

УДК 662.61

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЯ МИКРОПОМОЛА: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТ

А. В. Кузнецов^{1,2}, Н. А. Абаимов¹, Е. Б. Бутаков², П. В. Осипов¹,
А. Ф. Рыжков¹

¹Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, p.v.osipov@urfu.ru

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Исследовано влияние микропомола на процессы воздушной конверсии пылеугольного топлива. На основе данных экспериментов методами вычислительной гидродинамики выполнено моделирование, которое определило условия протекания исследуемого процесса. Проведено расчетное исследование конверсии угля грубого помола в среде продуктов сгорания угля микропомола при соотношении расходов первичного и вторичного угля 0.82 и соотношении соответствующих расходов воздуха 0.35, при коэффициентах избытка первичного воздуха 0.8, вторичного 1.87 и общего 1.39, при температурах в активной зоне более 1200 °С. По результатам расчета для указанного режима степень конверсии первичного угля составила 100 %, вторичного — 60 %, а общая конверсия ≈ 80 %. Полученные результаты указывают на возможность повышения эффективности сжигания угля за счет технологии микропомола применительно к системам безмазутного розжига и подсветки факела на паровых пылеугольных котлах ТЭС.

Ключевые слова: горение, эксперимент, вычислительная гидродинамика (CFD), микропомол.

DOI 10.15372/FGV20210108

ВВЕДЕНИЕ

Уголь является основным энергетическим топливом в Сибири. Его запасы многократно превышают запасы других видов топлив — нефти и газа. В мире на долю угольной генерации приходится около 35 % вырабатываемой электроэнергии и более 40 % выбросов углекислого газа от энергоустановок [1].

Глобальная тенденция на повышение энергоэффективности предполагает внедрение новых технологий и в угольной генерации. Энергетическое использование каменных углей базируется на сжигании в пылевидном состоянии в топках энергетических котлов и достаточно хорошо освоено. Среди энергетических проблем этого процесса следует выделить сжигание низкосортных углей — высокозольных и низкорекреационных, занимающих значительный объем в топливном балансе. Здесь на первом месте стоит вопрос повышения их реакционной способности.

Одной из перспективных технологий в энергетике может стать технология применения углей микропомола с улучшенными кинетическими характеристиками при их механоактивации и соблюдении оптимальных тепло-технических условий сжигания [2]. Для пылеугольных котлов микроуголь предлагают использовать как растопочное и/или стабилизирующее (подсветочное) топливо, взамен мазута или высокорекреационного двухкомпонентного топлива, получаемого плазменной термохимической подготовкой к сжиганию энергетических углей [2–6].

В энергетике тонина помола оценивается в первом приближении по интегральной зерновой характеристике — остатком на сите R_{90} ($7 \div 30$ % для каменных углей и $40 \div 45$ % для бурых) [7]. Более тонкий помол, называемый микропомолом ($10 \div 40$ мкм), увеличивает удельную поверхность реагирования и скорость протекания гетерогенных реакций. Он также облегчает процессы сушки, транспортировки пылеугольного топлива и т. п. [8, 9]. Уголь микропомола получают путем домалывания угля стандартного помола в специальных мельницах — виброцентробежных, планетарных, дезинтеграторных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-50069).

© Кузнецов А. В., Абаимов Н. А., Бутаков Е. Б.,
Осипов П. В., Рыжков А. Ф., 2021.

