

Theoretical and Applied Heating Engineering
Теоретическая и прикладная теплотехника

EDN: DAXSGG

УДК 52–17, 628.524, 621.43.043.1

**Numerical Simulation of Flare Burning
of Coal of a Micro-Mill in a Steam-Oil Burner**

Elena S. Tepfer^a,
Aleksandr A. Dekterev^{*a, b}, Viktor A. Kuznetsov^{a, b},
Artem A. Dekterev^a and Evgeniy Yu. Shadrin^a
^a*Institute of Thermophysics S. S. Kutateladze SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*
^b*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 16.01.2023, received in revised form 03.02.2023, accepted 17.03.2023

Abstract. The article is devoted to numerical modeling of coal fuel flaring in a steam-oil burner. The results of modeling an oil-steam burner developed at IT SB RAS and a new torch burner operating on diesel fuel with partial replacement of it with micro-milled coal are presented. A comparison of the calculation results with the experimental data showed their good agreement both in terms of the temperature level and the concentration of the gas components of the combustion products. The simulation results showed that the new burner operates stably in a wide range of pulverized coal flow rates. The obtained results of a numerical study can be used in the design of a new burner device, choosing the optimal operating modes to reduce the concentration of harmful emissions and fuel underburning at the output.

Keywords: burner, micro-milled coal, diesel fuel, flare combustion, numerical modeling, design.

Acknowledgements. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project no. 19–19–00443).

Citation: Tepfer, E.S., Dekterev, A.A., Kuznetsov, V.A., Dekterev, Ar.A., Shadrin, E. Yu. Numerical simulation of flare burning of coal of a micro-mill in a steam-oil burner. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(4), 462–480. EDN: DAXSGG



Численное моделирование факельного горения угля микропомола в паромасляной горелке

Е. С. Тэпфер^а, А. А. Дектерев^{а, б},
В. А. Кузнецов^{а, б}, А. А. Дектерев^а, Е. Ю. Шадрин^а
^аИнститут теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН
Российская Федерация, Новосибирск
^бСибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Статья посвящена численному моделированию факельного сжигания угольного топлива в паромасляной горелке. Представлены результаты моделирования паромасляной горелки, разработанной в ИТ СО РАН, и новой факельной горелки, работающей на дизельном топливе с частичной заменой его на уголь микропомола. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента показало их хорошее соответствие, как по уровню температуры, так и по концентрации газовых компонент продуктов горения. Результаты моделирования показали, что новая горелка устойчиво работает в широком диапазоне расхода угольной пыли. Полученные результаты численного исследования можно использовать при проектировании нового горелочного устройства, подобрав оптимальные режимы работы, для снижения на выходе концентрации вредных выбросов и недожега топлива.

Ключевые слова: горелка, уголь микропомола, дизельное топливо, факельное горение, численное моделирование, проектирование.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19–19–00443).

Цитирование: Тэпфер Е. С. Численное моделирование факельного горения угля микропомола в паромасляной горелке / Е. С. Тэпфер, А. А. Дектерев, В. А. Кузнецов, А. А. Дектерев, Е. Ю. Шадрин // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(4). С. 462–480. EDN: DAXSGG

Введение

Десятки тысяч населенных пунктов обеспечиваются электричеством за счет ДЭС (дизельных электростанций). ДЭС активно используются на территориях, где отсутствует централизованное энергообеспечение или есть сложности с подачей электроэнергии. Это малые населенные пункты на отдаленных арктических территориях, производственные объекты, расположенные в труднодоступных местах, на которых ведется добыча нефти, газа и других природных ресурсов. Дизельные электростанции достаточно мобильны, просты в монтаже и строительстве. Основные проблемы энергообеспечения в отдаленных районах – это доставка дизельного топлива и ограниченность сроков сезонного завоза. Стоимость доставки топлива для ДЭС при таких условиях очень высока и, соответственно, высока стоимость получаемой электроэнергии.

В большинстве случаев в малой энергетике используются низкосортные угли с высокой влажностью и низкой теплотой сгорания, которые сжигаются в слоевых топках. При таком способе сжигания процесс идет с низким КПД, плохо поддается автоматическому управлению, экологически грязный. В связи с этим возникает необходимость разработки новых способов конструкций для максимально эффективного сжигания углей.

Предлагается использовать совместное сжигание дизельного и пылеугольного топлива в горелочном устройстве, при этом необходимо не только исследовать процессы, происходящие при совместном горении дизеля и угля, но и разработать специальные горелочные устройства. Частичная замена дизельного топлива на уголь позволит сделать экономически выгоднее работу малых электростанций.

В Институте теплофизики СО РАН разработана горелка для сжигания жидких топлив [1–3], в которой топливо распыляется струей перегретого пара (рис. 1). Паромасляная горелка содержит цилиндрический корпус, состоящий из двух частей. В основании установлена паровая форсунка, трубка топливоподдачи, патрубок подачи сжатого воздуха, патрубок с датчиком наличия пламени и свеча зажигания. Во внешнем диске расположены отверстия для подачи согретого сжатого воздуха в корень факела.

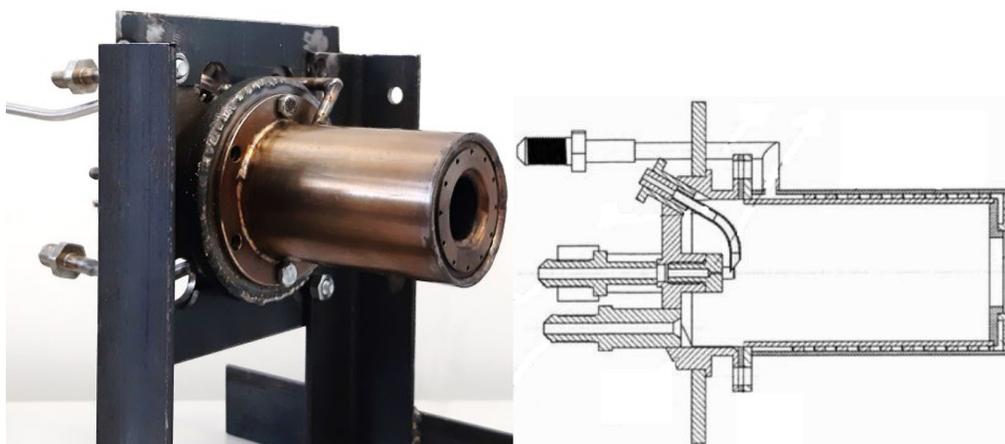


Рис. 1. Экспериментальное горелочное устройство

Fig. 1. Experimental burner

Такая горелка обеспечивает хороший распыл топлива, высокую эффективность выгорания топлива и низкую концентрацию вредных выбросов. Горелка была опробована на котле малой мощности, где оценивались недожег топлива и количество выбросов оксидов азота. В камере сгорания при коэффициенте избытка воздуха порядка 1,23 топливо почти полностью выгорало, а NO_x не превышали предельно допустимых значений.

Ранее авторами работы [4–6] проводилось численное моделирование паромасляной горелки ИТ СО РАН, в котором было показано, что в рассмотренной конструкции горелки происходят хорошее смешение пара с топливом и образование устойчивого факельного горения. Выгорание топлив и его производных при подаче пара происходит быстрее, а концентрация оксидов азота сильно снижается, что подтверждалось экспериментальными данными.

В данной работе предлагается смоделировать данное горелочное устройство, модернизированное для совместного сжигания дизельного топлива и угля микропомола [7–12].

