

УДК 662.61 : 532.584 : 662.66

Долинский А.А., Халатов А.А.

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

## ВОДОУГОЛЬНОЕ ТОПЛИВО: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ СЕКТОРЕ

Наведено стислий огляд застосування водовугільного палива у теплоенергетиці та житлово-комунальному секторі. Розглянуто основні властивості такого палива, особливості його горіння, виробництва та застосування. Сформульовано пропозиції з використання водовугільного палива в Україні.

Дается краткий обзор применения водугольного топлива в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе. Рассмотрены основные свойства такого топлива, особенности его горения, производство и применение. Сформулированы предложения по использованию водугольного топлива в Украине.

The brief survey of the coal-water fuel application in the thermal engineering and municipal-housing heating services is given. The main fuels properties, combustion process, specific features are presented along with production and application of the coal-water fuel. Some proposals are given to apply the coal-water fuel in the Ukraine.

Украина испытывает серьезный дефицит энергоносителей, в частности природного газа и нефти, запасы которых в Украине весьма ограничены. По потреблению природного газа (около 80 млрд м<sup>3</sup>/год) страна занимает шестое место в мире, при этом около 45% потребляемого газа приходится на промышленность и коммунально-бытовую сферу (ЖКХ). Что касается ЖКХ Украины, то структура его топливного баланса такова, что природный газ в нем играет доминирующую роль и составляет почти 80% от суммарного топливопотребления в отрасли.

Одним из главных направлений модернизации системы жилищно-коммунального сектора Украины является переход на использование альтернативных топлив, которые могли бы заменить постоянно дорожающий природный газ, поступающий из России и Туркменистана. В настоящее время рассматриваются несколько вариантов использования альтернативных топлив в системе ЖКХ Украины, причем одним из основных считается переход на широкое использование водугольного топлива (ВУТ).

### **Водугольное топливо**

Создание водугольного топлива является дальнейшим развитием технологии водугольных суспензий, которая была разработана в Рос-

сии еще в 50...60 гг. прошлого века для сжигания обводненной угольной “мелочи”. Водугольное топливо представляет собой дисперсную систему (вода-мелкодисперсный уголь-химические добавки), в которой в качестве горючей основы используются энергетические и неэнергетические угли.

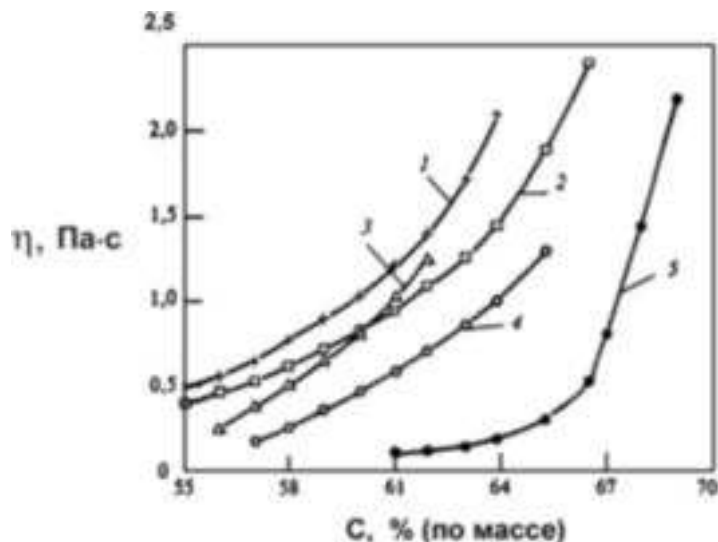
Идея использования водугольного топлива взамен нефтепродуктов получила активное распространение в начале 70-х годов прошлого века в Китае, Японии, Швеции, США и других странах во время мирового “нефтяного кризиса”. В настоящее время наибольший размах получили работы по ВУТ в Китае и Японии. В мегаполисах Китая уже запрещены строительство и эксплуатация котельных, работающих на твердом угле, а Государственной программой Правительства Китая предусмотрен поэтапный перевод предприятий с нефтегазового на водугольное топливо. Сегодня тематикой ВУТ в Китае занимаются три исследовательских центра, создан Государственный центр водугольных технологий. Если в 2001 г. в Китае ежегодно производилось и потреблялось более 2 млн тонн ВУТ, то в 2006 г. — уже около 15 млн тонн, что равноценно производству 10...12 гигаватт электрической энергии. К 2020 г. производство ВУТ в Китае планируется довести до рекордной цифры — 100 млн тонн в год [1].

