

УДК 620.9

## **Расчетное исследование процессов кислородного сжигания пылеугольного топлива в вихревом горелочном устройстве\***

**В.А. Кузнецов, Д.М. Божеева, А.А. Дектерев, А.В. Минаков**

*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: vakuznetsov@sfu-kras.ru

В работе проведены численные исследования аэродинамики и теплообмена в вихревом горелочном устройстве при факельном кислородном сжигании пылеугольного топлива. Предложенная численная методика апробирована на экспериментальных данных кислородного сжигания угля в потоке. Рассмотрено влияние концентрации кислорода в дутье на процессы воспламенения и горения угольной пыли в безазотной среде. Установлено, что для исследуемой горелки увеличение концентрации кислорода от 40,1 до 66,7 об. % приводит к изменению структуры течения, удлинению размеров факела и росту среднего значения концентрации несгоревшего твердого углерода с 0,00136 до 0,4 г/м<sup>3</sup> на расстоянии 1,5 м от горелки.

**Ключевые слова:** кислородное сжигание, вихревая горелка, аэродинамика, теплообмен, математическое моделирование.

### **Введение**

При сжигании угольного топлива в атмосферу выбрасывается наибольшее количество углекислого газа на единицу выделяемой энергии в сравнении с газом и нефтью [1]. При этом доля угля в энергетике остается высокой. Из имеющихся прогнозов [2] следует, что технология улавливания и хранения оксидов углерода будет играть важную роль во второй половине 21 века. Предполагается, что к 2100 году 40 % мировой электроэнергии будет получено с использованием технологии CCS (carbon capture and storage). Таким образом, развитие и исследование технологий, способствующих снижению эмиссии углекислого газа при сжигании и переработке угольного топлива, является актуальной задачей.

Обзор литературы показал, что для существующих угольных энергетических установок применяются две основные технологии, способствующие улавливанию CO<sub>2</sub> — это удаление азота из дымовых газов или удаление азота из воздуха перед сжиганием [3].

---

\* Работа выполнена в рамках государственного задания по науке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2024-0004.

Интерес представляет второй вариант, в котором окисление топлива протекает в среде  $O_2$ - $CO_2$ - $H_2O$ . Для обеспечения транспортировки и подачи пылевидного угля в топочное пространство удаленный азот замещается на рециркулируемые дымовые газы, состоящие из пара и углекислого газа. Отсутствие азота в камере сгорания также способствует снижению образования вредных  $NO_x$  [4, 5].

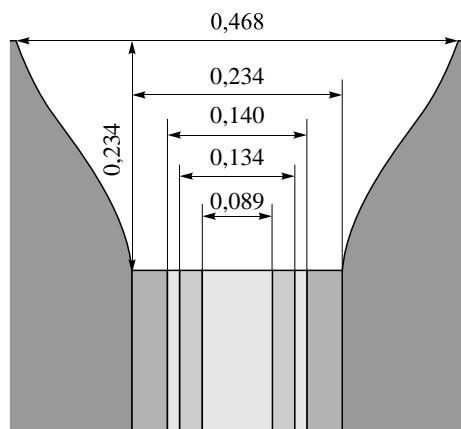
Известно, что при замене азота в дутье на рециркулируемые дымовые газы изменяются параметры и свойства среды в топочной камере. Характеристики горения пылеугольного топлива в среде с высокой концентрацией кислорода и углекислого газа (без азота) значительно отличаются по сравнению со случаем традиционного сжигания на воздушном дутье [6]. Увеличение концентрации трехатомных газов ( $H_2O$  и  $CO_2$ ) влияет на тепловой поток к стенкам топки. Следует также учитывать, что углекислый газ является ингибитором в процессах воспламенения топлива, поэтому повышение его концентрации ведет к увеличению периода индукции. Результаты работы [7] показали, что характеристики воспламенения угольной пыли при концентрации кислорода 27–30 % об. (70–73 %  $CO_2$ ) соответствуют традиционному воздушному сжиганию. Таким образом, повышение концентрации кислорода позволяет избежать ингибирующего эффекта.