1. Математическая модель

Математическое описание горения топлива включает в себя комплекс взаимосвязанных моделей, описывающих турбулентное движение газа, перенос тепловой и лучистой энергии, процессы горения, газификации и движения капель дизельного топлива и угольных частиц и т.д. Для численного моделирования нестационарного турбулентного течения газов использовалась URANS k- ω SST модель Ментора [13]. Движение капель дизельного топлива и частиц угля описывалось уравнениями динамики материальной точки с учетом силы сопротивления и силы тяжести. Учет турбулентности потока при движении частицы производился введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения для частицы. Для решения уравнения переноса теплового излучения использовался метод дискретных ординат. Коэффициенты поглощения газа вычислялись по модели суммы серых газов.

Расчет горения газообразных компонент базировался на модель EDC [14], которая позволяет использовать подробные химические механизмы в турбулентных реагирующих потоках.

Дизельное топливо является сложной смесью углеводородов. Неопределенность состава дизельного топлива создает большую трудность для его детального описания. Поэтому в данной работе дизельное топливо представлялось в виде *n*-гептана (C₇H₁₆). Для описания химических реакций использовался редуцированный механизм с 60 реакциями и 35 компонент, разработанный в исследовательском центре (ERC) университета Висконсина [15].

Процесс горения угольной частицы рассматривался в виде следующих последовательных этапов [16–19]: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент и горение коксового остатка. Скорость реагирования коксового остатка рассчитывалась согласно положениям классической диффузионно-кинетической теории:

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p \frac{\rho_p RT_g Y}{M} \frac{k_d k_b}{k_d + k_b},$$

где Y – массовая доля окислителя, M – молярная масса окислителя, k_d – константа скорости диффузии газа-реагента к поверхности частицы, k_d, k_b – константы скорости химической реакции. Константа скорости диффузии газа-реагента к поверхности частицы определялась:

$$k_d = D_0 \frac{[(T_p + T_g)/2]^{0.75}}{d_p},$$

где D_0 – коэффициент диффузии реакционно-активного газа при нормальных температуре и давлении.

Уравнение Аррениуса использовалось для нахождения константы скорости химической гетерогенной реакции:

$$k_b = k_{b,0} T^b e^{(E_b/RT_p)},$$

где $k_{b,0}$ – предэкспоненциальный множитель реакции выгорания углерода, E_b – энергия активации реакции выгорания углерода.

Для описания процессов реагирования твердого углерода в математическую модель включены реакции окисления и паровоздушной конверсии угля. Реакции и значения кинетических констант представлены в табл. 1.

Таблица 1. Кинетические константы гетерогенных реакций

Table 1. Kinetic constants of heterogeneous reactions

| Реакции | $k_{b,0}$, kg/(m ² s Pa) | E_b , J/kmol | β | Степень компонентов γ |
|-----------------------------|--------------------------------------|-------------------|---------|------------------------------|
| $C+0.5O_2 \rightarrow CO$ | 2.3 | $9.23 \cdot 10^7$ | 1 | $[O_2]^{0.4}$ |
| $C+CO_2 \rightarrow 2CO$ | 4.4 | $1.62 \cdot 10^8$ | 1 | $[CO_2]^{0.6}$ |
| $C+H_2O \rightarrow CO+H_2$ | 1.33 | $1.47 \cdot 10^8$ | 1 | $[H_2O]^{0.6}$ |

Для описания процесса распыла жидкого углеводородного топлива струёй пара (скорость которой может достигать скорости звука) было предложено следующее приближение: подаваемое в топку дизельное топливо представляется дискретным набором капель размером от 5 до 100 мкм. Угол раскрытия струи капель был выбран равным 55 градусов, скорость капель равна 30 м/с, направление подачи соответствовало направлению струи пара.

В рамках работы с использованием CFD-пакета Ansys Fluent была реализована и на базе данных эксперимента проведена адаптация комплексной математической модели процесса совместного сжигания жидкого углеводородного топлива и пылевидного угля в паромасляном горелочном устройстве.

2. Тестирование модели на основе экспериментальных данных

Для численного исследования процессов совместного сжигания жидкого и твердого углеводородного топлива было выбрано горелочное устройство, разработанное сотрудниками ИТ СО РАН (рис. 2). Объём данного устройства состоит из двух цилиндрических камер сгорания.

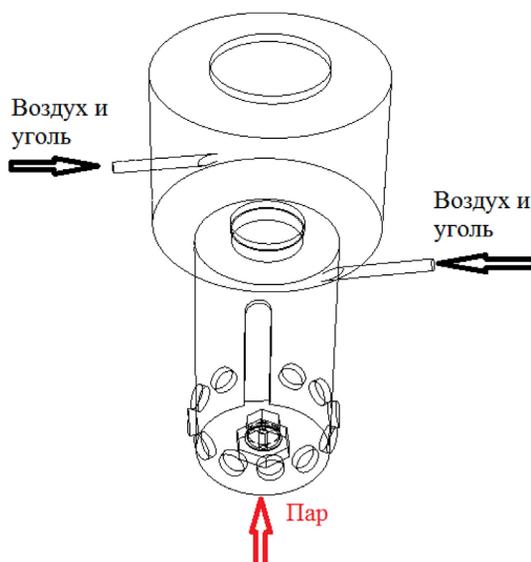


Рис. 2. Геометрия модели горелочного устройства

Fig. 2. Geometry of the burner model

В первой камере происходят процессы распыла, испарения, воспламенения и горения жидкого углеводородного топлива. Распыл топлива осуществляется за счет диспергации подаваемых капель высокоскоростной струей пара. Дизельное топливо подается в камеру сгорания через тонкую трубку, выход которой направлен и приближен к области формирования высокоскоростной струи пара. Подача окислительного воздуха в данной камере осуществляется за счет эжекции через отверстия в стенках. Во второй камере осуществляется тангенциальная подача воздуха и угольной пыли микропомола (аэросмеси).

Рассматривалось горение дизельного топлива в струе перегретого пара (без угля), а также совместное горение с пылевидным углем. Расходные характеристики представлены в табл. 2.

Задача решалась в полномасштабной трехмерной постановке. Предварительные расчеты показали наличие пульсаций параметров в области формирования факела. Поэтому были использованы нестационарные методы (URANS). Для расчетов использовалась неструктурированная сетка размером 2 млн ячеек с наличием детализации в области высоких градиентов скоростей.

Характеристики угольного топлива приведены в табл. 3. Характерный размер частиц угольной пыли составлял 50 мкм и не превышал 100 мкм.

На рис. 3–10 показаны процессы, протекающие в топочной камере и на выходе из нее при сжигании жидкого и твердого углеводородного топлива. На рисунках представлены два режима: горение дизеля и совместное горение дизеля и угля. При тангенциальной подаче аэросмеси во второй камере существенно изменяется структура течения (рис. 3). Тангенциальная скорость достигает 25 м/с.