В России первые исследования по проблеме водугольных суспензий и водугольного топли-

ва были выполнены в 50-х годах прошлого века, но в дальнейшем они были практически прекращены в связи с открытием богатых месторождений природного газа в различных регионах страны. Интерес к тематике ВУТ вновь появился в 70-х годах прошлого века после визита советской правительственной делегации в Италию, где проводились активные работы по тематике водоугольного топлива. В то время водоугольное топливо рассматривалось как реальная и легкодоступная замена нефтепродуктам. После визита делегации были развернуты широкие научные исследования, которые проводились в Институте горючих ископаемых Академии наук СССР, во ВНИИгидроуголь и КузНИИУглеобогащения. В течение нескольких лет был спроектирован и в 1989 г. введен в строй в г. Белово (Кузбасс) опытно-промышленный комплекс, включающий терминал производства ВУТ (шахта “Инская”) производительностью 400 тыс. тонн в год, трубопровод длиной 262 км и терминал приема и сжигания ВУТ на ТЭЦ-5 в г. Новосибирске. К сожалению, этот промышленный эксперимент не был доведен до конца, трубопровод был остановлен в летнее время в период профилактики ТЭЦ-5, но затем по ряду причин не был запущен. Тем не менее, этот опыт подтвердил оптимистические надежды на возможность использования водоугольного топлива в энергетике, теплоэнергетике и других приложениях.

Водоугольное топливо содержит 60...70% тонкоизмельченного угля размером 45...250 микрон, 30...40% воды и 1% химического реагента-пластификатора (поверхностно-активного вещества), вводимого для повышения прочности (реакционной способности) системы “жидкость— твердая фаза”. Температура воспламенения ВУТ составляет 450...650 °С, температура горения — 950...1050 °С, а степень выгорания топлива — до 99,5%. Такие благоприятные для горения условия способствуют существенному снижению в продуктах сгорания окислов азота (в 1,5...2 раза), окиси углерода (в 2 раза) и бенз(а)пирена (в 5 раз).

Водоугольное топливо может производиться из антрацитов, каменных и бурых углей различных марок и зольности, воды любого качества, включая шахтные и промышленные воды. Одной из важнейших характеристик топлива с точки



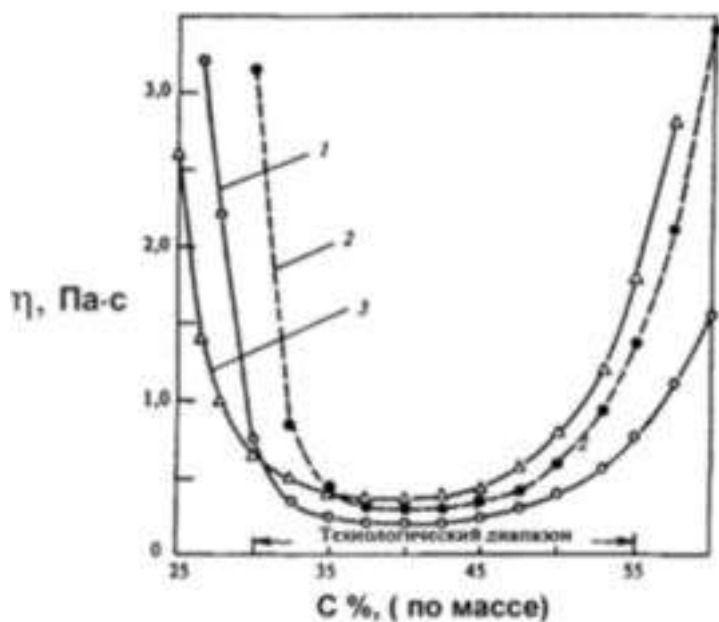
**Рис. 1. Зависимость эффективной вязкости водоугольного топлива  $\eta$  от содержания в нем мелкодисперсного угля шахты “Инская” (Кузбасс, Россия) [1].**

**1-3 — зольность угля 13,5%: 1 — одностадийная технология без гомогенизации; 2 — двухстадийная без гомогенизации; 3 — двухстадийная с гомогенизацией; 4 — обогащение угля до зольности 7%, двухстадийная технология с гомогенизацией; 5 — из обогащенного угля оптимального бимодального гранулометрического состава.**

зрения его хранения, транспортировки и сжигания является его динамическая стабильность. Однако она не имеет принципиального значения в случае использования водоугольного топлива на месте изготовления или поблизости от него.

### **Свойства водоугольного топлива**

При одинаковых теплоте сгорания, зольности, минералогическом составе, исходной влажности и одинаковых затратах на приготовление качество водоугольного топлива характеризуется его реологическими свойствами — динамической вязкостью и стабильностью [1, 2]. Стремление к созданию ВУТ с максимальным содержанием твердой фазы (угля) приводит к резкому увеличению его динамической вязкости (рис. 1). Вязкость ВУТ можно уменьшить введением химических реагентов (поверхностно-активных веществ — ПАВ) при оптимальном сочетании дисперсантов и стабилизаторов, а также подбором грануломет-



**Рис. 2.** Влияние относительной доли “тонкой” фракции угля (менее 60 мкм) на эффективную вязкость водоугольного топлива  $\eta$  с содержанием угля 63,5% [1].

1, 2 – крупная фракция (125...250 мкм):  
1 – свежеприготовленная, 2 – она же через 7 сут.;  
3 – крупная фракция (125...250 мкм) с 5 % частиц менее 125 мкм.

рического состава угольных частиц. Зависимость вязкости от содержания “тонкой” фракции и химических добавок имеет, как правило, экстремальный характер (рис. 2), что являясь типичным для водоугольного топлива, приготовленного из различных марок угля [1]. В соответствии с рекомендациями [1] при использовании в угольных ТЭС вязкость ВУТ не должна превышать 1,0 Па·с, а при применении в котельных – 0,6 Па·с.