Доступным инструментом для изучения зависимости протекания физико-химических процессов от концентрации кислорода, свойств среды в объеме камеры, конструктивных особенностей устройств являются численные методы математического моделирования (CFD — computational fluid dynamics). Математическое моделирование теплоэнергетических устройств на сегодняшний день представляет собой один из важнейших способов получения представительной информации о физико-химических процессах [6, 8–11].

Одна из проблем технологии кислородного сжигания с рециркуляцией дымовых газов заключается в эффективном использовании угольного топлива. При факельном горении пылеугольного топлива в среде  $CO_2$ - $H_2O$ - $O_2$  возникает сложность выбора режима работы энергетического оборудования. Устойчивое воспламенение, длина факела и полнота выгорания топлива зависят от множества факторов. Цель настоящей работы — численное исследование зависимости процессов воспламенения и горения пылеугольного топлива в закрученном потоке от концентрации кислорода в дутье.

## 1. Постановка задачи и математическая модель

Для исследования процессов воспламенения и горения пылеугольного топлива в безазотной среде был выбран горелочный стенд мощностью 2,5 МВт [12, 13]. На рис. 1



представлена схема горелочного устройства. В центральном кольцевом канале подается угольная пыль и прямооточный (первичный) газовый поток с температурой 373 К. Через второй кольцевой канал поступает закрученный (вторичный) газовый поток, подогретый до 551 К. Факельное горение осуществлялось в объеме топочной камеры длиной 6 м и сечением 2×2 м. Более подробная информация по горелочному стенду указана в работах [12, 13].

Рис. 1. Схема и размеры горелочного устройства. Размеры приведены в метрах.

Для данного горелочного устройства рассматривалось пять режимов кислородного горения пылевидного угля. Отличие заключалось в разной концентрации кислорода во вторичном потоке (табл. 1). Расход газа в первичном потоке был постоянный (734,4 кг/ч) и имел следующий состав:  $O_2$  — 1,8,  $CO_2$  — 78,0,  $H_2O$  — 16,2 об. %; расход угля составлял 248 кг/ч, коэффициент избытка кислорода — 1,14. Так как коэффициент избытка кислорода оставался постоянным, то увеличение концентрации кислорода во вторичном дутье приводило к уменьшению расхода газа и доли  $CO_2$  (табл. 1). Второй (базовый) режим соответствовал параметрам кислородного сжигания угольной пыли, полученным в эксперименте [13].

Для описания течения в топочной камере была выбрана модель движения многокомпонентной несжимаемой газовой среды (несущей фазы) на основе URANS-подхода (Unsteady-подхода Reynolds Averaged Navier–Stokes) с использованием  $k-\omega$  SST модели турбулентности. Опыт моделирования [14] показывает, что указанный метод удовлетворительно описывает рассматриваемое течение. Движение угольных частиц описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом силы сопротивления и силы тяжести (метод Лагранжа). Турбулентность потока при движении частицы учитывается путем введения случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частиц. Распределение Розина–Раммлера использовалось при описании размера угольных частиц (минимальный размер — 1 мкм, средний — 45 мкм, максимальный — 300 мкм). Решение уравнения переноса теплового излучения основано на методе дискретных ординат (Discrete Ordinates). Для коэффициента поглощения газа было выбрано постоянное значение 0,3 в соответствии с результатами работы [6], где было определено, что для условий с высокой концентрацией углекислого газа в объеме камеры сгорания коэффициент поглощения газа в среднем равен  $0,3\text{ м}^{-1}$ . Температура стенок была принята равной 1300 К, а коэффициент излучения стенки — 0,8. Описание процесса выхода летучих веществ основано на модели CPD (Chemical Percolation Devolatilization). Исследования [15] показали, что эта модель корректно описывает процесс пиролиза при моделировании горения угольной пыли в потоке.

Расчет химической кинетики горения газового топлива основан на использовании глобальных необратимых реакций между горючими компонентами и окислителем. Для описания процессов гомогенного горения применялась модель EDC (Eddy-Dissipation Concept), для описания гетерогенных реакций преобразования твердого углерода — модель множественных поверхностных реакций (The Multiple Surface Reactions Model). В расчетах использовалось шесть гомогенных и три гетерогенных реакции. Более подробное описание численной методики приведено в работе [5].

