка топливоподготовки.

В процессе мокрого помола для получения гомогенной суспензии обычно добавляется вода, хотя любые отходы, смывы от мазутных цистерн и прочее были бы предпочтительнее. Учитывая влажность шламов от 25% и выше, объем добавляемой влаги составляет не более 15%.

Наличие дополнительной влаги безусловно отразится на топливном балансе котла. Однако, как показывают многочисленные ТЭО и предТЭО, подобное увеличение влажности экономически более эффективно, чем комплекс мер по обезвоживанию шламов и решению вопросов их дозированной подачи. Особенно это относится к объектам малой и средней энергетики.

Технологии получения и использования водоугольных суспензий хотя и известны давно, в настоящее время находят широкое применение только в Китае на объектах крупной промэнергетики.

Экологические причины использования ВУС в Китае достаточно очевидны: сжигание ВУС должно привести к снижению образования оксидов азота (NO_x) и к более удобным мерам по улавливанию оксидов серы (SO_x). Тем не менее, если результаты о полноте сжигания угля в форме ВУС широко известны [1-4], то реальные практические данные по выбросам от сжигания водоугольного топлива как на крупных котлах, так и на котлах малой и средней энергетики в публичном доступе практически отсутствуют.

По имеющимся результатам [5] утилизация золы от сжигания угля в форме ВУС представляется более предпочтительной, чем золы от слоевого сжигания, однако, подтвержденных фактов использования данных решений в Китае также нет.

Установка для сжигания ВУС в Австрии

С целью продвижения на рынке в 2013-14 гг. ООО «Амальтеа» (г. Москва) совместно с Effective Energy Technologies GmbH (г. Вена, Австрия) создали промышленную установку приготовления ВУТ в окрестностях г. Вены и стандартный водогрейный котел в г. Грац (200 км от Вены). На данном оборудовании проведена серия сжиганий ВУС из различного вида сырья. Целью работ было проведение сертификационных измерений по стандартам CE (Conformite Europ^enne - европейское соответствие) объемов выбросов от сжигания ВУС и исследование некоторых режимов работы котлов.

Рис. 1. Внешний вид котла Ygnis LRR 48/1400 с установленной дизельной горелкой и форсункой ВУС.

Для проведения тестов использовался водогрейный 3-ходовой жаротрубный котел зарубежного производства (Франция) номинальной мощностью 1400 кВт (рис. 1), рассчитанный на использование газа, дизеля или мазута в качестве основного топлива. По существующим нормативам сжигание мазута на территории ЕС запрещено, в связи с чем для сжигания используется только дизельное топливо.

В качестве горелочного устройства применялась двухтопливная горелка, оснащенная насосом для жидкого топлива, дутьевым вентилятором для подачи воздуха, автоматикой, регулирующей режим работы горелки. Диапазон изменения мощности горелки составляет 114-513 кВт, что приемлемо для использования в составе комплекса на базе данного котла. Данная горелка обеспечивает максимально только около 30% от номинальной мощности котла, т.к. остальные 70% обеспечивает сжигание ВУС.

Выбор форсунки для сжигания ВУС осуществлялся из двух типов форсунок: форсунка зарубежного производства (Вена, Австрия) и паропневматическая форсунка разработки специалистов ООО «Амальтеа-Сервис». Ввиду малого угла распыла форсунки зарубежного производства (2α=20-25°) факел ВУС удлиняется до 2,5 м, что неприемлемо для данного котла. В результате, для распыла ВУС была выбрана паропневматическая форсунка отечественной разработки. Прототип форсунки был ранее многократно испытан на различных объектах в период разработки и функционирования углепровода Белово-Новосибирск в СССР Принцип действия форсунки основан на распылении ВУС вне объема форсунки, что снижает чувствительность качества распыла к износу топливоподающего ствола форсунки.

Расчетное время работы форсунки - не менее 1500-2000 ч. Указанное время работы форсунки является оценочным и базируется на предыдущих испытаниях аналогичной форсунки на водоугольных суспензиях.

Для распыла и сжигания ВУС дополнительный объем воздуха подается двумя путями:

- через компрессор с давлением до 4 бар - для распыла ВУС;
- дутьевым вентилятором с регулятором - вторичный воздух.

Форсунка для распыла ВУС и канал подачи вторичного воздуха монтируются через фронтальную стенку котла (рис. 2).

Рис. 2. Дизельная горелка и форсунка ВУС со стороны топки котла.

В качестве сырья для приготовления ВУС был использован каменный уголь с месторождения Мысловице (Польша):

- размер - 1-14 мм (после дробления);
- влажность - 5-7%;
- зольность - 2-6%;
- летучие - 33,5%;
- сера - макс. 0,6%;
- горючая сера - 0,35-0,5% (0,125-0,178 г/ГДж);
- теплотворная способность - 28000 кДж/кг.

