ДОКЛАДЫ АН ВШ РФ

январь–март

№ 1 (62)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 544.452.42

2024

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЛАЗМЕННОЙ АКТИВАЦИИ

Е.Б. Бутаков, С.С. Абдуракипов, Д.О. Кочергин, С.В. Виноградов, А.С. Почтарь Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Данная работа представляет экспериментальные исследования перспективного способа воспламенения и горения угольного топлива с использованием плазменной активации. Экспериментальные исследования проводились на стенде тепловой мощностью до 5 МВт. В качестве экспериментальных образца был выбран каменный уголь марки ГД, отобранный после шаровой барабанной мельницы с остатком на сите R90 = 15 %. Условия были приближены к промышленным, применяемым при растопке угольных котлов. Определен рабочий диапазон скоростей пылеугольного потока в электродуговом блоке. Установлено, что стабильный процесс воспламенения и дальнейшего горения угля возможен при скоростях потока на электродуговом блоке от 6 до 13 м/с. Проведена растопка экспериментального состояния до температуры 1000 °С при коэффициентах избытка воздуха *а* от 0,5 до 0,7, время растопки не превышало 200 с.

Ключевые слова: горение, эксперимент, плазмотрон, уголь. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-19-28

Введение

Угольные теплоэлектростанции по-прежнему вносят существенный вклад в производство энергии – 40 %. Значительная доля угольного топлива в выработке электроэнергии обусловлена большими мировыми запасами – 1055 млрд тонн, конкурентоспособными низкими ценами [1].

Одним из важнейших этапов работы угольной теплоэлектростанции является растопка котла из холодного состояния, нагрев котла до минимальной установленной рабочей мощности. Время запуска пылеугольного котла сильно зависит от конструкции котла и свойств угольного топлива, может варьироваться от 3 до 14 часов и производится несколько раз в год (до 25 пусков ежегодно на один котел). По прогнозам, в будущем количество запусков пылеугольных котлов в год будет увеличиваться, что связано с непостоянством остаточной нагрузки и увеличением возобновляемых источников энергии [2].

Для запуска пылеугольного котла применяются технологии, основанные на использовании дополнительного источника тепла [3]. Традиционной технологией запуска пылеугольных котлов является использование высокореакционного вспомогательного жидкого топлива – мазута. Для поддержания низкой вязкости мазут необходимо подогревать до температуры 80–100 °С. Подогретый мазут распыляется через форсунки в котел и поджигается дуговым запальником. Данная технология является дорогостоящей – цена мазута с каждым годом увеличивается, и трудоемкой – подготовка мазута к использованию и противопожарная безопасность. Средние мировые затраты на нагрев котла мазутом из холодного состояния составляют 2200 ₽/МW установленной мощности пылеугольного котла. Кроме этого, содержание серы в мазуте выше, чем в угле, что влечет увеличение выбро-

© 2024 Бутаков Е.Б., Абдуракипов С.С., Кочергин Д.О., Виноградов С.В., Почтарь А.С.

сов токсичных оксидов серы. При сжигании мазута наблюдается высокотемпературная коррозия поверхностей нагрева, одной из причин которой, является ванадий, содержащийся в мазуте. На теплоэлектростанциях пытаются заменить устаревшие мазутные технологии. Кроме того, для современного развития мировой теплоэнергетики характерно сокращение использования дефицитного жидкого топлива, являющегося ценным сырьем для нефтеперерабатывающей промышленности. [4, 5]. Необходимы современные надежные технологии запуска котлов с большим сроком эксплуатации.

Одной из технологий запуска пылеугольного котла, является использование плазменной топливной системы (ПТС) [6, 7]. Основная идея технологии заключается в нагреве пылеугольного топлива высокотемпературной плазменной дугой, генерируемой плазмотроном постоянного тока [8]. Мощность плазмотронов варьируется от 100 до 350 кВт. Данная технология получило широкое применение на пылеугольных станциях США, Канады, Германии, Китая [9]. Однако, существуют некоторые недостатки эксплуатации плазмотронов постоянного тока: низкий ресурс работы электродов (составляет около 500 часов); сложностью в эксплуатации системы охлаждения плазмотрона и необходимости подведения плазмообразующего газа; громоздкостью и высокой стоимостью источников постоянного тока.

