

УДК 621.499;661.621

**О.В. КРАВЧЕНКО<sup>1</sup>, Л.В. ТАРАСЕНКО<sup>2</sup>, А.В. БАСТЕЕВ<sup>2</sup>, В.В. ФОРФУТДИНОВ<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Институт проблем машиностроения НАН Украины, Харьков*<sup>2</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", Украина***ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ СУСПЕНЗИОННЫХ ГОРЮЧИХ**

Обоснована целесообразность использования в промышленных энергоустановках композитных суспензионных горючих (КСГ) на основе жидких углеводородов и дисперсного угля. На основании действующих цен проведена оценка относительной стоимости единицы тепловой энергии. Рассмотрены проблемы, связанные с особенностями горения и сформулированы задачи активации. Экспериментально исследованы предпламенные процессы для капли пылеугольномазутной смеси (ПУМС) на основе мазута и мелкодисперсной угольной пыли, активированной модельными веществами-активаторами ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ ). Проведена оценка влияния использованных активаторов на интенсивность предпламенных процессов, показана возможность увеличения полноты сгорания конгломератов угля.

**композитное суспензионное горючее, углеводородное горючее, вещество-активатор, процесс горения**

Бесперебойное обеспечение народного хозяйства страны газом, нефтью, углем, электрической и тепловой энергией – одно из условий существования ее экономической и политической независимости и национальной безопасности. В последнее время произошли существенные изменения в структуре энергетики, например, в начале 90-х годов на 42,8% сократилось производство электроэнергии, больше чем вдвое снизилась добыча угля, почти на треть – нефти и газа.

Кроме того, потенциальные запасы наиболее дефицитных видов топливно-энергетических ресурсов (нефти и газа) невелики: по различным экспертным оценкам при современном уровне их добычи доступные для разработки месторождения исчерпаются за 50-60 лет. Существенно лучше обстоит ситуация с запасами угля: при нынешних темпах добычи этого топлива его хватит на 450-500 лет. Мировое потребление каменного угля за период 1970-1980-1990 гг. снизилось с 61,5% до 30,9 и 29% соответственно. В 1996 году потребление каменного угля несколько возросло и составило 34,9%. В настоящее время наблюдается стойкая тенденция увеличения потребления угля [1]. И хотя потребности населения и народного хозяйства в топливных ресурсах, электро- и тепловой энер-

гии на данный момент в основном обеспечиваются, это осуществляется на пределе возможностей и обходится слишком дорого, поэтому экономически оправданы даже относительно небольшие значения повышения эффективности процесса сжигания топлива. Сложная ситуация с ресурсами газомазутных видов топлив привела к увеличению доли угля в топливном балансе электростанций.

Как известно, за последние 20 лет зольность угля, поступающего на ТЭС, выросла с 20..25 % до 30...38 %. В связи с этим возникают сложности, в том числе и с эффективностью сжигания угля в пылеугольных топках. Для решения этой проблемы существует несколько путей, к числу которых относится применение котлоагрегатов циркуляционного кипящего слоя (ЦКС), внедрение упрощенной технологии предварительного обогащения угля до 16...20 %, применение «подсветки» [1] и др.

В настоящее время широкое применение нашла «подсветка», которая осуществляется сжиганием углеводородных топлив. Поскольку большая часть углеводородных топлив импортируется, возникают сложности с поставкой их на ТЭС. Это приводит к тому, что, несмотря на наличие запасов угля, тепловые электростанции простаивают. Уменьшение по-

дачи углеводородных топлив на подсветку приводит к срывам факела и, как следствие, к аварийной остановке действующих энергоблоков.

Применение котлов с циклонной камерой сгорания (ЦКС) позволяет сжигать уголь любого качества без подсветки и использовать в качестве топлива, как высокозольные угли, так и шламы, представляющие собой не что иное, как отходы углеобогачительных фабрик. Внедрение «бесподсветочного» сжигания угля методами ЦКС, арочной топки и другими тормозится необходимостью значительных капитальных вложений.

Все изложенное делает актуальным переход действующих энергоблоков на унифицированное топливо, например, КСГ – приготовленную особым образом высококонцентрированную смесь, состоящую из мельчайших частиц угля, диспергированных в жидкой фазе. Такой средой, в частности, может быть вода, жидкие углеводороды - печное топливо или мазут, с добавками специальных активаторов горения. Использование КСГ в качестве основного топлива вместо традиционного сжигания угля позволяет снизить затраты на углеводородное топливо, упростить снабжение и систему подготовки топлива, более полно автоматизировать его подготовку и сжигание, решить проблему обеспечения экологичности технологического процесса сжигания горючего в теплогенерирующих установках разного масштаба.

