УДК 621.181

ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИГОТОВЛЕНИЯ И СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е.

Институт теплофизики им.С.С.Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия
ООО «ТеплоПром», Новосибирск, Россия

Работа выполнялась частично при поддержке
Федерального агенства по науке и инновациям в рамках Госконтракта № 02.740.11.0060.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается важная для энергетики проблема сжигания угля в котельных установках в виде водоугольной суспензии. Выполнены исследования по технологии приготовления водоугольного топлива и его сжигания. Разработано новое оборудование для этих целей. Приведены примеры опытно-промышленного использования технологии ВУТ.

ВВЕДЕНИЕ

Стратегические установки России по производству тепловой и электрической энергии связаны с ускоренным развитием угольной энергетики. В российской энергетике заканчивается так называемая «газовая пауза», а переход на уголь в энергетике требует применения энергоэффективных, ресурсосберегающих и экологообеспечивающих инновационных технологий.

Одним из путей масштабного вовлечения угля в энергетику может быть использование технологии сжигания угля в виде водоугольного топлива (ВУТ) вместо традиционного факельного или слоевого сжигания в котельных топках.

ОБЗОР РАБОТ ПО ТЕХНОЛОГИИ ВУТ

Обширные и длительные исследования свойств ВУТ из различных углей, их приготовления, хранения и гидротранспорта, а также разработка теории горения этого топлива, опытно-промышленные попытки сжигания ВУТ в котлах ведутся, начиная с 60-70 г. прошлого столетия, известными в СССР и России научными школами Института горючих ископаемых, ВНИИПИГидротрубопровод, Энергетического института им. Кржижановского и др., а также в США, Канаде, Италии, Китае. Из-за тяжелых экономических реформ Россия потеряла лидирующие позиции по ВУТ-направлению. В настоящее время наиболее интенсивные исследования по ВУТ проводятся в Китае. Там тематикой по ВУТ, как сообщается, занимаются три научно-исследовательских центра, работают 6 заводов по производству ВУТ, на котельных и электростанциях на ВУТе производится до 2 млн. кВт энергии. Намечается строительство крупного завода по производству ВУТ, утраивающего его производство. Китай поставляет ВУТ танкерами, в частности, в Японию.

По разным причинам широкого тиражирования в мире технология ВУТ пока не получила. Однако в последние годы вновь актуализируется проблема ее масштабного использования. Так, в сентябре 2007 г. были проведены слушания в Конгрессе США по вопросу увеличения применения «жидкого угля» в различных отраслях промышленности и, прежде всего, в качестве одного из базовых энергоносителей в национальной энергетической программе.

Водоугольные технологии в СССР и России с разным уровнем эффективности прошли проверку и продолжают внедряться на ряде российских объектов как большой, так и малой энергетики. К ним относятся:

1) опыт приготовления ВУТ из реакционного кузнецкого угля марки Д в Кузбассе (г. Белово) с его транспортом по трубопроводу длиной 262 км до Новосибирской ТЭЦ-5 и его сжигания на котлах ТПЕ-214 (блок 200 МВт);
2) получение искусственного композитного жидкого топлива (ИКЖТ) с возможностью использования в составе композиции

© Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е.

низкореакционных углей, торфа, отходов нефтепереработки по технологии Новосибирского государственного технического университета и ОАО «Новосибирскэнерго» (НГТУ-НСЭ) [5];

3) получение ВУТ и его сжигание по технологии кипящего слоя, разработанной и внедряемой НПО «Гидротрубопровод»;
4) технология прямого модульного приготовления и сжигания ВУТ в котле с адиабатным предтопком по схеме ФГУП НПЦ «Экотехника»;
5) разработанная НПО «Гидротрубопровод» и внедренная на ряде промышленных объектов технология получения топлива, определяемого авторами как экологически чистое топливо нового поколения - «ЭКОВУТ» [4].

