

**Мессерле В.Е.<sup>1</sup>, Устименко А.Б.<sup>2</sup>**<sup>1</sup> *Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск, РФ*<sup>2</sup> *Институт проблем горения КазНУ, Алматы, Казахстан***Плазменно-топливные системы для повышения энергоэффективности пылеугольных тепловых электростанций**

Показаны преимущества использования плазменно-топливных систем, заключающиеся в повышении эффективности сжигания энергетических углей и сокращении выбросов оксидов азота, а также механического недожога топлива. Плазменно-топливные системы испытаны на котлах Усть-Каменогорской ТЭЦ, Алматинских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 и подготовлены к испытаниям на Шахтинской ТЭЦ.

**Ключевые слова:** плазменно-топливная система, уголь, плазменная термохимическая подготовка угля к сжиганию, пылеугольный котел.

Показано переваги використання плазмово-паливних систем, що полягають у підвищенні ефективності спалювання енергетичного вугілля та скороченні викидів оксидів азоту, а також механічного недожогу палива. Плазмово-паливні системи випробувано на котлах Усть-Каменогорської ТЕЦ, Алматинських ТЕЦ-2 та ТЕЦ-3 та підготовлено до випробувань на Шахтинській ТЕЦ.

**Ключові слова:** плазмово-паливна система, вугілля, плазмова термохімічна підготовка вугілля до спалювання, пилувугільний котел.

Мировая энергетика в настоящее время и на обозримую перспективу (до 2100 г.) ориентирована на использование органического топлива, в основном низкосортных углей, доля которых в выработке электроэнергии составляет 40 %, тепловой — 24 %. В связи с этим повышение энергоэффективности пылеугольных тепловых электростанций является приоритетной задачей современной теплоэнергетики. Рассматриваемые плазменно-топливные системы (ПТС) для безмазутной растопки котлов, подхвата и стабилизации горения пылеугольного факела отвечают этим требованиям. В последнее время актуальность этой плазменной технологии возрастает еще больше в связи с истощением запасов нефти и газа, снижением качества твердых топлив и замедлением прироста мощностей АЭС.

В настоящей работе представлены результаты цикла исследований и применения прямоточных, вихревых и муфельных ПТС на пылеугольных котлах Усть-Каменогорской ТЭЦ, Шахтинской ТЭЦ, Алматинских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 (Казахстан). Исследованы ПТС на котлах с системами пылеприготовления с прямым вдуванием пыли (Шахтинская ТЭЦ и Алматинская ТЭЦ-2) и промежуточным бункером пыли (Усть-Каменогорская ТЭЦ и Алматинская ТЭЦ-3) [1–5].

В основе технологии плазменного воспламенения угля и реализующих ее ПТС лежит электротермохимическая подготовка топлива к сжиганию (ЭТХПТ). Суть ЭТХПТ заключается в нагреве плазменным факелом при дефиците кислорода потока пылеугольной смеси в специальной камере до температуры, превышающей температуру самовоспламенения данного угля. При этом происходит практически полный выход летучих и частичное сгорание и (или) газификация углерода угля. В результате в топке полученная топливная смесь или высокорекреакционное двухкомпонентное топливо (ВДТ), состоящее из горючего газа и коксового остатка, воспламеняется при смешении с вторичным воздухом и устойчиво горит без использования для стабилизации факела второго вида высокорекреакционного топлива (газа или мазута) даже в холодной топке. Процесс ЭТХПТ осуществляется в ПТС.

Рассмотрим процесс ЭТХПТ на примере оснащенного вихревой ПТС котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (рис.1). Четыре горелки установлены по две с фронта и с тыла в один ярус (рис.1, а). В котле сжигается каменный уголь зольностью 30 % с расходом через горелку (или ПТС) 3200 кг/ч. Расход первичного воздуха через горелку — 6400 кг/ч, мощность