Наличие закрутки также повлияло и на формирование факела на выходе из горелочного устройства (рис. 4). Стоит отметить, что добавление тангенциальной подачи воздуха увеличило пульсацию температуры в факеле. Результаты расчета показывают, что высокоскоростная струя пара взаимодействует с каплями дизельного топлива и увлекает их (с увеличением

Таблица 2. Расходные характеристики

Table 2. Consumable characteristics

| Расход, г/ч | Варианты | | |
|-------------|----------|-----------------|-----------------------|
| | S 6D 6.5 | S 6D 6.5+Воздух | S 6D 6.5+Воздух+Уголь |
| Дизеля | 700 | 700 | 700 |
| Пара | 580 | 580 | 580 |
| Воздуха | - | 4 | 4 |
| Угля | - | - | 150 |

Таблица 3. Характеристики угольного топлива

Table 3. Characteristics of coal fuel

| Уголь | Марка | Класс | W ^p % | A ^p % | S ^p % | C ^p % | H ^p % | N ^p % | O ^p % | Q _н ^p МДж |
|-----------|-------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|
| Кузнецкий | Д | Р, СШ | 12,5 | 13,2 | 0,3 | 58,7 | 4,2 | 1,9 | 9,7 | 22,9 |

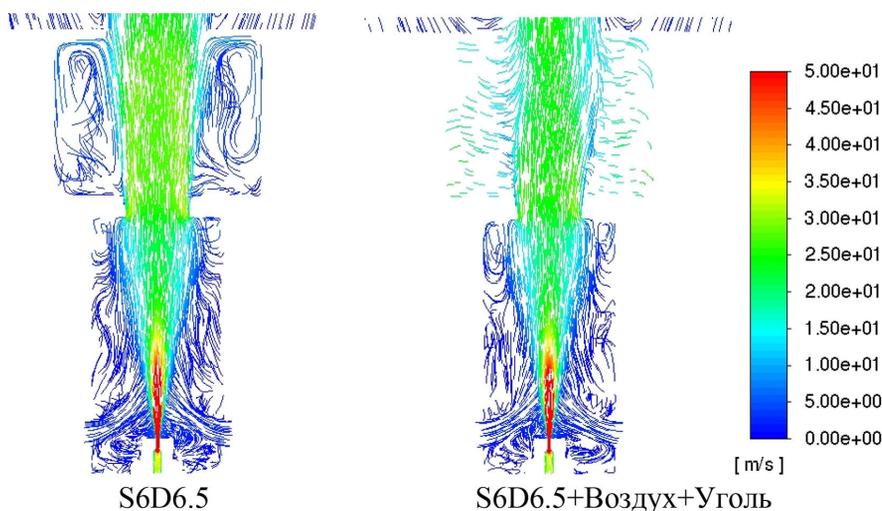


Рис. 3. Линии тока в центральном сечении (цветом отражена магнитуа скорости, визуализация скорости ограничена 50 м/с)

Fig. 3. Streamlines in the central section (the color shows the magnitude of the velocity, the visualization of the velocity is limited to 50 m/s)

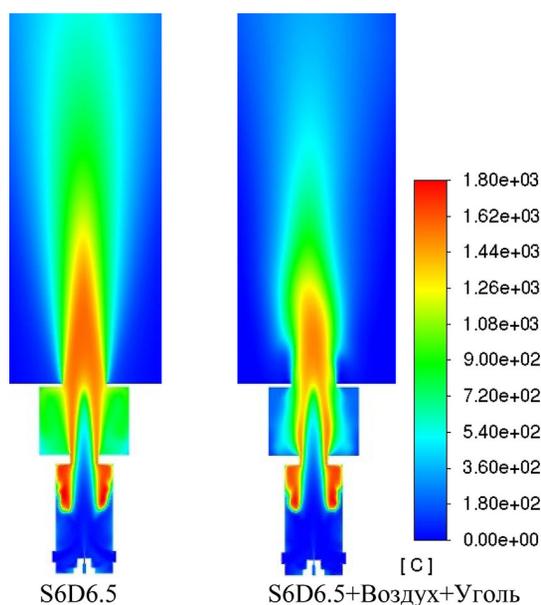


Рис. 4. Температура в центральном сечении

Fig. 4. Temperature in the central section

скорости) по направлению течения, воспламенение дизельного топлива происходит в верхней части первой камеры сгорания (рис. 4, 5). Догорание продуктов разложения гептана (C_7H_{16}), таких как CO и H_2 , происходит вне горелки для рассматриваемых режимов работы (рис. 6).

Результаты моделирования режима с углем показывают скопление частиц на боковой стенке второй камеры (рис. 7). Стоит отметить, что время жизни частиц в расчете было огра-

ничено 10 с и по истечении этого времени из камеры вылетало около 5–10 % частиц (рис. 8). Таким образом, время нахождения частиц в камере более 10 с, что, казалось бы, является достоинством данного режима горения. Но результаты показывают, что частицы все это время

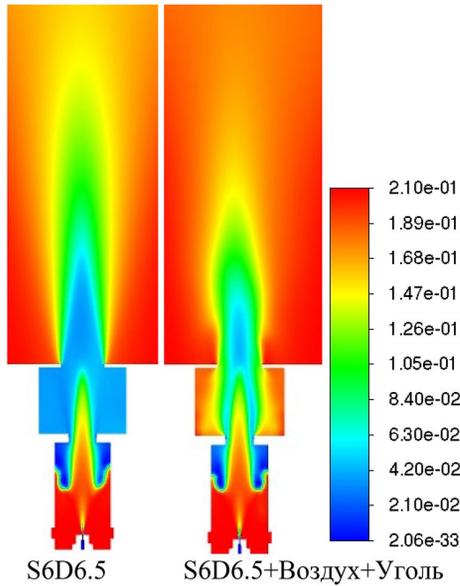


Рис. 5. Концентрация кислорода в центральном сечении (объемные доли)

Fig. 5. Oxygen concentration in the central section (volume fractions)

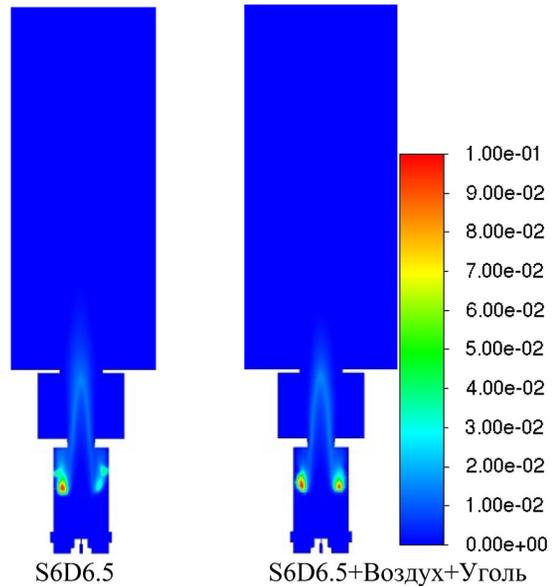


Рис. 6. Концентрация CO в центральном сечении (объемные доли)

Fig. 6. CO concentration in the central section (volume fractions)

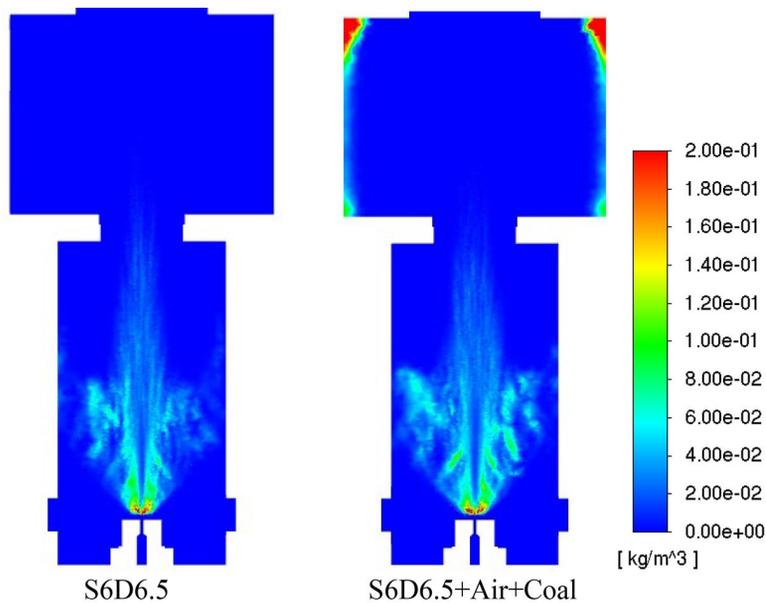


Рис. 7. Концентрация дизельных капель и угольных частиц в центральном сечении

Fig. 7. Concentration of diesel droplets and coal particles in the central section

