

Научная статья

Original article

УДК 536.46; 533.6; 532.517.4

DOI 10.55186/27131424_2023_5_6_4



**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И
КОНЦЕНТРАЦИИ УГАРНОГО ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ПЛАЗМЕННОГО
ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЯ**

NUMERICAL STUDY OF CHANGES IN TEMPERATURE AND CARBON
MONOXIDE CONCENTRATION DURING PLASMA IGNITION OF COAL

Батухтин Андрей Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры энергетики, Забайкальский государственный университет, Россия, г. Чита

Басс Максим Станиславович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры энергетики, Забайкальский государственный университет, Россия, г. Чита

Карпенко Юрий Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Забайкальский государственный университет, Россия, г. Чита

Кузнецова Надежда Сергеевна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры химии, Забайкальский государственный университет, Россия, г. Чита

Batukhtin Andrey Gennadievich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Energy, Transbaikal State University, Russia, Chita

Bass Maxim Stanislavovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Energy, Transbaikal State University, Russia, Chita

Karpenko Yury Evgenievich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Transbaikal State University, Russia, Chita

Kuznetsova Nadezda Sergeevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Department of Chemistry, Transbaikal State University, Russia, Chita

Аннотация

В работе выполнен расчет с помощью оптимизированной кинетической программы «Плазма-Уголь» процесса плазменно-воздушной подготовки бурого угля Харанорского месторождения Забайкальского края в экспериментальной установке с цилиндрическим каналом и плазматронами. Проведены численные эксперименты по изучению энергетического воздействия разной мощности на температуру и выход летучих. Установлено, что оптимальная суммарная мощность плазматронов для поддержания устойчивого режима горения аэросмеси составляет 450 кВт. Определена достаточная концентрация угольной пыли 1,5 кг/кг воздуха, обеспечивающая необходимую температуру газа для воспламенения топлива на входе в топочную камеру котла.

S u m m a r y

The work carried out a calculation using the optimized kinetic program “Plasma-Coal” of the process of plasma-air preparation of brown coal from the Kharanorsk deposit of the Trans-Baikal Territory in an experimental setup with a cylindrical channel and plasmatrons. Numerical experiments were carried out to study the energy effect of different powers on temperature and volatile yield. It has been established that the optimal total power of plasma torches to maintain a stable combustion mode of the air mixture is 450 kW. A sufficient concentration of coal dust was determined to be 1,5 kg/kg of air, providing the required gas temperature to ignite the fuel at the entrance to the combustion chamber of the boiler.

Ключевые слова: подготовка топлива, уголь, плазма, плазматрон, мощность, температура, угарный газ

Key words: fuel preparation, coal, plasma, plasmatron, power, temperature, carbon monoxide

Одним из актуальных направлений энергетики в современном мире является повышение экологической и экономической эффективности использования разных видов топлива. Снижение потребления мазута для растопки и повышение эффективности сжигания низкосортных углей – задачи, которые привлекают внимание многих исследователей в России [2, 4, 5] и за рубежом [1, 3, 6-8, 10]. Одним из наиболее перспективных решений существующих проблем является организация термохимической подготовки топлива к сжиганию, идея которой разрабатывается с прошлого века [5, 9].

Цель работы – численное и экспериментальное исследование закономерностей движения, нагрева пылевидного угольного топлива, концентрации угарного газа при разной суммарной мощности плазмотронов.

Материалы и методы. В основу сконструированной экспериментальной установки положена схема камеры электротермохимической подготовки твердого топлива к сжиганию с плазмотроном и вихревой пылеугольной горелкой, представленная в работах О.А. Лаврищева и А.Б. Устименко [3]. Установка включает плазменно-топливную систему, бункер пылевидного топлива с питателем, плазмотроны, циклонную камеру, дутьевые вентиляторы, трубопроводы воздуха (первичного и вторичного), дымосос с трубой, газоход, котел-утилизатор, трубопровод охлаждающей воды, измерительные отверстия.