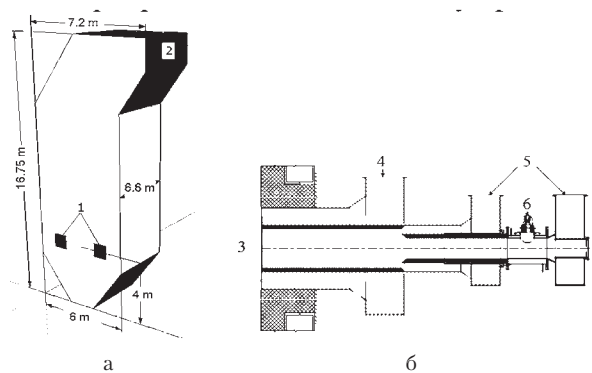


Рис.1. Общий вид топки котла БКЗ-75 паропроизводительностью 75 т/ч (а) и ПТС (б): 1 — амбразуры для установки пылеугольных горелок; 2 — сечение поворотной камеры котла; 3 — топочное пространство; 4 — подвод вторичного воздуха; 5 — подвод аэросмеси; 6 — плазмотрон.

плазмотрона — 200 кВт, длина ПТС — 2,3 м (рис.1, б). Численное моделирование процесса ЭТХПТ в ПТС выполнено с помощью одномерной математической модели Plasma-Coal [1, 2]. В ней детально рассматриваются аэродинамика, теплообмен и кинетический механизм термохимических превращений топлива в двухфазном потоке с плазменным источником.

Результаты расчетов по модели позволили определить геометрические размеры ПТС, необходимую мощность плазмотрона, температуру, скорость и состав продуктов ЭТХПТ. Состав газовой фазы продуктов ЭТХПТ при температуре газа и частиц 1000 °С и скорости потока 189,4 м/с приведен ниже (в числителе — в % (об.), в знаменателе — в кг/ч):

H <sub>2</sub>	-	14,2/88,5	H <sub>2</sub> O	-	2,9/162,8
CO	-	18,4/1599,0	N <sub>2</sub>	-	56,4/4911
CH <sub>4</sub>	-	0,3/14,0	O <sub>2</sub>	-	0,3/31,0
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	-	0,6/133,8	A <sup>C</sup> , кг/ч	-	1123,2
CO <sub>2</sub>	-	6,8/931,2	C <sup>C</sup> , кг/ч	-	816,0

Эти результаты использовались в качестве начальных условий для трехмерного численного моделирования горения ВДТ в топке котла БКЗ-75 с использованием программы Cinar ICE [3, 5]. Результаты 3D-моделирования показали, что при работающих ПТС воспламенение пылеугольного факела начинается раньше, фронт горения смещается к месту установки ПТС в топке котла, что приводит к снижению температуры отходящих газов, концентрации в них оксидов азота и механического недожога топлива по сравнению с традиционным режимом сжигания угля без плазменной активации горения.

Результаты расчета приведены на рис.2, демонстрирующем различие полей температуры в трех режимах сжигания угля в топке: традиционном, с ЭТХПТ в двух ПТС и в четырех ПТС. В традиционном режиме четыре симметричных факела с максимальной температурой 1852 °С образуют в центральной области топки общее ядро факела с температурой около 1300 °С. Если ПТС расположены сверху; их влияние проявляется в изменении формы факела ВДТ, увеличении его длины и повышении максимальной температуры до 2102 °С. При работе четырех ПТС длина факелов возрастает еще больше, а максимальная температура снижается до 1930 °С. По результатам моделирования котла БКЗ-75 выполнен проект его оснащения ПТС для безмазутной растопки и стабилизации горения пылеугольного факела.