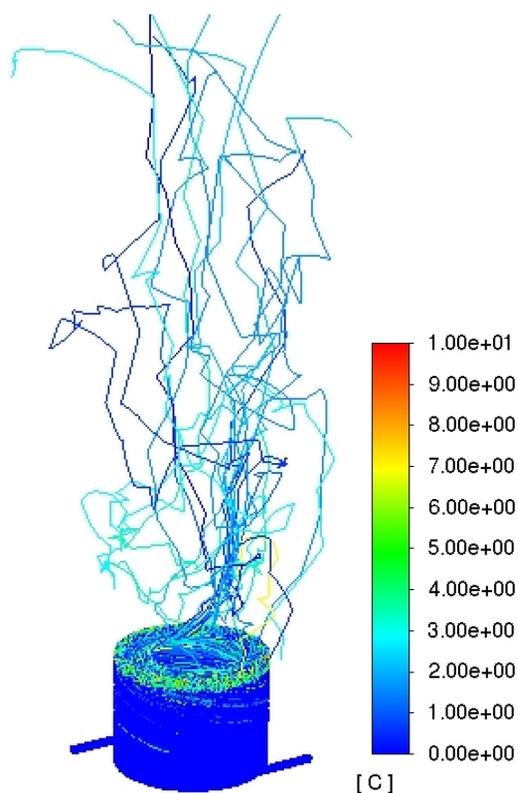


Рис. 8. Траектория движения угольных частиц (цветом отражено время существования частицы)

Fig. 8. The trajectory of the movement of coal particles (the color reflects the lifetime of the particle)

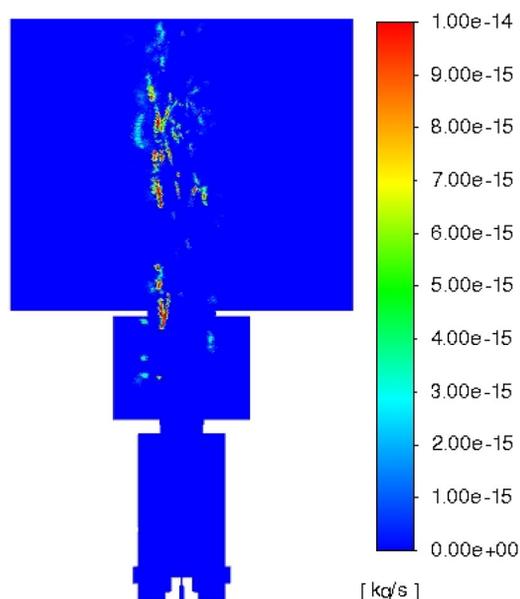


Рис. 9. Выгорание твердого углерода

Fig. 9. Burn out of solid carbon

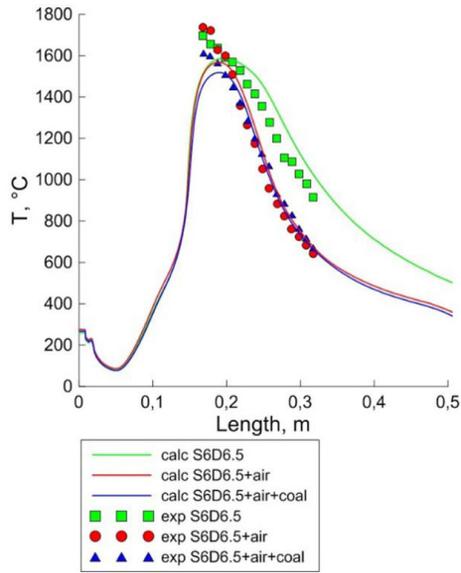
находятся в зоне с низкой температурой 50–200 °С (рис. 3). Это приводит к увеличению недожега твердого углерода. И по сути активное выгорание твердого углерода происходит в высокотемпературной зоне, когда частица начинает покидать камеру сгорания (рис. 9).

На рис. 10 представлено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными вдоль оси камеры. Наблюдается удовлетворительное соответствие основных параметров горения для разных режимов работы устройства. Видно наличие корреляции динамики изменения температуры и состава газа от режимных условий. В табл. 4 приведены средние значения (в горизонтальном сечении) параметров газа на выходе из камеры сгорания.

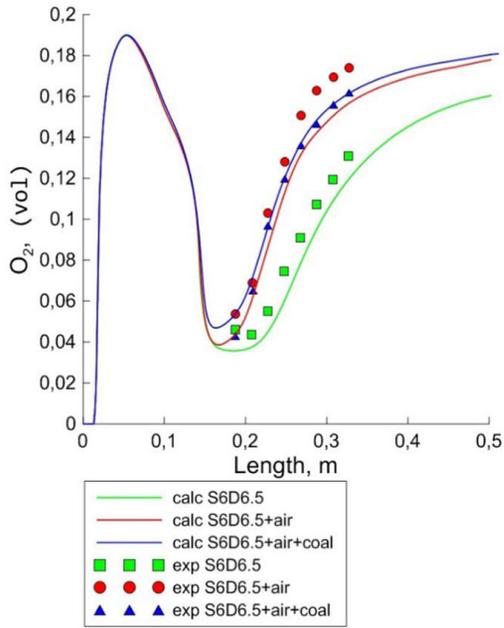
3. Расчетный анализ прототипа горелки

для совместного сжигания дизельного топлива и пылеугольного топлива

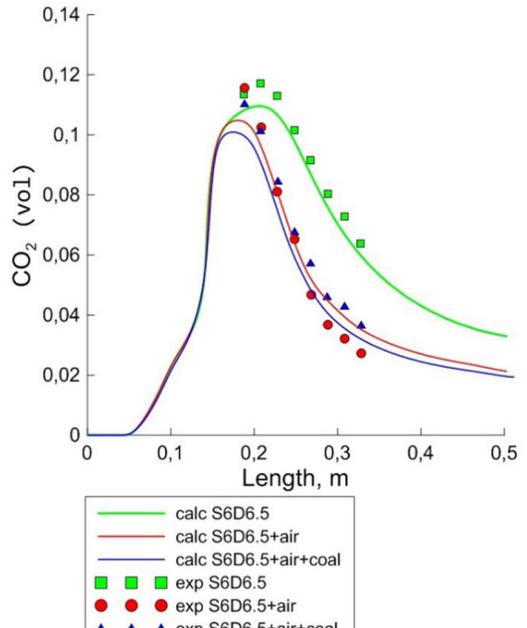
Предлагаемая конструкция горелочного устройства представлена на рис. 11. Горелка состоит из двух камер. В первой камере организуется эффективный распыл дизельного топлива высокоскоростной паровой струей и интенсивное воспламенение топлива, а во второй – потоком воздуха подача мелкодисперсного угольного топлива. Предварительный анализ показал, что тангенциальный ввод угольной пыли приводит к ее осаждению в камере, а также к интенсивной сепарации на выходе из горелки, значительно увеличивая недожог топлива. Поэтому в предлага-



a)



б)



В)