Некоторая сдержанность и осторожность по расширению применения водоугольных технологий на объектах большой энергетики объясняется возникшими в процессе их освоения на котлах ПК-40-1 и ТПЕ-214 Беловской и Новосибирской ТЭЦ-5 негативными результатами. Так, при испытании опытно-промышленного углепровода «шахта «Инская» г.Белово – Новосибирская ТЭЦ-5» и сжигания поступающего из него ВУТ были выявлены следующие недостатки [1, 2, 6]:

- громоздкая, затратная и сложная технология приготовления ВУТ с большим разбросом фракционного состава, нестабильными характеристиками и необходимостью ввода разного рода добавок;
- неудовлетворительные результаты сжигания ВУТ в камерной топке котла большой мощности из-за низкого ресурса работы сопел форсунок (менее 40 часов),
- необходимость постоянной подсветки факела и наличие значительного недожога топлива (более 15%).

Отметим некоторые несомненные достоинства ВУТ:

- появляется возможность частичной или полной замены дорогостоящего мазута;
- исключается взрывоопасность;
- появляется возможность транспортировать его по трубопроводам на дальние расстояния;
- уменьшаются эксплуатационные затраты на хранение, транспортирование и сжигание по сравнению с углем на 20–30%;
- в зависимости от соотношения цен на газ и уголь снижается себестоимость единицы вырабатываемой тепловой энергии в 1.5–5.0 раз;
- увеличивается степень выгорания горючей массы до 95–99%, что намного превышает этот показатель при сжигании рядового угля в слоевой топке;
- возрастает КПД котлов до 80–85%, и, тем самым обеспечивается высокая экономичность малых паровых и водогрейных котлов;
- упрощается процедура автоматизации управления процессами сжигания угля в котлах;
- решается ряд экологических проблем, в частности, снижаются вредные выбросы оксидов азота, монооксида углерода, частиц летучей золы.

На данном этапе основной задачей в доведении технологии ВУТ до широкого практического использования является: совершенствование методов измельчения угля с целью получения высокореакционного стабильного пластичного топлива с минимально возможным содержанием воды; разработка высокоэффективных топочных устройств; поиск рентабельных схем размещения теплогенерирующих станций и узлов подготовки ВУТ.

При существующих обстоятельствах наиболее востребованной на применение водоугольных технологий является малая энергетика (отопительные котельные, котлы производственного назначения, объекты ЖКХ), так как здесь меньше инвестиционные риски и капитальные затраты на реконструкцию, приемлемые сроки окупаемости. Технико-экономические оценки показывают, что в условиях Сибири замена газа, мазута, угля в многочисленных мелких промышленных котельных и ЖКХ на ВУТ с их одновременной модернизацией весьма перспективна.

Только в Сибирском федеральном округе общее количество мелких котлов (преимущественно угольных) составляет более 25000 единиц. Большинство из них находится в неудовлетворительном состоянии, имея КПД на уровне 45–50 %. Результаты обследования котельных Кузбасса в 2007 году показали, что фактический расход угля (Кузнецкий – марки D, $Q_p^н$ = 5220 ккал/кг) составляет 420-717 кг/Гкал вместо нормативных 200 кг/Гкал. Модернизация таких котельных с внедрением ВУТ может повысить КПД котельной установки до уровня 80–85 %, экономия топлива при этом составит 30-50 %.

Учитывая, что далеко не все научные и практические проблемы приготовления и сжигания ВУТ решены, должен быть продолжен поиск усовершенствованных и более эффективных инновационных ВУТ-технологий. Актуальными при этом остаются разработка модульных водоугольных топливных систем, а также получение реологических свойств продукта, позволяющих надежно транспортировать, хранить, распылять и сжигать его в топочных устройствах.

ВОДОУГОЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИТ СО РАН И ООО «ТЕПЛОПРОМ»

В течение последних 5 лет совместными усилиями Института теплофизики СО РАН и ООО «ТеплоПром» проработаны и реализованы в опытно-промышленном варианте все основные компоненты модульной технологии подготовки, хранения и сжигания ВУТ применительно к использованию в малой промэнергетике.