Рабочая масса – Харанорский бурый уголь, характеристики которого указаны в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики угля, использовавшегося в эксперименте

Наименование	Обозначение	Значение
Теплота сгорания рабочей массы (кДж/кг)	Q_{H}^{P}	12486
Выход летучих на горючую массу (%)	V^{daf}	44
Состав летучих в процентах от горючей массы (%)		
Оксид углерода (II)	CO	20

Оксид углерода (IV)	CO ₂	8
Метан	CH ₄	7
Водород	H ₂	2
Водяные пары	H ₂ O	28
Бензол	C ₆ H ₆	35
Элементарный состав рабочей массы (%)		
Влажность	W ^p	40,5
Зольность	A ^p	8,6
Сера (органическая и колчеданная)	S ^p	0,3
Углерод	C ^p	36,4
Водород	H ^p	2,3
Азот	N ^p	0,5
Кислород	O ^p	11,4

Численные расчеты проведены согласно математической модели А.В. Мессерле [6] с применением компьютерной программы «Плазма-уголь», составленной на языке C++ применительно к Windows. Точность численного расчета была повышена путем увеличения числа шагов расчетной сетки, использования метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности и интегрирования уравнений химической кинетики в пределах шага. Математическая модель была дополнена ранее отсутствующими уравнениями химической кинетики, увеличена точность расчета с некоторыми изменениями, дополнениями и упрощениями основной математической модели.

Для численных исследований применены следующие исходные данные: скорость газа и частиц на входе в канал 5 м/с; температура воздуха 328 К; коэффициент избытка воздуха 1,2; расход угольной пыли при заданной концентрации 0,15 кг/с, концентрация пыли 1,5 кг/м³, мощность плазмотронов (N_{пл}) изменялась в интервале значений 200, 300, 450 кВт; концентрация угольной пыли

($C_{пл}$) – в диапазоне 0,4; 1; 2 кг/кг воздуха при постоянной суммарной мощности плазмотронов 450 кВт.

Результаты и их обсуждение. По результатам расчетов, проведенных в программе MS Excel, получены данные по влиянию суммарной мощности плазмотронов на температуру газа и концентрацию горючего компонента – окиси углерода (Рис. 1, 2).

Как видно из графиков, при суммарной мощности плазмотронов 200 кВт температура газа на выходе из канала составляет около 600 К, что намного меньше температуры самовоспламенения угля Харанорского месторождения (более 1000 К). Более высокая температура достигается при увеличении мощности до 300 кВт, однако и таких значений недостаточно для успешной термоподготовки. Наиболее оптимальной для угля данного типа является мощность, равная 450 кВт. Температура растет до максимальных значений за счет реакции окисления углерода и на выходе плазменно-топливной системы между частицами и газом устанавливается термическое равновесие при температуре около 1200-1300 К [1, 10].