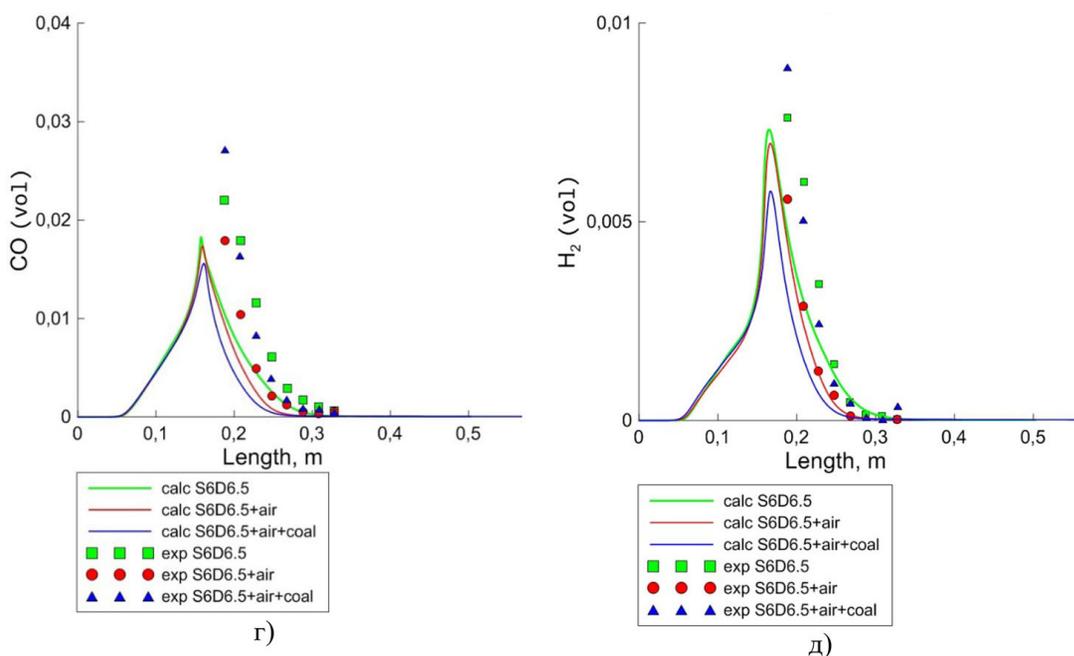


Рис. 10. Распределение параметров на оси горелки: а) температуры, К; б) концентрации O₂, м³/м³; в) концентрации CO₂, м³/м³; г) концентрации CO, м³/м³; д) концентрации H₂, м³/м³

Fig. 10. Distribution of parameters on the burner axis: a) temperature, K; b) O₂ concentration, m³/m³; c) CO₂ concentration, m³/m³; d) CO concentration, m³/m³; e) H₂ concentration, m³/m³

Таблица 4. Интегральные характеристики на выходе из топочной камеры

Table 4. Integral characteristics at the outlet of the combustion chamber

| Параметры | S 6D 6.5 | S 6D 6.5+Air | S 6D 6.5+Air+Coal |
|--|----------|--------------|-------------------|
| Температура, С | 1368 | 1271 | 1188 |
| C ₇ H ₁₆ , об.доли | 0 | 0.0 | 0.0 |
| CO, об.доли | 0.0058 | 0.052 | 0.0050 |
| H ₂ , об.доли | 0.0028 | 0.003 | 0.0022 |
| O ₂ , об.доли | 0.048 | 0.080 | 0.086 |
| CO ₂ , об.доли | 0.104 | 0.087 | 0.083 |
| H ₂ O, об.доли | 0.149 | 0.121 | 0.115 |

емой конструкции ввод угольной пыли организован прямоточной струей. При этом канал ввода угля располагается над факелом от дизельного топлива, что обеспечивает хорошее взаимодействие угольной пыли, несущего потока воздуха и первичного факела от дизельного топлива.

На первом этапе были проведены расчеты при сжигании дизельного топлива (рис. 12). Расход дизельного топлива составлял 1,2 кг/ч.

Как видно из рис. 12, факел стабилен, горячий пар и дизельное топливо хорошо перемешиваются. В топочной камере на расстоянии 0,4 м от горелки топливо практически полностью выгорает.

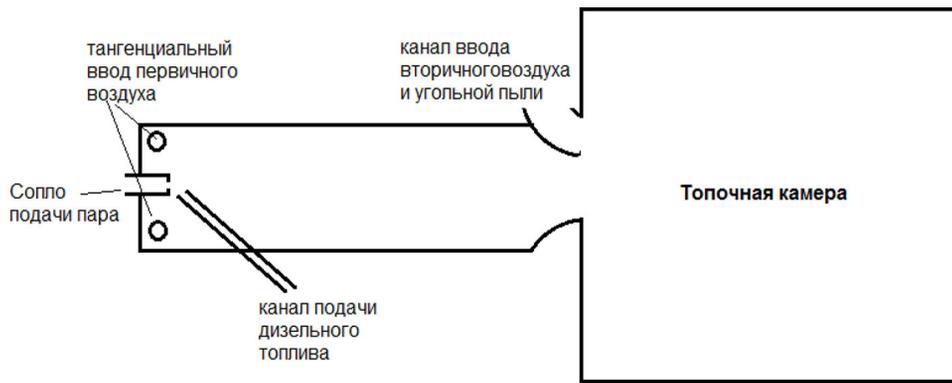
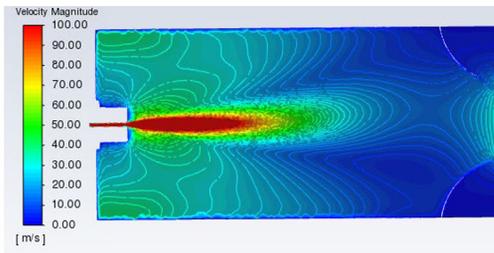
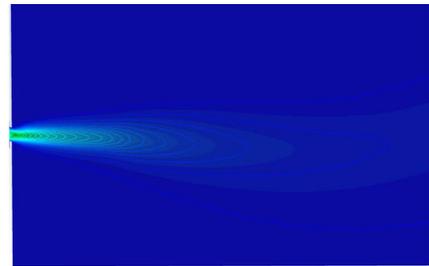


Рис. 11. Конструкция горелки для совместного сжигания дизельного и пылеугольного топлива

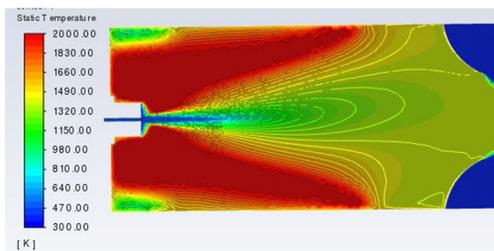
Fig. 11. The design of the burner for the co-combustion of diesel and pulverized coal



