

УДК 620.9

Расчетное исследование аэродинамики и теплообмена в перспективной конструкции пылеугольной топки*

С.В. Алексеенко¹, А.А. Дектерев^{1,2}, В.А. Кузнецов^{1,2}, Е.С. Тэпфер¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

²Сибирский федеральный университет, Красноярск

E-mail: dektev@mail.ru

Работа посвящена расчетному исследованию аэродинамики и теплообмена в четырехвихревой топочной камере при факельном горении бурых углей восточных месторождений. Для моделирования используется комплекс взаимосвязанных моделей, описывающих турбулентное движение газа, перенос тепловой и лучистой энергии, процессы деструкции и выгорания угольных частиц, образование оксидов азота NO_x . Результаты моделирования показали, что для рассмотренных марок бурых углей в топочной камере с исследуемой аэродинамической схемой формируется устойчивая четырехвихревая структура течения с равномерным распределением температуры в топочном объеме и допустимым уровнем образования NO_x .

Ключевые слова: топочная камера, четырехвихревая схема сжигания, математическое моделирование, горение угля, аэродинамика, теплообмен.

Введение

Тепловые станции на угольном топливе еще длительное время будут оставаться одним из основных источников тепла и электроэнергии. В России большинство пылеугольных энергоблоков уже выработали свой ресурс и требуется их реконструкция.

Схема низкотемпературного четырехвихревого сжигания, предложенная в СибВТИ [1], является одним из наиболее перспективных вариантов реконструкции. Четырехвихревая схема была реализована при реконструкции на котлах Красноярской ТЭЦ-1 и Гусиноозерской ГРЭС и за длительное время эксплуатации показала хорошие результаты.

Настоящая работа посвящена расчетному изучению особенностей сложной пространственной структуры закрученных турбулентных потоков в топочных устройствах, анализу распределения температуры и тепловых потоков, оценке уровня токсичных выбросов и недожога топлива — все это необходимо для обоснования схем реконструкции топочных камер.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-19-00443).

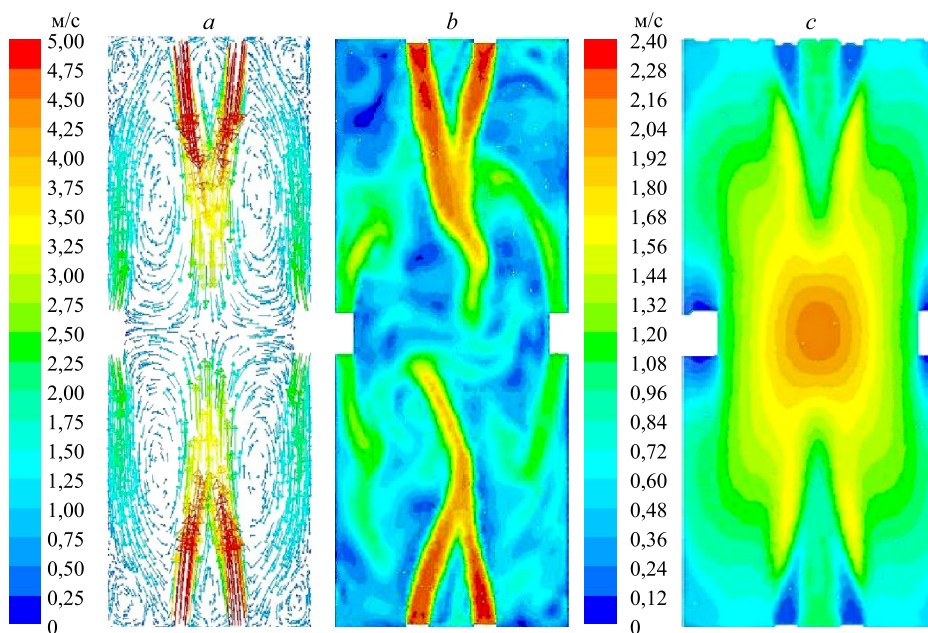


Рис. 1. Результаты изотермического моделирования четырехвихревой топки, сечение по второму ярусу горелок [2].