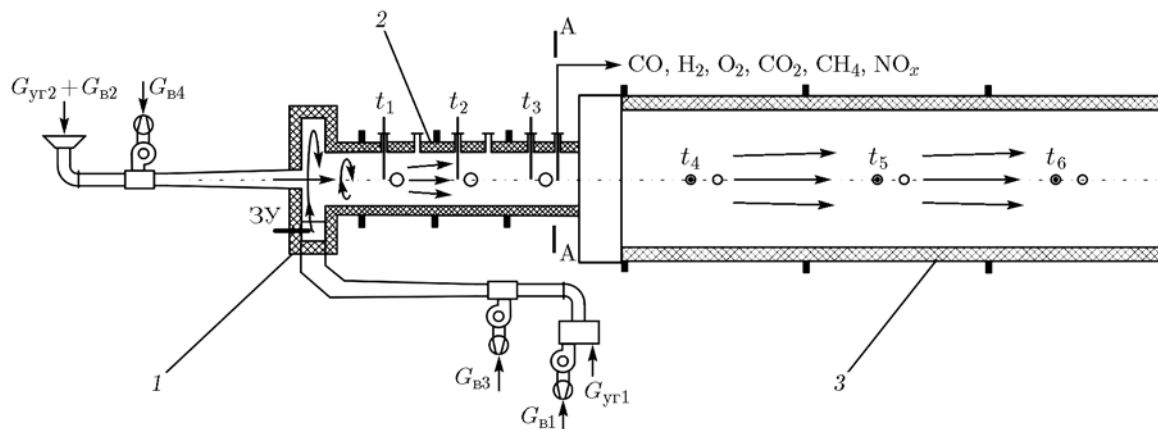


Рис. 1. Схема установки:

1 — завихритель, 2 — реакционная камера, 3 — камера дожигания, ЗУ — запальное устройство

Как известно [8, 10], в результате механического воздействия на уголь происходит распад отдельных химических связей с образованием свободных радикалов, ускоряющих последующее протекание химических реакций, диспергирование также приводит к структурным изменениям со снижением плотности упаковки, уменьшением доли атомов углерода, упорядоченных в слое. При такой механоактивации в угле возрастает атомное соотношение Н/С и уменьшается содержание кислорода из-за механодеструкции арилалкильных эфирных групп при разрыве кислородного мостика со стороны бокового радикала и последующего перераспределения водорода [8].

С увеличением тонины помола (степени механоактивации) снижается температура воспламенения угля и повышается скорость выхода летучих веществ из угля [10]. Такой способ подготовки угольного топлива может увеличить его реакционную способность при воспламенении и горении, что позволит проводить сжигание без предварительного нагрева топлива и воздуха.

В работе [2] приведено распределение частиц микрогля по размеру, полученное оптико-цифровым методом для каменного угля, используемого в настоящей работе. Уголь имеет высокую степень окисленности, по характеристикам ближе к бурому. При использовании такого угля на ТЭС применяют грубый помол частиц (доля частиц, прошедших через сито R_{90} , составляет 20 %). После мельницы-дизинтегратора доля частиц, прошедших через сито R_{90} , составляет более 95 %, что позволяет сжигать его без предварительного нагре-

ва топлива и воздуха [2]. Однако работа исключительно на угле микропомола экономически нецелесообразна, а процесс вовлечения угля грубого помола в режим горения с помощью факела угля микропомола не изучен.

Цель работы — исследование процесса воздушной конверсии угля грубого помола в среде продуктов сгорания угля микропомола без привлечения других методов интенсификации процесса (обогащение дутья, подогрев дутья или топлива и т. д.).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальные исследования выполнены на установке ИТ СО РАН (рис. 1), модифицированной для двухступенчатого ввода угля.

Установка представляет собой цилиндрический футерованный сосуд с улиточным завихрителем ($\varnothing 0.5 \times 0.14$ м), в который тангенциально подается первичный уголь G_{YT1} тонкого помола из мельницы-дизинтегратора. Вторичный уголь G_{YT2} стандартного помола подается через сопло в торец завихрителя с помощью вибрационного питателя.

После завихрителя потоки попадают в реакционную камеру внутреннего диаметра 0.315 м и длиной 1.5 м. Далее продукты реагирования поступают в камеру дожигания диаметром 1 м и длиной 3 м. На выходе твердые примеси продуктов сгорания сепарируются в циклоне, а газы выбрасываются дымососом в атмосферу. Детальное описание установки приведено в работе [9].

В экспериментах использован каменный

Таблица 1
Технический и элементный анализ угля

Технический анализ				Элементный состав, %				
W^r , %	A^r , %	V^r , %	Q_s^r , МДж/кг	C^r	H^r	N^r	S^r	O^r
5.4	22.3	32.3	20.0	54.6	4.1	1.3	0.5	11.8

окисленный уголь Кузнецкого бассейна марки Д (длиннопламенный), характеристики которого приведены в табл. 1. Как и все окисленные угли, он обладает повышенным содержанием кислорода, золы и пониженным содержанием углерода, водорода и теплоты сгорания.