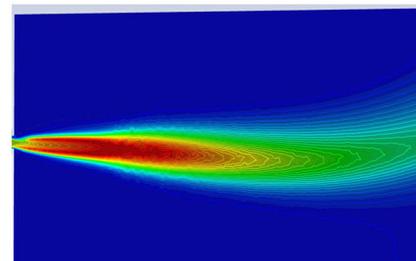
Поле модуля скорости в горелке, м/с



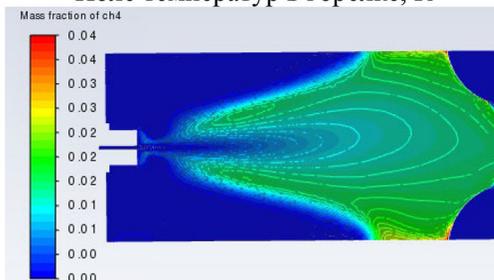
Поле модуля скорости в топке, м/с



Поле температур в горелке, К



Поле температур в топке, К



Массовая доля CH₄ в горелке



Массовая доля CH₄ в топке

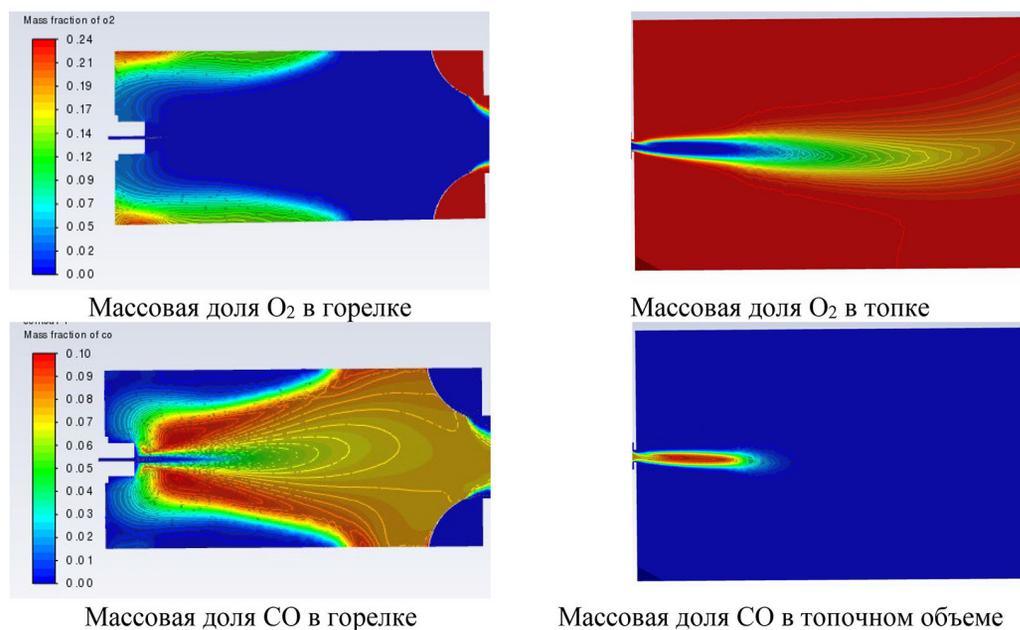


Рис. 12. Результаты расчета горения дизельного топлива в горелочном устройстве

Fig. 12. Calculation results of diesel fuel combustion in the burner

Таблица 5. Варианты расчета с различными расходами дизельного и пылеугольного топлива

Table 5. Calculation options with different consumptions of diesel and pulverized coal

| | | | |
|------------------|------|-----|-----|
| Диз.топливо, г/ч | 1000 | 800 | 600 |
| Уголь, г/ч | 300 | 600 | 900 |

Далее проводились вариантыные расчеты горения смеси дизельного и пылеугольного топлива, при этом тепловая нагрузка сохранялась (табл. 5).

На рис. 13 показаны характерные траектории движения угольных частиц в топочной камере. Цветом приведена температура частиц в градусах К.

На рис. 14 представлены поля скорости, температуры и концентраций веществ для варианта с соотношением топлив 1000 и 300 г/ч, соответственно, дизельное топливо и угольное.

Процесс горения для этого варианта устойчивый, как и для вариантов с соотношением топлив: 800 г/ч – дизельное и 600 г/ч – угольное топливо; 600 г/ч – дизельное и 900 г/ч – угольное топливо (рис. 15–16). Последний вариант соответствует режиму с равной тепловой нагрузкой от жидкого и твердого топлива.

На рис. 17 представлены графики распределения температуры и концентрации O₂ по длине факела для всех вариантов расчета. Процент выгорания летучих компонент топлива и углерода для трех вариантов расчета представлен в табл. 6.

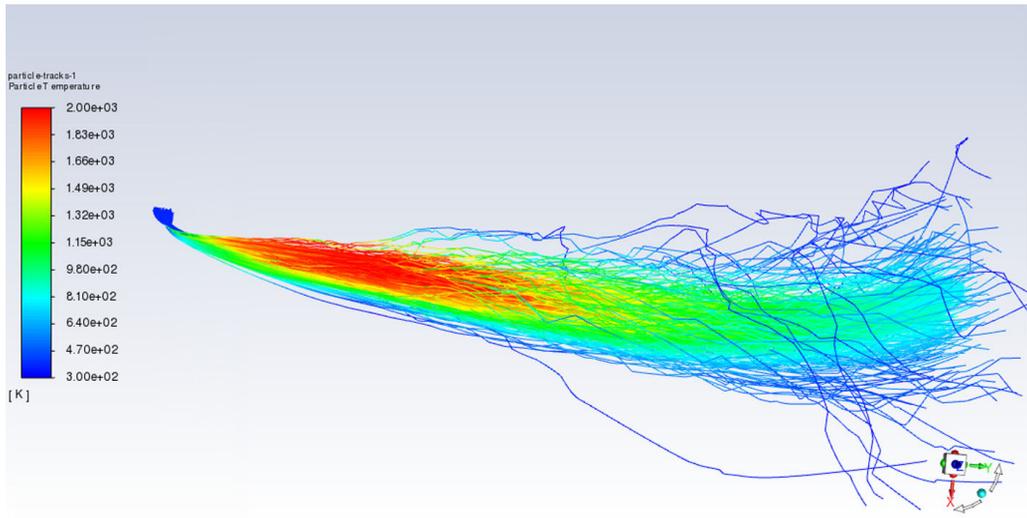
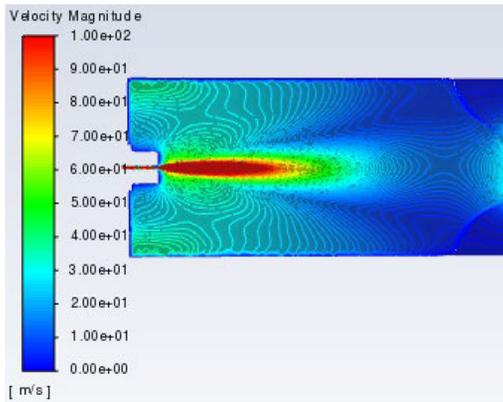
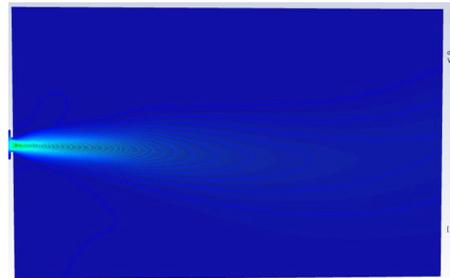