По требованию одного из заказчиков была разработана и внедрена схема распыла ВУС чистым кислородом. Результатом стала возможность 100% сжигания ВУС без топлива подсветки. Существенным фактом является укорочение факела горения ВУТ на 30-50% по сравнению с распылом воздухом. Важно отметить, что ввиду особенностей сырья данная ВУС имела влажность

около 50%, снижение влажности для данного типа сырья представлялось весьма затратным.

Возможность горения ВУС без топлива подсветки и без какой-либо модернизации камеры совместно с фактором укорачивания факела принципиально расширяет области использования ВУТ в малой и средней энергетике.

Рис. 3. Выход готового водоугольного топлива.

Приготовление ВУС (рис. 3) осуществлялось на гидроударном узле мокрого помола (ГУУМП) (подробнее о применении гидроударной технологии для получения водоугольного топлива см. журнал НТ № 7, 2010 г. - Прим. ред.).

Последовательность всех этапов приготовления ВУС показана на рис. 4.

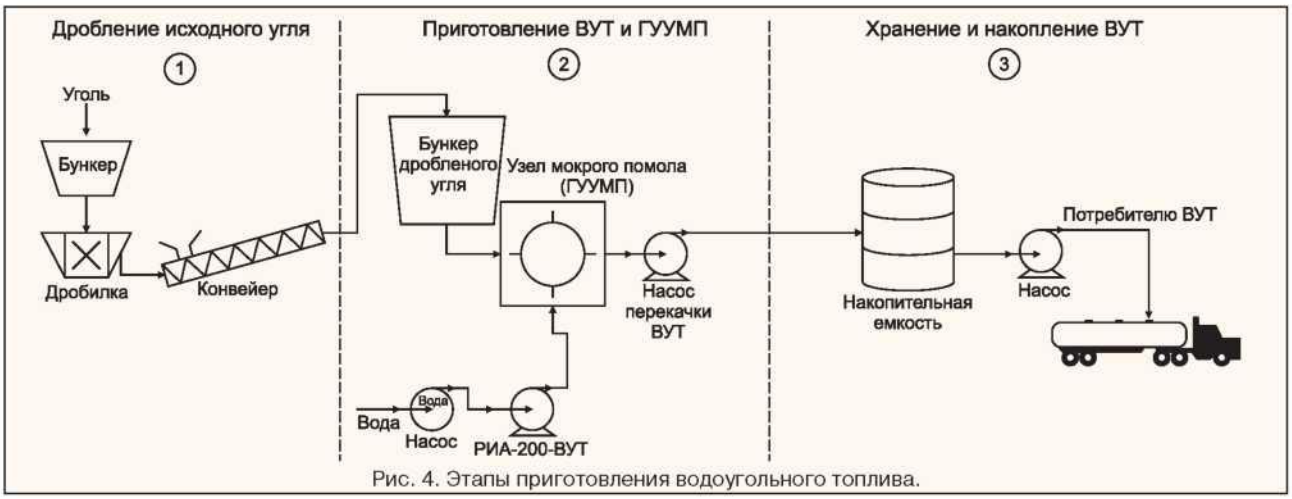

Рис. 4. Этапы приготовления водоугольного топлива.

ГУУМП (рис. 5) имеет следующие основные характеристики [6]:

- производительность - до 5 т/ч;
- энергозатраты - до 12 кВт.ч на 1 т ВУС.

Рис. 5. Гидроударный узел мокрого помола угля (ГУУМП) в Австрии.

Следует также отметить, что наиболее точные результаты по измерению энергозатрат на приготовление ВУС в ГУУМП были получены в Южной Корее, где ввиду использования сети 60 Гц был установлен частотный преобразователь, оснащенный электронным счетчиком потребленной энергии. По данным счетчика на приготовление 3 т ВУС потребовалось около 28,2 кВт.ч, т.е. около 9,4 кВтч/т.

Общие результаты

Горение водоугольного топлива совместно с дизельным является стабильным и устойчивым во всем диапазоне мощностей при соотношении дизель/ВУС - 20/80% (нагрузка котла - около 75%) и при соотношении - 30/70% при нагрузке близкой к максимальной мощности котла. Изменение соотношения дизель/ВУС производилось путем замены форсунки, регулирующей подачу дизельного топлива через горелку. Соотношение дизель/ВУС рассчитывалось на основании теплового вклада. Визуально выбросы от горения ВУС совместно с дизелем неотличимы от горения дизельного топлива.

Процесс горения дизеля и ВУС в котле на максимальной мощности при малой доле поддерживающего топлива (дизельного) характеризуется появлением видимого черного дыма из дымовой трубы котла. Примерной минимальной границей стабильного горения можно
считать соотношение дизель/ВУС - 30/70%. Полностью устойчивое и стабильное горение без заметных вариаций по объему выбросов начинается при соотношении дизель/ВУС - 50/50%.