После измельчения в шаровой барабанной мельнице средний диаметр частиц вторичного угля составляет 100 мкм. Средний диаметр частиц первичного угля после мельницы-дезинтегратора — 30 мкм. Фракционное распределение частиц угля по потокам приведено на рис. 2.

Воспламенение пылеугольного факела реализуется с помощью запального устройства и пропан-бутановой смеси.

Транспортировка угля в реактор осуществляется посредством эжектирующего воздуха ($G_{в1}$, $G_{в3}$ и $G_{в4}$). Расход воздуха фиксируется с помощью термоанемометрического датчика скорости АWV-3, имеющего диапазон измерения до 16 м/с при точности $5 \div 8$ %.

Состав газовой смеси измеряется газоанализатором ТЭСТ 203 в сечении А—А по оси установки. Принцип действия: измерение CH_4 , CO , CO_2 — оптико-абсорбционный, O_2 — электрохимический, H_2 — полярографический. Диапазон измерения объемных концентраций: O_2 — $0 \div 30$ %, H_2 — $0 \div 40$ %, CO — $0 \div 100$ %, CO_2 — $0 \div 30$ %, CH_4 — $0 \div 30$ %. Предел допустимой основной относительной погрешно-

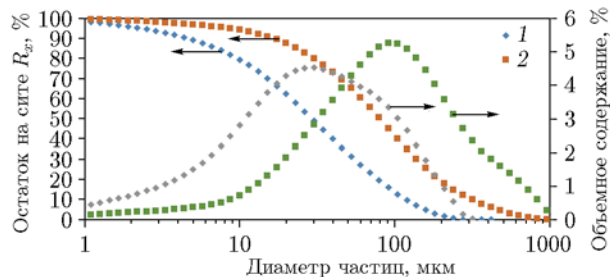


Рис. 2. Фракционный состав угля:
1 — первичный уголь, 2 — вторичный

Таблица 2
Режимные параметры эксперимента

Расход угля, кг/ч ($G_{уг1}/G_{уг2}$)	Расход воздуха, м ³ /ч ($G_{в1+в3}/G_{в2+в4}$)	α_1	α_2	α
200 (90/110)	1 540 (400/1 140)	0.80	1.87	1.39

Примечание. α_1 , α_2 — коэффициенты избытка первичного и вторичного воздуха, α — общий коэффициент.



Рис. 3. Данные по режиму подачи угля и воздуха

сти ± 5 %.

Измерение температуры по оси установки проводилось с помощью платинородиевых термомпар.

Перед проведением эксперимента выполнялась тарировка питателей топлива и датчиков расхода воздуха. Минимальный расход воздуха устанавливается исходя из условий, необходимых для транспортировки угольного топлива. Режимные параметры эксперимента представлены в табл. 2.

Работа установки включает в себя три периода (рис. 3):

I — пусковой: подача первичного угля без подачи вторичного угля, работает запальное устройство для разогрева реактора и поддержания горения, после выхода на режим устойчивого горения запальное устройство выключается;

II — основной: подача первичного и вторичного угля, проведение измерений;

III — финальный: прекращение подачи первичного и вторичного угля.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использована разработанная в УрФУ [11–13] с использованием методов вычислительной гидродинамики CFD-модель поточ-

ной газификации твердого топлива. Моделирование проведено на неструктурированной сетке с 900 000 расчетных элементов. К базовым подмоделям CFD-моделирования относятся уравнения неразрывности, энергии, переноса компонентов среды, равновесия сил для дискретной фазы, сохранения импульса и т. д. Использована подмодель турбулентности $k-\omega$ SST, верификация которой на примере горения угольной пыли в топке приведена в работе [13]. На стенках установки выполняется условие прилипания. Перенос энергии излучением описывается дискретной подмоделью излучения (32 луча) с подмоделью «серых» газов. Количество рассчитываемых траекторий движения частиц топлива равняется 2 000.

Подмодель горения угольных частиц

Для упрощения модели считается, что сушка происходит мгновенно. Такое допущение не вносит серьезной погрешности, особенно при газификации каменных углей с низким содержанием влаги.

