

УДК 62-643, 662.61, 536.462

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛЕУГОЛЬНОЙ ВЗВЕСИ В ГАЗОВОЙ СТРУЕ $\text{CH}_4\text{--N}_2$

С. В. Алексеенко, Е. Б. Бутаков, Л. М. Чикишев, Д. К. Шараборин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: aleks@itp.nsc.ru, e.butakov@mail.ru, l.chikishev@gmail.com, sharaborin.d@gmail.com

Проведены экспериментальные исследования факельного диффузионного горения газа при различных расходах $\text{CH}_4\text{--N}_2$ и постоянном расходе угля. Получены кривые уноса диффузионного пламени для различных диаметров сопла. Показано, что увеличение диаметра сопла приводит к уменьшению минимального остатка расхода горючего газа, при котором возможно устойчивое горение. Незначительное уменьшение остатка расхода горючего газа наблюдается также при подаче угля. Проведена регистрация флюоресцентного свечения ОН, позволяющего анализировать положение и динамику фронта пламени.

Ключевые слова: факелы, горение пылеугольной взвеси, воспламенение, панорамные оптические измерения.

DOI: 10.15372/PMTF20200509

Введение. В долгосрочной перспективе уголь остается одним из наиболее важных ресурсов теплоэнергетического комплекса вследствие больших мировых запасов и конкурентоспособных низких цен [1]. В России развитие производства электроэнергии из ископаемого топлива в значительной степени связано с повышением эффективности существующих электростанций, работающих на угле, в том числе в процессе газификации угля с получением синтез-газа [2]. При этом важной актуальной задачей является уменьшение количества образующихся вредных веществ, особенно сажи и NO_x [3, 4]. Для решения данной задачи, в частности, необходима оптимизация аэродинамики факельного горения в пылеугольных котлах с целью увеличения энергоэффективности и уменьшения количества выбросов в окружающую среду.

Для исследования процесса факельного горения угольного топлива используются передовые методы диагностики, позволяющие проводить неинвазивные измерения скорости, состава и температуры газа и концентрации частиц с дальнейшей верификацией компьютерных моделей [5–7]. В работе [8] с использованием современных оптических методов (laser Doppler velocimetry (LDV), ОН planar laser-induced fluorescence (ОН PLIF)), фотографий рассеяния Ми, пирометра, а также контактных методов измерения детально ис-

Модернизация стенда выполнена в рамках Государственного задания Института теплофизики СО РАН. Экспериментальные и численные исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00781).

© Алексеенко С. В., Бутаков Е. Б., Чикишев Л. М., Шараборин Д. К., 2020

следована структура газовой (метан) струи с горением, содержащей частицы каменного угля (средний размер частиц 25 мкм, среднемассовый размер — 33 мкм). В [8] представлены распределения средней скорости и диаметра частиц, концентрации CO_2 и O_2 , а также пространственные корреляции между интенсивностью сигнала флуоресценции ОН и рассеяния Ми и сделан вывод, что реакция горения происходит на периферии кластера распыленных частиц угля в верхней области потока и проникает внутрь кластера, если процесс горения протекает ниже по потоку.

Горение пылеугольного топлива в факеле осесимметричной турбулентной струи является относительно простой (с точки зрения геометрии задачи) моделью для описания процессов в топочных камерах реальных горелочных устройств, имеющих более сложную геометрию. Тем не менее в данной постановке могут быть детально рассмотрены основные физико-химические процессы, влияющие на срыв факела, скорость выгорания топлива и образование вредных выбросов. Однако количество таких работ невелико. В работе [9] рассмотрены режимы турбулентного горения диффузионного факела газовой (пропан) струи, содержащей мелкодисперсные (размером менее 150 мкм) частицы угля (антрацит, бурый уголь, каменный уголь), и распределения температуры и концентрации CO_2 и O_2 . Установлено, что при наличии частиц угля интенсивность теплового потока от струи увеличивается. При этом значительного влияния этих частиц на срыв пламени не выявлено.