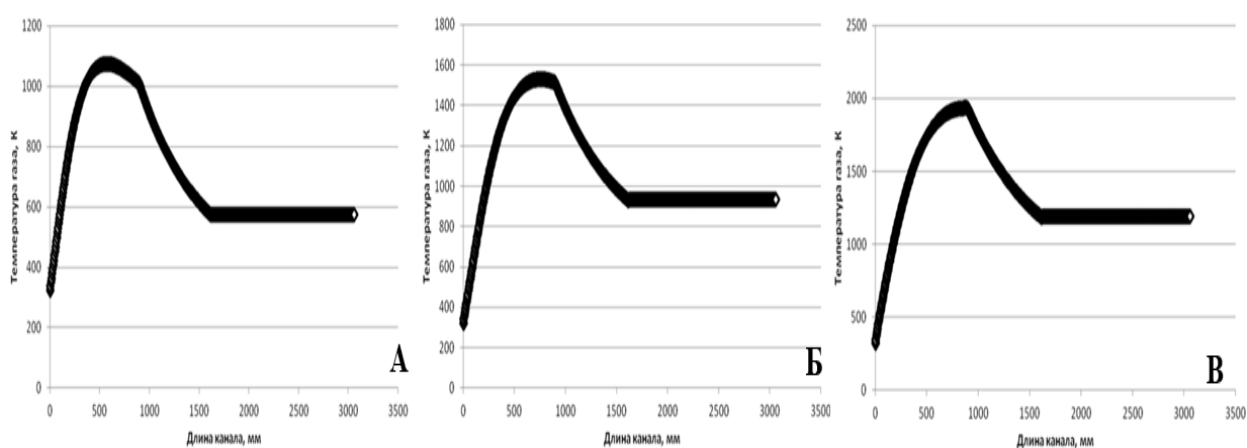


Рис. 1. Изменение температуры газа по длине канала,
 $N_{пл}=200$ (А), 300 (Б), 450 (В) кВт

Рост температуры в центре факела и ее понижение на выходе существенно влияет на химические процессы синтеза продуктов реакций горения, так как температура – это главный фактор, определяющий скорость окислительно-восстановительных превращений, составляющих топливовоздушной смеси [1, 6].

Концентрация окиси углерода достигает самого высокого значения 0,00036 кг/м³ при суммарной мощности 450 кВт на середине длины канала, при 300 кВт максимальные значения в 2 раза ниже, а при 200 кВт более чем в 10 раз меньше указанного экстремума (Рис. 2).

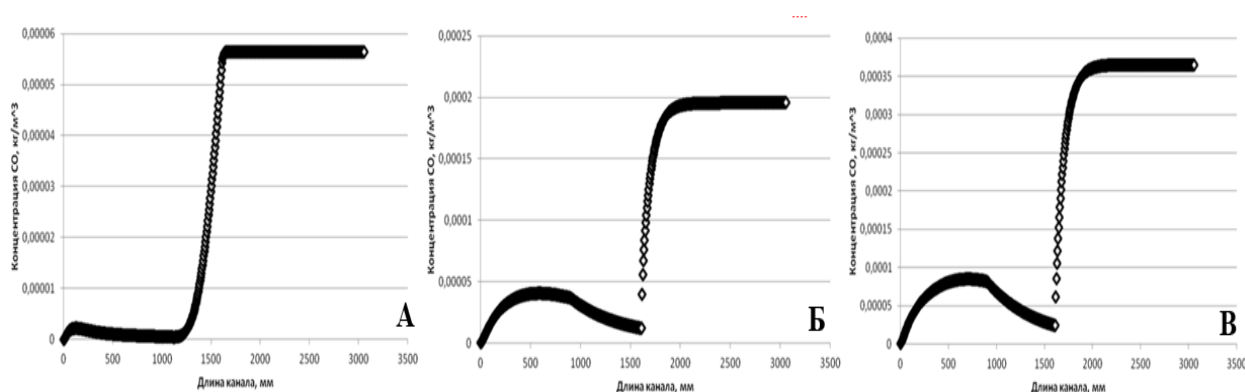


Рис. 2. Изменение концентрации СО (кг/м³) по длине канала, N_{пл}=200 (А), 300 (Б), 450 (В) кВт

Кривые изменения концентрации угарного газа, представленные на рисунке 2 подтверждают, что поведение уровня продуктов подготовки пылеугольного топлива к сжиганию качественно подобно для разных мощностей плазмотронов [4]. СО (II) концентрируется в области распространения потока топлива, где находится входящий в его состав углерод. Концентрации горючих компонентов, в том числе и СО (II) характеризуются сложными корреляциями по длине плазменно-топливной системы и достигают максимума на выходе [5-6, 10]. Как известно, недостаточные значения температуры в канале обуславливают низкую скорость окисления топливовоздушной смеси, что негативно сказывается

на реакционной способности горючего газа и коксового остатка, воспламенении и последующем устойчивом горении смеси [2, 8, 9].

Анализ данных на рисунке 3 показывает, что при концентрации пыли менее 1 кг/кг воздуха температура газа не поднимается до необходимой для воспламенения, так как при крупных частицах горение идет менее интенсивно, а значит выделяющейся теплоты не будет хватать для достижения нужной температуры и приведет к повышенным затратам энергии.