Подмодель выхода летучих веществ из угля (пиролиз) одноступенчатая кинетическая. Состав летучих веществ определяется исходя из равновесного состава (H_2O , CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , N_2) элементов летучих (N, O, H, летучий C):

$$\frac{dm_p}{d\tau} = -k_v m_{p0} (1 - f_{v0}), \quad (1)$$

f_{v0} — массовая доля летучих веществ в исходном угле, m_{p0} — начальная масса угольной частицы, k_v — константа скорости выхода летучих веществ, определяемая по уравнению Аррениуса:

$$k_v = k_{v0} \exp(-E_v/RT_p), \quad (2)$$

где k_{v0} — предэкспоненциальный множитель процесса выхода летучих веществ, с^{-1} , E_v — энергия активации процесса выхода летучих

веществ, Дж/моль, T_p — температура частицы, К.

Скорость горения коксового остатка рассчитывается согласно положениям [14] диффузионно-кинетической теории:

$$\frac{dm_p}{d\tau} = -S_p \frac{\rho R T_g C}{M} \frac{k_d k_c}{k_d + k_c}, \quad (3)$$

где S_p — площадь поверхности частицы, м^2 , T_g — температура газа-реагента, К, k_d — коэффициент скорости диффузии газа-реагента к поверхности частицы, k_c — коэффициент скорости химической реакции, C — массовая доля реагента, кг/кг, M — молярная масса окислителя, моль/моль, R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К). Константа скорости диффузии газа-реагента к поверхности частицы определяется по формуле [14]

$$k_d = D_0 \frac{[(T_p + T_g)/2]^{0.75}}{d_p}, \quad (4)$$

где D_0 — константа диффузии реакционно-активного газа при нормальных температуре и давлении, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м} \cdot \text{Па} \cdot \text{К}^{0.75})$, d_p — диаметр частицы топлива, м. Диаметры частиц в расчете задавались в соответствии с рис. 2.

Константа скорости химической гетерогенной реакции определяется по уравнению Аррениуса:

$$k_c = A_c \exp(-E_c/RT_p), \quad (5)$$

где A_c — предэкспоненциальный множитель, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Па})$, E_c — энергия активации, Дж/моль.

Моделируемые гетерогенные химические реакции горения и газификации коксового остатка приведены в табл. 3.

Моделирование проведено для реактора с длиной камеры до 4 м или 12 калибров (отношение длины канала к его диаметру $L/D = 12$).

Таблица 3

Гетерогенные реакции и их кинетические константы [15]

Реакция	ΔH , кДж/моль	A_c , кг/(с · м ² · Па)	E_c , кДж/моль
$\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	-404.7	0.005	74
$\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$	+118.5	0.0635	162
$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	+159.9	0.0019	147

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения температуры и концентраций продуктов конверсии проводились в конце реакционной камеры (сечение А—А на рис. 1). Получены следующие результаты: $T_3 = 1250\text{ }^\circ\text{C}$, $\text{O}_2 = 7.3\text{ }\%$, $\text{H}_2 = 0$, $\text{CO} = 0.2\text{ }\%$, $\text{CO}_2 = 10.2\text{ }\%$, $\alpha = 1.39$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Траектории и убыль массы частиц угля

Ввод в реакционную камеру потока первичного угля из завихрителя и аксиальной струи вторичного угля создает гидродинамическую, структурную и температурную неоднородность.

Закрученный поток горящего первичного угля выходит из улиточного завихрителя и догорает на протяжении первых 2–3 калибров, втягивая в спиралевидное движение периферийную часть потока вторичного угля (рис. 4).

Изначальное аксиальное движение вторичного угля относительно быстро распадается на два потока. Основная приосевая струя вторичного угля, постепенно выгорая, сохраняет практически прямолинейное, слабо прецессирующее движение до конца расчетного участка. Периферийная часть потока вторичного угля втягивается в спиралевидный поток первичного угля и отбрасывается к стенке реактора, что создает нетривиальную картину распределения температур и концентраций газов, рассмотренную ниже.

Время пребывания в установке вторичного угля мало ($\approx 0.04\text{ с}$) из-за большой аксиальной скорости потока (рис. 4, в).

