

УДК 62-643, 662.61, 536.462

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ГАЗОВОЙ СТРУЕ

Е. Б. Бутаков, В. А. Кузнецов, А. В. Минаков,  
А. А. Дектерев, С. В. Алексеенко

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: e.butakov@mail.ru, victor\_partner@mail.ru, Tov-Andrey@yandex.ru,  
dek\_art@mail.ru, aleks@itp.nsc.ru

Проведена адаптация математической модели диффузионного горения газа при различных расходах  $\text{CO}-\text{H}_2$  и постоянном расходе угля. Показано, что результаты расчета основных характеристик пламени удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными и позволяют определить структуру пылегазового потока, состав газа, температуру частиц и газа, степень выгорания углерода и др. Предложенная модель позволяет проводить анализ устойчивости горения газоугольного пламени и переходных процессов, сопровождающих изменение режимов подачи топливно-окислительной среды.

Ключевые слова: факелы, горение пылеугольной взвеси, воспламенение, математическая модель.

DOI: 10.15372/PMTF20210315

**Введение.** Уголь является одним из ключевых энергоресурсов, его мировая добыча в 2019 г. увеличилась на 1,5 % и составила 7953 млн т [1]. Угольная энергетика по-прежнему занимает лидирующие позиции (приблизительно 38 % общего потребления энергоресурсов), и согласно прогнозам в ближайшие десятилетия доля угля в мировом энергетическом балансе будет составлять основную часть [2]. Прежде всего это обусловлено большими мировыми запасами угля (приблизительно 1055 млрд т) и его конкурентоспособными низкими ценами [3].

Сжигание является основным способом получения энергии из угля. Среди существующих технологий сжигания угля наиболее распространено факельное сжигание [4, 5]. Однако сжигание угля приводит к увеличению объема вредных выбросов в окружающую среду, поэтому все более важной становится задача их снижения с минимальными потерями эффективности процесса [6, 7]. Проблеме эффективного и экологически чистого сжигания угля во всем мире уделяется большое внимание [8, 9].

В настоящее время разрабатываются различные типы вихревых горелок для сжигания угля, позволяющих снизить объем вредных выбросов, увеличить полноту сгорания

---

Экспериментальные исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 19-79-00147), численные исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 19-08-00781).

топлива, обеспечить стабильность процесса горения и работающих в широком диапазоне нагрузок [7–12]. Для оптимизации и проектирования горелочно-топочных устройств пылеугольных котлов применяется математическое моделирование с использованием стационарного приближения и моделей турбулентности, основанных на осредненных уравнениях переноса [13–17]. Однако такой подход не позволяет исследовать устойчивость горения, процессы локального воспламенения, срыва пламени, переходные процессы и процессы, происходящие при изменении нагрузки, типа топлива и др. С этой целью развиваются нестационарные методы моделирования совместного горения пылеугольного и газового топлива.

В [18] приведен обзор работ, посвященных моделированию процесса сжигания пылевидного угля. Существуют следующие методы вычислительной гидродинамики: метод, в котором решаются осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье — Стокса (RANS), метод крупных вихрей (LES) и метод прямого численного моделирования (DNS). В работе [18] в основном рассматривались такие модификации методов, как DNS-метод высокой точности и LES-метод для сжигания пылевидного угля (PCC). Также в [18] большое внимание уделено исследованию различных моделей выхода летучих веществ, так как этот процесс оказывает существенное влияние на воспламенение и стабилизацию горения пылевидного угля. Моделирование гомогенного горения является важным этапом в расчетах PCC, поскольку от этого зависят распределение скорости, состав газов, температура и т. д. Как правило, разработка более точных и сложных моделей (методов) требует больших вычислительных затрат.