Снижение динамической вязкости ВУТ за счет использования ПАВ является достаточно дорогим мероприятием, поскольку сегодняшняя стоимость ПАВ практически соизмерима со стоимостью исходного сырья (угля). Как сообщается, в Институте физико-органической химии и углехимии НАН Украины разработаны новые технологии получения ПАВ, сырьем для которых служит бурый уголь, запасы которого в Украине значительны. Главными достоинствами разработанных ПАВ являются высокая эффективность регулирующего действия, абсолютная термостойкость, простая технология и низкая стоимость.

### Особенности горения водоугольного топлива

Механизм горения водоугольного топлива и пылевидного сухого угля существенно различны. При сжигании пылеугольного топлива вследствие высокой степени измельчения частицы угля и минеральных компонентов отделены друг от друга. Наличие негорючих твердых частиц и влаги оказывают определяющее влияние на интенсивность подвода кислорода к поверхности горящей угольной частицы. Выгорание капли водоугольной суспензии, каждая из которых содержит до 400 пылинок угля, характеризуется следующими стадиями термической подготовки, воспламенения и горения.

Первая стадия – испарение влаги с поверхности капли при постоянной температуре. Конец этой стадии характеризуется началом “спекания” частиц угля на поверхности. Вторая стадия характеризует проникновением поверхности испарения вглубь частицы, перегреву водяных паров во внутренней области и активации поверхности частиц угля. Около поверхности формируется пористый поверхностный слой, внутри частицы растет давление пара, что ведет к увеличению ее объема. К концу второй стадии частица угля представляет собой пористое тело, поверхность которого пронизывается струями водяного пара из внутренней области. Первая и вторая стадии являются подготовительными к процессу воспламенения.

Третья стадия соответствует началу воспламенения частицы и характеризуется резким увеличением ее температуры. В этот период происходит выгорание летучих и углерода с поверхности и завершение испарения влаги из центральной зоны частицы. В конце третьей стадии температура капли достигает своего максимального значения. В четвертой стадии происходит догорание коксового остатка, причем температура внутри частицы уменьшается до температуры окружающего ее потока.

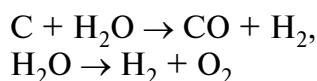
Длительность первой стадии слабо зависит от марки угля и уменьшается с увеличением температуры среды, при температуре потока выше 5000С протяженность первой стадии уже не зависит от температуры среды. Протяженность вто-

рой стадии зависит от температуры среды и марки угля. Например, бурый уголь практически не спекается, поэтому протяженность второй стадии для него в 2...3 раза меньше, чем для газового угля. Протяженность третьей стадии определяется маркой угля, начиная с температуры 500...600 °С для бурого угля и 800...900 °С для газового угля она становится постоянной, т.е. процесс горения определяется только скоростью подвода окислителя к поверхности частицы. Время четвертой стадий определяется структурой агломерата твердых частиц угля после завершения структурообразования, испарения влаги, выделения летучих и количеством остаточного углерода в агломерате. Для бурого угля, богатого летучими и образующего менее плотный агломерат, продолжительность этой стадии меньше, чем для газового угля.

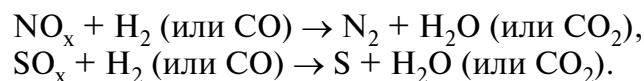
Эксперименты показали, что несмотря на различный характер действия влияющих факторов, длительность горения капли водоугольного топлива слабо зависит от природы угля, хотя удельная реакционная поверхность и температура воспламенения топлива из бурого и газового углей существенно различны.

Теоретический анализ горения водоугольного топлива с позиций диффузионно-кинетической теории, выполненный в работе [3], позволил заключить, что длина зоны горения водоугольного топлива, содержащего минеральные частицы (зольность), пропорциональна расходу топлива в степени (1-n), где  $n = 0,8$  характеризует турбулентное обтекание капли топлива. Рост влажности топлива незначительно сокращает длину зоны горения вследствие увеличения удельной начальной реакционной поверхности капли. Увеличение зольности топлива, удельного веса угля и начального диаметра капель способствуют росту протяженности зоны горения.

Вода, присутствующая в водоугольном топливе, способствует формированию специфических химических реакций в процессе горения. Взаимодействие перегретого пара с углеродом топлива и термическая диссоциация воды в соответствии с реакциями:



способствуют образованию водорода и кислорода. Кислород стимулирует процессы горения, а водород и монооксид углерода являются сильными восстановителями, которые способствуют уменьшению содержания оксидов азота и серы в уходящих газах:



Как при механическом, так и пневматическом распыливании водоугольного топлива в начальный период скорость движения капель в 3...5 раз превышает скорость воздушного потока. Высокая относительная скорость является причиной интенсивного тепло- и массообмена, она приводит к очень быстрому испарению влаги с поверхности капли и образованию пористого агломерата неправильной формы. Тем не менее, при математическом моделировании движение капель водоугольного топлива можно рассматривать как движение ансамбля частиц; однако в отличие от движения инертной частицы движение водоугольной капли осложняется физико-химическими процессами внутри капли, интенсивным газовыделением через ее поверхность, изменением формы и плотности. Вследствие этого движение выгорающей капли топлива в потоке газа характеризуется переменным коэффициентом сопротивления. В области воспламенения коэффициент сопротивления зависит от многих факторов и в значительной степени определяется условиями подвода топлива и воздуха.