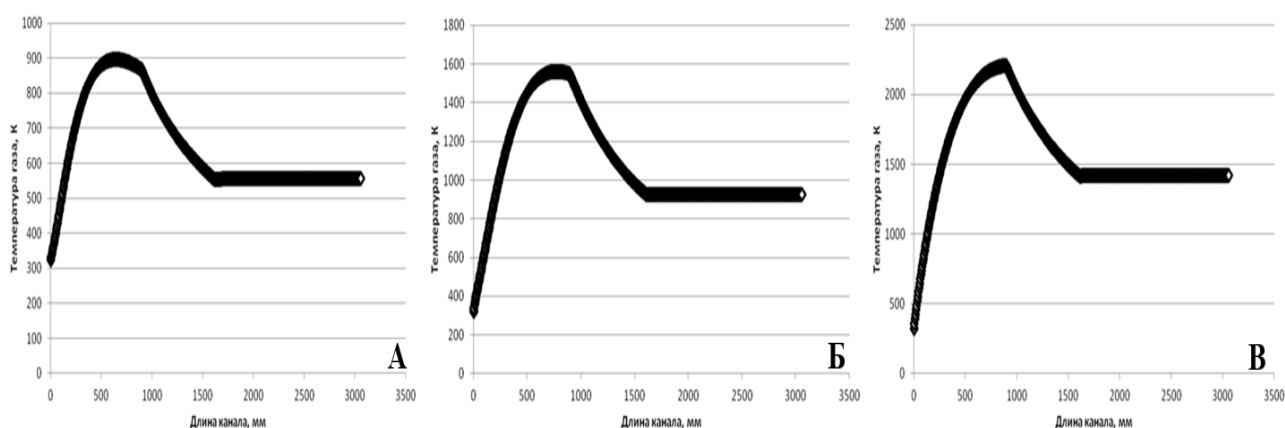


Рис. 3. Изменение температуры газа по длине канала,
 $C_{II} = 0,4$ (А), 1 (Б), 2 (В) кг/кг

Концентрации пыли 1 кг/кг воздуха также недостаточно для завершения процессов, хотя температура газа на выходе из канала несколько выше, чем при концентрации 0,4 кг/кг. Значения показателя 2 кг/кг воздуха обеспечивают необходимую температуру газа для воспламенения угольной пыли при смешении со вторичным воздухом на входе в топочную камеру котла. Однако такая концентрация излишне высокая, целесообразным является значение 1,5 кг/кг воздуха, создающее оптимальную температуру термохимической подготовки топлива 1100-1200 К, при которой концентрация горючих газов достигает максимума [2, 4].

Выводы. Таким образом, в результате проведенных численных экспериментов были получены температурные и концентрационные поля СО, изучено влияние мощности плазмотронов на температуру и уровень продуктов

термохимической подготовки топлива. В результате экспериментальной работы и расчетов установлен диапазон суммарной мощности плазмотронов 450 кВт и концентрация угольной пыли 1,5 кг/кг воздуха, достаточные для поддержания стабильного порядка горения аэросмеси на выходе из канала. Это подтверждается высокими значениями температурного поля (до 1300 °С) и концентрации горючих компонентов на выходе из плазменно-топливной системы.

Литература

1. Аскарлова А.С., Болегенова С.А. Численное исследование аэродинамических и теплофизических характеристик пылеугольного топлива: монография. Алматы: Қазақ университеті, 2015. 150 с.
2. Дробчик В. В., Шиляев А.М., Волокитин Г.Г. Исследование условий воспламенения пылевоздушной смеси низкосортных топлив // Известия ТПУ. 2010. Т. 316. № 4. С. 52-55.
3. Лаврищев О.А., Устименко А.Б. Плазменно-топливные системы и принципы их функционирования // Горение и плазмохимия. 2022. № 20. С. 51-62.
4. Мессерле А.В., Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменная термохимическая подготовка к сжиганию пылеугольного топлива // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. Вып. 3. С. 366–374.
5. Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазмохимические технологии переработки топлив // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2012. Т. 55. Вып. 4. С. 30-34.
6. Процессы тепломассопереноса в топочных камерах при горении термохимически активированного топлива / В.Е. Мессерле, А.С. Аскарлова, С.А. Болегенова, П. Шафарик, В.Ю. Максимов, С.А. Болегенова, А.О. Нугыманова // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26. № 6. С. 977-989.
7. Технологии безмазутной растопки котлов и стабилизации воспламенения пылеугольного факела на тепловых электростанциях / Б.К. Алияров, М.Б. Алиярова, У. Жалмагамбетова, А.К. Мергалимова, В.Е. Мессерле, А.Б. Устименко // Горение и плазмохимия. 2019. № 17. С. 193-202.