Технология приготовления ВУТ является двух-стадийной. На первом этапе производится измельчение угля с применением ШБМ и/или дезинтегратора, и на втором этапе - полученную ВУС подвергают кавитационной обработке. В тех случаях, когда в качестве исходного продукта для приготовления ВУТ используются отходы углеобогащения с крупностью частиц угля до 1мм, число операций может быть уменьшено до одной, и технология приготовления ВУТ сводится к кавитационной обработке шлама. Для этих целей нами использован роторный генератор кавитации [6].

Схема генератора показана на рис.1, а фотография действующего устройства представлена на рис.2. В генераторе используется явление возникновения пузырьковой кавитации в гидродинамическом следе за плохо обтекаемым телом.

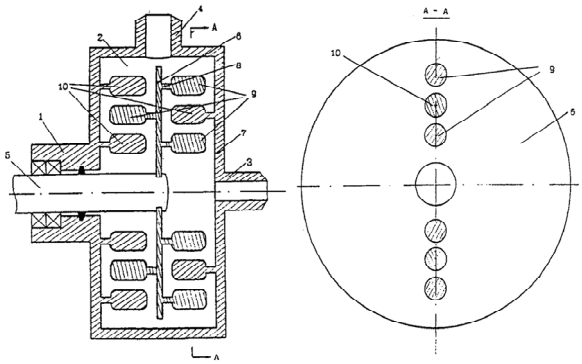

Рис.1. Схема генератора кавитации.

Важно отметить, что в данном генераторе кавитация возбуждается в объеме жидкости, а не на стенках аппарата, благодаря чему генератор имеет высокую производительность, а стенки аппарата не подвержены кавитационному разрушению.

Кавитационная обработка на этом генераторе угольных суспензий с крупностью частиц угля до 500мкм (полученной, например, в результате измельчения угля на шаровой барабанной мельнице), позволяет получить ВУТ с размером твердых частиц до 200 - 250мкм и менее при затратах энергии порядка 20 кВт/т. При этом кавитация наиболее эффективна в области малых размеров частиц. Как показывают опыты, содержание частиц с размерами до 10мкм увеличивается до 20- 30% (см. рисунок 3). А такое ВУТ за счет существенного увеличения суммарной поверхности частиц угля лучше горит, а также оно обладает более высокими реологическими и седиментационными свойствами. ВУТ после кавитационной обработки в покое имеет

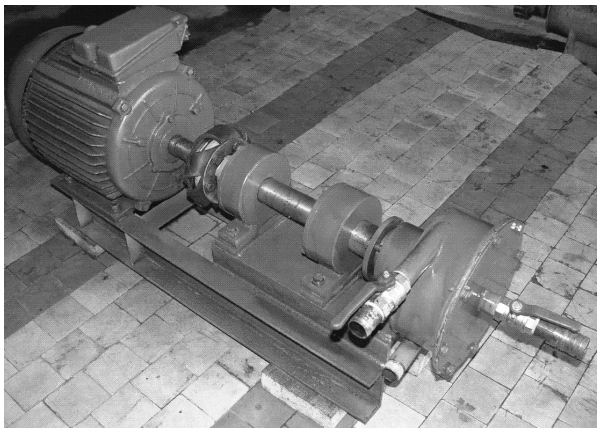

Рис.2. Фотография генератора кавитации

достаточно высокую вязкость (рис.4) и не расслаивается даже без применения пластификаторв в течение 30 дней и более. Однако при появлении сдвиговых напряжений вязкость ВУТ резко падает и с ростом их остается практически постоянной на уровне 500-1000 сП. Применение пластификаторов позволяет облегчить измельчение угля и повысить пластичность топлива.

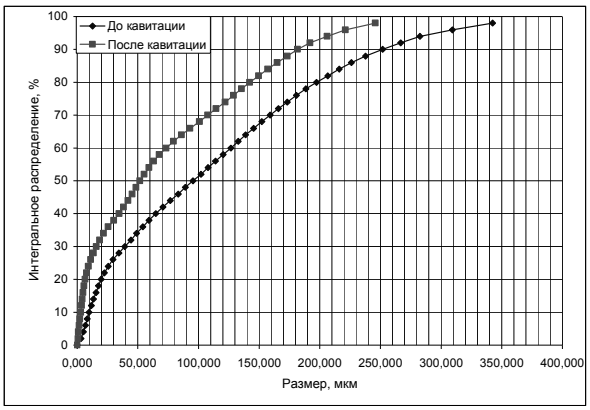

Рис.3. Гранулометрический состав ВУТ, приготовленного из антрацита 0-1 (шлам), до и после обработки на генераторе кавитации.