Степень конверсии вторичного угля на выходе из расчетного участка протяженностью $L/D = 12$ составляет $X_{\text{уг}2} \approx 60\text{ }\%$. Общая степень конверсии всего угля $X_{\text{уг}} \approx 80\text{ }\%$.

Распределение температур и концентраций

Особенности взаимодействия потоков первичного и вторичного угля отражаются в распределении температур и концентраций газов в сечениях установки.

Температурное поле в установке неоднородное (рис. 5). Оно отражает процессы выгорания первичного угля и развития конверсии в распадающемся на струи потоке вторичного угля.

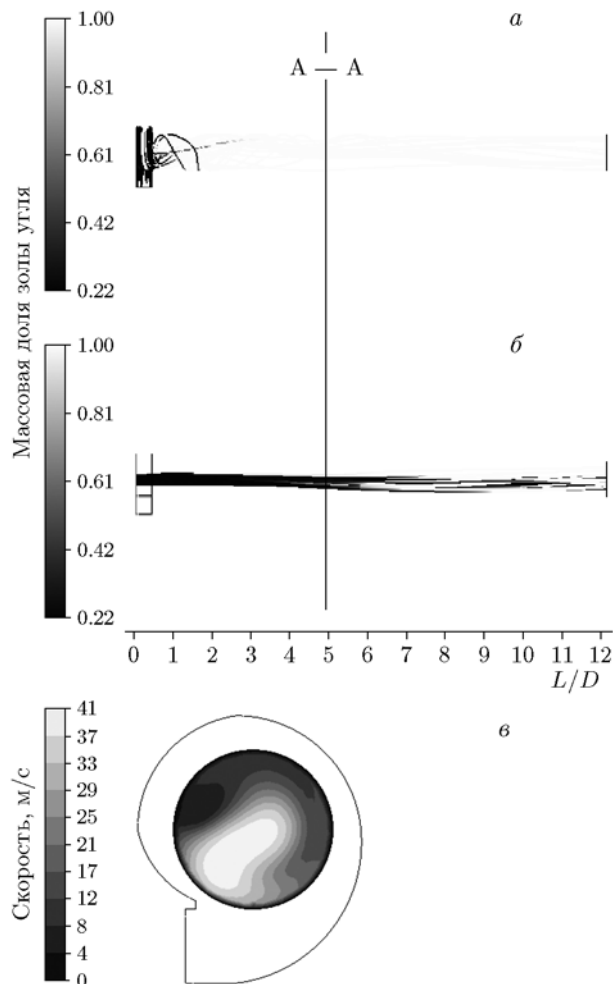


Рис. 4. Траектории и убыль массы первичного (а) и вторичного (б) угля. Распределение аксиальной скорости в сечении А—А (в)

Уже в первом контрольном сечении максимальные температуры (до $2147\text{ }^\circ\text{C}$) располагаются в спиралевидном вихре между двумя относительно холодными зонами — осевой и пристенной ($527\text{ }^\circ\text{C}$), которая образуется в результате втягивания части осевой струи во вращательное движение догорающего первичного угля. Во втором контрольном сечении индицирующие горение вторичного угля максимальные температуры (до $1639\text{ }^\circ\text{C}$) полностью переходят в пристенную зону, тогда как осевая зона остается относительно холодной ($665\text{ }^\circ\text{C}$). В третьем контрольном сечении картина кардинально изменяется. Максимальные температуры (до $2066\text{ }^\circ\text{C}$), характеризующие интенсивное горение вторичного угля, фиксируются в осевой зоне, тогда как в пристенной зоне горение завершается ($1237\text{ }^\circ\text{C}$), что подтверждают