Данные работы используются для верификации методов численного моделирования [10], однако полученные результаты ограничены малым значением числа Рейнольдса ($Re = 2544$), фиксированными температурой и составом несущей фазы.

В течение последних 30 лет численное моделирование сжигания пылеугольного топлива широко используется при проектировании и оптимизации энергетических установок различного типа, для улучшения и технико-экономического обоснования новых методов [11]. Разработано множество численных методов и моделей (см., например, [12–17]). Работы [11–17] дополнены многочисленными экспериментальными исследованиями, проведенными в лабораторных и полупромышленных условиях [18–22]. Однако в литературе практически отсутствуют количественные данные о характеристиках турбулентных пульсаций дисперсной фазы, об особенностях кластеризации в потоке с неоднородной плотностью вследствие горения.

Целью настоящей работы является получение с использованием современных методов оптической диагностики турбулентных реагирующих течений новых экспериментальных данных о динамике частиц микропотока угольного топлива в турбулентном сдвиговом потоке (струе), в процессе горения пылеугольного факела.

Экспериментальный стенд и методика измерений. Горелочный стенд представляет собой открытый контур, подключенный к баллонам с горючим газом (метаном) и транспортным газом (азотом), расход которых контролировался поплавковыми ротаметрами. Схема установки приведена на рис. 1, на котором также показана схема подключения соплового блока к топливной и транспортной магистрали.

На экспериментальном стенде использовались сопла с одинаковой внутренней геометрией. Для создания незакрученных струйных течений с ударным профилем на срезе сопла использовалось профилированное сопло Витошинского, имеющее предвключенный участок с вложенными перфорированными пластинами для выравнивания потока перед соплом. Диаметры d использовавшихся в экспериментах профилированных сопел составляли 10, 15 и 23 мм. Уголь подавался шнековым питателем в линию транспортного газа (азота). Перед началом эксперимента проводилась тарировка угольного питателя. В сопло поступала перемешанная смесь топлива и азота. Смешение происходило в длинной трубе ($L_2 = 500$ мм, $d_2 = 22$ мм), метан подавался через иглу, ориентированную в направлении потока.

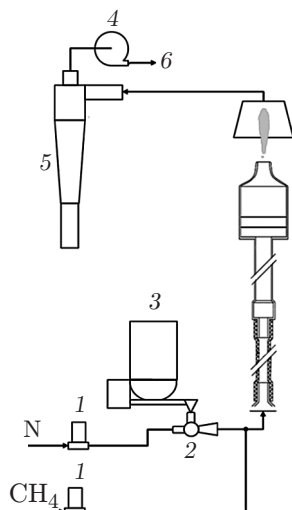


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — ротаметр, 2 — эжектор, 3 — шнековый питатель, 4 — дымосос, 5 — циклон, 6 — атмосфера