**Математическая модель.** Для адаптации математической модели на основе данных исследования горения пылеугольного топлива в пламени газа  $\text{CO}-\text{H}_2$  была выбрана горелка с закруткой потока (за счет встроенных лопаток) (рис. 1). В центральном канале подавался горючий газ (объемная доля  $\text{CO}$  — 50 %,  $\text{H}_2$  — 50 %) с расходом 3 л/мин. В кольцевом канале подавался окислитель (воздух) с добавлением угля, расход которого составлял 1,6 кг/ч, расход воздуха — 8 м<sup>3</sup>/ч. Половина подаваемых частиц угля имеют размер менее 50 мкм, остальные частицы — 50 ÷ 100 мкм. В расчетах использовался каменный длиннопламенный уголь Кузнецкого месторождения, имеющий следующие тех-

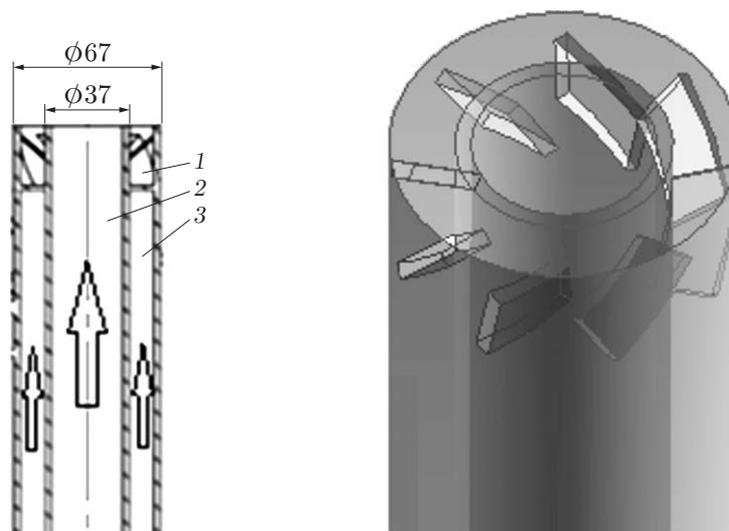


Рис. 1. Схема горелочного устройства:

1 — завихритель, 2 — канал подачи газов  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , 3 — канал подачи воздуха и угля; стрелки — направление потока

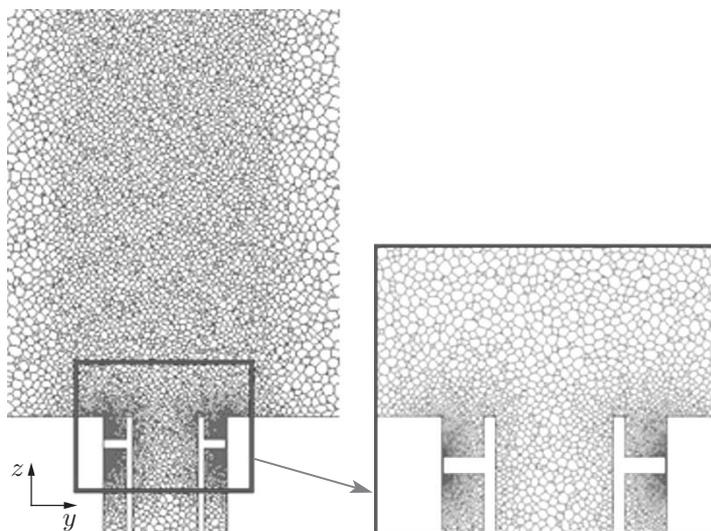


Рис. 2. Геометрия расчетной области и расчетная сетка (увеличенный фрагмент — область лопаток)

нические характеристики и состав: массовая доля влаги, определенная по аналитической пробе,  $W_a = 2\%$ , зольность для сухого состояния топлива  $A_d = 21\%$ , выход летучих веществ для сухого беззольного состояния  $W_{Vdaf} = 41\%$ , массовая доля углерода для сухого беззольного состояния  $W_{Cdaf} = 74,5\%$ , массовая доля водорода для сухого беззольного состояния  $W_{Hdaf} = 4,9\%$ , массовая доля кислорода для сухого беззольного состояния  $W_{Odaf} = 17,7\%$ , массовая доля азота для сухого беззольного состояния  $W_{Ndaf} = 2,2\%$ , массовая доля общей серы для сухого состояния  $W_{Sdaf} = 0,6\%$ . Расчет проводился в нестационарной полномасштабной трехмерной постановке с учетом сил тяжести. Использовалась неструктурированная расчетная сетка, содержащая 1,5 млн ячеек, с локальным сгущением в области сопла и в области образования пламени (рис. 2).