Рис. 13. Траектория угольных частиц

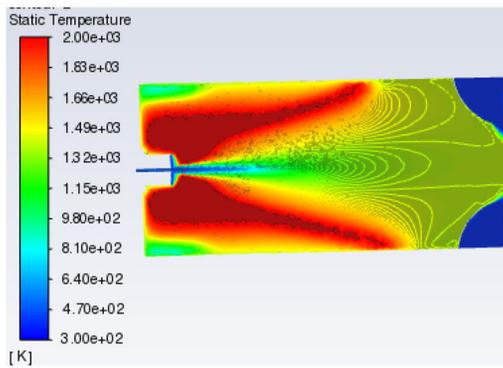
Fig. 13. Trajectory of coal particles



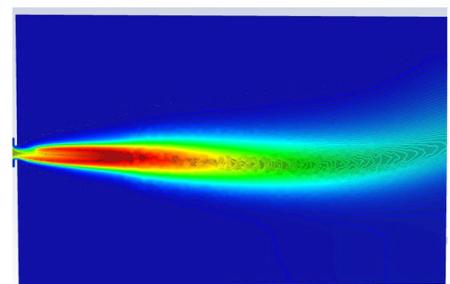
Поле модуля скорости в горелке, м/с



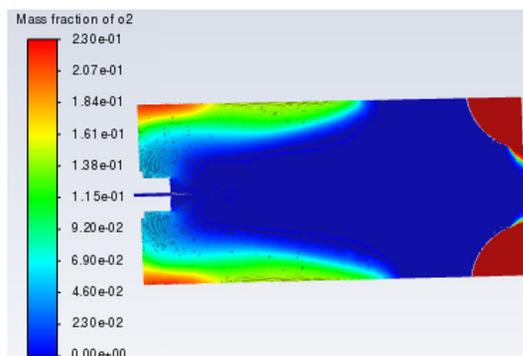
Поле модуля скорости в топке, м/с



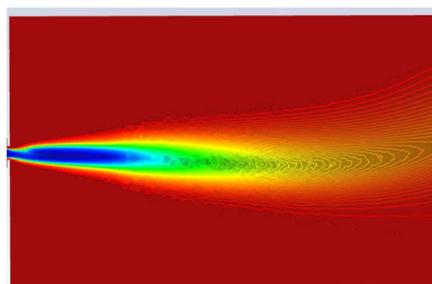
Поле температур в горелке, К



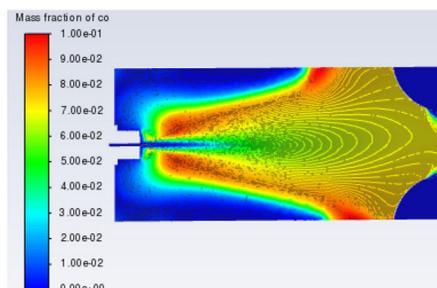
Поле температур в топке, К



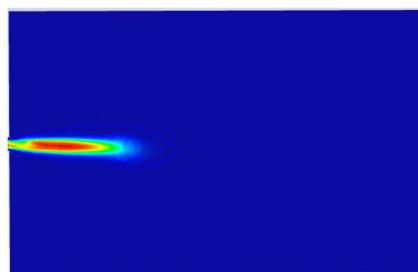
Массовая фракция O2 в горелке



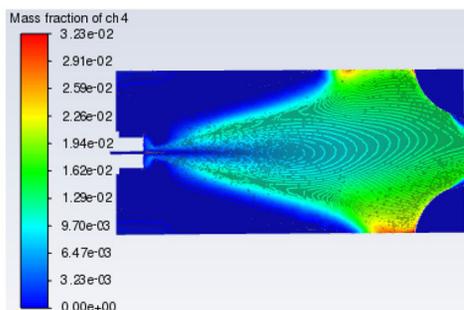
Массовая фракция O2 в топке



Массовая фракция CO в горелке



Массовая фракция CO в топке



Массовая фракция CH4 в горелке



Массовая фракция CH4 в топке

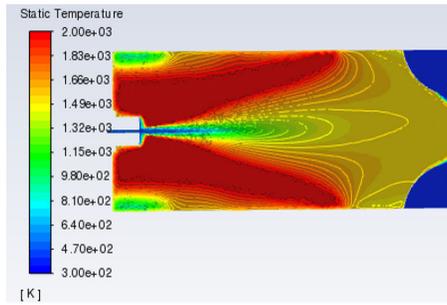
Рис. 14. Результаты моделирования горелочного устройства при совместном сжигании 1000 г/ч дизельного и 300 г/ч угольного топлива

Fig. 14. Burner simulation results for co-firing 1000 g/h diesel and 300 g/h coal fuel

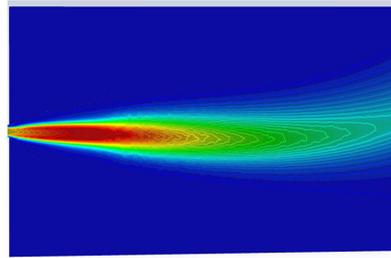
Таблица 6. Результаты вариантного расчета

Table 6. Results of variant calculation

| дизельное/уголь, г/ч | 1000/300 | 800/600 | 600/900 |
|--------------------------------|----------|---------|---------|
| Кол-во выгоревших летучих, % | 99.87 | 99.7 | 99.64 |
| Кол-во выгоревшего углерода, % | 88.6 | 94.3 | 95.06 |



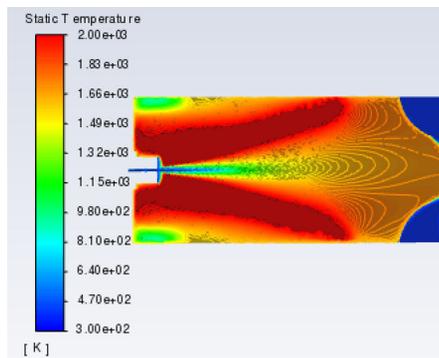
Поле температур в горелке, К



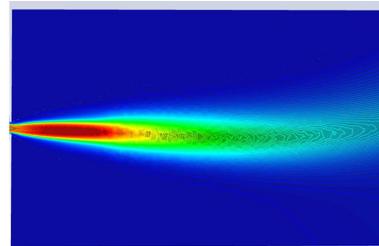
Поле температур в топке, К

Рис. 15. Поле температур для варианта с загрузкой угольной пыли – 600г/ч

Fig. 15. Temperature field for the option with coal dust loading – 600 g/h



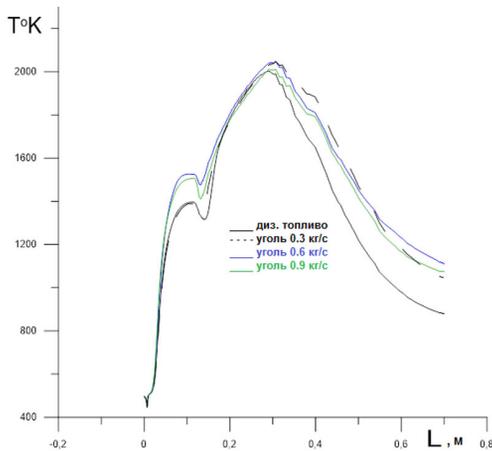
Поле температур в горелке, К



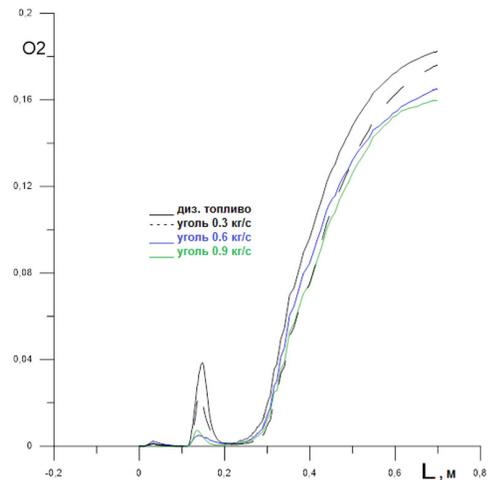
Поле температур в топке, К

Рис. 16. Поле температур для варианта с загрузкой угольной пыли – 900 г/ч

Fig. 16. Temperature field for the option with coal dust loading – 900 g/h



Температура по длине факела, К
Temperature along the length of the torch, K



O₂ вдоль факела, кг/кг
O₂ along the flame, kg/kg

Рис. 17. Распределение температуры и O₂ по длине факела

Fig. 17. Distribution of temperature and O₂ along the length of the torch

Заключение

Разработана математическая модель и проведено моделирование экспериментальной горелки при сжигании дизельного топлива, распыляемого высокоскоростной паровой струей при подачи угольной пыли и без нее. При сравнении результатов моделирования с данными экспериментов показано, что модель с достаточной точностью описывает процессы смешения, горения и теплообмена в горелочном устройстве в рассмотренных в эксперименте режимах.