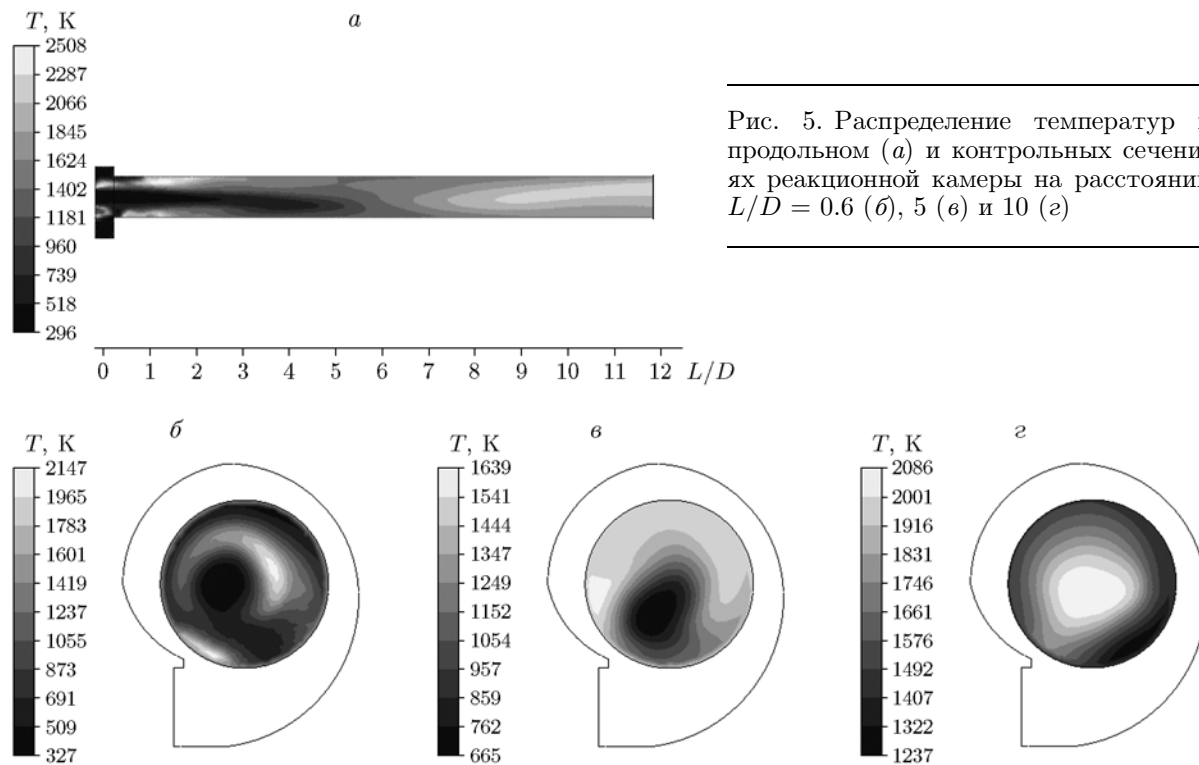


Рис. 5. Распределение температур в продольном (а) и контрольных сечениях реакционной камеры на расстоянии $L/D = 0.6$ (б), 5 (в) и 10 (з)

результаты численного анализа.

Кислород (рис. 6) в значительных количествах присутствует во всех сечениях: в первом — до 21 %, во втором — до 18 %, в третьем — до 13%. Значительная концентрация кислорода наблюдается в отмеченных ранее областях с повышенными значениями температуры и наоборот, в холодных зонах содержание кислорода увеличивается.

Поля концентраций CO_2 и H_2O хорошо коррелируют с полями температур. Минимуму температур соответствуют минимумы CO_2 и H_2O , а максимуму температур — максимумы CO_2 и H_2O . Максимальные значения CO_2 во всех сечениях составляют $10 \div 15$ %, минимальное значение CO_2 доходит до нуля. Для H_2O максимальные значения составляют $6 \div 8$ %, минимальные $1 \div 4$ %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное расчетно-экспериментальное исследование процесса двухпоточной воздушной конверсии каменного угля, при котором продукты сгорания закрученного потока первичного угля микропомол в холодном воздухе инициируют воспламенение и горение

вторичного аксиального потока угля грубого помола при соотношении расходов первичного и вторичного угля 90/110 кг/кг, расходов первичного и вторичного воздуха 400/1140 м³/ч, коэффициентах избытка воздуха $\alpha_1 = 0.8$, $\alpha_2 = 1.87$ и общем $\alpha = 1.39$, температурах в активной зоне более 1200 °С и степенях конверсии первичного угля $X_{\text{уг}1} = 100$ %, вторичного угля $X_{\text{уг}2} \approx 60$ %, общей степени конверсии $X_{\text{уг}} \approx 80$ %.

