

# ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОТ СЖИГАНИЯ ВУТ



А.Г. Морозов

### «Откуда» вместо «зачем»

Основных причин применения технологии ВУС в качестве ВУТ две: более полное сжигание угля в форме ВУС и снижение газообразных выбросов. Если результаты о полноте сжигания угля в форме ВУС широко известны [1-4], то реальные практические данные по выбросам от сжигания ВУТ как на крупных котлах, так и на котлах малой и средней энергетики в публичном доступе практически отсутствуют.

Известно, что водоугольное топливо – это смесь мелкоизмельченного угля или углеродосодержащего сырья с водой, либо водной эмульсией. Доля воды в ВУС обычно составляет 36...41%, с учётом внутренней влаги угля:

ВУС = 59...64% уголь (в сухом виде) + 36...41% влага.

Типовые теплотехнические и реологические свойства ВУС представлены в Таблице 1.

По прогнозам аналитиков, к 2020 году уголь может обойти нефть, став самым потребляемым топливом в мире. В последние годы США, осуществив «сланцевую революцию», обеспечивают дешевым углем Европу и Азию после того, как, к примеру, европейцы стали отказываться от использования энергии атомных станций после аварии на «Фукусиме». Однако экологичность угольного топлива по-прежнему под вопросом, потому что угольные электростанции считаются наиболее «грязным» источником энергии. Эксплуатация таких генераций сопровождается эмиссией оксидов серы и азота, тяжелых металлов и хранением больших объемов золы, образующейся в результате сжигания углей. Кроме того, сжигание угля не всегда производится эффективно.

В связи с этим, автор статьи предлагает познакомиться с инновационной технологией водоугольных суспензий (ВУС) в качестве водоугольных топлив (ВУТ), которые хотя и известны давно, но сегодня находят широкое применение только в Китае на объектах крупной промэнергетики.

Вода в любом топливе в любом случае является балластом, который обычно стараются избегать, следовательно, намерение добавить воду в ВУС 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 чёрного 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 объёме 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 ещё 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

Таблица 1. Характеристики ВУТ

Показатель	Значение
Массовая доля твёрдой фазы (угля)	58...65%
Гранулометрический состав	100% фракции менее 120мкм
Плотность	Около 1200 кг/м³
Зольность твёрдой фазы	5...30% (зависит от марки угля)
Низшая теплота сгорания	2300...4600 ккал/кг (зависит от марки исходного сырья)
Вязкость, при скорости сдвига 81с	до 1000 мПа*с
Температура воспламенения	450...650 °С
Температура горения	900...1100 °С
Статическая стабильность	<input type="checkbox"/> до 5..10 суток - без применения добавок; <input type="checkbox"/> от 10 суток - возможно применение добавок <input type="checkbox"/> от 30 суток - с применением добавок или доп.обработку
Температура замерзания	0 градусов (без добавок)

обычно добавляется вода, хотя любые отходы, смывы от мазутных цистерн и пр. были бы предпочтительнее. Учитывая влажность шламов от 25% и выше, объём добавляемой влаги составляет не более 15% (примерно). 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.

Экологические причины использования ВУС в Китае достаточно очевидны: сжигание ВУТ должно привести к снижению образования оксидов азота (NOx) и к более удобным мерам по улавливанию оксидов серы (SOx). Тем не менее, в открытых источниках практически отсутствуют результаты измерений выбросов NOx/SOx на действующих котлах в Китае. Тем более таких данных нет относительно сжигания ВУС в котлах малой и средней энергетики.

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

В 2013-2014 гг. ООО «Амальтеа» (Москва) совместно с Effective Energy Technologies GmbH (Вена, Австрия) провели серию экспериментов по сжиганию ВУС из различного вида сырья. Целью экспериментов были измерения объёмов выбросов от сжигания ВУС и исследование некоторых режимов работы котлов.

### Описание установки для сжигания ВУТ

#### Котёл

Для проведения тестов используется водогрейный 3-х ходовой жаротрубный котёл Ygnis LRR 48/1400 номинальной мощностью 1400 кВт, рассчитанный на использование газа, дизеля или мазута в качестве основного топлива. По нормативам ЕС сжигание мазута на территории ЕС запрещено, в связи с чем для сжигания используется только дизельное топливо.

#### Горелка

Горелка Riello Press N45 является двухтопливной горелкой, оснащённой насосом для жидкого топлива, дутьевым вентилятором для подачи воздуха, автоматикой, регулирующей режим работы горелки.