Технология сжигания ВУТ. Водоугольное топливо (ВУТ) содержит более 30% воды и вопрос выбора топочного устройства для сжигания такого топлива исключительно важен. ВУТ, в виде капель

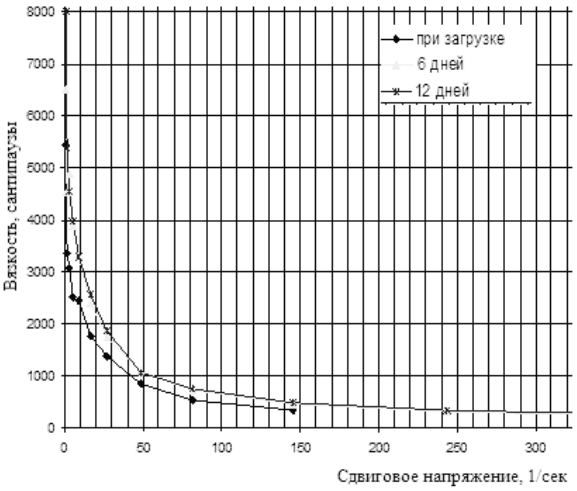

Рис.4. Изменение со временем вязкости ВУТ, приготовленного из антрацита (АСШ) путем измельчения на ШБМ и кавитационной обработки.

попавшее в топку, должно пройти стадию испарения воды и сушки частиц угля, воспламенения угля и, наконец, его горения.

Реактор, предназначенный для сжигания ВУТ,

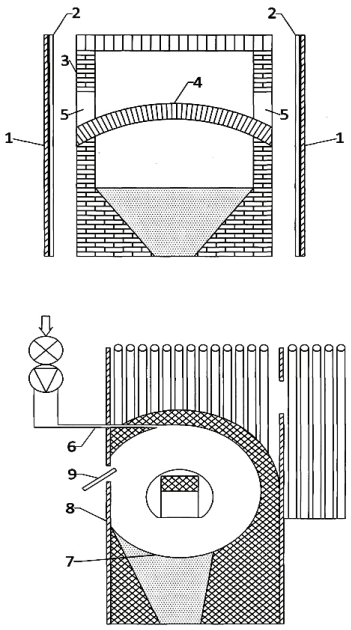

Рис.5. Принципиальная схема топочного устройства

должен обеспечивать достаточно большое время пребывания частиц топлива в камере горения, интенсивное перемешивание топлива и окислителя и поддерживать достаточно высокую температуру во всем объеме камеры горения.

Авторами предложено и опробовано топочное устройство в виде муфельной вихревой камеры, ориентированное на сжигание ВУТ в котлах малой и средней мощности (рис.5).

Главной отличительной особенностью этой топки является кольцевая форма камеры горения. За счет выбора конструкции топки, мест установки пневматических топливных форсунок и сопл подвода вторичного воздуха, в топках организован вихревой воздушно-капельный поток, что обеспечивает максимальную продолжительность по времени нахождения капель топлива в факеле, а это, в свою очередь, гарантирует полноту выгорания ВУТ. Факел заполняет весь объем камеры горения, благодаря чему в топке поле температур является в высокой степени однородным, а максимальная температура в камере понижена. Таким образом, имеет место низкотемпературный топочный процесс, что приводит к сниженному выходу токсичных газовых выбросов, в частности, оксидов азота.