Котел ЦКТИ-75 Усть-Каменогорской ТЭЦ (рис.3) оснащен тремя основными турбулентными пылеугольными горелками и двумя растопочными муфельными горелками, в которые были встроены ПТС. На котле сжигался кузнецкий каменный уголь зольностью 17,7 % и с теплотой сгорания 4878 ккал/кг. В процессе испытаний ПТС на этом котле расход угольной пыли через каждую ПТС составлял 1,5 т/ч, а первичного воздуха — 2,6 т/ч. Расход угольной пыли через основные горелки составлял 11,5 т/ч. Мощность плазмотрона варьировалась от 60 до 70 кВт, а его тепловой КПД составлял 85–86 %. Температура факела ВДТ на выходе из ПТС изменялась в интервале 1040–1240 °С. Относительные затраты электроэнергии на плазмотрон составляли 0,5–0,7 % от тепловой мощности муфельной горелки, концентрация NO<sub>x</sub> на выходе из ПТС не превышает 20 мг/нм<sup>3</sup> при выходе синтез-газа (CO + H<sub>2</sub>) более 60 %. Через 35 мин работы ПТС был достигнут стационарный тепловой режим муфельной горелки, после чего плазмотроны были отключены и горение факелов поддерживалось разогретыми муфелями. Длина факелов, выходящих из муфельных горелок достигала 3 м. Безмазутная растопка котла продолжалась 3,25 ч, после чего котел был подключен к главному паропроводу ТЭЦ.

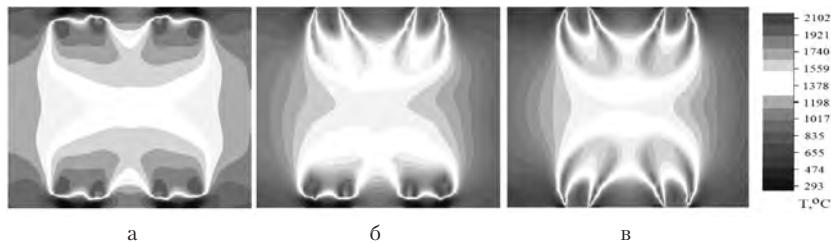


Рис.2. Поле температур в поперечном сечении топки в плоскости расположения горелок при традиционной работе (а), с использованием двух ПТС (б) и четырех ПТС (в).

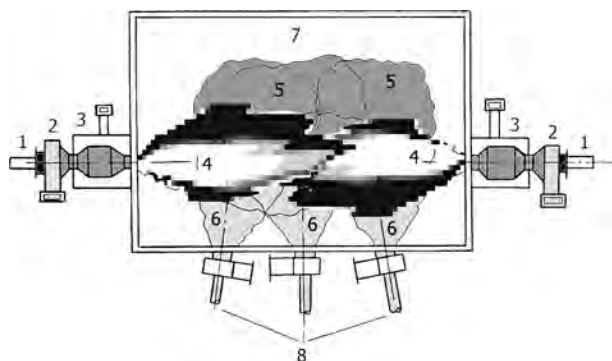


Рис.3. Топочная камера котла ЦКТИ-75 паропроизводительностью 75 т/ч Усть-Каменогорской ТЭЦ с ПТС: 1 – плазмоторн; 2 – камера ЭТХПТ; 3 – муфельная горелка; 4 – факел ВДТ из ПТС; 5 – пылеугольный факел; 6 – аэрозоль из основных горелок; 7 – топка; 8 – основные пылеугольные горелки.

Котел БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 оборудован четырьмя блоками двухъярусных щелевых пылеугольных горелок (рис.4, б). Расход экибастузского угля зольностью 45 % и с теплотой сгорания 3800 ккал/кг составлял через каждую горелку 4 т/ч. Две ПТС были установлены в нижнем ярусе горелок по диагонали (рис.4, а) и включались на мощность 120–140 кВт (ток 350–450 А, напряжение 300–350 В). Воспламенение факелов в топке наблюдалось через 2–3 с после подачи угольной пыли с расходом до 3 т/ч через каждую ПТС. Температура пылеугольного факела на выходе из ПТС достигала 1200–1300 °С, его длина – 5–6 м. При этих параметрах наблюдалось образование ядра факела ярко-желтого цвета в центре топки. Через 3,5 ч от начала растопки параметры котла достигли рабочих значений, и он был подключен к главному паропроводу, после чего на все горелки аэрозоль была подана.