Расчеты проводились в нестационарной постановке, так как рассматриваемое течение имеет существенные пульсации скорости и температуры. Для сопоставления результатов

Таблица 1

Параметры вторичного дутья

№ варианта	1	2	3	4	5
Расход газов, кг/ч	2286,0	1677,6	1317,6	1087,2	925,2
$O_2$ об. %	30,2	40,1	49,5	58,3	66,7
$CO_2$ об. %	48,2	38,9	30,2	21,9	14,1
$H_2O$ об. %	11,9	11,6	11,2	10,9	10,6
Температура, К	551	551	551	551	551
Число закрутки	0,7				

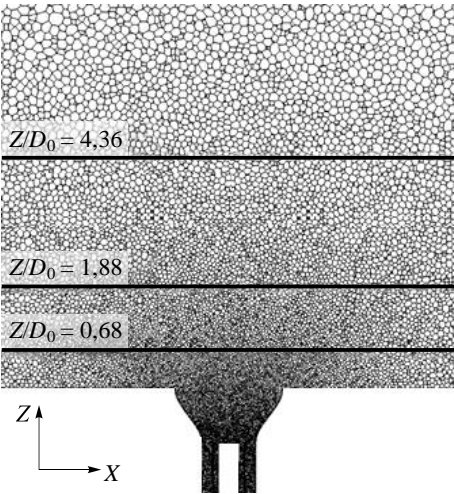


Рис. 2. Расчетная сетка — 1 млн ячеек ( $D_0 = 0,234$  м).

расчетные данные осреднялись. Инициализация воспламенения факела осуществлялась путем временного локального повышения температуры до 1500 К в ядре факела. В расчетах использовалась неструктурированная сетка (~ 1 млн ячеек) со сгущением в области горелочного устройства (рис. 2). Методические расчеты показали, что данная детализация сетки оптимальна с точки зрения точности и вычислительных затрат. Численные исследования выполнялись с использованием программного пакета Ansys Fluent.

## 2. Результаты исследования

На рис. 3 представлены результаты расчета в виде векторного поля для пяти режимов горения. Средняя скорость вторичного дутья снижается от первого режима к пятому и составляет 55,0, 41,6, 33,6, 28,5, 25,0 м/с соответственно. Этот фактор оказывает существенное влияние на формирование структуры течения в области факела (рис. 3). Вихревые горелки обладают сложным закрученным течением с наличием зоны обратного течения в ядре факела. Результаты расчетов показывают, что характерная структура потока присутствует в первых трех режимах. Такое течение способствует перемешиванию горячих дымовых газов, топлива и окислителя, что приводит к интенсификации воспламенения и стабилизации горения факела. Обратное течение в ядре факела формируется вследствие образования зоны разряженного давления. При снижении скорости потока вторичного дутья (4 и 5 режимы) эта зона пропадает и течение выпрямляется (рис. 3).

На рис. 4 для сопоставления представлены профили аксиальной и тангенциальной скоростей для разных режимов работы горелки. Анализ профилей скорости показал, что рассматриваемое течение имеет сложную структуру с наличием зоны обратного тока и тангенциальной закрутки потока. Отрицательные значения аксиальной скорости в ядре факела (сечение  $Z/D_0 = 0,68$ , рис. 4) свидетельствуют о наличии зоны обратного течения. В пятом режиме наблюдается полное вырождение зоны циркуляции и выравнивание профиля аксиальной и тангенциальной скоростей (рис. 4). На рис. 2 схематично нанесены сечения (линии) на разном удалении от горелки, в которых проводилось сопоставление