Диапазон изменения мощности горелки Riello Press 45N составляет 114...513 кВт, что приемлемо для использования в составе комплекса на базе котла Ygnis LRR 48/1400 мощностью 1400 кВт. Данная горелка обеспечивает максимальный вклад

в топливный баланс котле в размере чуть более 30% от номинальной мощности котла.

Измерение соотношения дизель/ВУС производилось путём замены форсунки, регулирующей подачу дизеля через горелку Riello Press N45.

#### Форсунка для ВУС

Выбор форсунки для сжигания ВУТ осуществлялся из двух типов форсунок: форсунка производства Combustion Solutions (Вена, Австрия) и паропневматическая форсунка ООО «Амальтеа-Сервис». Ввиду малого угла распыла форсунки Combustion Solutions ( $2\alpha = 20..25^\circ$ ) факел ВУТ удлиняется до 2,5 м, что неприемлемо для данного котла. В результате, для распыла ВУТ была выбрана паропневматическая форсунка разработки ООО «Амальтеа-Сервис». 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 объёма форсунки, что снижает чувствительность качества распыла к износу топливоподающего ствола форсунки.

Расчётное время работы форсунки – не менее 1500...2000 часов. Указанное время работы форсунки является оценочным. Оценка базируется на предыдущих испытаниях аналогичной форсунки на водоугольных суспензиях.

Андрей Геннадиевич Морозов, к.т.н., генеральный директор, ООО «Амальтеа»



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



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

Для распыла и сжигания ВУС дополнительный объём воздуха подаётся двумя путями:

- Через компрессор с давлением до 4 бар – для распыла ВУС
- Дутьевым вентилятором с регулятором – вторичный воздух ВУС.

Форсунка для распыла ВУС и канал подачи вторичного воздуха монтируются через фронтальную стенку котла.

**Сырьё**

В качестве сырья для приготовления ВУТ был использован каменный уголь с месторождение 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, мин 6690 ккал/кг

**Приготовление ВУТ**

Приготовление ВУТ осуществлялось на гидроударном узле мокрого помола (ГУУМП), разработанного ООО «Амальтеа-Сервис» и усовершенствованного силами Effective Energy Technologies GmbH.

ГУУМП имеет следующие основные характеристики [6]:

- Производительность – до 5 т/ч
- Энергозатраты – до 12 кВт\*ч на 1 тонну ВУТ
- Компактность
- Приемлемый ресурс помольных элементов.

Наиболее точные результаты по измерению энергозатрат на приготовление ВУТ в ГУУМП были получены в Южной Корее, где в виду использования сети 60 Гц был установлен частотный преобразователь, оснащённый электронным счётчиком потреблённой энергии. По данным счётчика на приготовление 3 т ВУТ (3 евротанка) потребовалось около 28,2 кВт\*ч, т.е. около 9.4 кВт\*ч/т.



Рис. 3. Исходный уголь и готовое ВУТ



**Видимые результаты  
Общие результаты**

Горение ВУТ совместно с дизелем является стабильным и устойчивым во всём диапазоне мощностей при соотношении дизель/ВУТ 20%/80% и при соотношении 30%/80% при мощности близкой к максимальной мощности котла. Соотношение дизель/ВУТ рассчитывалось на основании теплового вклада.

Визуально выбросы от горения ВУТ совместно с дизелем не отличимы от горения дизеля.

Особенность горения при максимальной нагрузке котла

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



Рис. 4. ГУУМП в Южной Корее, выход готового ВУТ

**Инструментальные результаты  
Измерения выбросов**

Результаты измерений выбросов в целом соответствуют ожиданиям:

1. Совместное сжигание ВУТ и дизеля приводит к снижению объёма выбросов NOx практически в два раза, с 145 мг/м3 до 75,5 мг/м3. Тепловой режим котла при этом не изменяется.

2. Объёмы выбросов CO практически не изменяются при соотношении дизель/ВУТ 30%/70% и стремительно увеличиваются при уменьшении доли дизеля и одновременном увеличении мощности котла до максимума. Подобное увеличение связано с недостаточностью объёма газомазутного котла для полного сгорания частиц угля, водящих в состав ВУТ.

**Выводы**

1. Проведённые эксперименты показали практическую применимость

факельного сжигания ВУТ в газомазутных котлах жаротрубного типа.