Согласно нормативам, на одну растопку расходуется 12 т топочного мазута, что по теплотворной способности эквивалентно 30 т эки-

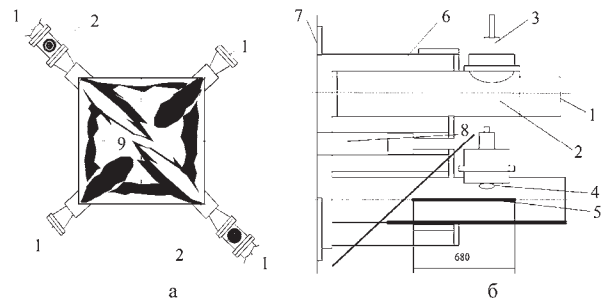


Рис.4. Схема топки котла БКЗ-160 паропроизводительностью 160 т/ч (а) и схема прямоточной ПТС – блока горелок с плазмоторнами (б): 1 – подвод аэрозоль; 2 – ПТС – камера ЭТХПТ; 3 – плазмоторн; 4 – плазменный факел; 5 – перегородка; 6 – короб вторичного воздуха; 7 – граница топки; 8 – канал для установки мазутной форсунки; 9 – топочное пространство.

бастузского угля. Вместо этого на одну растопку в среднем расходовалось около 16,5 т угля, что подтверждает энергетическую эффективность ЭТХПТ. Относительные затраты электроэнергии на плазмоторны составили 1,2–1,4 % тепловой мощности пылеугольных горелок.

Котел БКЗ-420 паропроизводительностью 420 т/ч Алматинской ТЭЦ-2 оснащен шестью пылеугольными вихревыми лопаточно-лопаточными горелками. Двухпоточные и по первичному, и по вторичному воздуху горелки расположены с фронта котла в два яруса (рис.5). Номинальный расход экибастузского угля зольностью 40 % и с теплотой сгорания 4000 ккал/кг составляет 11 т/ч через одну горелку. Три ПТС (рис.5, б) устанавливались треугольником вверх вместо основных пылеугольных горелок (рис.5, а).

Во время испытаний был получен устойчивый пылеугольный факел (рис.6) от ПТС в холодной топке. В процессе испытаний ПТС по достижению необходимой концентрации пыли в

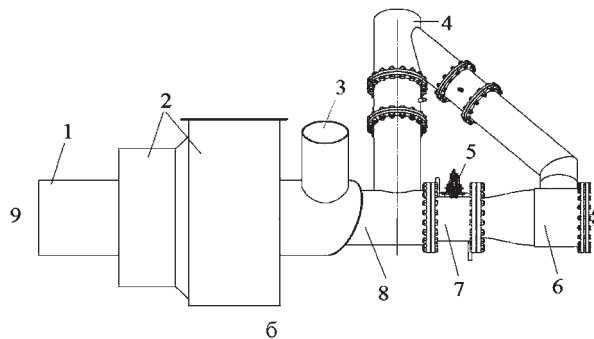
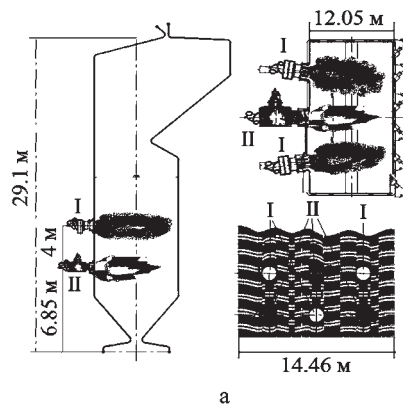


Рис.5. Схема компоновки ПТС и основных пылеугольных горелок (а) и общий вид ПТС на котле БКЗ-420 АТЭЦ-2: I – штатная вихревая двухпоточная пылеугольная горелка; II – ПТС; 1 – канал внешнего потока аэрозоль; 2 – короб вторичного воздуха; 3 – подвод внешнего потока аэрозоль; 4 – подвод внутреннего потока аэрозоль; 5 – плазмоторн; 6 – камера подачи аэрозоль к плазмоторну; 7 – камера ЭТХПТ; 8 – камера смешения и термохимической подготовки топлива; 9 – топочное пространство.