В большинстве случаев в топках паровых котлов передача теплоты от горячих продуктов сгорания к тепловоспринимающим поверхностям осуществляется излучением. Применение водоугольного топлива изменяет условия лучистого теплообмена по сравнению со случаем горения угольной пыли. Во-первых, снижается температура горения топлива, увеличивается содержание излучающих трехатомных газов и уменьшается концентрация твердых частиц в продуктах сгорания. С ростом влажности топлива перенос теплоты излучением  $\text{H}_2\text{O}$  резко возрастает, а перенос излучением  $\text{CO}_2$  — несколько снижается. Суммарное увеличение интенсивности излучения

трехатомных газов практически полностью компенсирует некоторое снижение температуры газа в топке, связанное с затратами теплоты на испарение влаги из топлива.

Одной из важных эксплуатационных характеристик является степень загрязнения радиационных экранов. При сжигании пылевидного сухого угля (антрациты, тощие угли) коэффициент загрязнения поверхности составляет 0,40...0,45. Экспериментальное исследование радиационного теплообмена в топочном пространстве котла ДКВР 6,5/13 с цилиндрическим предтопком при сжигании водоугольного на основе углей марки Т и Г выполнено в работе [4]. Около радиационных экранов на расстоянии 150...200 мм от трубных поверхностей температура горячих газов составляла 1050...1200 °С. При различных режимах эксплуатации котла и сжигании водоугольного топлива из угля марки Т средний коэффициент загрязнения экранов составлял 0,57, а при сжигании угля марки Г — 0,60. Таким образом, количество теплоты, переданное в топочном пространстве радиационным теплообменом, слабо зависит от метаморфизма исходного угля. Полученные данные свидетельствуют об отсутствии значительных загрязнений поверхности нагрева при сжигании водоугольного топлива, тепловая эффективность экранов в этом случае почти в 1,5 раза выше, чем при сжигании пылеугольного топлива.

### **Производство водоугольного топлива**

Согласно опубликованным данным [1], для промышленного производства ВУТ в Китае и других странах широко используется российская технология разработки 70-х годов прошлого века, которая включает двухстадийный “мокрый” помол угля, когда в одной мельнице осуществляется грубодисперсный, а в другой — высокодисперсный помол угля. Процесс приготовления топлива завершается в смесителе. Двухстадийный помол в определенной степени оптимизирует гранулометрический состав водоугольной смеси и оказывает положительное влияние на динамическую вязкость ВУТ.

Основными промышленными аппаратами производства ВУТ по традиционной технологии явля-

ются шаровые и стержневые мельницы “мокрого” помола (рис. 3). Традиционная технология характеризуется следующими энергозатратами [1]:

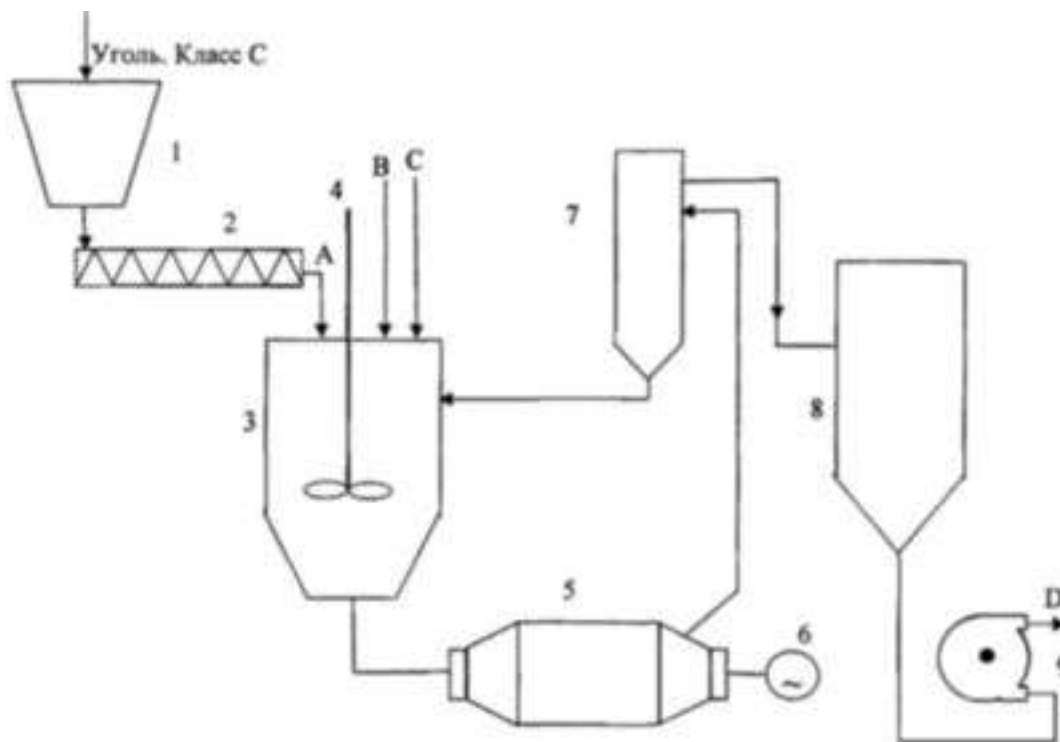
- ◆ Компания Vawri CWM Ltd, Китай — 248 кВт·ч/т,
- ◆ ОПУ “Белово-Новосибирск”, Россия — 192 кВт·ч/т,
- ◆ Исследовательский центр по угледобыче, Япония — 86 кВт·ч/т.