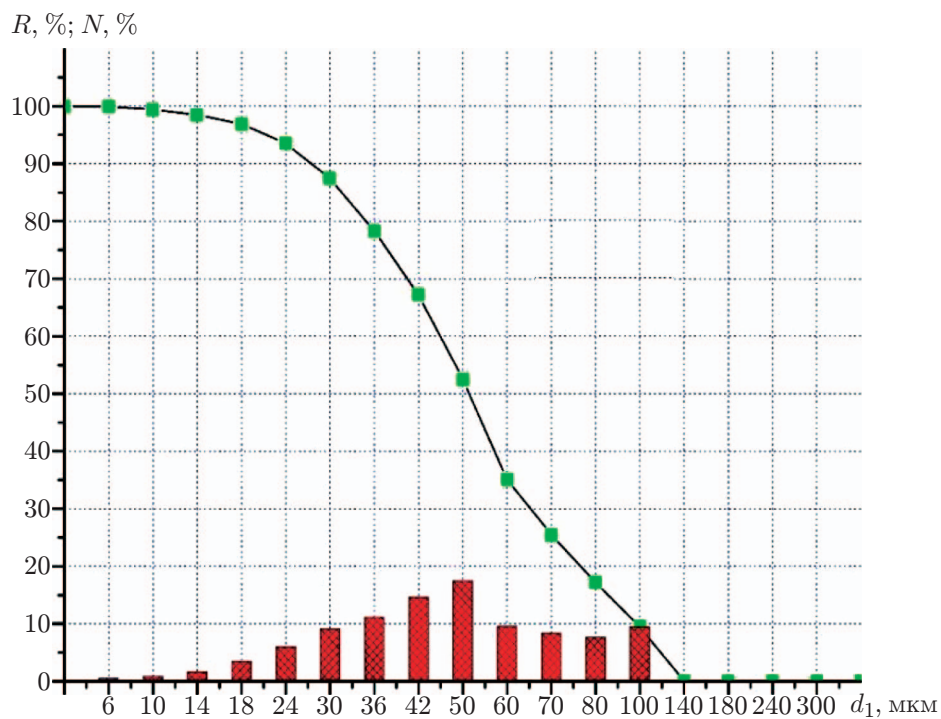


Рис. 2. Остаток на сите R расхода горячего газа (линия) и распределение частиц по размерам N (гистограмма) при использовании длиннопламенного угля Кузнецкого месторождения

В экспериментах использовался каменный длиннопламенный уголь Кузнецкого месторождения со следующими техническими характеристиками и элементным составом: массовая доля воды в аналитической пробе $W_a = 2\%$, зольность в сухом состоянии $A_d = 21\%$, выход летучих веществ $V_{daf} = 41\%$, массовые доли углерода, водорода, кислорода, азота в сухом беззольном состоянии соответственно $C_{daf} = 74,5\%$, $H_{daf} = 4,9\%$, $O_{daf} = 17,7\%$, $N_{daf} = 2,2\%$, массовая доля общей серы в сухом состоянии $S_{daf} = 0,6\%$.

Спектральные размеры угольных частиц измерялись с использованием оптически-цифрового метода, цифрового микроскопа Levenhuk, снабженного встроенной 5-мегапиксельной камерой, и программного комплекса для обработки изображения; установлено, что 50 % частиц имеют диаметр $d_1 < 50$ мкм, остальные частицы — $50 \div 100$ мкм (рис. 2).

Эксперименты проводились при следующих значениях основных параметров: расход угля — 0,2 кг/ч, расход N_2 — $3,0 \div 7,7$ л/мин, расход CH_4 — $1,2 \div 3,3$ л/мин, температура — 291 К. Выбор расхода N и CH_4 основан на обеспечении достаточной мощности нагрева частиц угля и скорости несущего потока для транспортировки частиц до сопла. Во всех экспериментах расход угля был постоянным, увеличение расхода приводит к забиванию системы подачи.

Проведена регистрация флуоресцентного свечения ОН, позволяющего анализировать положение и динамику фронта пламени. Система ОН PLIF состояла из перестраиваемого импульсного лазера на красителях, импульсного неодимового лазера (YAG-лазера накачки и интенсифицированной камеры). С помощью коллимирующего оптического устройства лазерный луч преобразовывался в лазерный нож. Перестраиваемый лазер возбуждал флуоресцентное свечение ОН при переходе $Q_1(8)$ полосы $A^2\Sigma \pm X^2\Pi(1-0)$. Среднее значение энергии импульсов с длиной волны 283 нм приблизительно равно 12 мДж. Интенсивность флуоресценции ОН регистрировалась с помощью камеры, оснащенной УФ-объективом и полосно-пропускающим оптическим фильтром (длина волны пропускания 310 ± 10 нм).

Результаты измерений. На рис. 3,а показаны кривые уноса диффузионного пламени для различных диаметров сопла. Увеличение диаметра сопла приводит к уменьшению минимального остатка Re расхода Q горючего газа CH_4 в отсутствие подачи угля, когда возможно устойчивое горение, также незначительное уменьшение остатка наблюдается в случае сопла диаметром 15 мм при подаче угля.