Важным звеном в технологии сжигания ВУТ является выбор форсунки. Несмотря на высокую дисперсность частиц угля и кажущуюся

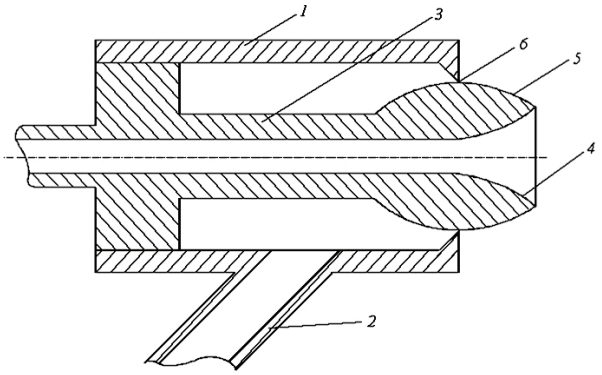

Рис.6. Схема форсунки

пластичность суспензии, ВУТ является высокоэрозионным продуктом. Попытки использования для распыливания ВУТ известных горелочных устройств, в которых, как правило, разгон газожидкостной смеси производится внутри специальных камер, показали малый ресурс работы форсунок. Авторами для ВУТ разработана новая оригинальная конструкция пневматической форсунки [11,14]. Схема форсунки показана на рис.6.

Струя газа, вытекающая из сопла 6, не отрываясь от стенок в силу эффекта Коанда, движется вдоль сходящейся наружной стенки насадки 5 и образует за пределами форсунки сходящийся струйный газовый поток. В результате столкновения струй образуется основное струйное течение вдоль оси форсунки и возвратная струя типа кумулятивной.

По трубе *3* в зону распыливания подается

рабочая жидкость. Благодаря тому же эффекту Коанда, жидкость на выходе из трубы имеет тенденцию прилипать к стенкам диффузного сопла и растекаться вдоль них тонкой струей. Однако процесс этот не является устойчивым и при отсутствии газового потока жидкость иногда вытекает сосредоточенной струей, примыкая к стенкам диффузора 4 то в одном, то в другом месте. Высокоскоростная возвратная струя газа, внедряясь в жидкостную струю вдоль ее оси, нарушает целостность струи и заставляет жидкость равномерно распределяться тонкой струей по стенкам диффузора 4. При этом возвратная газовая струя после соударения с жидкостной струей еще раз изменяет свое направление на обратное, растекаясь вдоль стенок диффузора и ускоряя поток жидкости, а в пространстве, ограниченном основной газовой струей и стенками диффузора 4, формируется тороидальный вихрь. В результате взаимодействия жидкостной конической струи и газового потока на выходе из диффузора 4 образуется газокапельный поток. Часть мелких капель жидкости попадает в возвратную газовую струйку. При этом капли увеличивают среднюю плотность потока по сравнению с чистым газом, и эффективность возвратной струйки как разрушителя сосредоточенной струи жидкости увеличивается.

Как уже было отмечено, взаимодействие газовой и топливной струй происходит за пределами форсунки. Скорость движения ВУТ вдоль стенок форсунки сравнительно невелика. Поэтому абразивное разрушение стенок форсунки практически отсутствует.

На основе полученных наработок на «Заводе стеновых блоков» созданы три теплогенерирующие установки мощностью 1.5 МВт, 3 МВт и 7 МВт соответственно (последняя - на базе Бийского котла КЕ 10-13).

При запуске котлов первичный разогрев топки производится за счет сжигания дизельного топлива, подаваемого в топку через те же пневматические топливные форсунки. По достижении температуры в топке на уровне 400-450°С, в топку дополнительно подается ВУТ. Со временем, по мере повышения температуры, доля дизельного топлива уменьшается до нуля, а доля ВУТ увеличивается, и котел выводится на расчетный режим работы на ВУТ без какой-либо подсветки. Эксплуатация котлов показывает, что на всех использованных нами углях (антрацит, угли марки Г и Д, отходы углеобогащения и др.) удается поддерживать устойчивую работу котлов при температурах 800-1200°С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- организован мокрый помол угля на модернизированной шаровой барабанной мельнице;
- разработан гидродинамический генератор кавитации, позволяющий повысить дисперсность угля и увеличить химическую активность ВУТ;
- подобраны пластификаторы, позволяющие получить высокореактивные пластичные ВУТ с концентрацией угля порядка 60-70 %, сохраняющие устойчивое состояние свыше 30 дней;
- созданы специализированные топочные устройства, осуществляющие сжигание ВУТ в вихревом потоке;
- разработаны специальные распылительные устройства (форсунки) для ВУТ;
- создан вычислительный комплекс программ по расчету топочных процессов при сжигании ВУТ в модернизированных котлах.