Математическая формулировка задачи о горении пылеугольного топлива включает комплекс взаимосвязанных моделей, описывающих турбулентное движение газа, перенос тепловой и лучистой энергии, процессы горения, газификации и движения угольных частиц и т. д. Для численного моделирования нестационарного турбулентного течения топочной среды использовались URANS RSM-, URANS ( $k-w$ )-SST-, DES-модели. Движение частицы описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом сил сопротивления и тяжести. Учет турбулентности потока при движении частицы проводится путем введения случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частицы. Решение уравнения переноса лучистой энергии основано на P1-аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной двухтемпературной среды. Процесс горения угольной частицы состоит из следующих последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонентов и горение коксового остатка. Выход летучих веществ  $C_xH_yO_z$  рассматривается в однокомпонентном приближении, для расчета скорости выхода используется двухстадийное приближение на основе модели Кобаяши. Для расчета горения газообразных компонентов использовалась модель вихревой диссипации (EDC). Скорость горения коксового остатка рассчитывается в соответствии с классической диффузионно-кинетической теорией.

Тестирование модели горения пылевидного угля проводилось в работе [17]. Ранее была протестирована математическая модель процесса газового горения для различных режимов и горелочных устройств, в том числе для рассматриваемого сопла [19–21]. На основе

Таблица 1

Значения кинетических констант гомогенных реакций [22]

Реакция	$A$ , кмоль/(м <sup>3</sup> ·с)	$E$ , Дж/кмоль	$\beta$	$\gamma$
$\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	$4,4 \cdot 10^{11}$	$1,26 \cdot 10^8$	0	$\gamma_{\text{CH}_4} = 0,5, \gamma_{\text{O}_2} = 1,25$
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	$3,1 \cdot 10^8$	$1,26 \cdot 10^8$	0	$\gamma_{\text{CH}_4} = 1, \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 1$
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 + 0\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2$	$2,5 \cdot 10^8$	$6,69 \cdot 10^7$	0	$\gamma_{\text{CO}} = 1, \gamma_{\text{O}_2} = 0,3$
$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	$7,9 \cdot 10^{10}$	$1,46 \cdot 10^8$	0	$\gamma_{\text{H}_2} = 1, \gamma_{\text{O}_2} = 0,5$

Таблица 2

Значения кинетических констант гетерогенных реакций [23]

Реакция	$A$ , кмоль/(м <sup>3</sup> ·с)	$E$ , Дж/кмоль	$\beta$	$\gamma$
$\text{C} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$	2,30	$9,23 \cdot 10^7$	1	$\gamma_{\text{O}_2} = 0,4$
$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	4,40	$1,62 \cdot 10^8$	1	$\gamma_{\text{CO}_2} = 0,6$
$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	1,33	$1,47 \cdot 10^8$	1	$\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0,6$

этих данных была выбрана модель вихревой диссипации (EDC) с четырехступенчатым механизмом реагирования метана (табл. 1). Горение коксового остатка описывается с помощью трехстадийного механизма реагирования (табл. 2). В табл. 1, 2  $A$  — предэкспоненциальный множитель,  $E$  — энергия активации,  $\beta$  — показатель степени температурной экспоненты,  $\gamma$  — степень концентрации компонентов.

Расчет проводился в нестационарной полномасштабной трехмерной постановке с учетом сил тяжести. Дискретизация уравнений переноса осуществлялась с помощью метода контрольного объема. Связь полей скорости и давления для несжимаемой жидкости реализовывалась с помощью процедуры SIMPLEC. Для аппроксимации конвективных членов уравнений, описывающих турбулентные характеристики, и уравнений гидродинамики в URANS-моделях использовалась противопоточная схема второго порядка, в DES-методе — центрально-разностная схема. Диффузионные члены аппроксимировались по схеме второго порядка, нестационарные слагаемые — по неявной схеме второго порядка точности. Временной шаг удовлетворял условию сходимости по Куранту — Фридрихсу — Леви (CFL): среднее значение параметра  $\text{CFL} < 2$ .

**Результаты расчета и их анализ.** На рис. 3–5 представлены результаты расчета процесса горения пылеугольного топлива в газовом пламени CO–H<sub>2</sub>. На рис. 3 показана структура газового потока в центральном сечении. Видно, что при горении факела структура потоков закрученная, максимальная скорость (закрутка) по координате  $y$  достигает 1,9 м/с. На высоте, приблизительно равной трем диаметрам, скорость закрутки начинает существенно уменьшаться и вследствие малой плотности газа поток устремляется вверх.