Для сопла диаметром 15 мм представлены характерные фотографии (рис. 3,б,в) пламени при диффузионном горении CH_4 при подаче угля и в отсутствие подачи. Видно, что при подаче угля вблизи основания пламени воспламенения угольных частиц не наблюдалось. Характерное свечение появлялось в окрестности края пламени на расстоянии 50 мм от сопла, большая часть частиц горела в диффузионном слое. Угольное пламя значительно ярче, чем пилотное, вследствие излучения. Частицы угля имеют форму полос вследствие длительного времени экспозиции камеры.

На рис. 4 показано мгновенное распределение интенсивности лазерно-индуцированной флуоресценции ОН в случае диффузионного горения смеси CH_4-N_2 (интенсивность нормирована на максимальное значение).

Поскольку радикал ОН образуется в процессе горения во фронте пламени, а также присутствует в продуктах сгорания, находясь в состоянии термического равновесия с водой, можно предположить, что внутренняя граница (расположенная ближе к оси струи) области присутствия радикала ОН соответствует положению фронта пламени. Фронт пламени распространяется в направлении, противоположном направлению потока смеси CH_4-N_2 , частично перемешанной за счет молекулярной и турбулентной диффузии с окружающим воздухом.

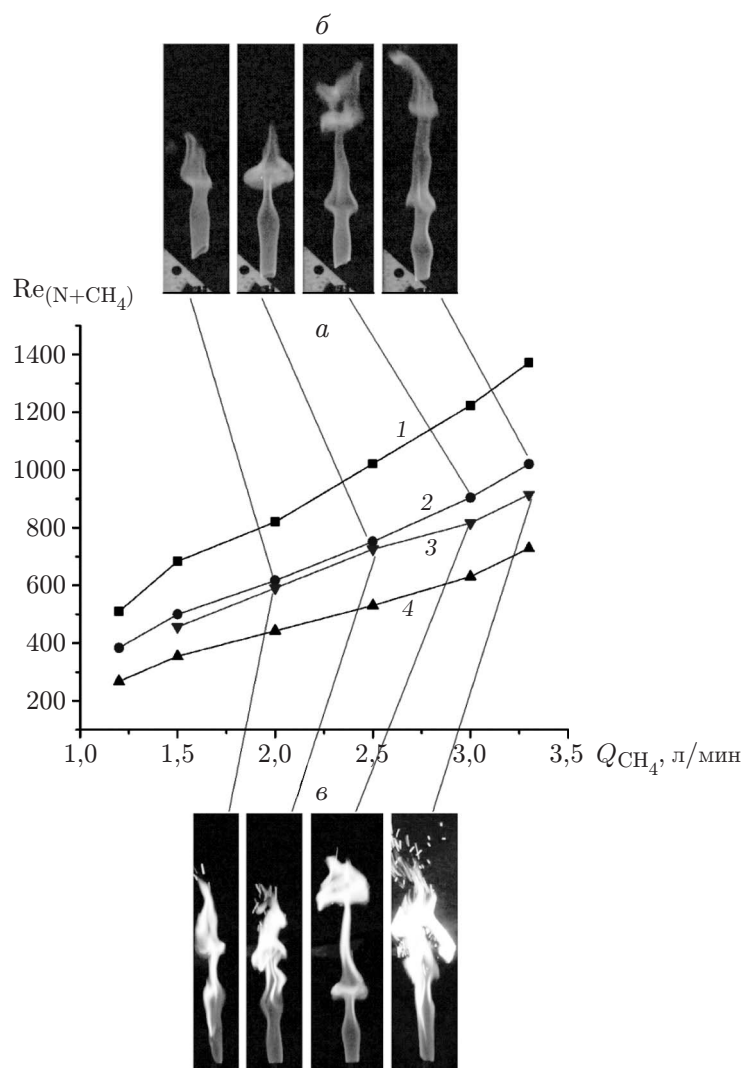


Рис. 3. Кривые уноса пламени для различных диаметров сопла в отсутствие подачи угля и при его подаче (а) и характерные фотографии пламени для сопла диаметром $d = 15$ мм в отсутствие подачи угля (б) и при подаче угля (в) в различные моменты времени:
 1, 2, 4 — в отсутствие подачи угля (1 — $d = 10$ мм, 2 — $d = 15$ мм, 4 — $d = 23$ мм),
 3 — при подаче угля ($d = 15$ мм)