Векторы осредненного поля скорости (а), мгновенное значение магнитуды скорости (b), уровень турбулентных пульсаций (с), м/с.

Для описания взаимосвязанных физико-математических процессов, происходящих в топочной камере при сжигании пылеугольного топлива, используется комплексная модель, реализованная в программном комплексе ANSYS Fluent.

Первоначально для гидродинамического стенда четырехвихревой топки были проведены экспериментальные и расчетные исследования структуры потока [2]. Показано, что в камере формируются четыре устойчивые вихревые структуры с вертикальными осями и с противоположным направлением вращения (рис. 1а). Наблюдается нестационарное взаимодействие струй (рис. 1b), которое обеспечивает интенсивное перемешивание среды (рис. 1с), и при этом отсутствует наброс струй на стенки модели топки. Применяемая в настоящей работе методика моделирования турбулентности URANS (Unsteady Reynolds averaged Navier–Stokes) хорошо воспроизводит структуру как средних, так и пульсационных характеристик течения в гидродинамической модели четырехвихревой топки, результаты расчетов согласуются с данными эксперимента [2].

Был проведен цикл расчетов для полномасштабной топочной камеры котла, сжигающего шлакующие бурые угли. В работе [3] представлены результаты исследования процессов при пылеугольном горении в четырехвихревой топочной камере при различной нагрузке и возможных схемах отключения блоков горелок.

Настоящая работа посвящена анализу теплообмена при сжигании в четырехвихревой топке бурых углей разных месторождений.

1. Математическая модель

Математическое описание горения пылеугольного топлива в топочном пространстве включает комплекс моделей, описывающих турбулентное движение газа, сложный теплообмен, процессы горения и движения угольных частиц, образование оксидов азота NO_x .

Для численного моделирования нестационарного турбулентного течения топочной среды использовалась методика URANS. Предыдущий опыт моделирования слабозакрученных потоков показал, что модель MSST (The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model) позволяет получить корректные значения осредненных и турбулентных характеристик течений.

Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1-аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной двухтемпературной среды. Коэффициенты поглощения газа вычисляются по модели суммы серых газов, коэффициенты поглощения и рассеяния частицами определяются по аппроксимации оптически крупных частиц.

Процессы, связанные с горением угольной пыли, так же как аэродинамика и теплообмен, являются определяющими при моделировании работы пылеугольных топочных устройств. В результате теплового воздействия на угольную частицу начинается процесс пиролиза с выделением летучих веществ, сгорающих в ходе гомогенной реакции в газовой фазе. После гетерогенного выгорания углерода коксового остатка образуется зола, представляющая собой несгораемые компоненты угольной пыли. Движение угольных частиц описывается уравнениями динамики материальной точки с учетом сил сопротивления и тяжести. Для описания процесса выхода летучих веществ использовалось двухстадийное приближение на основе модели Кобаяши с соавторами [4].

Горение коксового остатка описывается химической реакцией окисления углерода угля с кислородом воздуха с получением оксида углерода: $C + 0,5O_2 = CO$. В математической модели также учитываются восстановительные реакции паровоздушной конверсии углерода угля: $C + CO_2 = 2CO$ и $C + H_2O = 2CO + H_2$. Скорость реагирования коксового остатка рассчитывается согласно положениям диффузионно-кинетической теории [5, 6]. Расчет горения газообразных компонентов проводился с учетом реакционной способности и концентрации горючего и окислителя, а также скорости турбулентного перемешивания топлива и окислителя.

При описании образования термических оксидов азота применялся набор зависящих от температуры химических реакций (механизм Зельдовича). Вклад «быстрых» молекул NO_x в пылеугольных котлах несуществен, тем не менее, в расчетах он также учитывался. Основной вклад в образование оксидов азота дает топливный азот, содержащийся в угле. Важным моментом при образовании топливных оксидов азота является отслеживание промежуточных азотосодержащих элементов (HCN , NH_3 , N_2O). В литературе отмечается, что использование механизма с несколькими промежуточными азотосодержащими элементами для твердого топлива дает лучшие прогнозы. Более полно используемая математическая модель факельного горения угольного топлива представлена в работах [7–9].