8. Умбеткалиев К.А., Устименко А.Б. Кинетический расчет плазменно-воздушной и плазменно-паровой газификации твердых топлив // Горение и плазмохимия. 2022. № 2. С. 73-81.
9. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-aided solid fuel combustion // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. № 31. P. 3353–3360.
10. Numerical simulation of pulverized coal combustion in a power boiler furnace / A. S. Askarova, V. E. Messerle, A. B. Ustimenko, S. A. Bolegenova, V. Yu. Maximov, Z. Kh. Gabitova // High Temperature. 2015. Vol. 53. № 3. P. 445–452.

Literature

1. Askarova A.S., Bolegenova S.A. Numerical study of aerodynamic and thermophysical characteristics of pulverized coal fuel: monograph. Almaty: Kazakh University, 2015. 150 p.
2. Drobchik V.V., Shilyaev A.M., Volokitin G.G. Study of the conditions of ignition of a dust-air mixture of low-grade fuels // Izvestia TPU. 2010. T. 316. No. 4. P. 52-55.
3. Lavrishchev O.A., Ustimenko A.B. Plasma fuel systems and principles of their functioning // Combustion and plasma chemistry. 2022. No. 20. P. 51-62.
4. Messerle A.V., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma thermochemical preparation for combustion of pulverized coal fuel // Thermophysics of high temperatures. 2017. T. 55. Issue. 3. pp. 366–374.
5. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-chemical technologies for fuel processing // News of universities. Chemistry and chemical technology. 2012. T. 55. Issue. 4. pp. 30-34.
6. Processes of heat and mass transfer in combustion chambers during the combustion of thermochemically activated fuel / V.E. Messerle, A.S. Askarova, S.A. Bolegenova, P. Safarik, V.Yu. Maksimov, S.A. Bolegenova, A.O. Nugymanova // Thermophysics and aeromechanics. 2019. T. 26. No. 6. P. 977-989.
7. Technologies for oil-free firing of boilers and stabilization of pulverized coal flame ignition at thermal power plants / B.K. Aliyarov, M.B. Aliyarova, U.

Zhalmagambetova, A.K. Mergalimova, V.E. Messerle, A.B. Ustimenko // Combustion and plasma chemistry. 2019. No. 17. pp. 193-202.

8. Umbetkaliev K.A., Ustimenko A.B. Kinetic calculation of plasma-air and plasma-steam gasification of solid fuels // Combustion and plasma chemistry. 2022. No. 2. P. 73-81.
9. Karpenko E.I., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma-aided solid fuel combustion // Proceedings of the Combustion Institute. 2007. № 31. P. 3353–3360.
10. Numerical simulation of pulverized coal combustion in a power boiler furnace / A. S. Askarova, V. E. Messerle, A. B. Ustimenko, S. A. Bolegenova, V. Yu. Maximov, Z. Kh. Gabitova // High Temperature. 2015. Vol. 53. № 3. P. 445–452.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 123102000012-2 Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива, соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г.)

© Батухтин А.Г., Басс М.С., Карпенко Ю.Е., Кузнецова Н.С., Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №6/2023.

Для цитирования: Батухтин А.Г., Басс М.С., Карпенко Ю.Е., Кузнецова Н.С. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ УГАРНОГО ГАЗА В ПРОЦЕССЕ ПЛАЗМЕННОГО ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЯ// Международный журнал прикладных наук и технологий "Integral" №6/2023.