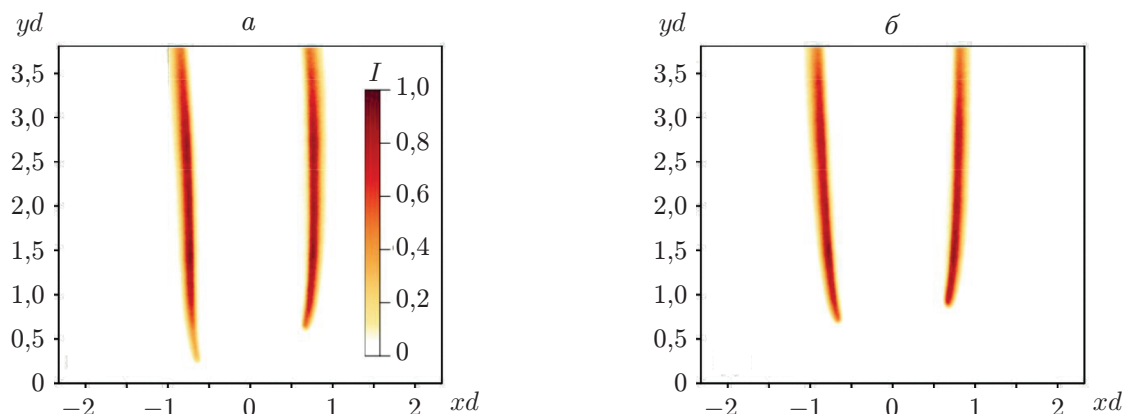


Рис. 4. Мгновенное распределение интенсивности флюоресценции в случае диффузионного горения смеси $\text{CH}_4\text{--N}_2$ при различных расходах:

a — $Q = 2,0 \div 4,7$ л/мин, *б* — $Q = 3,3 \div 7,7$ л/мин

Закключение. С использованием современных оптических методов проведены экспериментальные исследования диффузионного горения каменного длиннопламенного угля Кузнецкого месторождения в струе газа $\text{CH}_4\text{--N}_2$. Для профилированных сопел диаметром 10, 15, 23 мм получены граничные значения расходов несущего газа для диффузионного пламени. В отсутствие подачи угля при увеличении расхода Re при фиксированном значении расхода CH_4 , превышающем критическое значение, пламя не может стабилизироваться вблизи сопла и уносится потоком. При подаче угольной пыли срыв пламени происходит раньше. Воспламенение угольных частиц наблюдается на расстоянии 50 мм от сопла.

Представленные мгновенные распределения интенсивности флюоресценции радикала OH показывают, что фронт пламени стабилизируется несимметрично относительно оси струи, на некотором расстоянии от сопла и испытывает пульсации вблизи точки стабилизации пламени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Прогноз** развития энергетики мира и России 2016 / Под ред. А. А. Макарова, Л. М. Григорьева, Т. А. Митровой. М.: Ин-т энергет. исслед. “ИНЭИ РАН”: Аналит. центр при Правительстве РФ, 2016.
2. **Abaimov N. A., Butakov E. B., Burdukov A. P., et al.** Investigation of air-blown two-stage entrained-flow gasification of micronized coal // *Fuel*. 2020. V. 271. 117487.
3. **Croiset E.** NO_x and SO_2 emissions from O_2/CO_2 recycle coal combustion // *Fuel*. 2001. V. 80, iss. 14. P. 2117–2121.
4. **Choi C. R., Kim C. N.** Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler // *Fuel*. 2009. V. 88, iss. 9. P. 1720–1731.
5. **Шараборин Д. К., Толстогузов Р. В., Дулин В. М., Маркович Д. М.** О структуре импактной струи с закруткой потока и горением // *Физика горения и взрыва*. 2020. Т. 56, № 2. С. 10–16.
6. **Лобасов А. С., Дулин В. М., Дектерев А. А., Минаков А. В.** Турбулентный перенос в закрученной струе с распадом вихревого ядра PIV/PLIF — измерения и численное моделирование // *Теплофизика и аэромеханика*. 2019. Т. 26, № 3. С. 381–389.