Основная причина большого расхода энергии обусловлена весьма низким (менее 1%) энергетическим КПД шаровых мельниц. Стержневые мельницы имеют несколько лучшие энергетические характеристики. В процессе приготовления одной тонны ВУТ испаряется около 15 кг воды, что при производительности мельницы 3 т/ч составляет более одной тонны воды в сутки. Поэтому, чтобы не допустить конденсации пара в помещении, мельницу приходится оборудовать пароотводящей системой. Другим недостатком традиционной технологии является значительный механический и коррозионный износ поверхности мелющих тел (400...1000 г на тонну продукции), который в зависимости от марки стали в 3...5 раз превышает аналогичные характеристики при сухом измельчении угля. В целом, производство водоугольного топлива в Китае по традиционной технологии характеризуется достаточно высокой стоимостью — около 25 долларов США за тонну водоугольного топлива.

С точки зрения технологических свойств и затрат энергии на приготовление по традиционной технологии оптимальными параметрами ВУТ являются следующие:

- ◆ угольные ТЭС: содержание угля (по массе) — 60...70%, размер угольных частиц — не более 250 микрон, средняя теплота сгорания — 21000 кДж/кг;
- ◆ котельные: содержание угля 62...65%, размер угольных частиц — не более 45 микрон, средняя теплота сгорания — 21000 кДж/кг. Верхний предел размеров частиц устанавливается исходя из условий динамической вязкости и минимального механического недожога топлива.

В настоящее время ряд российских предприятий уже приступил к малосерийному производ-



**Рис. 3. Принципиальная схема производства водоугольного топлива [1].**

**1** – угольный бункер; **2** – шнековый питатель; **3** – смеситель; **4** – мешалка; **5** – шаровая барабанная мельница "мокрого" помола; **6** – электропривод; **7** – гидроциклон; **8** – промежуточный бак; **9** – расходный перистальтический насос. **А** – сырой уголь; **В** – вода; **С** – добавки; **Д** – готовое ВУТ.

ству оборудования для приготовления водоугольного топлива. В частности, Омский завод нефтедобывающего оборудования разработал комплект оборудования производительностью 6 тонн водоугольного топлива в час. Сырьем для его приготовления служит каменный уголь марки D (годовой расход около 30 тысяч тонн), массовая концентрация угля – 60%, плотность – 1,2 т/м<sup>3</sup>, низшая теплота сгорания топлива – 14700 кДж/кг.

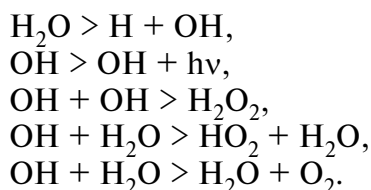
### **Новые технологии**

В последние годы в России работы в области водоугольных технологий существенно активизировались. Были созданы улучшенные технологии производства ВУТ с низкой стоимостью производства и хорошими эксплуатационными характеристиками – прежде всего динамической стабильностью. Выполнен большой объем работ по внедрению водоугольного топлива в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе.

В 1999 г. в Новосибирском государственном техническом университете разработано водоугольное топливо ИКЖТ (искусственное композитное жидкое топливо), для производства которого использована кавитационная технология обработки угля [5]. Для производства ИКЖТ используется измельченный до 2,0 мм уголь, который далее дополнительно измельчается в диспергаторе ультратонкого измельчения до состояния со средним размером частиц около 30 микрон. После этого угольный порошок смешивается с водой и технологическими добавками и поступает в кавитатор, где происходит доработка топливной композиции. Кавитационная обработка способствует деструкции молекул угля, который распадается на отдельные органические составляющие с активной поверхностью частиц и большим количеством свободных органических радикалов частиц размером 5...10 микрон.

