

УДК 662.65+662.61

## **НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ В КИПАЮЩЕМ СЛОЕ ВУТ ИЗ БЕЛОРУССКИХ БУРЫХ УГЛЕЙ**

*Бородуля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М.*

*Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск*

Устойчивое развитие топливно-энергетического комплекса Беларуси тесно связано с эффективным использованием низкосортных местных бурых углей с повышенной зольностью и влажностью, при сжигании которых возникают проблемы с воспламенением и поддержанием устойчивого горения, а также с экологией. Поэтому актуальной является задача улучшения их потребительских свойств как энергетического топлива.

Известен ряд технологий преобразования углей в так называемые экологически чистые, эксплуатационно-удобные виды топлива – газообразное и жидкое. Однако в их подавляющем большинстве используются сложные процессы термической или химической переработки с большими капитальными вложениями и повышенными требованиями к эксплуатации.

Поиски новых решений в направлении получения из низкосортных твердых топлив более удобных для использования энергоносителей, обладающих относительно невысокой стоимостью, объективно привели к созданию топливных дисперсных систем вода – мелкодисперсный уголь – химические добавки. Водугольное топливо (ВУТ) представляет собой единую структурированную дисперсную систему, которая содержит до 60–70% твердой фазы, состоящей из частиц микронных (45–200 мкм) фракций органических и минеральных компонентов угля, от 30 до 40% воды, а также, если необходимо – нерастворимые в воде химические присадки (1%) [1-5].

Свойства ВУТ хорошо согласуются с требованиями и преимуществами технологии кипящего слоя (КС). Прежде всего следует отметить такие качества ВУТ [6]:

- возможность использования в качестве топлива как энергетических, так и низкосортных углей;
- обеспечение жестких экологических требований к уровню выбросов оксидов серы и азота с продуктами сгорания;
- снижение избытка воздуха в топочном процессе, поскольку содержащаяся в ВУТ вода выполняет функцию промежуточного окислителя;
- содержание при необходимости добавок, стабилизирующих свойства и реологические характеристики ВУТ, а также связывающих образующийся диоксид серы;
- рациональное использование угольной мелочи, которая обычно составляет значительную часть добываемого угля и отходов углеобогащения;
- отклонения от заданного качества ВУТ по зольности и влажности в результате изменения характеристик исходного угля или в процессе приготовления не влияют на автотермичность режима горения ВУТ в кипящем слое.

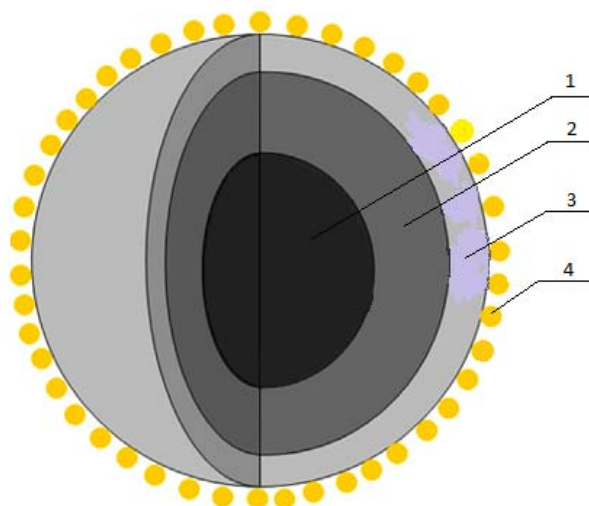
Изучена возможность получения водоугольного топлива на основе белорусских бурых углей перспективных месторождений (таблица), а также некоторые особенности его сжигания в топочных устройствах с кипящим слоем.

Таблица

Основные качественные характеристики исходных топлив [7]

Показатель	Лельчицкое углепроявление	Бриневское месторождение	Антрацитовый штыб (Украина)
Зольность, %	24,3	20,0	27,3
Влажность естеств., %	13,0	55,0	4,8
Выход летучих веществ, % на органическое вещество	43,8	60,0	6,3
Элементарный состав, % на органическое вещество:			
углерод	69,0	64,0	-
водород	4,7	6,0	-
азот	1,1	0,7	-
сера	2,0	1,0	-
кислород	23,0	28,0	-
Низшая рабочая теплота сгорания, кДж/кг	17179	8380	22618

ВУТ было получено с использованием технологии ИТТФ НАН Украины, представляющей собой двухстадийный помол угля, на первой стадии которого в вихревой камере осуществляется сухое измельчение его крупностью от 2–3 мм до 10–30 мкм, а на второй стадии в кавитационном диспергаторе – “мокрое” дробление с образованием частиц топлива со средним размером 6–10 мкм и смешивание с водой. Кавитационная обработка способствует деструкции молекул угля с образованием свободных радикалов, а в воде образуются атомарный водород, перекись водорода, вода в возбужденном состоянии и другие компоненты, способствующие созданию активной дисперсионной среды [8].