На основании действующих цен была проведена оценка относительной стоимости единицы тепловой энергии  $\xi$  в зависимости от содержания угля  $\varepsilon, \%$ , которая показала, что экономичность процесса генерации тепла напрямую зависит от количества добавки угля или воды в состав КСГ (рис. 1).

Результаты ранее проведенных исследований по изучению особенностей процесса сжигания и доставки КСГ к КС позволяют сделать следующие выводы:

– для сжигания композитного топлива в газомазутных котлах требуется незначительная реконструкция горелок (поскольку распыление КСГ проис-

ходит аналогично распылению мазута) и системы топливоподачи, при этом устойчивость процесса горения не нарушается;

– с увеличением мощности установки при сжигании КСГ, нет необходимости в использовании другого топлива в качестве подсветки; при этом значительно снижаются приведенные затраты на транспортировку КСГ и подача топлива может осуществляться непрерывно;

– появляется возможность полностью автоматизировать процесс сжигания топлива, а также регулирования его расхода;

– продукты сгорания КСГ соответствуют экологическим требованиям, предъявляемым к выбросам ТЭС.

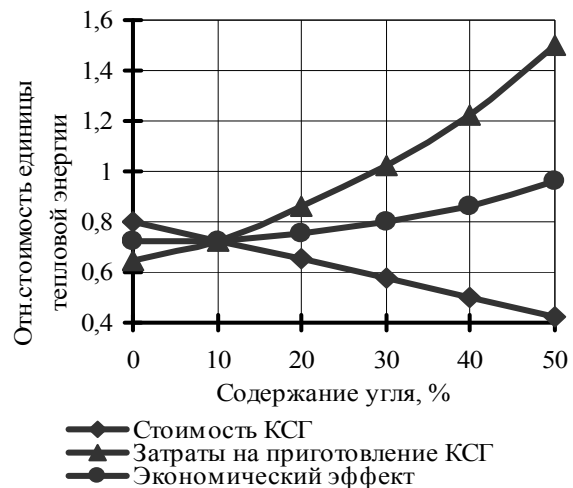


Рис. 1. Оценка затрат, связанных с использованием КСГ

В [2] описана серия экспериментов с КСГ, в которых одним из этапов приготовления ПУМС является операция очистки (облагораживания) угля, а именно мазутная агломерация. Процесс горения ПУМС было предложено улучшить, добавив 7 – 8% воды. Оказалось, что значительная доля частиц золы, образующейся при сжигании ПУМС, в процессе горения топлива оплавляется. Для уменьшения твердого остатка при сжигании ПУМС, автором было предложено прибегнуть к введению в это топливо соответствующих присадок.

Однако увеличение содержания угля неизбежно сопровождается трудностями при организации про-

цессов подготовки горючего, подачи его в камеру сгорания (КС) и непосредственно при осуществлении рабочего процесса.

В работе [3] была разработана технология приготовления и сжигания КСГ на основе жидких углеводородов (печного топлива (ПТ), мазута) с добавлением угольной пыли. Было предложено использовать в качестве гетерофазного вещества-активатора воду, что существенно упростило подачу горючего в камеру сгорания и, в силу разности температур кипения воды и углеводородной основы, существенно усилило эффект диспергирования горючего в КС. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно с точки зрения повышения экологичности теплогенерирующих установок. Основной проблемой подготовки КСГ было расслоение опытных составов. Эксперименты с КСГ на основе ПТ показали, что смешивание его с чистой водой невозможно. В качестве связующего вещества было предложено использовать стеарат натрия (СН). Результаты экспериментов показали, что добавление СН создает однородную смесь, пригодную для проведения эксперимента на время  $360 \leq t \leq 600$  мин. Эксперименты с КСГ на основе мазута показали, что смешивание его с чистой водой возможно до определенных пропорций. Опытным путем определено, что до 40% воды смешивается с мазутом без добавления связующего вещества СН. Данная статья является продолжением серии работ по исследованию особенностей предпламенных процессов для ПУМС.

Экспериментально установленным фактом является наличие двух основных стадий процесса горения капли ПУМС: испарение жидкой основы и образование конгломерата из частиц наполнителя и веществ-активаторов. Сформировавшийся к началу второй стадии конгломерат из частиц наполнителя, в нашем случае бурого угля, по мере движения по тракту КС выходит из высокотемпературной зоны, полностью не прореагировав с кислородом воздуха, тем самым, снижая результирующую полноту сгорания топлива, и повышая содержание вредных веществ в продуктах сгорания (ПС), в первую очередь,

сажи. Таким образом, для реализации горения с высокой полнотой сгорания необходимо применить дополнительные мероприятия по активации рабочего процесса. Физические основы активационного подхода рассмотрены в [4].