Выявлено, что, как и в режиме без подачи вторичного угля, изученном в [9], микропомол первичного угля позволяет поддерживать устойчивые режимы горения в завихрителе и дожигания в реакционной камере. Формирование на начальном этапе гидродинамического и теплового разделения потоков при максимальной неоднородности параметров позволяет реализовать первую стадию двухступенчатой схемы сжигания первичного угля с выделением теплоты и дальнейшим разогревом и воспламенением вторичного угля.

Дожигание первичного угля завершается в начальной части камеры, где начинает нарушаться первоначальная неоднородная структура с гидродинамическим и тепловым разделением потоков. Далее по ходу потока периферий-

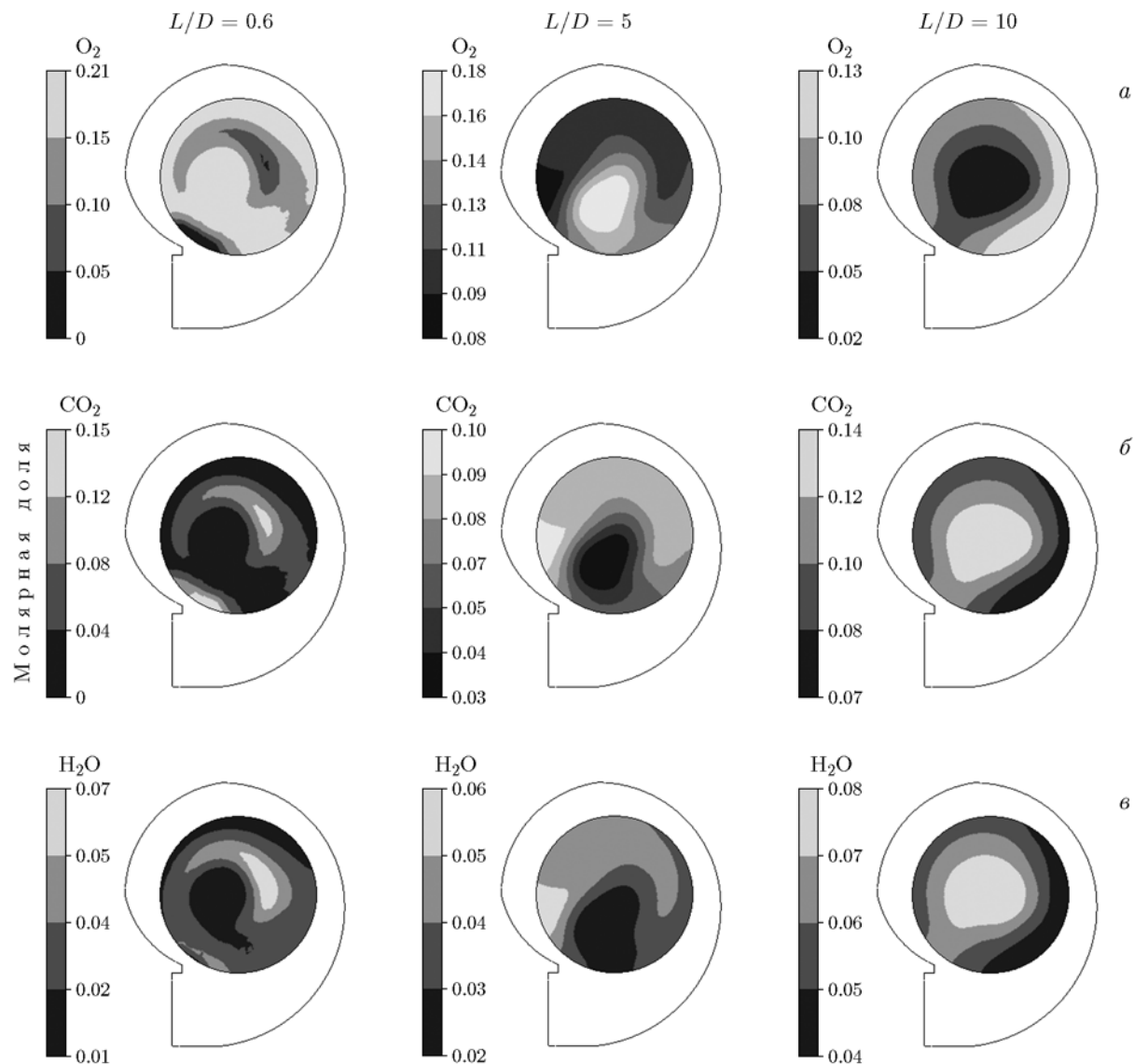


Рис. 6. Распределение концентраций O_2 (а), CO_2 (б), H_2O (в) в контрольных сечениях реакционной камеры

ная часть аксиальной струи вторичного угля вовлекается в пристеночное закрученное движение и сгорает, затем происходят прогрев и горение основного осевого потока.