7. Litvinov I. V., Sharaborin D. K., Shtork S. I. Reconstruction the structural parameters of a precessing vortex by SPIV and acoustic sensor // Experiments Fluids. 2019. V. 60, iss. 9. Paper 139.
8. Hwang S. M., Kurose R., Akamatsu F., et al. Application of optical diagnostics techniques to a laboratory-scale turbulent pulverized coal flame // Energy Fuels. 2005. V. 19, N 2. P. 382–392.
9. Gollahalli S. R., Prasad A., Gundavelli S. Lift-off characteristics and flame base structure of coal seeded gas jet flames // Proc. Inst. Mech. Engrs. A. 1996. V. 210, N 5. P. 373–382.
10. Mika Hashimoto N., Kurose R., Shirai H. Numerical simulation of pulverized coal jet flame employing the TDP model // Fuel. 2012. V. 97. P. 277–287.
11. Muto M., Watanabe H., Kurose R., et al. Large-eddy simulation of pulverized coal jet flame. Effect of oxygen concentration on NO_x formation // Fuel. 2015. V. 142. P. 152–163.
12. Watanabe J., Okazaki T., Yamamoto K., et al. Large-eddy simulation of pulverized coal combustion using flamelet model // Proc. Combust. Inst. 2017. V. 36. P. 2155–2163.
13. Clements A., Black S., Szuhánszki J., et al. LES and RANS of air and oxy-coal combustion in a pilot-scale facility: Predictions of radiative heat transfer // Fuel. 2015. V. 151. P. 146–155.
14. Stein O. T., Olenik G., Kronenburg A., et al. Towards comprehensive coal combustion modelling for LES // Flow Turbulence Combust. 2013. V. 90. P. 859–884.
15. Stein O. T., Olenik G., Kronenburg A. LES of swirl-stabilised pulverised coal combustion in IFRF furnace N 1 // Proc. Combust. Inst. 2015. V. 35. P. 2819–2828.
16. Rabac M., Franchetti B. M., Marincola F., et al. Large eddy simulation of coal combustion in a large-scale laboratory furnace // Proc. Combust. Inst. 2015. V. 35. P. 3609–3617.
17. Rietha M., Clements A. G., Rabaçald M., et al. Flamelet LES modeling of coal combustion with detailed devolatilization by directly coupled CPD // Proc. Combust. Inst. 2017. V. 36. P. 2181–2189.
18. Чернецкий М. Ю., Дектерев А. А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 3. С. 37–46.
19. Алексеенко С. В., Бурдуков А. П., Дектерев А. А. и др. Физическое и математическое моделирование аэродинамики и горения в топочных камерах энергоустановок // Теплоэнергетика. 2011. № 9. С. 67–72.
20. Гил А. В., Старченко А. В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 5. С. 655–671.
21. Chernetskiy M., Dekterev A., Chernetskaya N., Hanjalic K. Effects of reburning mechanically-activated micronized coal on reduction of NO_x : Computational study of a real-scale tangentially-fired boiler // Fuel. 2018. V. 214. P. 215–229.
22. Чернецкий М. Ю., Кузнецов В. А., Дектерев А. А. и др. Сравнительный анализ влияния моделей турбулентности на описание процессов горения угольной пыли при наличии закрутки потока // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 4. С. 615–626.

*Поступила в редакцию 1/VI 2020 г.,
после доработки — 1/VI 2020 г.
Принята к публикации 29/VI 2020 г.*