1 – область, заполненная водой (область исходного топлива); 2 – область, заполненная паром; 3 – область, заполненная паром и летучими; 4 – частицы материала слоя (инерт)

Рис. 1 – Модель горения капли ВУТ в кипящем слое

кул угля с образованием свободных радикалов, а в воде образуются атомарный водород, перекись водорода, вода в возбужденном состоянии и другие компоненты, способствующие созданию активной дисперсионной среды [8].

Объединив преимущества технологии получения ВУТ и сжигания в кипящем слое, появляется возможность улучшить показатели теплоэнергетического оборудования.

Проведено математическое моделирование процесса горения капли ВУТ (рис.1) и выполнена качественная оценка реальных процессов, протекающих при ее горении в КС. С помощью модели рассчитана длительность основных стадий термической подготовки и горения ВУТ. Как

показано, продолжительность предварительных стадий прогрева капли ВУТ и испарения влаги составляет соответственно несколько секунд и несколько десятков секунд. Время горения коксового остатка значительно превосходит длительность предшествующих стадий и может достигать нескольких десятков минут. Специфической особенностью горения ВУТ является более низкая температура воспламенения, которая ниже аналогичной температуры для обычного пылеугольного топлива.

Для экспериментального исследования процесса горения ВУТ использовался универсальный стенд с кипящим слоем, основным элементом которого является камера сжигания КС с внутренней циркуляцией дисперсного материала. Она представляет собой цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром  $D = 55$  мм. Газораспределительная решетка изготовлена из шамотного кирпича толщиной 1,5 см, зажатого между двойными слоями жаростойкой сетки с ячейкой 0,5 мм. Высота рабочей зоны над решеткой составляет 0,5 м. На газораспределительной решетке располагается кипящий слой инертного дисперсного материала (кварцевый песок,  $d = 0,25$  мм, кажущаяся плотность  $\rho = 2540$  кг/м<sup>3</sup>). Температура КС измеряется с помощью хромель-алюмелевой термопары с открытым спаем (диаметр электродов 0,5 мм, изоляция – двухканальная керамическая соломка, помещенная в жаропрочную металлическую трубку). Камера сжигания снабжена наружным электронагревателем в виде нихромовой спирали, покрыта тепловой изоляцией из каолина и стекловаты и помещена в защитный металлический кожух, что обеспечивает минимальные потери тепла из установки. Мощность нагревателя регулируется вручную. Для измерения вертикального профиля температуры термопара перемещается по высоте кипящего слоя.

Кипящий слой создается за счет псевдооживления мелкозернистого кварцевого песка воздухом, подаваемым с помощью компрессора. Для визуального наблюдения за поверхностью кипящего слоя и процессом горения в нем топлива на выходе из камеры сжигания закреплено зеркало.

Экспериментально на лабораторном стенде с КС подтверждена рассчитанная по моделям последовательность и продолжительность стадий горения в кипящем слое образцов ВУТ, приготовленных из разных по своим теплофизическим свойствам твердых топлив: белорусских бурых углей и антрацитового штыба.

Исследованы особенности взаимодействия водоугольного топлива с материалом кипящего слоя. Показано, что при падении капли ВУТ на слой происходит несимметричное ее разрушение, характер которого зависит как от температуры слоя, так и от влажности суспензии (рис. 2). В большинстве случаев происходит образование куска объемом до 50% от исходной капли и множество мелких осколков.

Увеличение температуры кипящего слоя, с одной стороны, ускоряет подсушку поверхности, что приводит к образованию корочки, препятствующей разрушению капли, а с другой – чрезмерная интенсификация процесса испарения влаги повышает вероятность разрыва капли за счет увеличения давления внутри нее. В случае высококонцентрированных ВУТ разрушение капли практически не происходит, что способствует уменьшению уносимых из слоя мелких частиц.



Рис. 2 - Фотография агломератов КаВУТ на основе лельчицкого бурого угля (уголь – 50%, вода – 50%), извлеченных из кипящего слоя в процессе горения.