На рис. 4, 5 представлены результаты расчетного и экспериментального исследования горения пылеугольной смеси. Видно, что в эксперименте и в расчетах фронт горения газа и угольных частиц находится на границе раздела окислителя и топлива. Фронт пламени начинается от кольцевого канала малого диаметра. Концентрация оксида углерода в расчете характеризует степень выгорания горючего газа и форму пламени (см. рис. 4, б). Светящиеся линии на рис. 4, в показывают направление движения горящих угольных частиц, увлекаемых закрученным потоком и движущихся по спиралевидной траектории. Аналогичные результаты получены в расчетах (см. рис. 5, б). Также результаты расчетов показывают, что некоторые угольные частицы вследствие действия центробежной силы и силы гравитации разлетаются и падают вниз.

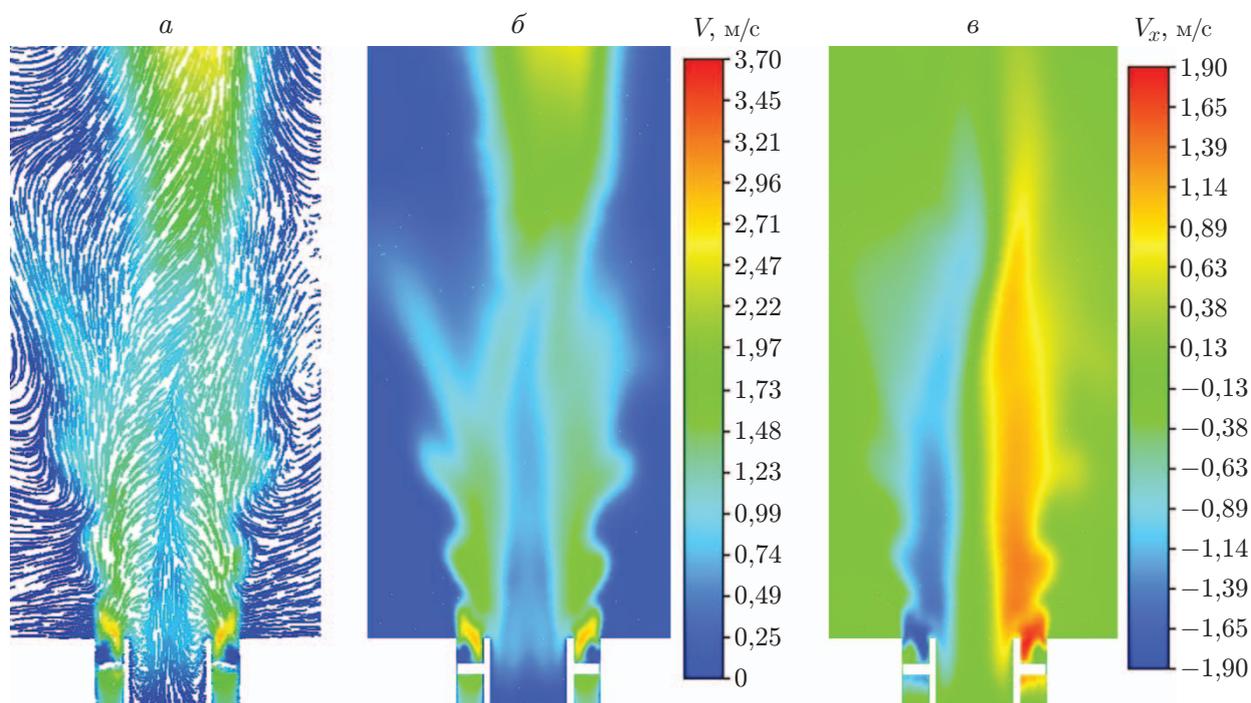


Рис. 3. Структура газового потока:

*a* — линии тока, *б* — поле скорости, *в* — поле компоненты скорости вдоль оси  $x$