Альтернативой технологии ПТС, является плазменная система воспламенения (ПСВ), основанная на плазмотроне с переменным током. В PIS пылеугольное топливо вместе с окислителем пропускается через электродный блок, таким образом увеличивается время контакта высокотемпературных плазменных дуг с топливом. Плазмотрон переменного тока обладает простотой технической реализацией, малым потреблением электрической мощности от 2 до 10 кВт, длительным ресурсом непрерывной работы (исчисляется годами), отсутствием необходимости применения систем охлаждения.

Целью данной работы является исследование перспективной технологии, основанной на применении высоковольтного плазмотрона переменного тока.

2. Экспериментальные исследования и результаты

Схематично плазменная технология воспламенения угольного пыли представлено на рис. 1. Технология ПСВ позволяет заменить традиционные технологии растопки котлов и стабилизации горения, основанные на использовании резервных топлив мазут/газ. Перемешенная угольная пыль с первичным воздухом *1* поступает в электродуговой блок плазмотрона *2*, в котором генерируется высокотемпературные плазменные дуги *3*, являющиеся источником тепла для инициирования воспламенения и частичной газификации угля. Высокореакционная пылеугольная смесь поступает в камеру сгорания, где происходит смешение с вторичным воздухом *4* и продолжается активное горение угля в котле *5*.

Основной частью ПСВ является электродуговой блок. Электродуговой блок состоит из двух пар цилиндрических медных электродов, закрепленных на восьми проходных изоляторах (рис. 2, a). Питание на электроды подается с использованием специально разработанных преобразователей частоты, состоящих из высокочастотного транзисторного инвертора, со специальной формой выходного напряжения и высокочастотный высоковольтный трансформатор оригинальной конструкции. В процессе работы на электродах генерируются две несвязанные электродные дуги (рис. 2, δ).

Испытания ПСВ при сжигании угольной пыли проводились в опытной топке мощностью 5 МВт в Институте теплофизики СО РАН (рис. 3). Данный опытный стенд был выбран для изучения возможности использования ПСВ на промышленном котле.



Рис. 1 – Схематическое изображения работы ПСВ:
1 – пылеугольная смесь; 2 – электродуговой блок; 3 – плазменные дуги;
4 – вторичный воздух; 5 – пылеугольное пламя
Fig. 1 – Schematic representation of the PSV operation:
I – pulverized coal mixture; 2 – electric arc block; 3 – plasma arcs;
4 – secondary air; 5 – pulverized coal flame



Puc. 2 – Электродуговой блок: a – схема; б – воспламенение пылеугольной пыли в электродуговом блоке Fig. 2 – Electric arc unit: a – diagram; b – ignition of pulverized coal dust in the electric arc unit

Опытный стенд цилиндрической формы (длина 5 м), расположен горизонтально и разделен на камеры разной длины и диаметра. Камера сгорания (внутренним диаметром 0,3 м, длина 2 м) предназначена для воспламенения и горения топлива, а также проведения визуальных наблюдений; в камере дожигания (внутренним диаметром 1 м, длина 3 м) происходит догорание топлива. Корпус топки выполнен из стали толщиной 5 мм, внутри топка теплоизолирована шамотом толщиной 125 мм. Топка может работать как с вихревой тангенциальной подачей распыленного топлива, так и в прямоточном режиме. Основными элементами топки является (рис. 3): система топливоподачи; прямоточная горелка для ПСВ, расположенная горизонтально на оси топки; камера сгорания с измерительными датчиками и смотровыми окнами; камера догорания с тангенциальной подачей вторичного воздуха; дымосос.

Топка работает следующим образом: уголь засыпается в бункер, после чего шнековым питателем подается в воздушный тракт, где смешивается с первичным воздухом (Рв₁). Подвод первичного воздуха в смеситель осуществляется с воздуходувки марки MSH BL-520-670. Пылеугольная смесь поступает в электродуговой блок, где инициируется воспламенение угля при прохождении плазменных дуг. Горючая смесь прямоточно подается в камеру сгорания, где смешивается с вторичным воздухом (Рв₂), подаваемым через тангенциальный закручивающий аппарат. В камере сгорания протекает активное горение угольной пыли. Пройдя камеру сгорания, недогоревшее топливо поступает в камеру дожигания, где смешивается с третичным воздухом, необходимым для полного выгорания топлива. Третичный воздух подается в камеру дожигания через тангенциальный закручивающий анодается в камеру дожигания через тангенциальный закручивающий аппарат.



Puc. 3 – Экспериментальный полупромышленный стенд Fig. 3 – Experimental semi-industrial stand

Температура подаваемого воздуха во всех экспериментах составляла 22 °С.