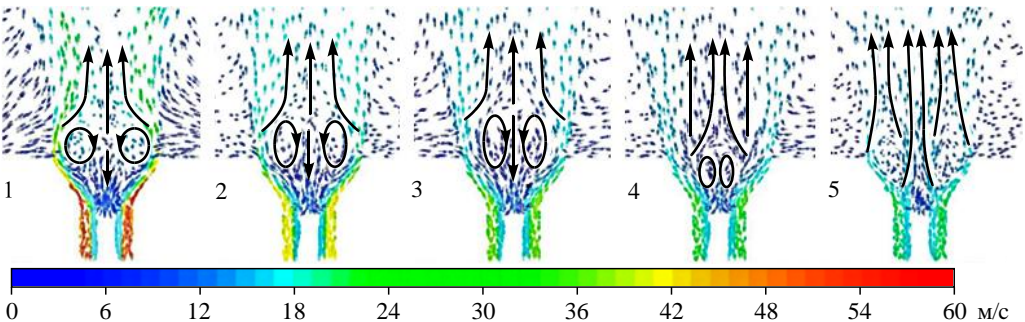


Рис. 3. Векторное поле (магнитуа скорости, м/с) в центральном сечении.

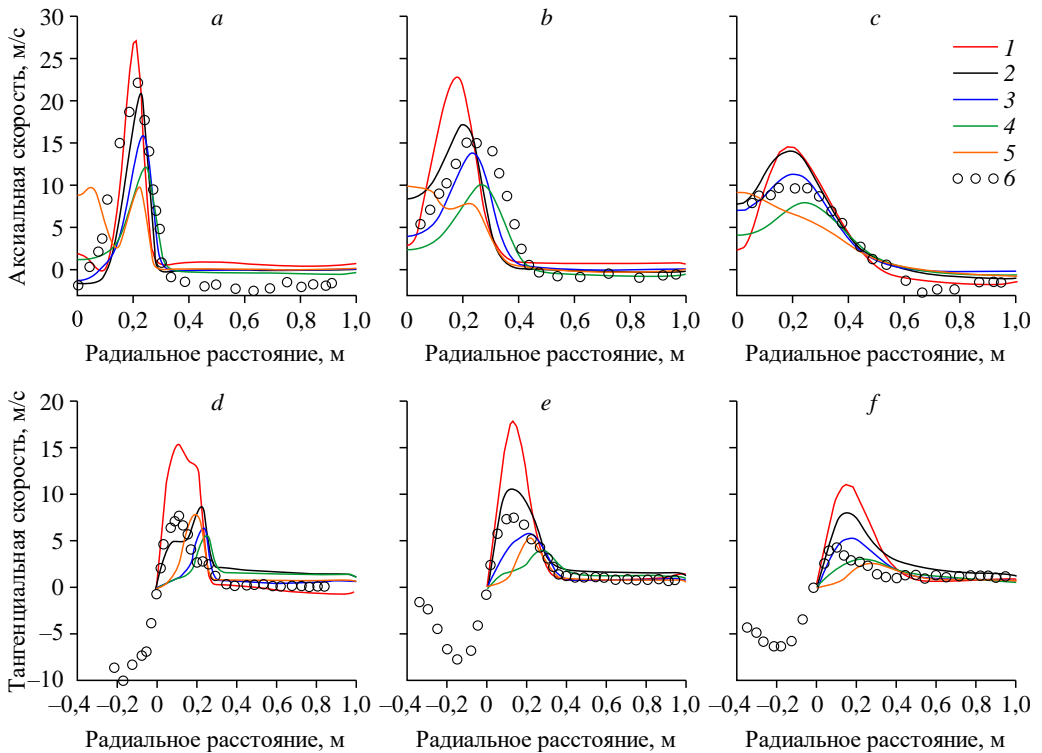


Рис. 4. Профиль осредненных значений аксиальной (*a–c*) и тангенциальной (*d–f*) скоростей на различных расстояниях от горелки ( $D_0 = 0,234$  м).

$Z/D_0 = 0,68$  (*a, d*),  $1,88$  (*b, e*),  $4,36$  (*c, f*);

1–5 — результаты расчетов для вариантов 1–5, 6 — экспериментальные данные.

результатов расчета и эксперимента. Отметим, что результаты базового режима (№ 2) удовлетворительно согласуются с данными эксперимента [13].