В результате кавитационного воздействия вода также претерпевает изменения – в ней образуются атомарный водород, перекись водорода  $H_2O_2$ ,

вода в возбужденном состоянии и другие компоненты, химическая активность которых способствует образованию активной дисперсной среды, насыщенной компонентами ионного и катионного типа [6]:



Получаемое топливо характеризуется следующими показателями: калорийность — до 6000 ккал/кг, зольность — 1,0...1,5%, текучесть — 900...1000 спз в диапазоне температур 20...70 °С, высокая стабильность. Как сообщается такое топливо характеризуется повышенной реакционной способностью и может храниться без разрушения физико-химической структуры более 12 месяцев. Высокая калорийность водоугольного топлива достигается за счет предварительного обогащения угля, отмытого во флотационных машинах с содержанием золы до 2...3% в твердой фазе и высокой концентрацией угля — до 70...75%. Повышение динамической устойчивости топлива обеспечивается специальными добавками, создающими электростатический барьер между частицами твердой фазы, а также наличием ультрадисперсной твердой фазы (менее 1,0 мкм).

Обработка топлива в кавитационных аппаратах характеризуется низкими затратами энергии ( $\approx 5$  кВт·ч/т), причем эффективность применения ИКЖТ в котельной технике возрастает при использовании маслосодержащей или загрязненной нефтепродуктами воды. “Мокрая” обработка водоугольного топлива в кавитационных аппаратах оказалась чрезвычайно плодотворным направлением, что привело в дальнейшем к созданию ряда новых технологий производства водоугольного топлива.

КаВУТ (кавитационное водоугольное топливо). В патенте [7] описывается технология производства КаВУТ, которое не требует использования химических реагентов — стабилизаторов. Массовая доля угля в топливе КаВУТ составляет 62...70%, большая часть угольных частиц после кавитационной обработки имеет средний размер

71 мкм (60...70%), а остальные — 71...250 мкм. При этом топливо сохраняет стабильность на протяжении 8...24 месяцев. Технологический процесс приготовления КаВУТ характеризуется низкими удельными энергозатратами (до 30 кВт·ч/т) и низкими показателями уноса металла с рабочих органов кавитатора (менее 50...90 г/т КаВУТ).

Водоугольное топливо КаВУТ обладает большей реакционной способностью по сравнению с исходным топливом (углем), низкой температурой в ядре факела (1200 °С), высокой степенью выгорания (до 99%). Активация поверхностных частиц приводит к существенному снижению температуры воспламенения — для КаВУТ из антрацита в 2 раза, для КаВУТ из бурых углей — до 300...325 °С.

При факельном сжигании топлива КаВУТ процесс горения начинается непосредственно на срезе форсунки, сразу после его распыления, причем топливо горит без какой-либо “подсветки”. В Институте “Новосибирсктеплоэлектропроект” разработана технология сжигания КаВУТ, объединяющая стационарный кипящий слой и объемное сжигание топлива. Предлагаемая схема в какой-то степени аналогична циркулирующему кипящему слою, применяемому в угольной энергетике, она позволяет существенно снизить размер частиц материала кипящего слоя и “сдвинуть” процесс реагирования топлива в объем кипящего слоя за счет его газификации водой.

Удельные затраты на сооружение установки по приготовлению КаВУТ составляют 2,2 дол. США на тонну продукции в год, а стоимость производства дополнительных узлов (прием угля, дробление, подача на приготовление, хранение, подача на сжигание) — 1,35 дол. США на тонну топлива в год. В сумме это составляет 3,55 дол. США на тонну продукции в год, что почти в 3 раза меньше затрат на сооружение традиционной схемы угольной топливоподачи с пылеприготовлением.

Использовать КаВУТ предлагается в качестве основного топлива в паровых и водогрейных котлах, а также как исходную смесь для приготовления синтез-газа и синтетических моторных топлив. Особенно удобно производить КаВУТ из высоковлажных углей или из увлажненных отходов углеобогащения. Расчеты показывают, что из 1 млн. тонн переработанного на обогатительных фабри-

ках угля в отвалы, можно выработать 20 МВт электроэнергии. Это означает, что наиболее рационально производить КаВУТ на обогатительных фабриках, получая в технологическом цикле два продукта — угольный концентрат и топливо КаВУТ.

Водоугольное топливо ЭКОВУТ характеризуется высокими экологическими характеристиками. Оно производится из антрацитов, каменных и бурых углей любых марок и любой зольности и воды любого качества, включая шахтные и промышленные воды. Для получения выюкокало-рийного топлива используется предварительная деминерализация исходного сырья. Процесс сжигания ЭКОВУТ характеризуется высокой полнотой выгорания (98...99,7%), низким уровнем механического недожога и полным отсутствием химического недожога топлива. Сжигание ЭКОВУТ осуществляется при очень малых избытках воздуха (3...7%), что способствует существенному снижению потерь теплоты с уходящими газами и росту КПД котла.

### **Водоугольное топливо в жилищно-коммунальном секторе**

Внедрением водоугольного топлива в жилищно-коммунальном секторе и теплоэнергетике России сегодня занимаются несколько предприятий. Среди них можно отметить НПО “Экотехника” (г. Новокузнецк), Институт горючих ископаемых (г. Москва), ОАО “Корпорация Компомаш” (г. Москва), НПО “Гидротрубопровод” (г. Москва). Наибольшую активность на рынке водоугольных технологий проявляет НПО “Экотехника”, которое разработало и создало:

- ◆ Технологический комплекс по приготовлению ВУТ производительностью до 1 т/ч и его сжиганию в котле мощностью 0,55 МВт (Беловский завод горношахтного оборудования; г. Белово, Кузбасс).