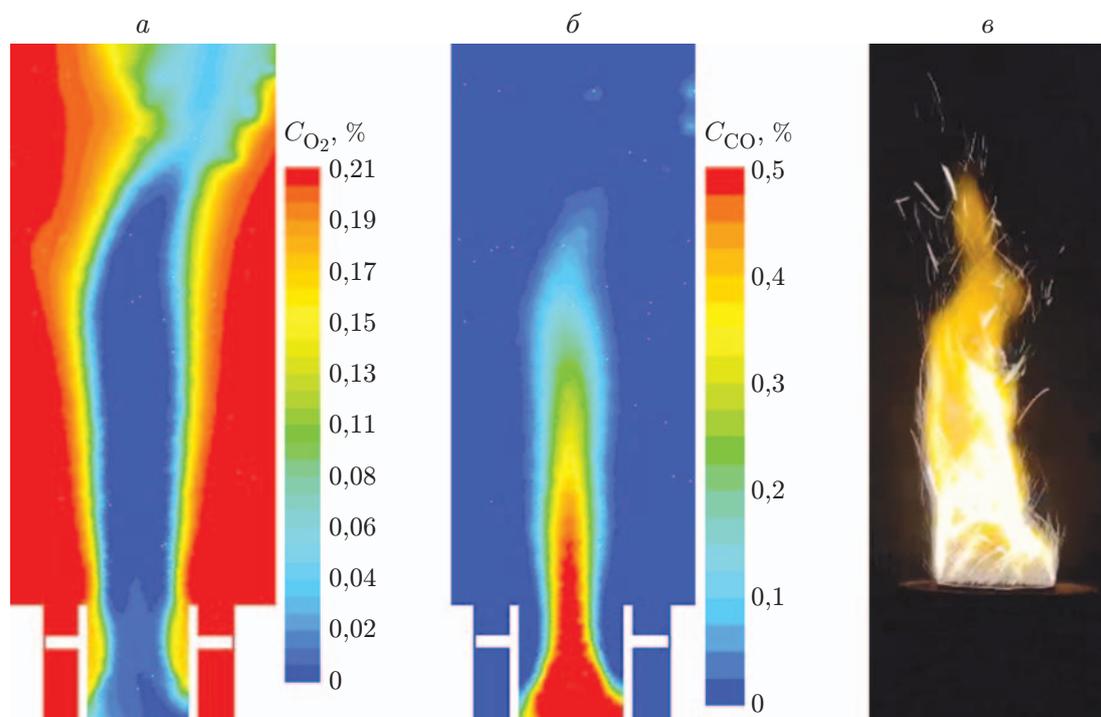


Рис. 4. Форма пламени:

*a*, *б* — расчет (*a* — поле концентрации (объемной доли)  $O_2$ , *б* — поле концентрации (объемной доли)  $CO$ ), *в* — эксперимент