Результаты расчета распределения температуры для пяти разных режимов показывают, что при повышении концентрации кислорода для данного горелочного устройства наблюдается удлинение факела (рис. 5). Это обусловлено характером течения, описанным

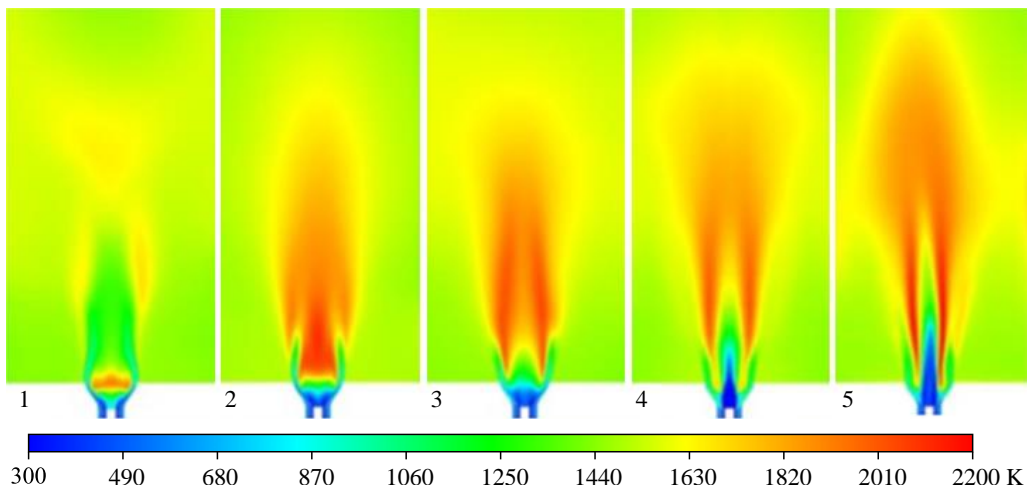


Рис. 5. Поле осредненных значений температуры (K) в центральном сечении.

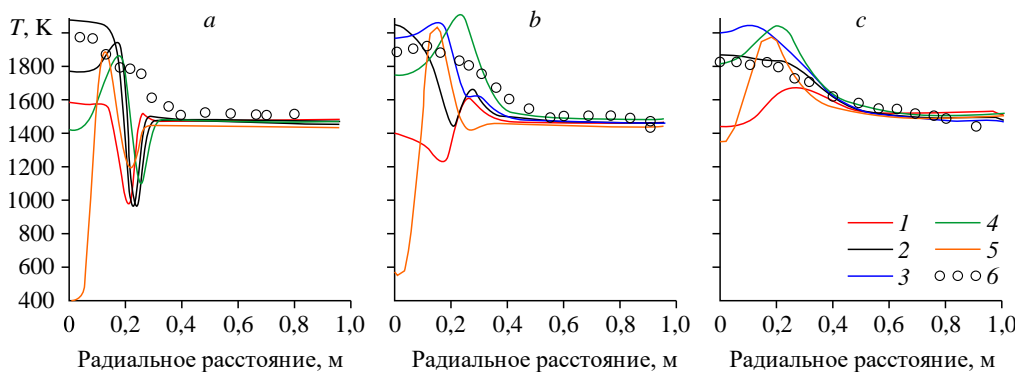


Рис. 6. Профиль осредненных значений температуры на различных расстояниях от горелки ( $D_0 = 0,234$  м).

$Z/D_0 = 0,68$  (a), 1,88 (b), 4,36 (c); 1–5 — результаты расчетов для вариантов 1–5, 6 — экспериментальные данные.

ранее. Во втором режиме формируется наиболее интенсивное обратное течение (см. рис. 4  $Z/D_0 = 0,68$ ), что приводит к локализации максимальной температуры в ядре факела (рис. 5). Сопоставление результатов расчета базового режима (№ 2) по температуре с экспериментальными данными также демонстрирует удовлетворительное соответствие (рис. 6).