- ◆ Паровой котел КП-0,55 паропроизводительностью 700 кг/час в котельной ОАО “Хлеб” (г. Новокузнецк), работающий на ВУТ, доставляемом автотранспортом из г. Прокопьевск (расстояние 50 км).

- ◆ Демонстрационную установку по подготовке угля, приготовлению, транспортировке, хранению и сжиганию ВУТ (г. Новокузнецк).

В 2000 г. в рамках проекта Минпромнауки России по переводу котлов различной мощности на сжигание ВУТ НПО “Экотехника” осуществило работы по промышленному испытанию котла ДКВР 6,5/13 паропроизводительностью 6,5 тонн пара в час в котельной спецгормолзавода г. Мыски. В конструкции котла реализован низкотемпературный вихревой способ сжигания распыленного ВУТ, обладающий высокой эффективностью [8]. За счет этого устойчивая работа котла обеспечивается даже при невысоких значениях низшей теплоты сгорания топлива (до 12600 кДж/кг). Низкая температура пламени в топке котла (970...1040 °С) исключила шлакообразование и нарушение условий теплообмена в водяных трубах.

В котельной шахты “Инская” НПО “Экотехника” в содружестве с Российской академией наук проведены работы по переводу котла КВ-ТС-20 со слоевой топкой на вихревое сжигание водоугольного топлива [9]. Использование ВУТ обеспечило устойчивую работу котла, снижение мех-недожога на 30% и вредных выбросов в атмосферу на 10...20%. Тепловая мощность котла была увеличена с 13,2 до 21,1 МВт, а КПД котла повышен с 78,8 до 84%.

Технология сжигания водоугольного топлива ЭКОВУТ успешно используется на ряде предприятий России, таких как котельная г. Морозовска (антрацит марки АШ), котельная № 9 г. Пудож, Карелия (каменный уголь марки Г и Д Интинского месторождения Печорского бассейна с содержанием серы 3,2...4,7%), Иркутская ТЭЦ-14 (бурый уголь марки БЗ Азиатского бассейна Иркутской области) и Казахстана - Семипалатинская ТЭЦ-1 (каменный уголь марки Д месторождения Шубарколь). Удельные капиталовложения в создание комплекса производства ЭКОВУТ не превышают 2,5...4,0 дол. США в пересчете на тонну угля.

“Корпорация Компомаш” и “Гидротрубопровод” в настоящее время проводят проектные работы по переводу ряда котельных с мазутного и газового топлива на водоугольное в г. Воркута и в г. Воскресенск, Московской обл. В обоих случаях для сжигания ВУТ используется технология кипящего слоя.

Еще в шестидесятые годы прошлого века Институтом горючих ископаемых АН СССР был



разработан метод прямого сжигания угольного шлама в виде водоугольной суспензии. Активная работа по созданию водоугольного топлива из угольного шлама проводится в настоящее время в Кемеровской области, где разработана программа перевода коммунальных котельных на водоугольное топливо. Подсчитано, что использование шламов в количестве 27 млн тонн, накопившихся за несколько лет в Кузбасском бассейне, потенциально соответствует выработке более 500 МВт электроэнергии. Средняя себестоимость одной гигакалории теплоты в котельных Кемеровской области в 2002 г. составила: при производстве ВУТ из угля — 8,6 дол. США, а при производстве ВУТ из угольного шлама — 7,4 дол. США. Для сведения укажем, что средняя себестоимость производства одной гигакалории теплоты в этом регионе в 2002 г. при использовании природного газа составила 10,7 дол. США.

### **Заключение**

Выполненный анализ показал, что уголь различных марок, а в ряде случаев и отходы угля (шлам) могут эффективно сжигаться с водой в малых и больших котлах. К настоящему времени в мире выполнен большой объем исследовательских работ в области технологий получения и сжигания ВУТ, который завершился созданием в Китае, Японии и других странах многотоннажного промышленного производства водоугольного топлива. В России разработаны улучшенные технологии производства водоугольного топлива, создан ряд демонстрационных установок, показавших перспективность и экономическую целесообразность перевода мазутных и газовых котлов системы ЖКХ на водоугольное топливо.

В шестидесятые-семидесятые годы прошлого века в Украине проводились работы в области водоугольных технологий, но в настоящее время они практически свернуты. В 1970...73 гг. на шахте им. Абакумова (г. Донецк) была построена промышленная установка по производству и сжиганию ВУТ из каменноугольных шламов производительностью 60 000 тонн в год. Но в постоянную эксплуатацию установка не была введена в связи с реконструкцией углеобогадатель-

ной установки шахты и увеличением зольности угольных шламов с 30 до 50%, на что установка не была рассчитана.

В шестидесятые годы прошлого века проводились также исследования по сжиганию водоугольных суспензий, изготовленных из тощих углей Донецкого бассейна. Было установлено, что при создании определенных тепловых условий у “корня” факела возможно получение устойчивого факела и высокой степени выгорания водоугольного топлива. Количество теплоты, подводимое к началу зоны горения, зависит от избытка воздуха, его температуры и массы продуктов сгорания, рециркулирующих из высокотемпературной зоны к “корню” факела. Для “усиления” рециркуляции горячих газов хороший эффект дает использование завихрителя воздушного потока с углом закрутки лопаток от 30 до 50 градусов [10].