Построены три пилотные котельные установки мощностью 1.5, 3 и 7 МВт, ориентированные на сжигание ВУТ и оснащенные автоматизированными системами сбора информации и управления работой котла.

Полученные результаты 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 50 % топлива в неэффективно работающих котельных, сократить расходы качественных топлив (уголь, топочный мазут, природный газ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные результаты исследований водоугольного топлива и перспективы его использования / А.М. Хидиятов, В.И. Бабий, К.В. Агапов, Л.И. Дубовцев, А.Я. Клобертанц, В.С. Полиградов и др. // Развитие технологий подготовки и сжигания топлива на электростанциях. Сб. ст.: под ред. А.Г. Тумановского, В. Котляра. - М.: ВТИ, 1996.

2. Зайденварг В.Е., Трубецкой К.Н., Мурко В.И., Нехороший И.Х. Производство использование водоугольного топлива. - М.: Изд-во Академии горных наук, 2001.
3. Концепция и результаты стендовых испытаний двухступенчатого сжигания водоугольного топлива с кипящим слоем в первой ступени / И.В. Листратов, Ю.Н. Дубинский, В.В. Антошкин, Е.Г. Карпов // Сб. науч. тр. Шестой Всеросс. конф. горения твердого топлива / Новосибирск, ИТФ СОРАН. - 2007.
4. Делягин Г.Н., Петраков А.П., Ерохин С.Ф. «ЭКОВУТ» - новое технологически чистое топливо нового поколения. Сб. тр. ВТИ. - М.,2001.
5. Овчинников Ю.В., Луценко СВ. Технико-экономическая эффективность использования ВУТ-ИКЖТ.
6. Энергосистемы, электростанции и их агрегаты. Сб. науч. тр. / Под общ. ред. академика В.Е. Накорякова. - Выпуск № 10. - Новосибирск: Издательство НГТУ. - 2007.
7. Трубецкой К.Н., Зайденварг В.Е., Кондратьев А.С. и др. Водоугольное топливо – результаты разработки и перспективы применения в России // Ж. Теплоэнергетика. № 5. 2008. С.49-52.
8. Патент РФ № 2115176 от 26.03.97 г. «Генератор кавитации».
9. Патент РФ № 2346733 20.02.2009г. «Генератор кавитации».
10. Патент РФ № 2389948 от 20.05.2010
11. «Устройство для сжигания водоугольного топлива».
12. Патент РФ № 2389945 от 20.05.2010. «Топочное устройство для сжигания жидкого топлива».
13. Патент РФ № 2346756 от 15.05.2007 . «Пневматическая форсунка»
14. Патент РФ № 2390386 от 27.05.2010г. Пневматическая форсунка.
15. Алексеенко С.В., Мальцев Л.И., Саломатов В.В., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е. Топочное устройство для сжигания водоугольного топлива // Сб. докл. VII Всероссийской конф. с межд. участием «Горение твердого топлива». Новосибирск, Россия, 10-13 ноября. - 2009. - Ч. 2. – С. 4 -7.
16. Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е. Пневматическая форсунка для распыливания ВУТ // Сб. докл. VII Всероссийской конф. с межд. участием «Горение твердого топлива». Новосибирск, Россия, 10-13 ноября. - 2009. - Ч. 2. – С. 83-88.
17. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Мальцев Л.И., Тэпфер Е.С. Моделирование сжигания ВУТ в топочной камере // Сб. докл. VII Всероссийской конф. с межд. участием «Горение твердого топлива». Новосибирск, Россия, 10-13 ноября. - 2009. - Ч. 1. – С. 227-233.