Задача решалась в трехмерной нестационарной постановке. Использовалась неструктурированная расчетная сетка с локальным сгущением вблизи горелочных устройств и в области формирования четырехвихревой зоны циркуляции. Общая детализация расчетной сетки составляла 1,5 млн ячеек (рис. 2). Дискретизация уравнений переноса осуществлялась по методу контрольного объема. Связь полей скорости и давления для несжимаемой жидкости реализовывалась с помощью процедуры SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent). Для аппроксимации конвективных членов уравнений использовалась противопоточная схема второго порядка. Диффузионные члены аппроксимировались по схеме второго порядка. Нестационарные слагаемые аппроксимировались по неявной схеме второго порядка точности. Временной шаг

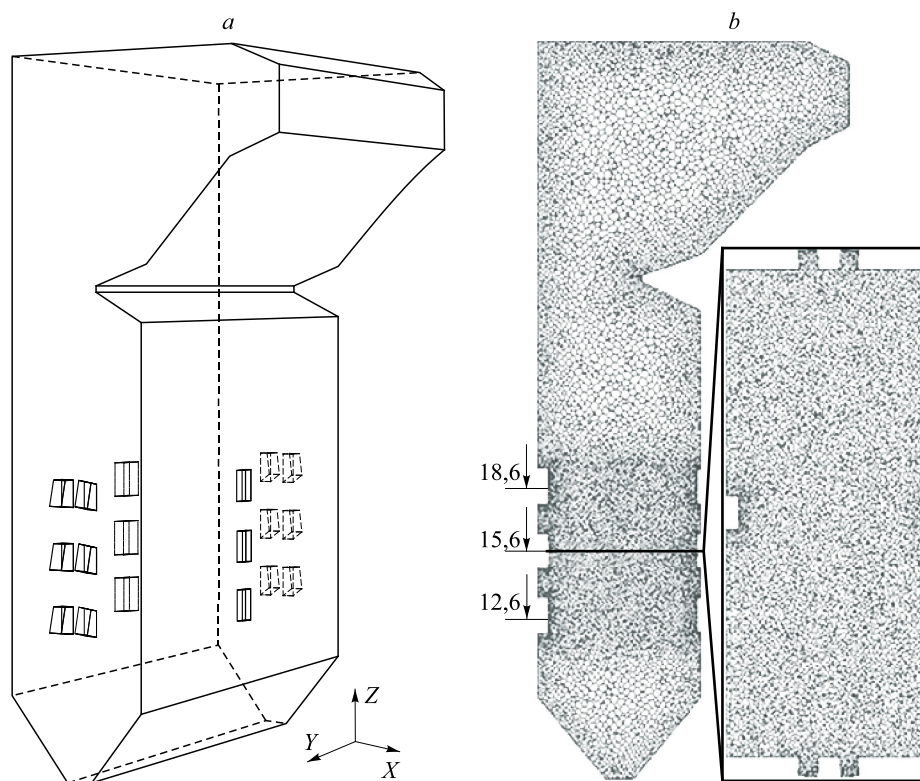


Рис. 2. Геометрия модели (а) и расчетная сетка в 1,5 млн ячеек (b) топки котла БКЗ-640 с четырехвихревой аэродинамической схемой.

удовлетворял условию: число Куранта $CFL < 2$. Осреднение результатов осуществлялось до тех пор, пока выбранная величина не переставала изменяться.

