

УДК 536.46:532.517.4

Влияние способа подачи топливной аэросмеси на основные характеристики процессов тепломассопереноса*

**А.С. Аскарова^{1,2}, В.Е. Мессерле¹⁻³, С.А. Болегенова^{1,2},
В.Ю. Максимов¹, С.А. Болегенова², А.О. Нугыманова¹**

¹*Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби,
Алматы, Казахстан*

²*Научно-исследовательский институт экспериментальной
и теоретической физики, Алматы, Казахстан*

³*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: nugymanova.aizhana@gmail.com

Методами трехмерного компьютерного моделирования проведены вычислительные эксперименты, позволяющие определять влияние различных компоновочных решений по горелочным устройствам и способа подачи топливной аэросмеси на основные характеристики процессов тепломассопереноса (аэродинамика течения, температурные поля, концентрационные поля продуктов горения) по всему объему камеры сгорания энергетического котла и на выходе из нее. Показано, что использование вихревых горелочных устройств с закруткой потока аэросмеси позволяет улучшить обменные процессы в топочной камере и уменьшить выбросы вредных веществ в атмосферу как при традиционном сжигании топлива, так и при пониженной нагрузке котла (частичное отключение горелок).

Ключевые слова: тепломассоперенос, численное моделирование, способ подачи аэросмеси, пониженная нагрузка котла, скорость, температура, концентрация вредных веществ.

Введение

В плане практического применения особенно важными являются исследования процессов тепломассообмена при наличии физико-химических превращений в областях реальной геометрии (камеры сгорания различных теплоэнергетических установок). Развитие теории тепломассопереноса и разработка на этой основе технологических процессов экологически чистого производства энергии являются актуальными проблемами современной теплоэнергетики [1 – 3].

При проведении исследований процессов тепломассопереноса в топочных камерах, имеющих целью разработку экологически чистых угольных технологий, возрастает роль

* Разработка схемы подачи топливной аэросмеси выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН (номер гос. регистрации 121031800229-1), численные эксперименты по влиянию способа подачи топливной аэросмеси на основные характеристики процессов тепломассопереноса — за счет грантового финансирования МОН РК (AP09261161, AP08857288).

информационных технологий, численных методов и вычислительных экспериментов. Их использование позволяет добиться геометрического и физического подобия исследуемых объектов, соблюдения всех основных параметров и режимных условий, адекватных технологической схеме сжигания топлива на реальном энергетическом объекте, и существенно облегчает решение многих энергетических задач [3 – 7].

Для моделирования процессов тепломассопереноса при наличии физико-химических превращений используются фундаментальные законы сохранения таких физических величин, как масса, импульс, энергия. Поскольку в этом случае тепломассоперенос представляет собой взаимодействие турбулентных движений и химических процессов, то следует учитывать также закон сохранения компонентов реагирующей смеси, турбулентность, многофазность среды, выделение тепла за счет излучения нагретой среды и химических реакций [8 – 12].

Запишем основные уравнения, используемые для решения поставленной задачи:

— закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0; \quad (1)$$

— закон сохранения импульса:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i; \quad (2)$$

— закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) - \frac{\partial q_i^{\text{res}}}{\partial x_i} + \frac{\partial P}{\partial t} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_h, \quad (3)$$

где удельная энтальпия $h = e + P/\rho$, S_h — источник энергии за счет химических реакций и теплообмена излучением;

— закон сохранения для компоненты вещества:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_\beta) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_\beta u_i) + \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + S_\beta. \quad (4)$$

Стандартная k - ε -модель представлена уравнением переноса турбулентной кинетической энергии [3, 13 – 15]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \rho \cdot \varepsilon \quad (5)$$

и уравнением диссипации (преобразование кинетической энергии турбулентности во внутреннюю) турбулентной кинетической энергии ε

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon,1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{\varepsilon,2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \rho. \quad (6)$$