2. Помимо ВУТ из угля силами Effective Energy Technologies GmbH были проведены эксперименты по сжиганию водоугольной 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.

3. Существующая конструкция паропневматической форсунки показала свою применимость для распыла ВУТ. Для нужд конкретных котлов с другими геометрическими размерами топек может потребоваться изменение конструкции форсунки для



Таблица 2. Результаты измерения выбросов

Параметр	Дизель 100%, 200кВт	Дизель/ВУТ 20%/80%, 1000кВт (75% от max)	Дизель/ВУТ 30%/70%, 1350кВт (100% от max)
1. Температура холодного воздуха, °C	13,1	13,3	13,0
2. Температура уходящих газов, °C	51,8	52,1	55,1
3. CO <sub>2</sub> , %	14,9	14,8	15..20
4. CO, мг/ м <sup>3</sup>	159	159	200..400
5. NO <sub>x</sub> , мг/м <sup>3</sup>	145	73,5	150...250
6. Избыток воздуха, λ	1,31	1,29	1,25
7. Расход дизеля, кг/ч	18	18	30
8. Расход ВУТ, кг/ч	-	180	224

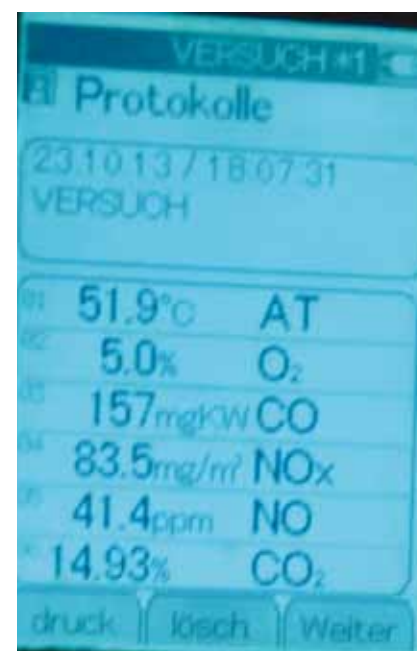


Рис. 5. Показания приборов при измерении выбросов

изменения угля распыла, но с сохранением принципа действия.

а) В текущих экспериментах прогорание ВУС успешно происходит в топке котла Ygnis LRR 48/1400, имеющего длину топки менее 3м. Грансостав ВУС при этом составляет до 100 мкм.

4. В процессе экспериментов были проведены испытания горения ВУТ как при 100% нагрузке котла, так и при нагрузке около 75% от номинальной. Результаты испытаний показали принципиальную возможность сжига-

ния ВУТ газомазутного котла в обоих режимах. При этом следует отметить следующие принципиальные моменты:  
а) Устойчивое горение обеспечивается при соотношении дизель/ВУС 30%/70% и выше вплоть до 75...80% нагрузке котла. Результаты измерений для данного соотношения приведены в Таблице 2.

б) При соотношении 30%/70% и 100% нагрузке котла наблюдается увеличение выбросов монооксидов углерода, что связано с недостаточностью объёма топки.

с) При соотношении дизель/ВУТ более 50%/50% и 100% нагрузке котла наблюдаются наиболее приемлемые значения объёмов выбросов.

5. Выбросы оксидов азота (NO<sub>x</sub>) снижаются существенно в любых случаях.

6. В целом, проведённые эксперименты показывают возможность расширения рынка потребления ВУТ, прежде всего на рынках малой-средней теплогенерации (ЖКХ) и обойти типовые трудности административно-технического плана [7]. Использование компактных устройств приготовления ВУТ, совместное сжигание ВУТ и поддерживающего топлива, ускоряет внедрение ВУТ, снижает капитальные затраты на внедрение.

**Литература**

1. Делягин Г. Н., Давыдова И.В. Сжигание твёрдого 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 // CRC 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., А.Г. Морозов, А.А. Пак, И.А. //Тезисы III Международной конференции проблемы рационального использования природного и техногенного сырья баренцева региона в технологии строительных и технических материалов – Сыктывкар, 2007 г.
6. Современные подходы к использованию водоугольного топлива /О.О.Архипкин, А.Г.Морозов //Экологический вестник России, № 11, 2011г.
7. С.И. Мосин, А.Г. Морозов, Г.Н. Делягин, «Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива», г. Москва Новости Теплоснабжения, №9, 2008г.