2. Результаты моделирования

Для моделирования был выбран котел Гусиноозерской станции БКЗ-640-140ПТ-1 ст. № 2. Топка открытого типа, призматической формы, объемом 4308 м^3 , имеет сечение $18,17 \times 7,74 \text{ м}$. В верхней части топки трубы заднего экрана образуют аэродинамический выступ, который предназначен для улучшения аэродинамикиверху топки и частичного затенения ширм. Котел оборудован 15 прямоточными горелками с периферийной подачей аэросмеси и центральным вводом вторичного воздуха. Горелки расположены в три яруса на отметках 12,58, 15,58 и 18,58 м. На фронтном и боковых экранах расположены прямоточные горелки, на заднем экране — воздушные сопла третичного дутья. На горелках фронтного горелочного блока установлены насадки, обеспечивающие разделение аэросмеси на два потока, направленных под углом 20° вдоль фронтного экрана в сторону боковых экранов. Оси боковых горелочных блоков направлены к центру топки. Воздушные сопла третичного дутья установлены в три яруса на задней стене топки, на отметках установки горелок. Геометрия модели и расчетная сетка приведены на рис. 2.

Анализировались варианты с горением трех видов бурых углей восточных месторождений: окино-ключевской, назаровский, холбоьджинский (табл. 1, 2). Для всех вариантов размер угольных частиц одинаковый, задавалось 10 фракций частиц с распределением по Розину–Рамлеру, где минимальный размер частиц — 1 мкм, средний — 90 мкм, максимальный — 350 мкм.

Таблица 1

Технический и элементный состав угля

Элемент	Тип угля		
	Окино-ключевской	Назаровский	Холбольджинский
W _r , %	21,5	12,4	22,0
Ar, %	18,84	7,71	12,5
V _{daf} , %	40,3	47,8	45,0
C, %	74,5	69,8	71,0
H, %	4,9	4,9	5,04
S, %	1,7	0,46	0,46
O, %	17,94	24,0	22,43
N, %	0,96	0,84	1,07
Q _п , МДж/кг	16,47	20,56	17,03

V_{daf} — содержание летучих веществ на сухую беззольную массу;

Q_п — низшая теплота сгорания.

Как для изотермической лабораторной модели, так и для модели реального котла с факельным горением пылеугольного топлива в топочной камере наблюдается нестационарная картина, обусловленная взаимодействием прямоточных горелочных струй в центре топочной камеры. Пульсации потока приводят к интенсивному перемешиванию топочной среды и, как следствие, хорошему выгоранию топлива и выравниванию температуры. На рис. 3 представлены характерные картины течения в топочной камере. Наблюдается подобная структура течения для всех типов рассмотренных топлив. Горелочные высокоскоростные струи формируют в топке устойчивую четырехвихревую структуру течения, скорости потока вблизи фронтального и заднего экрана достигают 15 м/с и выше. При этом в топке отсутствуют прямые набросы факела на поверхности нагрева, а воздушные струи, омывающие фронтальную и заднюю стенки, дополнительно экранируют поверхности, что обеспечивает бесшлаковочный режим работы.

На рис. 4 и 5 приведены осредненные по времени значения температур для трех вариантов расчета. Видно, что для всех вариантов в центре топки в области горелок формируется ядро горения с максимальными температурами 1350–1400 °С.

Из-за несимметричности расположения блоков горелок (на фронтальной стенке — горелки, на задней — сопла воздушного дутья) в горизонтальном сечении высокотемпературная зона смещается к фронтальной стене (рис. 5). Для назаровского угля наблюдаются более высокие температуры, что, по-видимому, обусловлено меньшей влажностью топлива и более высоким содержанием летучих. Это способствует быстрому воспламенению и выгоранию угольных частиц и, как следствие, лучшему тепловосприятию топочными экранами.