В этот же период в Украине были выполнены работы по сжиганию водоугольного топлива, приготовленного из антрацитового штыба [11]. Было подтверждено, что недостаток теплоты в начале зоны горения ВУТ можно компенсировать увеличением начальной температуры воздуха, интенсификацией обратных течений горячих продуктов сгорания, повышением качества смешения топлива и воздуха. Устойчивое горение водоугольного топлива из антрацитового штыба в цилиндрическом предтопке диаметром 0,9 м и длиной 3,0 м наблюдалось при температуре подогрева воздуха до 440...480 °С и организации интенсивных рециркуляционных потоков продуктов сгорания. При этом температура продуктов сгорания в зоне горения составила 1000...1100 °С, а на выходе из предтопка — 1450...1500 °С. Даже при неоптимальных режимах степень выгорания ВУТ из антрацитового штыба составила 78% в пределах предтопка и 97% — на выходе из топки котла.

Украина богата угольными месторождениями, поэтому развитие инфраструктуры производства водоугольного топлива на основе различных углей для использования в котельных установках теплоэнергетики и жилищно-коммунального сектора взамен природного газа является исключительно важной и насущной государственной проблемой. В Донецком регионе в условиях компактного проживания эта задача облегчается тем,

что могут быть созданы групповые пункты по производству ВУТ, обслуживающие котельные, расположенные на расстоянии 50...100 км от места производства топлива. Доставка водоугольного топлива автотранспортом при этом не вызывает проблем, а свойство сохранения динамической устойчивости топлива при достаточно быстром использовании ВУТ после его приготовления (до нескольких суток) не является серьезным препятствием. Производство водоугольного топлива можно организовать и на обогатительных фабриках, где для этого имеется необходимая инфраструктура.

Срок окупаемости проектов перевода котлов ЖКХ на водоугольное топливо, как правило, не превышает двух лет. Важно отметить, что модернизация котлов ЖКХ Украины с переводом их на водоугольное топливо, является весьма прибыльным предприятием, поскольку при прочих преимуществах значительно увеличивается коэффициент полезного действия котлоагрегата. Одновременно использование водоугольного топлива гарантирует существенное улучшение экологических показателей сжигания угля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ходаков Г.С.* Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. — 2007. — № 1. — С. 35–45.
2. *Ходаков Г.С.* К реологии суспензий // Теоретические основы химической технологии. — 2004. — Т.38, № 4. — С. 456–466.
3. *Делягин Г.Н., Онищенко А.Г.* Теоретический анализ выгорания водоугольной суспензии с учетом ее начальной зольности и влажности // “Горение дисперсных топливных систем”. Сб. научных трудов. М.: Наука. — 1969. — С. 7–18.
4. *Делягин Г.Н., Онищенко А.Г.* Радиационный теплообмен в топке парового котла при сжигании водоугольных суспензий // “Горение дисперсных топливных систем”. Сб. научных трудов. М.: Наука. — 1969. — С. 40–47.
5. *Овчинников Ю.В., Ноздренко Г.В., Щипников П.А., и др.* Способ производства жидкого композитного топлива. Патент на изобретение № 2151959. Приоритет от 18.06.1999.
6. *Овчинников Ю.В., Луценко С.В., Евтушенко Е.А.* Физические процессы и механохимические эффекты в дезинтеграторах и кавитаторах при производстве ИКЖТ // Изд. Новосибирского ГТУ. “Энергосистемы, электростанции и их агрегаты”. Сб. научных трудов. Вып.9. Новосибирск. — 2005. — С. 310.
7. *Петраков А.Д., Радченко С.М. Яковлев О.П.* Водоугольное топливо. Патент России № 2249029. Приоритет от 27.03.2005.
8. *Пузырев Е.М., Мурко В.И., Звягин В.Н., и др.* Результаты опытно-промышленных испытаний работы мазутного котла ДКВР 6,5/13 на водоугольном топливе // Теплоэнергетика. — 2001. — № 2. — С. 69–71.
9. *Нехороший И.Х., Костовецкий С.П., Мурко В.И., и др.* Результаты перевода котла КВ-ТС-20 на сжигание водоугольного топлива // Теплоэнергетика. — 1997. — № 2. — С. 13–15.
10. *Гладкий А.И., Делягин Г.Н., Кирсанов В.И., Онищенко А.Г.* Сжигание водоугольных суспензий из донецких тощих углей в топке промышленного парового котла // “Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения”. Сб. научных трудов. М.: Наука. — 1969. — С. 28–37.
11. *Делягин Г.Н., Кирсанов В.И., Онищенко А.Г.* Особенности сжигания антрацитового штыва в виде водоугольных суспензий в топке парового котла // “Горение дисперсных топливных систем”. Сб. научных трудов. М.: Наука. — 1969. — С. 33–39.

Получено 01.08.2007 г.