Таблица 2. Сравнительные результаты измерения параметров выбросов.

Параметр	Вид топлива (нагрузка котла)		
	дизель 100%, (200 кВт)	дизель/ВУС 20/80%, (1000 кВт, 75%)	дизель/ВУС 30/70%, (1350 кВт, 100%)
Температура уходящих газов, °С	51,8	52,1	55,1
Содержание СО, мг/м^3	159	159	200-400
Содержание NO_x, мг/м^3	145	73,5	150-250
Избыток воздуха	1,31	1,29	1,25
Расход дизеля, кг/ч	18	18	30
Расход ВУС, кг/ч	–	180	224

Результаты измерений выбросов в целом соответствуют ожиданиям (см. табл. 2):

- совместное сжигание ВУС и дизельного топлива приводит к снижению объема выбросов NO_x практически в два раза - со 145 до 75,5 мг/м^3. Тепловой режим котла при этом не изменяется;
- объемы выбросов СО практически не изменяются при соотношении дизель/ВУС - 30/70% и стремительно увеличиваются при уменьшении доли дизеля и одновременном увеличении мощности котла до максимума. Подобное увеличение связано с недостаточностью объема газомазутного котла для полного сгорания частиц угля, водящих в состав ВУС.

Помимо ВУС из угля силами зарубежных партнеров были проведены эксперименты по сжиганию суспензии, полученной из отходов нефтепроизводства (нефтяного кокса). Данные эксперименты также подтвердили применимость водно-коксовой суспензии на газомазутных котлах малой мощности. Использование кокса в качестве сырья является принципиально важным с точки зрения его утилизации.

Приготовление и сжигание ВУС в Ижевске

В апреле 2015 г. ООО «Амальтеа» совместно с котельным заводом «Богатырь» (г. Ижевск) смонтировали и запустили промышленную установку подготовки ВУТ на базе ГУУМП и угольный котел для сжигания ВУТ.

Приготовление ВУС осуществляется на ГУУМП 2-го поколения, существенно модернизированного и обладающего лучшими эксплуатационными характеристиками: меньший износ помольных элементов, существенная автоматизация, компактность.

Помимо комплекса приготовления разработан цельный комплекс топливоподачи, включающий в себя не только насос подачи ВУТ и форсунку, но и промежуточную емкость хранения ВУТ с обвязкой, необходимой для работы в непрерывном режиме и режиме с остановками (рис. 6).

Рис. 6. Комплекс топливоподачи ВУТ на котел в Ижевске.

Сжигание осуществляется в вихревом пред- топке. В зависимости от видов сырья, мощности и пр. сжигание ВУТ осуществляется с подсветкой или без.

Экономика внедрения водоугольного топлива

Для российского рынка теплоэнергетики основным вопросом является снижение себестоимости производимого тепла. Очевидно, что внедрение любого нового топлива целесообразно проводить при наличии экономической целесообразности. На сегодняшний день основным энергоносителем в теплоэнергетике России является природный газ, цена которого (в пересчете на т у.т.) ниже любых других энергоносителей практически во всех регионах РФ. Исключение составляет, пожалуй, только Красноярский край, где при цене угля до 500 руб./т газ не является самым дешевым топливом, даже при его наличии.

В негазифицированных районах России уголь по-прежнему остается самым дешевым видом топлива, даже если этот уголь привозной. Однако существенной проблемой на сегодняшний день является колоссальный механический недожог угля, встречающийся на угольных котельных. В первом квартале 2015 г. специалистами ООО «Амальтеа» были исследованы около десятка угольных котельных и было обнаружено, что средний механический недожог составляет 40-45%, а на одной из котельных - более 50%! Это означает не только нарушение экологической чистоты работы котельных, но и существенное повышение себестоимости производимой тепловой энергии. В регионах, где уголь является привозным и его стоимость высока, подобный недожог существенно влияет на себестоимость 1 Гкал и, следовательно, на тарифы.

В табл. 3 приведены сравнительные данные по себестоимости 1 Гкал, полученной при использовании в качестве топлива мазута, щепы, пеллет, угля и водоугольного топлива из этого же угля. Расчеты приведены по действующей стоимости топлива в Северо-Западном ФО.

Наименование топлива	Стоимость, руб./т	Теплотворная способность, ккал/кг	Механический недожог, %	Цена, руб./Гкал	Стоимость т у.т. (справочно)
Сжиженный газ	27000	10800	–	2500	17500
Щепа	4500	2400	1	1875	13125
Пеллеты	6500	4000	1	1625	11487
Мазут	13000	9000	1	1459	10213
Уголь	4300	5500	40	1300	9121
Водоугольное топливо	3370	3600	2	917	6419

Из таблицы очевидно, что водоугольное топливо является самым низкозатратным

топливом даже при высокой цене на уголь. Мазут, пеллеты и щепа по-прежнему остаются дорогим видом топлива. Высокая цена щепы обусловлена, прежде всего, тем, что в настоящее время в России фактически отсутствуют действующие установки по производству щепы.