Перед проведением серии экспериментов производилась калибровка шнекового питателя угля и датчиков расхода воздуха. Минимальный расход воздуха определялся из условий транспортировки угольного топлива. Измерение расходов воздуха (G_{air1}, G_{air2}, G_{air3}) проводилось в течение всего эксперимента.

Таблица 1 / Table 1

Мощность плазмотрона, кВт	2–10
Напряжение, В	10 000
Ток дуги, А	2
Частота тока, кГц	20
Масса плазмотрона, кг	15
Ресурс работы, ч	5000
Температура плазменной дуги, К	2000–3500

Технические характеристики плазмотрона переменного тока Technical characteristics of the AC plasma torch

В настоящей работе проведены опытно-промышленные испытания ПСВ при прямоточном сжигания угольной пыли в опытной топке.

На протяжении всего эксперимента проводился визуальный контроль процесса горения угольной пыли и измерения температуры по длине стенда. В экспериментах использован каменный уголь углеразреза Кузнецкого бассейна марки Д, характеристики которого приведены в табл. 2.

Уголь отбирался после шаровой барабанной мельницы с остатком на сите R90 = 15 %.

Таблица 2 / Table 2

Технический анализ				Элем	ентный ана	лиз, %		
Wr,%	Ar, %	Vr, %	Qsr, MJ/kg	Cr	Hr	Nr	Sr	Or
5,4	22,3	32,3	20,0	54,6	4,1	1,3	0,5	11,8

Технический и элементный анализ угля Coal technical and elemental analysis

Первоначально производилось включение ПСВ и первичного воздуха, мощность, затрачиваемая на работу плазмотрона, составила 5 кВт. Включение ПСВ приводит к незначительному росту температуры воздуха, вдуваемого в камеру сгорания.

Для выявления характерных режимов работы технологии ПСВ эксперименты проходили в два этапа. Основной задачей первой серии экспериментов (\Im_1 , \Im_2 , \Im_3) (табл. 3) являлось определение характерных режимов зажигания угольной пыли в зависимости от расхода первичного воздуха и скорости на электродуговом блоке. Расход воздуха изменялся от минимального, необходимого для транспортировки угольной пыли, до максимального, при котором происходит срыв факела в камере сгорания.

Таблица 3 / Table 3

Программа первой серии экспериментов First series of experiments program

Параметр	Э1	\Im_2	Э3
Расход угля Ру, кг/ч	120	120	120
Расход первичного воздуха Рв1, м3/ч	114	240	330
Скорость воздуха в плазмотроне, м/с	6	13	18

В Э₁ присутствовала сепарация угольной пыли в нижней части электродного блока, несмотря на это зажигание угольной пыли было устойчивым с низкой яркостью пламени. Для прогрева стенок камеры сгорания до 900 °C потребовалось 500 с. В камере дожигания через смотровое окно наблюдались недогоревшие частички угля. В Э₂ был увеличен расход воздуха до 240 м³/ч. Уголь стабильно воспламенялся в электродуговом блоке в течение всего эксперимента, образовался факел в камере сгорания. Время выхода на температуру 900 °C составило 200 с. В случае с Э₃ при скорости на электродуговом блоке 18 м/с угольная пыль частично воспламеняятся, но основная масса угля пролетает в камеру сгорания без горения.

Во второй серии экспериментов при смене режимов расход воздуха поддерживался постоянным, изменялась подача угля (табл. 3). Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания *а* уменьшался от 0,7 до 0,5.

На рис. 4–6 показаны зависимости температуры на экспериментальном полупромышленном стенде в зависимости от времени, с входными параметрами, указанными в режимах 1-3 (табл. 3).

При прохождении пылеугольной смеси через высокотемпературные плазменные дуги, генерируемые плазмотроном, наблюдалось воспламенение топлива и дальнейшее горение в камере сгорания.

Длительность экспериментов составляла около 5 мин, что достаточно для разогрева топочного пространства до температуры 1000 °С.





Fig. 4 – Temperature distribution along the length of the combustion chamber in the firing mode from a cold state using ESV, coal consumption 103 kg/h



Рис. 5 – Распределение температуры по длине экспериментального стенда в режиме растопки из холодного состояния с использованием ПСВ, расход угля 122 кг/ч

Fig. 5 – Temperature distribution along the length of the experimental stand in the kindling mode from a cold state using PSV, mode 122 kg/h

Основное горение протекало в начальной зоне камеры сгорания, где расположена термопара l (рис. 4–6), видно, что происходит стремительный рост температуры после начала подачи угля. Во всех режимах наблюдается стабильное воспламенение и горение, в режиме l температура в камере дожигания растет с меньшей скоростью, чем в режимах 2 и 3. Режимы 2 и 3 схожи по скорости прогрева камеры сгорания и температурному профилю по длине экспериментального стенда. Увеличение расхода угля приводит к росту температуры в камере дожигания.