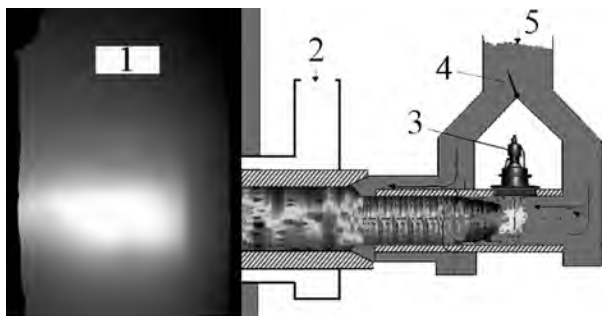


Рис.6. Вид факела от ПТС № 4 через смотровой лючок в боковой стенке котла (35-я минута после плазменного воспламенения пылеугольного факела в горелке № 4): 1 — топочное пространство; 2 — подача вторичного воздуха; 3 — плазматрон; 4 — шибер; 5 — подача аэросмеси.

аэросмеси наблюдалось воспламенение пылеугольного факела в холодной топке котла на выходе из горелок №№ 2, 4, 6 (см. рис.5, а). Измерение температуры факелов через смотровые лючки цифровым пирометром показало, что сразу после воспламенения температура факелов составляла 700–800 °С, затем повышалась до 1050–1070 °С. При этом в начале воспламенения наблюдались пульсации горящих факелов в топке, стабилизирующихся по мере ее прогрева и подачи 30–40 % вторичного воздуха на горелки №№ 2, 4, 6. Через 67 мин после плазменного воспламенения пылеугольных факелов температура первичного воздуха составила 75 °С, температура в барабане — 143 °С, температура газов за топкой — 192 °С. Скорость повышения температуры горячего воздуха при этом составляла около 1,5 °С/мин, что соответствует скорости повышения температуры при мазутной растопке котлоагрегата.

## Выводы

Моделирование и испытания ПТС на действующих пылеугольных котлах ТЭС подтвердили техническую реализуемость, экологическую и энергетическую эффективность безмазутной растопки котлов и стабилизации горения пылеугольного факела с использованием ПТС.

## Список литературы

1. Калинин Р.А., Левицкий А.А., Мессерле В.Е. и др. Электротермохимическая подготовка низкорекреакционных углей. Математическая модель и эксперимент // Химия высоких энергий. — 1990. — Т. 24, № 3. — С. 272–277.
2. Даутов Г.Ю., Тимошевский А.Н., Урюков Б.А. и др. Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии: Проблемы и перспективы (Плазменно-энергетические технологии для улучшения экологических и экономических показателей сжигания и газификации пылевидного угля, С. 341–366) // Низкотемпературная плазма. — Новосибирск: Наука, 2004. — Т. 20. — 464 с.
3. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-aided solid fuel combustion // Proceedings of the Combustion Institute. Elsevier, 2007. — Vol. 31, Part II. — P. 3353–3360.
4. Карпенко Е.И., Карпенко Ю.Е., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Использование плазменно-топливных систем на тепловых электрических станциях России, Казахстана, Китая и Турции // Химия высоких энергий. — 2009. — Т. 43, № 3. — С. 271–275.
5. Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Тютеебаев С.С. и др. Применение плазменного воспламенения твердых топлив на Алматинской ТЭЦ-2 // Вестн. КазНУ им. аль-Фараби. Сер. хим. — 2011. — № 3. — С. 168–172.

Поступила в редакцию 20.07.12

## Messerle V.E.<sup>1</sup>, Ustimenko A.B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Thermal Physics, Siberian Department, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> The Scientific-Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, KazNU, Almaty, Kazakhstan

## Plasma-Fuel Systems for Energy Efficiency Increase of Pulverized Coal Thermal Power Plants

The advantages of plasma-fuel systems application are displayed. They consist in power-generating coal combustion efficiency increase, nitrogen oxides mission and mechanical fuel underburning reduction. Plasma-fuel systems are tested on Ust-Kamenogorsk thermal power plant boilers, Almaty TPP-2 and TPP-3 and they are prepared for Shakhtinsk power plant examination.

**Key words:** plasma-fuel system, coal, plasma thermochemical preparation for coal combustion, pulverized coal boiler.

Received July 20, 2012