Таблица 2

Параметры работы котла

Параметр	Тип угля		
	Окино-ключевской	Назаровский	Холбольджинский
Расход топлива, т/ч	104,29	83,54	100,86
Доля рециркулирующих дымовых газов отбора	0,23	0,23	0,23
Температура горячего воздуха, °С	394	394	394
Температура аэросмеси, °С	141	141	141
Коэффициент избытка воздуха в топке	1,2	1,2	1,2

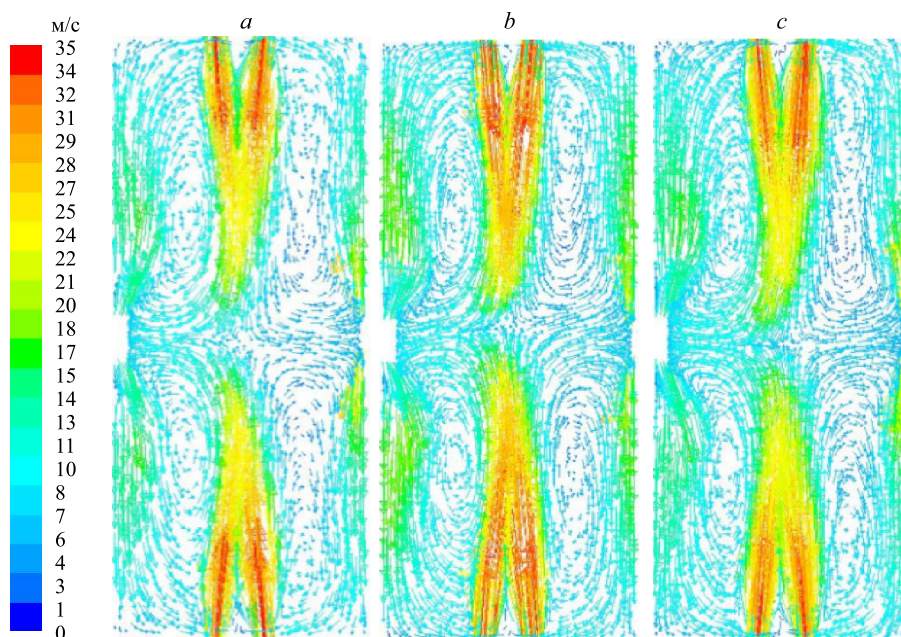


Рис. 3. Поле скорости в сечении на уровне второго яруса горелок (осредненные значения) для окино-ключевского (а), назаровского (b) и холбольджинского (с) угля.

На рис. 6 представлены распределения температуры T и концентрации C_{NO_x} по высоте топочной камеры H . Распределения температуры по высоте топки для трех вариантов имеют близкие значения (см. рис. 6a). При низкотемпературном пылеугольном сжигании

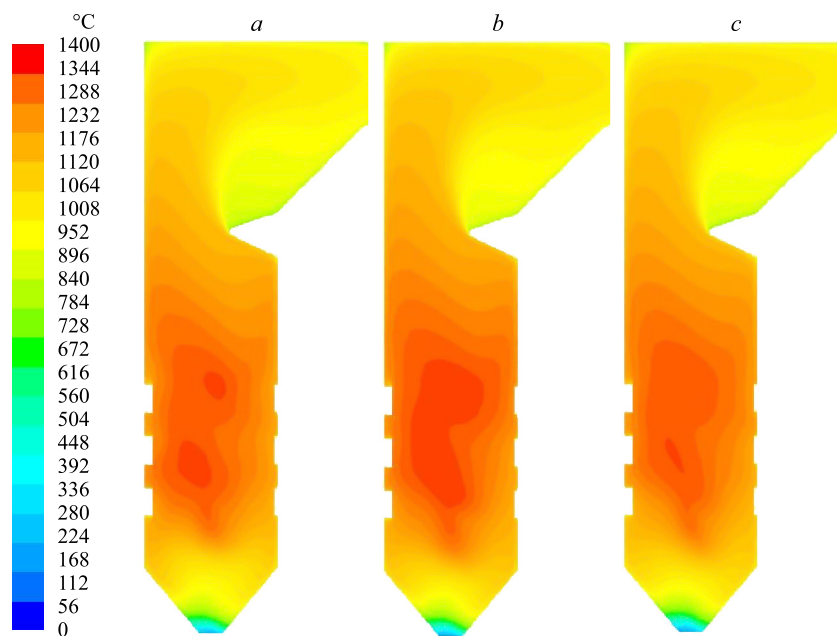


Рис. 4. Поле температуры в центральном сечении по оси Y (осредненные значения) для окино-ключевского (а), назаровского (b) и холбольджинского (с) угля.