Экспериментально исследована зависимость продолжительности горения капли ВУТ от используемого твердого топлива и температуры слоя. Стадии прогрева, испарения влаги и выхода летучих не рассматривались из-за сложности их определения, а также вследствие незначительной продолжительности. Показано, что длительность стадии горения ВУТ из антрацита на порядок превышает длительность горения для ВУТ из бриневского бурого угля. Это объясняется тем, что исходные твердые топлива характеризуются высокой пористостью и соответственно высокой внутренней влажностью, достигающей 55–60%, т. е. уже начальная влажность сухого на вид топлива превышает влажность ВУТ из антрацита. Водугольное топливо из более качественного бурого угля Лельчицкого месторождения отличается устойчивым процессом горения, продолжительность горения капли в два раза выше, чем у ВУТ из бриневского угля. Повышение температуры кипящего слоя от 800 до 900°С сокращает продолжительность процесса горения исследуемых ВУТ на 8–11 с.

Экспериментально изучены температурные и временные зависимости содержания оксидов серы, азота и углерода в газообразных выбросах при сжигании водугольного топлива на основе белорусских бурых углей в кипящем слое. Показано, что оптимальная температура слоя, при которой наблюдается минимальное количество выбросов диоксида серы, равняется 800–850 °С, монооксида углерода – 850–900 °С. Наблюдается некоторое повышение содержания диоксида серы в продуктах сгорания ВУТ из лельчицкого угля, что объясняется более высоким содержанием серы – 2% против 1% у бриневского бурого угля.

Установлено, что во время горения капель ВУТ повышение температуры слоя приводит к снижению выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  за счет формирования восстановительной среды с повышенным содержанием монооксида углерода и водорода, образующихся при газификации углерода. При этом на начальных

стадиях горения (через 5–15 с после подачи ВУТ в кипящий слой) наблюдается максимум выбросов  $\text{NO}_x$ . Наличие такого экстремального характера связано с преобладающей ролью реакции восстановления  $\text{NO}_x$ .

Подтверждается противоположная тенденция в закономерностях выбросов оксидов серы и азота в зависимости от температуры (рис.3), характерная для твердых топлив (уголь, горючие сланцы). Наибольшие выбросы оксидов серы и азота имеют место на начальной стадии горения ВУТ (10–15 с) [9].

Исследована принципиальная возможность самостоятельного – без дополнительной подсветки – горения ВУТ в кипящем слое. Наиболее удовлетворительные результаты получены для высококонцентрированных ВУТ на основе антрацита и бурого угля Лельчицкого месторождения, который по своим качественным характеристикам близок к каменным углям. Так, с образцами ВУТ из антрацита при расходе 1 мл/мин наблюдался устойчивый процесс горения в течение 30–40 мин, с образцами из лельчицкого бурого угля – от 20 до 30 мин.