Известно, что вещества-активаторы, например, карбамид и/или соли с кислородсодержащими анионами, вводимые в ПУМС, приводят к интенсификации диспергирования конгломерата, т.е. к механическому разрушению конгломерата, локальному повышению температуры и концентрации окислителя с последующим сгоранием не прореагировавшей массы угля [3]. Также известно, что присутствие карбамида в зоне горения приводит, кроме описанных изменений механизма горения, к снижению эмиссии окислов азота в ПС [4].

В данной работе в качестве модельных веществ-активаторов предлагается использовать следующие кислородсодержащие соли:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ . Целью исследований является изучение влияния указанных добавок на особенности процесса горения. Сырьевой базой для выбранных веществ-активаторов являются накопившиеся в Украине излишние запасы боеприпасов, исчерпавших свой ресурс и требующих незамедлительной утилизации.

В данной работе была использована следующая технология приготовления ПУМС с веществами-активаторами: капсулирование исходных частиц мелко дисперсного угля ( $\text{C}_{0,838}\text{H}_{0,056}\text{N}_{0,015}\text{O}_{0,077}\text{S}_{0,014}$ ,  $A^d \cong 28\%$  (минеральные составляющие),  $V^{\text{daf}} \cong 42\%$  (летучие составляющие)) веществами-активаторами; и затем введение этих частиц в состав основного углеводородного топлива. В качестве углеводородной основы ПУМС был использован сертифицированный мазут ( $\text{C}_{0,839}\text{H}_{0,113}\text{O}_{0,011}\text{S}_{0,038}$   $A^d \cong 0,092\%$ ,  $V^{\text{daf}} \cong 98\%$ , анализ проводился согласно ГОСТ 1461 в испытательной лаборатории «Универсалнефтехим», ООО фирма «ВТиИ»). На рис. 2 – 4 представлены микрофотографии опытных образцов. Видимые включения на рис. 4 являются каплями воды, которые при нагревании до  $130^\circ\text{C}$  исчезали.

Размер капель воды и частиц угля определялся

методом секущей для двухфазной системы по введенному в поле микроскопа объекту известного размера. Съемка образцов производилась с увеличением в 680 раз.

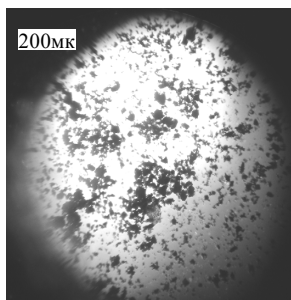


Рис. 2. Микрофотография бурого угля

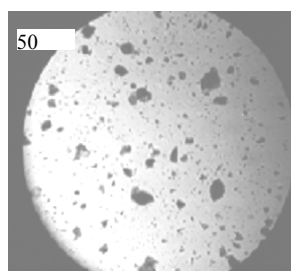


Рис. 3. Микрофотография образца ПУМС (85 % мазут + 15 % уголь)

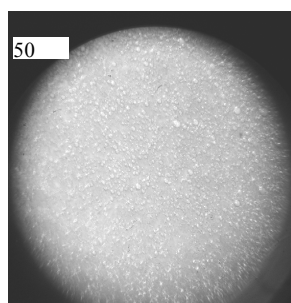


Рис. 4. Микрофотография исходной водомазутной эмульсии (75 % мазут + 25 % вода)

Исследование водо-мазутной эмульсии показало, что около 85 % включений имеют размер по диаметру в диапазоне 1 – 3 мкм, около 14 % включений в диапазоне 3 – 5 мкм и отдельные капли размером ≈ 8 мкм. Более качественная гомогенизация эмульсии может быть проведена по методике, описанной в работе [5].

Использованный в наших экспериментах мазут предварительно подвергался эмульгированию с водой в устройстве, аналогичном описанному в [6]. Затем водо-мазутная смесь с варьируемым количеством воды механически эмульгировалась. На завер-

шающем этапе приготовления ПУМС капсулированный активаторами уголь добавлялся в известном количестве в эмульсию, и полученная смесь механически перемешивалась. Было установлено, что смесь стабильна и не расслаивается в течение, по крайней мере, 3-х месяцев при комнатной температуре.

Исследования особенностей предпламенных процессов и воспламенения капель активированных образцов ПУМС были проведены с помощью методов термогравиметрии и термометрии, подробно описанных в работах [2,3]. Проводились измерения изменения массы образца ПУМС в воздухе по времени при различной температуре. Также измерялось поле температур в зоне горения.

Как известно, добавки угольной пыли в мазут приводят на предпламенных стадиях к формированию конгломерата. Капсулирование угля кислородосодержащими веществами-активаторами способствует более интенсивному ходу процесса и диспергированию наполнителя на завершающей стадии процесса. Максимальная скорость изменения относительной массы для активированных образцов в 3,5 – 4 раза больше, чем для не активированного угля и начинается на более низких температурах (на ≈ 50°C раньше). Результаты термометрии показали увеличение температуры горения на 10 – 15%.