Предложен вариант горелочного устройства, позволяющий проводить совместное сжигание дизельного топлива и угольной пыли в соотношении 50/50 по тепловой мощности. При этом наблюдается стабильное горение факела и относительно небольшой недожог угольного топлива. В дальнейшем планируется расчетным путем оптимизировать горелочное устройство с целью проведения экспериментального сжигания смеси топлив в промышленной камере сгорания.

Список литературы / References

- [1] Вигриянов М. С., Ануфриев И. С., Копьев Е. П., Садкин И. С., Шарыпов О. В. Паромасляное горелочное устройство. Реферат к патенту № 2740722, патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. Заявка 2020119233, приоритет от 20.01.2021. [Vigriyanov M. S., Anufriev I. S., Kopyev E. P., Sadkin I. S., Sharyпов O. V. Steam oil burner device. Abstract to patent No. 2740722, patent holder Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Thermophysics S. S. Kutateladze of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (in Rus.)]
- [2] Алексеенко С. В., Ануфриев И. С., Вигриянов М. С., Копьев Е. П., Шарыпов О. В. Характеристики сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара. *Физика горения и взрыва*. 2016. 52(3). 37–44 [Alekseenko S. V., Anufriev I. S., Vigriyanov M. S., Kopyev E. P., Sharyпов O. V. Characteristics of diesel fuel combustion in a burner device with a superheated steam jet. *Physics of gorenje and explosion*. 2016. 52(3). 37–44 (in Rus.)]
- [3] Копьев Е. П., Ануфриев И. С., Шадрин Е. Ю., Лобода Е. Л., Агафонцев М. В., Мухина М. А. Изучение характеристик пламени горелочного устройства при распылении жидких углеводородов паровой струей. *Доклады АН ВШ РФ*. 2019. 2(43). 38–55 [Kopyev E. P., Anufriev I. S., Shadrin E. Yu., Loboda E. L., Agafontsev M. V., Mukhina M. A. Studying the characteristics of the flame of a burner device when spraying liquid hydrocarbons with a steam jet. *Reports of the Higher School of Economics of the Russian Federation*. 2019. 2(43). 38–55 (in Rus.)]
- [4] 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*. 323, 1 September 2022, 124375 doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124375
- [5] Kuznetsov V. A., Dekterev Ar. A., Anufriev I. S., Minakov A. V. Numerical study of the effect of superheated steam supply during the combustion of liquid fuel in a burner on the reduction of harmful emissions. *Journal of Physics: Conference Series* 2233 (2022) 012005 doi:10.1088/1742-6596/2233/1/012005
- [6] Minakov A. V., Kuznetsov V. A., Dekterev Ar. A., Anufriev I. S., Kopyev E. P., Alekseenko S. V. Comparative Analysis of Numerical Methods for Simulating N-Heptane Combustion with Steam Additive. *Energies* 2023, 16(1), 25 doi.org/10.3390/en16010025

[7] Алексеенко С.В., Бурдуков А.П., Попов В.И., Попов Ю.С. *Способ и устройство для ультратонкого помола угля*. Патент № 2273521 Приоритет от 06.05.2004. Патентообладатель ИТ СО РАН. [Alekseenko S. V., Burdukov A. P., Popov V. I., Popov Yu. S. *Method and device for ultrafine grinding of coal*. Patent № 2273521 Priority dated 06.05.2004. Patent holder of IT SB RAS (in Rus.)]

[8] Чернецкий М.Ю., Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Ануфриев И.С., Стрижак П.А. Исследование воспламенения угольной пыли, полученной при различной механической обработке, в условиях высокоскоростного нагрева. *Физика горения и взрыва*. 216. 52(3). 79–81. [Chernetsky M. Yu., Burdukov A. P., Butakov E. B., Anufriev I. S., Strizhak P. A. Investigation of ignition of coal dust obtained by various mechanical processing under conditions of high-speed heating. *Physics of gorenje and explosion*. 216. 52(3). 79–81. (in Rus.)]

[9] Чернецкий М.Ю., Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Кузнецов А.В. Исследование процессов деактивации механоактивированных углей микропомола. *Физика горения и взрыва*. 54(1). 23–26. [Chernetsky M. Yu., Burdukov A. P., Butakov E. B., Kuznetsov A. V. Investigation of deactivation processes of mechano-activated carbons of micropromol. *Physics of gorenje and explosion*. 54(1). 23–26. (in Rus.)]

[10] Burdukov A. P., Butakov E. B., Popov V. I., Chernetskiy M. Yu., Chernetskaya N. S. The use of mechanically activated micronized coal in thermal power engineering. *Thermal Science*. 2016. 20. 23–33.

[11] Burdukov A. P., Popov V. I., Yusupov T. S., Hanjalić K., Chernetskiy M. Yu. Autothermal Combustion Of Mechanically-Activated Micronized Coal In A 5 Mw Pilot-Scale Combustor. *Fuel*. 2014. 122. 103–111.

[12] Chernetskiy M. Yu., Dekterev A. A., Burdukov A. P. Computational modeling of autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal. *Fuel*. 2014. 135. 443–458.

[13] Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*. 1994. 32(8). 1598–1605.

[14] Magnussen B. In: *On the structure of turbulence and a generalized eddy dissipation concept for chemical reaction in turbulent flow*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics; 1981. <https://doi.org/10.2514/6.1981-42>.

[15] Patel A., Kong S.-C., Reitz R.D. Development and Validation of a Reduced Reaction Mechanism for HCCI Engine Simulations. *SAE Tech. Pap.*, SAE International. 2004. 10.4271/2004-01-0558

[16] Gavrilov A., Dekterev A., Chernetsky M. Simulation of coal combustion in a pulverized coal-fired boiler. 13. 2008. ICHMT DIGITAL LIBRARY ONLINE (ISSN: 961-91393-0-5 Print). Volume 1. *Proceedings of CHT-08 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer*. May 11–16, 2008, Marrakesh, Morocco.

[17] Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании. *Физика горения и взрыва*. 3. 2011. 37–46 [Chernetsky M. Yu., Dekterev A. A. Mathematical model of heat exchange and combustion of pulverized coal fuel during flare combustion. *Physics of gorenje and explosion*. 3. 2011. 37–46 (in Rus.)]

[18] Дектерев А. А., Гаврилов А. А., Чернецкий М. Ю., Суржикова Н. С. Математическая модель процессов аэродинамики и теплообмена в пылеугольных топочных устройствах. *Тепло-*

вые процессы в технике. 3(3). 2011. 140–143 [Dekterev A. A., Gavrilov A. A., Chernetsky M. Yu., Surzhikova N. S. Mathematical model of aerodynamics and heat transfer processes in pulverized coal combustion devices. *Thermal processes in engineering*. 3(3). 2011. 140–143 (in Rus.)]

[19] Chernetskiy M., Dekterev A., Chernetskaya N., Hanjalić K. Effects of reburning mechanically-activated micronized coal on reduction of NO_x: Computational study of a real-scale tangentially-fired boiler. *Fuel*. 214, 15 February 2018, 215–229 doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.132