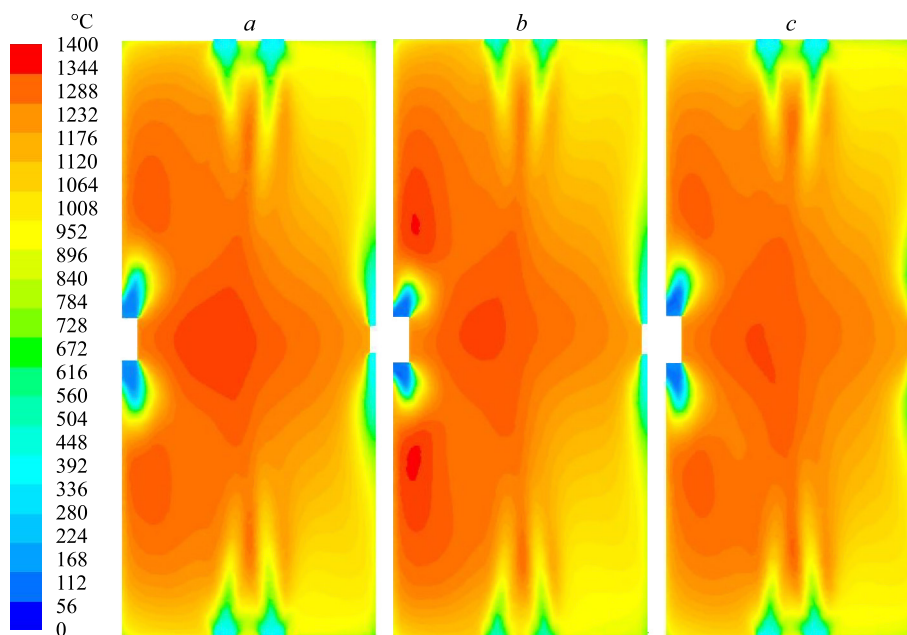


Рис. 5. Поле температуры в горизонтальном сечении на уровне второго яруса горелок (осредненные значения) для: окино-ключевского (а), назаровского (b), и холбольджинского (с) угля.

величина концентрации NO_x в топочной камере обусловлена в первую очередь образованием топливных оксидов азота. Существенное различие в концентрации оксидов азота в топочной камере для разных углей (см. рис. 6b) определяется процентным содержанием азота в исходном топливе и количеством подаваемого топлива: назаровский уголь — 0,84 % и 83,54 т/ч; окино-ключевской — 0,96 % и 104,29 т/ч; холбольджинский — 1,07 % и 100,86 т/ч. Уровень NO_x на выходе из топочной камеры для всех рассмотренных режимов работы соответствует требованиям, предъявляемым к котлам с твердым шлакоудалением. В табл. 3 приведены результаты интегральных характеристик горения на выходе из топочной камеры.