Рис. 6 – Распределение температуры по длине камеры сгорания в режиме растопки из холодного состояния с использованием ПСВ, расход угля 168 кг/ч

Fig. 6 – Temperature distribution along the length of the combustion chamber in the combustion mode from a cold state using EPS, coal consumption 168 kg/h

Во всех режимах наблюдается стабильное воспламенение и горение, в первом случае температура в начальной зоне достигает 900 °С и затем растет с меньшей скоростью, чем в режимах 2 и 3. Режимы 2 и 3 схожи по скорости прогрева камеры сгорания и температурному профилю по длине экспериментального стенда.

Таблица 4 / Table 4

Параметр	Э1	\Im_2	Э3
Расход угля Р _у , кг/ч	100	125	170
Расход воздуха (Рв ₁ + Рв ₂ /Gв ₃), м ³ /ч	1050 (350/700)	1050 (350/700)	1050 (350/700)
a	0,4	0,55	0,65

Программа второй серии экспериментов Program of the second series of experiments

В результате проведения экспериментов показана возможность воспламенения и горения угля с использованием ПСВ мощностью 5 кВт.

Заключение

Разработана и спроектирована новая ПСВ-технология воспламенения угольного топлива, основанная на использовании плазмотрона переменного тока мощностью от 2 до 10 кВт.

В результате экспериментов на пилотной установке установлено влияние скорости пылевоздушной смеси в электродуговом блоке на воспламенение и горение; устойчивое воспламенение угольного топлива происходит при скорости в электродуговом блоке от 6 до 13 м/с. Время выхода на режим экспериментального стенда до температуры 1000 °С при коэффициентах избытка воздуха от 0,7 до 0,5 составляло не более 200 с. С увеличением подачи угольного топлива в электродуговую установку интенсифицируется процесс воспламенения: пламя в камере сгорания образуется мгновенно. Результаты экспериментов указывают на возможность использования технологии ПСВ для розжига и интенсификации горения угольной пыли на теплоэлектростанции.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. WEC. World Energy Scenarios 2019: European regional perspectives. URL: https://www. worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2019-european-regional-perspectives (accessed: 04.03.2024).
- 2. Annual Energy Outlook 2018 / U.S. Energy Information Administration. URL: https://www.eia.gov/outlooks/archive/aeo18/ (accessed: 04.03.2024).
- IEA. World Energy Outlook 2017 / International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/ reports/world-energy-outlook-2017 (accessed: 04.03.2024).
- 4. IEA. Coal 2019 Analysis and forecast to 2024 / International Energy Agency. URL: https://www.iea.org/reports/coal-2019 (accessed: 04.03.2024).
- Modelling and simulation of a coal-fired power plant for start-up optimization / M. Hübel, S. Meinke, M. Andrén, C. Wedding // Applied Energy. – 2017. – Vol. 208. – P. 319–331. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.033.
- Optimization of the boiler start-up taking into account thermal stresses / J. Taler, P. Dzierwa, D. Taler, P. Harchut // Energy. – 2015. – Vol. 92 (1). – P. 160–170.
- Brouwer A.S., Seebregts A., Faaij A. Operational flexibility and economics of power plants in future low-carbon power systems // Applied Energy. – 2015. – Vol. 156. – P. 107–128.
- Han Y., Shen B., Zhang A.A. Techno-economic assessment of fuel switching options of addressing environmental challenges of coal-fired industrial boilers: an analytical work for China // Energy Procedia. 2017. Vol. 142. P. 3083–3087.
- Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modeling and full-scale test // Fuel. – 2014. – Vol. 126. – P. 294–300. – DOI: 10.1016/j.fuel.2014.02.047.