На рис. 5 представлена остаточная масса образцов как функция относительного времени опыта  $\tau/\tau_0$ .

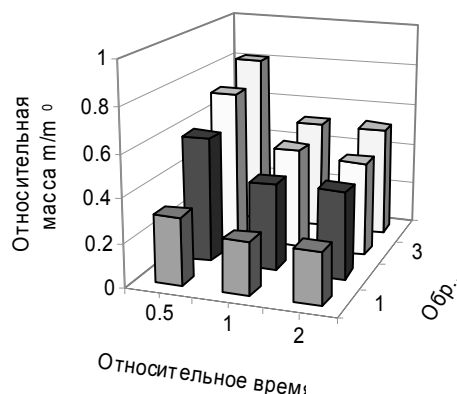


Рис. 5. Оценка снижения массы твердых остатков в ПС:

- 1– 55%Мазут+16%Уголь+4%NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>+25%Вода
- 2– 80%Мазут+16%Уголь+4%NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>
- 3– 85%Мазут+15%Уголь
- 4– Чистый мазут

Из рис. 5 видно, что использование веществ-

активаторов существенным образом влияет на оставшуюся массу в сторону ее уменьшения, что означает увеличение полноты сгорания. Аналогично веществам-активаторам на процесс горения влияет вода, содержащаяся в эмульсии. Кроме экспериментальных исследований были проведены расчеты равновесного состава продуктов сгорания указанных составов. Расчет проводился с помощью SOFT «ASTRA-4M» для адиабатных условий протекания процесса горения.

Добавка активатора увеличивает равновесную температуру горения, что качественно согласуется с данными эксперимента. SOFT «ASTRA-4M» дает возможность оценить токсичность продуктов сгорания ПУМС в воздухе при добавлении воды.

### Выводы

Внедрение и усовершенствование технологии сжигания КСГ позволит путем вариации компонентов, интенсивности обработки каждого компонента и КСГ в целом получать жидкое горючее заданного качества вне зависимости от изменяющихся свойств компонентов.

Технология сжигания КСГ, ее разработка и продвижение на энергетический рынок сопоставима по капиталовложениям с традиционной технологией сжигания угля, конкурентоспособна с ней и может применяться при реконструкции действующих ТЭЦ.

Применение ВУТ для подсветки на ТЭС позволяет перевести указанные объекты на единое унифицированное топливо. Замена мазута, который идет на подсветку, на КСГ экономически выгодно при современном уровне цен на энергоносители. Добавки мелкодисперсной угольной пыли в КСГ уменьшают стоимость калории вырабатываемого тепла, причем, чем меньше стоимость угля, тем выше процент экономии.

Представленные результаты экспериментов позволяют сделать вывод, что для решения проблемы повышения полноты сгорания низкосортных углей активационный подход открывает определенные

перспективы. Показано, что использование модельных веществ-активаторов приводит к снижению остаточной массы конгломерата и способствует более интенсивному ходу процесса.

### Литература

1. Тумановский А.Г., Бабий В.Л. Совершенствование технологий сжигания топлив // Теплоэнергетика. – 1996. – № 7. – С.30-39.
2. Экспериментальное исследование процесса горения суспензионных горючих на основе ПТ и мазута / А.В. Бастеев, Алаа Мусалам, В.В. Форфутдинов, Р.А. Кучмамбетов // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. – К.: НАУ, 2003. – «АВИА-2003», (23-25 апреля 2003, Киев.) – С. 41.13-41.15.
3. Бастеев А.В., Мусалам Алаа, Форфутдинов В.В. Разработка технологии и особенности рабочего процесса сжигания суспензионных горючих // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. науч. тр.: – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т «ХАИ», 2001. – Вып. 26. Двигатели и энергоустановки. – С. 39-41.
4. Бастеев А.В. Принцип активации и его применение в процессах энергопреобразования // Пробл. машиностроения. – 1993. – Вып. 39. – С. 81-87.
5. Патент на корисну модель № 18922, Україна, МПК7 В01F 3/08, В 63 В59/00/ "Змішувач-форсунка"/ І.Г. Суворова (Україна), О.В. Кравченко (Україна); Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України. – № U 2006 06857; Заяв. 19.06.2006; Опубл. 15.11.06, Бюл. № 11. – 4 с.
6. Кервалишвили П.Д., Утямишев И.Р. Несколько новых экологически чистых технологий производства энергии // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 1. – С. 29-34.

*Поступила в редакцию 29.05.2007*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А. В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.