На рис. 7 представлено поле распределения концентрации кислорода. Видно, что при повышении концентрации кислорода (в частности, с 40,1 до 66,7 об. %) на осевой зоне формируется протяженная область с низкими значениями концентрации кислорода. Из-за плохого перемешивания горение в этих режимах происходит на границе взаимодействия топлива и окислителя, что приводит к удлинению факела.

В табл. 2 приведены средние значения концентрации твердого углерода в поперечных сечениях на разных расстояниях от горелки. Наиболее интенсивное выгорание топлива наблюдается во втором режиме на расстоянии 1,5 м, здесь концентрация составляет  $0,00136 \text{ г/м}^3$ . При переходе со второго режима работы горелки на пятый среднее значение

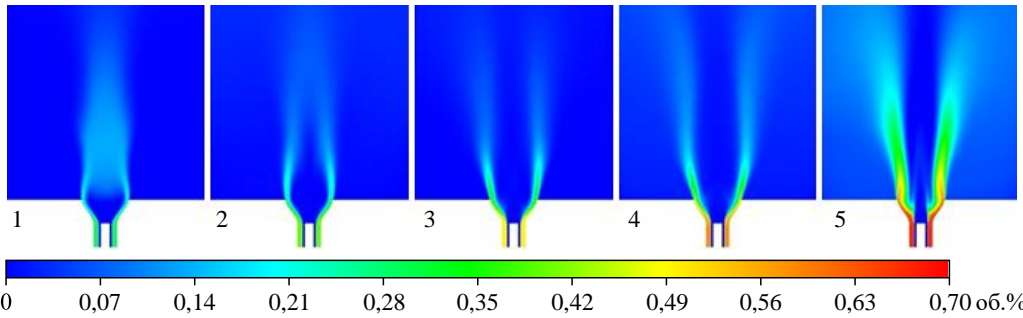


Рис. 7. Поле осредненных значений концентрации кислорода (об. %) в центральном сечении.

Таблица 2  
Концентрация твердого углерода ( $\text{г/м}^3$ )

Расстояние	Режимы				
	1	2	3	4	5
1,5 м	0,1399	0,00136	0,0730	0,370	0,401
3 м	0,001	0,00082	0,0114	0,058	0,095
4,5 м	0,00085	0,00073	0,0011	0,0012	0,0013

концентрации несгоревшего твердого углерода повышается с 0,00136 до 0,4 г/м<sup>3</sup> (на расстоянии 1,5 м от горелки). В первом режиме эффективность выгорания ниже по сравнению со вторым. На расстоянии 4,5 м во всех режимах происходит практически полное выгорание углерода, его концентрация не превышает 0,0013 г/м<sup>3</sup>.

Проведенные в работе [5] исследования показали, что для прямоточных горелок повышение концентрации кислорода приводит к уменьшению длины факела, что свидетельствует о более быстром воспламенении летучих веществ (снижении периода индукции) и интенсивном выгорании углерода. Указанный эффект также подтверждается результатами множества других исследований. Сопоставляя их с данными, полученными в настоящей работе, можно сделать вывод, что повышение концентрации кислорода снижает период индукции воспламенения топлива, но из-за конструктивных особенностей горелочного устройства и режимов подачи этот эффект может нивелироваться, что приведет к удлинению факела.

### Заключение

Выполнены численные исследования физико-химических процессов кислородного сжигания пылеугольного топлива в топочной камере с вихревым горелочным устройством. Предложенная комплексная математическая модель апробирована на экспериментальных данных. Проведено исследование влияния концентрации кислорода в дутье на параметры сжигания угольной пыли. Анализ полученных результатов показал, что увеличение концентрации кислорода с 40,1 до 66,7 об. % во вторичном дутье (при постоянном значении коэффициента избытка кислорода) приводит к снижению скорости струи вторичного дутья, что способствует вырождению зоны обратного течения в ядре факела (для данной горелки); увеличению длины факела и перестроению температурного режима горения; росту среднего значения концентрации несгоревшего твердого углерода в поперечном сечении с 0,00136 до 0,4 г/м<sup>3</sup> на расстоянии 1,5 м от горелки.