Результаты указывают на возможность повышения эффективности сжигания угля за счет технологии микропомола применительно к системам безмазутного розжига и подсветки факела на паровых пылеугольных котлах ТЭС.

ЛИТЕРАТУРА

1. International Energy Outlook 2019. — <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/ieo2019.pdf>.
2. Burdukov A. P., Popov V. I., Chernetskiy M. Yu., Dekterev A. A., Hanjalić K. Mechanical activation of micronized coal: Prospects for new combustion applications // Appl. Therm. Eng. — 2014. — V. 74. — P. 174–181.
3. Abdurakipov S. S., Burdukov A. P., Butakov E. B., Kuznetsov A. V. On investigation of burning and gasification of coal fuel crushed at mills with high-energy impact // J. Phys.: Conf. Ser. — 2018. — V. 1128, N 1. — UNSP 012061.
4. Watanabe H., Otaka M. Numerical simulation of coal gasification in entrained flow gasifier // Fuel. — 2006. — V. 85. — P. 1935–1943.
5. Messerle V. E., Karpenko E. I., Ustimenko A. B., Lavrichshev O. A. Plasma preparation

- of coal to combustion in power boilers // Fuel Process. Technol. — 2013. — V. 107. — P. 93–98.
6. **Messerle V. E., Karpenko E. I., Ustimenko A. B.** Plasma assisted power coal combustion in the furnace of utility boiler: numerical modeling and full-scale test // Fuel. — 2014. — V. 126. — P. 294–300.
 7. **Штегман А. В., Рыжий И. А., Беляев А. В., Сосин Д. В., Фоменко Е. А.** Получение тонкой пыли с помощью мельницы с динамическим сепаратором // Электрические станции. — 2017. — № 8. — С. 29–35.
 8. **Kirda V. S., Khrenkova T. M., Krichko I. B.** Influence of fine grinding on the structure and properties of coals // Solid Fuel Chem. — 1983. — V. 17, N 6. — P. 37–43.
 9. **Burdukov A. P., Popov V. I., Yusupov T. S., Chernetskiy M. Yu., Hanjalić K.** Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor // Fuel. — 2014. — V. 122. — P. 103–111.
 10. **Welham N. J., Chapman P. G.** Mechanical activation of coal // Fuel Process. Technol. — 2000. — V. 68. — P. 75–82.
 11. **Рыжков А. Ф., Абаймов Н. А., Донской И. Г., Свищев Д. А.** Модернизация поточного воздушного газификатора для твердотопливной парогазовой установки // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 3. — С. 96–103. — DOI: 10.15372/FGV20180310.
 12. **Abaimov N. A., Ryzhkov A. F.** Development of a model of entrained flow coal gasification and study of aerodynamic mechanisms of action on gasifier operation // Therm. Eng. — 2015. — V. 62, N 11. — P. 767–772.
 13. **Chernetskiy M. Y., Kuznetsov V. A., Dekterev A. A., Abaimov N. A., Ryzhkov A. F.** Comparative analysis of turbulence model effect on description of the processes of pulverized coal combustion at flow swirl // Thermophys. and Aeromechan. — 2016. — V. 23, N 4. — P. 591–602.
 14. **Smith I. W.** The combustion rates of coal chars: A review // 19th Int. Symp. on Combust. — 1982. — P. 1045–1065.
 15. **Vascellari M., Arora R., Pollack M., Hasse C.** Simulation of entrained flow gasification with advanced coal conversion submodels. Part 1: Pyrolysis // Fuel. — 2013. — V. 113. — P. 654–669.
-

*Поступила в редакцию 17.02.2020.
Принята к публикации 08.06.2020.*