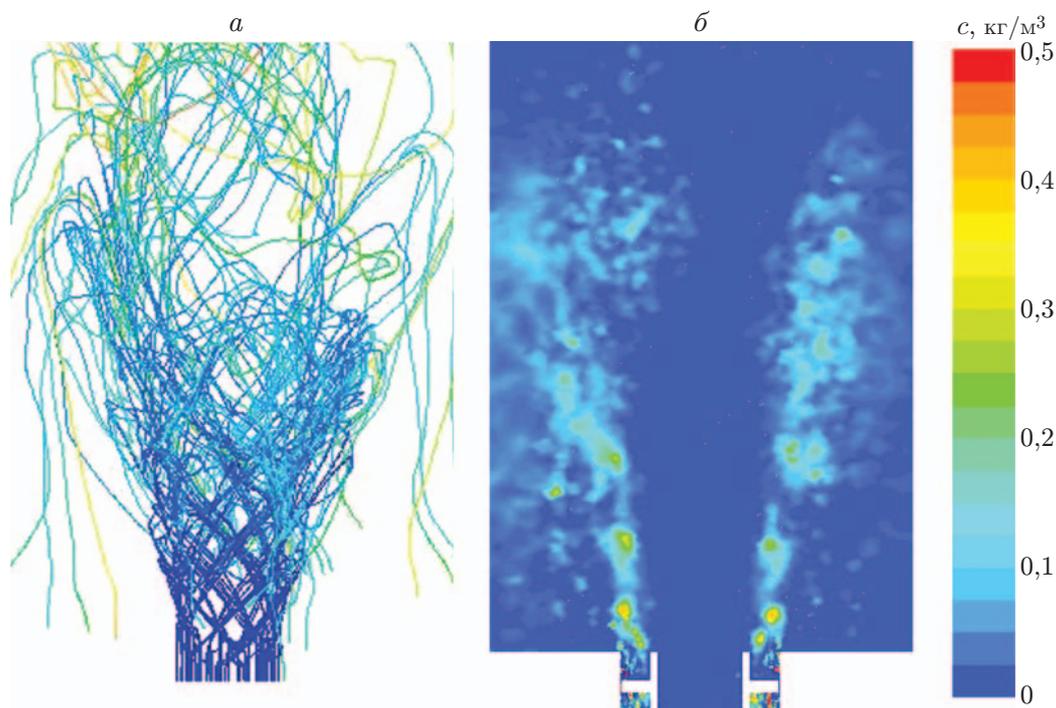


Рис. 5. Траектория движения (а) и поле концентрации (б) частиц пламени

**Заключение.** Проведена адаптация математической модели на основе данных исследования горения пылеугольного топлива в потоке газов  $\text{CO-H}_2$  в диапазоне экспериментально исследованных параметров. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что математическая модель процессов позволяет решить трехмерные нестационарные задачи, такие как совместное сжигание газа  $\text{CO-H}_2$  и угля в открытом пламени.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Coal 2019: Analysis and forecast to 2024.** S. l.: Intern. Energy Agency, 2019. [Electron. resource]. Режим доступа: <http://www.iea.org>.
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.**  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  emissions from  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  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  $\text{NO}_x$  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, N 139. P. 1–18.

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  $\text{NO}_x$  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. **Maidanik M. N., Verbovetskii E. K., Dekterev A. A., et al.** Mathematical simulation of the furnace and turning gas conduit of a P-50R boiler during joint combustion of solid and gaseous fuel // *Thermal Engng.* 2011. V. 58, N 6. P. 483–488.
14. **Chernetskiy M. Yu., Dekterev A. A., Burdukov A. P., Hanjalić K.** Computational modeling of autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal // *Fuel*. 2014. V. 135. P. 443–458.
15. **Peters A. A. F., Weber R.** Mathematical modeling of a 2.4 MW swirling pulverized coal flame // *Combust. Sci. Technol.* 1997. V. 122. P. 131–182.
16. **Krasinsky D. V., Salomatov V. V., Anufriev I. S., et al.** Modeling of pulverized coal combustion processes in a vortex furnace of improved design. Pt 2. Combustion of brown coal from the Kansk-Achinsk basin in a vortex furnace // *Thermal Engng.* 2015. V. 62, N 3. P. 208–214.
17. **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.
18. **Ruipeng Cai, Kun Luo, Hiroaki Watanabe, et al.** Recent progress in high-fidelity simulations of pulverized coal combustion // *Adv. Powder Technol.* 2020. V. 31, N 7. P. 3062–3079.
19. **Lobasov A. S., Dekterev Ar. A., Minakov A. V.** Numerical simulation of premixed methane/air and synthesis gas/air flames for turbulence swirling jet // *J. Phys. Conf. Ser.* 2019. V. 1382. P. 1–5.
20. **Dekterev A. A., Dekterev Ar. A., Minakov A. V.** Comparative study of different combustion models for turbulent gas flames // *J. Phys. Conf. Ser.* 2016. V. 754. P. 1–6.
21. **Dulin V. M., Markovich D. M., Minakov A. V., et al.** Experimental and numerical simulation for swirl flow in a combustor // *Thermal Engng.* 2013. V. 60, N 13. P. 990–997.
22. **Jones W. P., Lindstedt R. P.** Global reaction schemes for hydrocarbon combustion // *Combust. Flame*. 1988. V. 73. P. 222–233.
23. **Brown B. W., Smoot L. D., Smith P. J., Hedman P. O.** Measurement and prediction of entrained-flow gasification processes // *AIChE J.* 1988. V. 34. P. 435–446.

*Поступила в редакцию 12/III 2021 г.,  
после доработки — 12/III 2021 г.  
Принята к публикации 29/III 2021 г.*