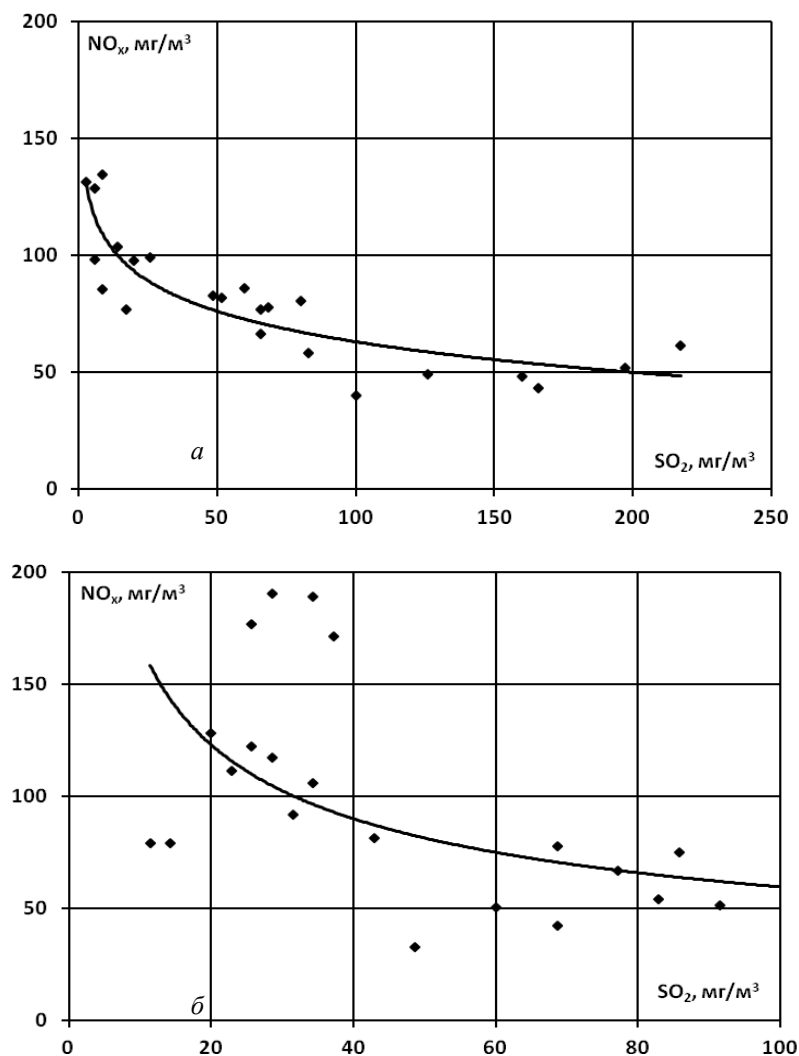


Рис. 3. Взаимосвязь выхода оксидов азота и серы при сжигании ВУТ на основе лельчицкого (а) и бриневского (б) бурого угля через 30 с после подачи ВУТ в слой

Рассмотрена концепция эффективного использования белорусских бурых углей путем получения ВУТ с его последующим сжиганием в топке кипящего слоя. Запасы бурого угля в Беларуси позволяют организовывать приготовление и использование ВУТ в местах его добычи. При этом можно избежать затрат на специальные меры по повышению стабильности ВУТ и его транспортировку. Получаемое энергетическое топливо дает возможность существенно улучшить теплотехнические и экологические показатели процесса его сжигания [10].

Следует отметить, что технология производства ВУТ не предполагает использования термических и химических методов обработки углей и воды. Это делает его конкурентоспособным на рынке энергоносителей. При непосредственном использовании ВУТ в топках кипящего слоя не требуется его специальной подготовки перед сжиганием, наблюдается повышение устойчивости и стабильности горения топлива, снижение вредных выбросов в окружающую среду.

### Литература

1. Делягин Г.Н., Петраков А.П., Головин Г.С., Горлов Е.Г. Водные дисперсионные системы на основе бурых углей как энергетическое и технологическое топливо // Рос. хим. журн. 1997. № 6. С. 72–77.
2. Долинский А.А., Халатов А.А. Водоугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе // Пром. теплотехника. 2007. Т.29, № 5. С.70–79.
3. Мурко В.И. Опыт разработки и внедрения водоугольного топлива в России // Энергосбережение (Украина). 2003. № 10. С.17–21.
4. Мингалеева Г.Р., Нигматуллин Р.М., Шамсутдинов Э.В. Перспективы использования водоугольного топлива в России // Тр. академэнерго. 2009. № 1. С. 83–95.
5. Савицкий Д.П., Егурнов А.И., Макаров А.С., Завгородний В.А. Жидкое топливо на основе угольных шламов и бурого угля // Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2009. № 1. С. 13–16.
6. Листратов И.В., Ашуров Ф.М., Живлюк Н.Ю. и др. Опыт создания и промышленной эксплуатации установки с топкой кипящего слоя на водоугольном топливе // Пром. энергетика. 2005. № 1. С.22-25.
7. Лиштван И.И. Угли месторождений Беларуси и направления их комплексного использования // Энергоэффективность. 2011. №5. С. 9–13.
8. Халатов А.А., Хлебников О.Е., Шихабутдинова О.В. Получение водоугольного топлива на основе кавитационно-вихревой технологии // Сб. тез. докл. междунар. науч.-практ. конф.: Энергоэффективность (19–21 октября 2010 г.). Киев, 2010. С. 113–115.
9. Бородуля В.А., Виноградов Л.М., Дикаленко В.И., Дроздов В.Н. Комплексное решение экологических и ресурсосберегающих задач при сжигании низкосортных твердых топлив в кипящем слое // Сибирский физико-технический журнал. 1991. Вып. 5. С. 37–41.
10. Бородуля В.А., Виноградов Л.М. Перспективы водоугольного топлива в теплоэнергетических установках с кипящим слоем // Энерго- и материалосберегающие экологически чистые технологии. Гродно. 2010. ч.І. С 69–77.