Сопоставление имеющихся литературных данных и полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что повышение концентрации кислорода снижает период индукции воспламенения топлива, но при этом может приводить к изменению структуры течения (в зависимости от конструкции горелки), что может способствовать увеличению размеров факела и снижению интенсивности выгорания топлива.

### Список литературы

1. Miller B.G. Carbon dioxide emissions reduction and storage // Clean Coal Eng. Technol. 2017. P. 609–68.
2. Morris J., Kheshgi H., Paltsev S., Herzog H. Scenarios for the deployment of carbon capture and storage in the power sector in a portfolio of mitigation options // Climate Change Economics. 2021. Vol. 12, No. 1. P. 2150001–215000-19.
3. Buhre B.J.P., Elliott L.K., Sheng C.D., Gupta R.P., Wall T.F. Oxy-fuel combustion technology for coal-fired power generation // Prog Energy Combust Sci. 2005. Vol. 31, Iss. 4. P. 283–307.
4. Al-Abbas A.H., Naser J. Oxy-fuel combustion in the lab-scale and large-scale fuel-fired furnaces for thermal power generations // Therm. Power Plants-Adv. Appl. 2013. P. 51–84.
5. Kuznetsov V.A., Minakov A.V., Bozheeva D.M., Dekterev A.A. Oxy-fuel combustion of pulverized coal in an industrial boiler with a tangentially fired furnace // Intern. J. Greenhouse Gas Control. 2023. No. 124. P. 10386–1–10386-14.
6. Guo J., Hu F., Jiang X., Li P., Liu Z. Effects of gas and particle radiation on IFRF 2.5 MW swirling flame under oxy-fuel combustion // Fuel. 2020. Vol. 263. P. 116634–1–116634-11.
7. Jovanovic R., Milewska A., Swiatkowski B., Goanta A., Spliethoff H. Sensitivity analysis of different devolatilisation models on predicting ignition point position during pulverized coal combustion in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> atmospheres // Fuel. 2012. Vol. 101. P. 23–37.

8. Minakov A.V., Kuznetsov V.A., Anufriev I.S., Kopyev E.P. Numerical analysis of a pre-chamber vortex burner with a steam blast atomizer // Fuel. 2022. Vol. 323. P. 124375-1–124375-14.
9. Minakov A.V., Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V. Comparative analysis of numerical methods for simulating n-heptane combustion with steam additive // Energies. 2022. Vol. 16. 25 p.
10. Alekseenko S.V., Dekterev A.A., Maltsev L.I., Kuznetsov V.A. Implementation of a three-stage scheme for the co-combustion of pulverized coal and coal-water slurry in an industrial boiler to reduce NO<sub>x</sub> emissions // Process Safety Environ. Prot. 2023. Vol. 169. P. 313–327.
11. Алексеев С.В., Дектерев А.А., Кузнецов В.А., Тэпфер Е.С. Расчетное исследование аэродинамики и теплообмена в перспективной конструкции пылеугольной топки // Теплофизика и аэромеханика. 2022. Т. 29, № 6. С. 973–980.
12. Rebola A., Azevedo J.L.T. Modelling coal combustion with air and wet recycled flue gas as comburent in a 2.5 MWth furnace // Appl. Therm. Eng. 2015. Vol. 86. P. 168–177.
13. Woycenko D.M., van de Kamp W.L., Roberts P.A.R. Combustion of pulverized coal in a mixture of oxygen and recycled flue gas // Tech. Rep. Intern. Flame Res. Found Doc. F98/Y/4, 1995. P. 92–99.
14. Dekterev A.A., Kuznetsov V.A. Investigation of pulverized coal flaring based on eddy-resolving turbulence models // J. Phys. Conf. Ser. 2020. Vol. 1677, Iss. 1. P. 012104-1–012104-4.
15. Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Sentyabov A.V., Chernetskiy M.Y. Numerical study of devolatilization models on the combustion process of pulverized fuel flow swirling // J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol. 2016. Vol. 9, No. 1. P. 15–23.

*Статья поступила в редакцию 31 мая 2023 г.,  
после переработки 8 декабря 2023 г.,  
принята к публикации 13 июня 2024 г.*