Как показывают результаты ТЭО и фактические данные, затраты, необходимые на внедрение водоугольного топлива, являются высокоокупаемыми. Для угольных котельных стоимость внедрения водоугольного топлива (CAPEX - капитальные затраты) меньше, чем для мазутных. Однако, рентабельность инвестиций (IRR - внутренняя норма доходности) в обоих случаях очень похожа и составляет 45-65% в зависимости от регионов. Так, для одной из угольных котельных в Архангельской области сжигание угля в форме водоугольного топлива в объеме 3000 т у.т. позволяет получить экономию в объеме 8,6 млн руб. в год по сравнению с классическим сжиганием угля. Стоимость реконструкции подобной котельной мощностью около 6 Гкал составляет 12-14 млн руб. в зависимости от местных условий. С учетом сроков реализации проекта и изготовления оборудования срок окупаемости составляет около 24 мес., без учета снижения затрат на утилизацию недожженного угля, который образуется при обычном сжигании.

Выводы

1. Проведенные эксперименты показали практическую применимость факельного сжигания ВУС в газомазутных котлах жаротрубного типа.

2. Существующая конструкция паропневматической форсунки показала свою применимость для распыла ВУС. Для нужд конкретных котлов с другими геометрическими размерами топок может потребоваться изменение конструкции форсунки для изменения угля распыла, но с сохранением принципа действия. В текущих экспериментах прогорание ВУС (размеры частиц до 100 мкм) успешно происходит в топке котла, имеющего длину топки менее 3 м.

3. В процессе экспериментов были проведены испытания горения ВУС как при 100% нагрузке котла, так и при нагрузке около 75% от номинальной. Результаты испытаний показали принципиальную возможность сжигания ВУС газомазутного котла в обоих режимах. При этом следует отметить следующие принципиальные моменты:

■ устойчивое горение обеспечивается при соотношении дизель/ВУС - 30/70% и выше при нагрузке котла до 75-80%;

■ самостоятельное горение ВУС реализуемо при корректном выборе режимов подачи воздуха и топлива;

■ в ряде случаев экономически целесообразным является использование кислорода в качестве распыливающего агента вместо воздуха, чтобы сократить длину факела ВУТ до размера газового, и полностью отказаться от топлива подсветки.

4. Выбросы оксидов азота (NO_x) снижаются существенно в любых случаях.

5. В целом, накопленные результаты показывают возможность расширить рынок потребления водоугольного топлива, прежде всего в малой и средней теплогенерации (ЖКХ), и обойти типовые трудности административно-технического плана [7]. Использование компактных устройств приготовления ВУС, совместное сжигание водоугольного топлива и поддерживающего топлива, ускоряет его внедрение и снижает капитальные затраты на внедрение.

6. Внедрение водоугольного топлива характеризуется рентабельностью не ниже 45% и привлекательными сроками окупаемости.

7. Ознакомиться с технологией в рабочем режиме можно на промышленных образцах в городах Ижевске и Вене (Австрия).

Литература

1. Делягин Г.Н., Давыдова И.В. Сжигание твердого топлива в виде водоугольных суспензий. Москва: ЦНИЭИ Уголь, 1969. 49 с.
2. Sunggyu Lee, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka. Handbook of alternative fuel technologies // CKC Press. New York. 2007.
3. Зайденварг В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х. Производство и использование водоугольного топлива. М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. 176 с.
4. NEDO and IEA-eLM International Cooperation Committee, CWM in Japan. 1997.
5. Зольный отход от сжигания водоугольного топлива как микронаполнитель бетонов / Крашенинников О.Н., Морозов А.Г., Пак А.А. //Тезисы III Международной конференции «Проблемы рационального использования природного и техногенного сырья Баренцева региона в технологии строительных и технических материалов». Сыктывкар, 2007 г.
6. Архипкин О.О., Морозов А.Г. Современные подходы к использованию водоугольного топлива // Экологический вестник России. 2011. № 11.
7. Мосин С.И., Морозов А.Г., Делягин Т.Н. Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива // Новости теплоснабжения. 2008. № 9.

Эта статья была опубликована в журнале «Новости теплоснабжения» №06 (178) 2015 г., http://www.rosteplo.ru/nt/178

Журнал «Новости теплоснабжения»

Новости Теплоснабжения *- журнал для специалистов в сфере теплоснабжения. Актуально. Профессионально. Доступно.*

Оформить **бесплатную** подписку http://www.rosteplo.ru/soc/registration/