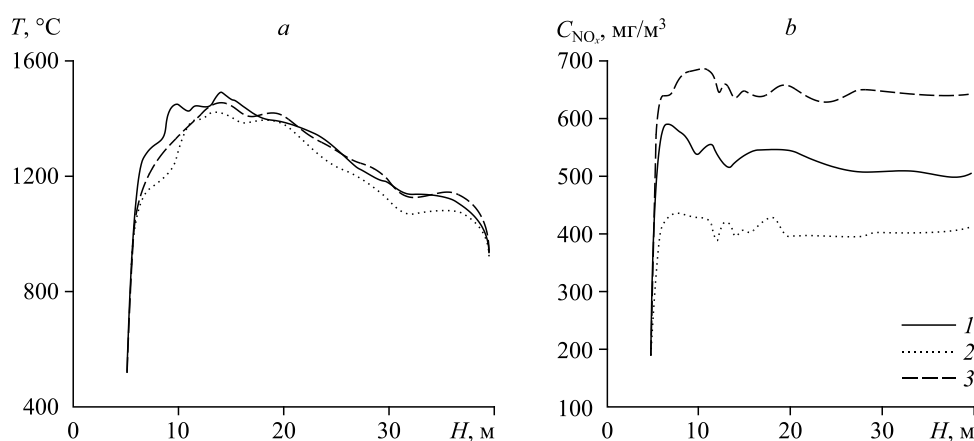


Рис. 6. Распределения по высоте топки температуры (a) и концентрации оксида азота (b) для окино-ключевского (1), назаровского (2) и холбольджинского (3) угля.

Таблица 3

Результаты моделирования работы котла на разных углях

Расчетный вариант	T , °C (на выходе из топки)	C_{NO_x} , мг/м ³	Механический недожог, %
Окино-ключевской уголь	1138	509	4,6
Назаровский уголь	1111	396	1,4
Холбольджинский уголь	1160	627	6,04

Для всех рассмотренных топлив, в том числе и низкосортных с высоким содержанием влаги и золы, в четырехвихревой топочной камере реализуется стабильное воспламенение и горение угля.

Заключение

Результаты исследований показали, что четырехвихревая схема сжигания в котле обеспечивает стабильное воспламенение и горение бурых углей. Уровень NO_x на выходе из топочной камеры соответствует требованиям, предъявляемым к котлам с твердым шлакоудалением. По уровню выбросов оксидов азота (396 мг/м³) и низкому механическому недожогу (1,4 %) вариант с сжиганием назаровского угля в исследуемом котле является предпочтительным. Использованная аэродинамическая схема топки реализует бесшлакочный режим работы, что обусловлено отсутствием прямого наброса пылеугольных факелов на стенки и низким уровнем турбулентных пульсаций и температур потока вблизи поверхностей нагрева.

Список литературы

1. Пат. 2032853 РФ. МПК⁵¹ F23C 5/08. Призматическая экранированная топка / Срывков С.В., Процайло М.Я., Пронин М.С., Дектерев А.А., Ковалевский А.М., Попов В.П.; заявитель и патентообладатель Сиб. фил. Всесор. теплотехн. науч.-исслед. ин-та. № 5060853/06; заявл. 01.09.1992; опубл. 10.04.1995.
2. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Dekterev A.A., Shadrin E.Yu., Kuznetsov V.A., Sharypov O.V., Boyko E.E., Naumov I.V., Kabardin I.K. Investigation of transfer processes in swirling flows in application to vortex furnaces for coal fuel // Intern. J. Thermal Sci. 2021. Vol. 161. Art. 106715.
3. Dekterev A.A., Kuznetsov V.A., Tepfer E.S. Calculation analysis of heat transfer in a four-vortex furnace of a pulverized coal boiler when operating at various loads // J. of Physics: Conf. Ser. 2021. Vol. 2119. P. 012149-1–012149-5.
4. Kobayashi H., Howard J.B., Sarofim A.F. Coal devolatilization at high temperatures // Proc. Combust. Inst. 1977. Vol. 16. P. 411–425.
5. Baum M.M., Street P.J. Predicting the combustion behaviour of coal particles // Combust. Sci. Tech. 1971. Vol. 3, No. 5. P. 231–243.
6. Smith I.W. The combustion rates of coal chars: a review // 19th Intern. Symp. on Combustion. (Pittsburgh, USA, 1982). Pittsburgh: The Combustion Inst. 1982. P. 1045–1065.
7. Чернецкий М.Ю., Дектерёв А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва. 2011. № 3. С. 37–46.
8. Чернецкий М.Ю., Кузнецов В.А., Дектерев А.А., Абаймов Н.А., Рыжков А.Ф. 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.
9. 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. 2018. Vol. 214. P. 215–229.

Статья поступила в редакцию 18 июля 2022 г.,
после доработки — 31 августа 2022 г.,
принята к публикации 2 сентября 2022 г.