EXPERIMENTAL STUDIES OF IGNITION AND COMBUSTION OF COAL USING PLASMA ACTIVATION

Butakov E.B., Abdurakipov S.S., Kochergin D.O., Vinogradov S.V., Pochtar A.S. Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS

This work presents experimental studies of a promising method of ignition and combustion of coal fuel using plasma activation. Experimental studies were carried out on a bench with a thermal power of up to 5 MW. As an experimental sample, hard coal of the GD grade was chosen selected after a ball drum mill with a sieve residue of R90 = 15%. The conditions were close to industrial ones used when lighting coal boilers. The operating range of pulverized coal flow velocities in the electric arc unit has been determined. It has been established that a stable process of ignition and further combustion of coal is possible at flow rates on the electric arc unit from 6 to 13 m/s. The experimental stand was kindled from a cold state to a temperature of 1000 °C at excess air coefficients a from 0.5 to 0.7, the kindling time did not exceed 200 seconds.. Based on the experiments, CFD modeling determined whether the process conditions were met.

Keywords: combustion, experiment, plasmatron, coal. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-19-28

REFERENCES

1. WEC. *World Energy Scenarios 2019: European regional perspectives*. Available at: https://www. worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2019-european-regional-perspectives (accessed 04.03.2024).

- U.S. EIA. Annual Energy Outlook 2018. Available at: https://www.eia.gov/outlooks/archive/ aeo18/ (accessed: 04.03.2024).
- 3. IEA. *World Energy Outlook 2017*. Available at: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017 (accessed 04.03.2024).
- IEA. Coal 2019. Analysis and forecast to 2024. Available at: https://www.iea.org/reports/coal-2019 (accessed 04.03.2024).
- Hübel M., Meinke S., Andrén M., Wedding C. Modelling and simulation of a coal-fired power plant for start-up optimization. *Applied Energy*, 2017, vol. 208, pp. 319–331. DOI: 10.1016/ j.apenergy.2017.10.033.
- 6. Taler J., Dzierwa P., Taler D., Harchut P. Optimization of the boiler start-up taking into account thermal stresses. *Energy*, 2015, vol. 92 (1), pp. 160–170.
- Brouwer A.S., Seebregts A., Faaij A. Operational flexibility and economics of power plants in future low-carbon power systems. *Applied Energy*, 2015, vol. 156, pp. 107–128.
- Han Y., Shen B., Zhang A.A. Techno-economic assessment of fuel switching options of addressing environmental challenges of coal-fired industrial boilers: an analytical work for China. *Energy Procedia*, 2017, vol. 142, pp. 3083–3087.
- Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modeling and full-scale test. *Fuel*, 2014, vol. 126, pp. 294– 300. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.02.047.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Бутаков Евгений Борисович – родился в 1990 году, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 53 научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. Е-mail: e_butakov@mail.ru).

Butakov Evgenii Borisovich (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), senior researcher, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He is the author of 53 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: e_butakov@mail.ru).

Абдуракипов Сергей Сергеевич – родился в 1990 году, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр., ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 47 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. Email: s.s.abdurakipov@gmail.com).

Abdurakipov Sergey Sergeevich (b. 1990) – Candidate of Sciences (Phys.&Math.), Researcher, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He is the author of 53 scientific papers. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: s.s.abdurakipov@gmail.com).

Кочергин Дмитрий Олегович – родился в 1994 году, инженер, ООО «КОТЭС Инжиниринг». Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано пять научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. Е-mail: dmitriy.kochergin@cotes-e.com).

Kochergin Dmitry Olegovich – (b. 1994) engineer, COTES Engineering LLC. His research interests are currently focused on combustion, gasification, anignition. He has 5 scientific papers published. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: dmitriy.kochergin@cotes-e.com).

Виноградов Сергей Владимирович – родился в 2001 году, лаборант, ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано три научные работы. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: serj.vin@yandex.ru). Vinogradov Sergey Vladimirovich (b. 2001), laboratory assistant, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He has 3 scientific papers published. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: serj.vin@yandex.ru).

Почтарь Антон Сергеевич – родился в 2001 году, лаборант, ИТ СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано три научные работы. (Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, д. 1. E-mail: antonpochtar01@mail.ru).

Pochtar Anton Sergeyevich (b. 2001), laboratory assistant, IT SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He has 3 scientific papers published. (Address: 1, Ac. Lavrentiev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: antonpochtar01@mail.ru).

Статья поступила 15 ноября 2023 г. Received November 15, 2023

To Reference:

Butakov E.B., Abdurakipov S.S., Kochergin D.O., Vinogradov S.V., Pochtar A.S. Eksperimental'nye issledovaniya vosplameneniya i goreniya kamennogo uglya s primeneniem plazmennoi aktivatsii [Experimental studies of ignition and combustion of coal using plasma activation]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 19–28. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-19-28.