Основные уравнения (1)–(6) представляют собой математическую модель, с помощью которой можно описать процессы тепломассопереноса в топочной камере энергетического котла, сжигающего уголь в пылевидном состоянии. Модель учитывает турбулентность и двухфазность среды, конвективный перенос, источники тепла и вещества при физико-химических превращениях, происходящих в объеме топочного пространства при горении пылеугольного факела. Систему уравнений (1)–(6) можно записать в обобщенном виде следующим образом:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} = -\frac{\partial \rho u_i \varphi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S_\varphi, \quad (7)$$

где φ — обобщенная транспортная переменная ($u, v, w, T, C, k, \varepsilon$), Γ_φ — обобщенный коэффициент обмена, S_φ — источниковый член, который определяется химической кинетикой процесса, нелинейными эффектами теплового излучения, межфазного взаимодействия, а также многостадийностью химических реакций.

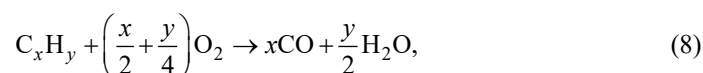
Указанная выше система уравнений решается численно с использованием метода контрольного объема, который подробно описан в работах [3, 13, 16–25] и использовался при проведении вычислительных экспериментов по сжиганию высокозольного угля на казахстанских ТЭС.

В настоящей работе в модели горения выделяются следующие стадии:

- пиролиз с выходом летучих веществ и образованием коксового остатка;
- горение летучих продуктов и оксида углерода;
- горение коксового остатка.

Моделирование пиролиза. Модель горения должна описывать исключительно локальное выделение тепла в результате сгорания и влияния продуктов сгорания на теплообмен. Поэтому авторы при выборе моделей пиролиза и сгорания отказались от применения громоздких систем с большим количеством компонент. В представленной работе используется одностадийная модель пиролиза, описанная в исследовании [26]. Эта модель достаточно точно работает во многих случаях и является хорошим компромиссом для уменьшения времени расчета.

Моделирование горения летучих веществ. Продукты пиролиза, смешиваясь с воздухом, образуют реакционноспособную смесь. При описании процесса пиролиза летучие вещества рассматриваются как фиктивные углеводороды. Поскольку в основном интерес представляет скорость и тепловыделение при окислении, при высоких температурах и достаточном количестве кислорода сгорание летучих веществ может быть представлено в виде двухступенчатой реакции, в предположении, что на первой ступени происходит окисление летучих веществ до CO и H₂O [27]:



а на второй ступени — окисление до CO₂:



В данной работе с учетом реакций (8) и (9) для определения скорости сгорания продуктов пиролиза используется концепция турбулентной диссипации EDM (Eddy-Dissipation Model), предложенная Магнуссеном и подробно описанная в работе [28].

Моделирование горения коксового остатка. Гетерогенная реакция горения твердого углерода на поверхности частиц кокса определяется диффузией кислорода из окружающей среды в пограничный слой и в пористую среду частицы, а также реакцией между углеродом и кислородом на поверхности частицы. Самый медленный из этих процессов определяет скорость выгорания кокса. В зависимости от диаметра и температуры частиц образуются соответственно оксид и диоксид углерода [29]:



Предполагается, что при горении коксового остатка диаметр частиц топлива изменяется от d_1 до d_2 . При выходе летучих компонентов размер частиц остается постоянным, а изменяется только плотность топлива — от значения плотности сухого угля до плотности кокса.

Изменение концентрации углерода коксового остатка ξ_C определяется уравнением:

$$\frac{d\xi_C}{dt} = -K_C A_{sp} \xi_C, \quad (12)$$

где K_C — константа скорости окисления углерода коксового остатка, A_{sp} — удельная поверхность частицы, отнесенная к ее массе.

Уравнение константы скорости окисления углерода коксового остатка имеет вид:

$$K_C = p_{O_2} / \left(\frac{1}{K_d} + \frac{1}{K_{kin}} \right), \quad (13)$$

здесь K_{kin} — константа скорости кинетической составляющей реакции горения углерода коксового остатка, K_d — константа скорости диффузии окислителя, p_{O_2} — относительное парциальное давление кислорода.

Вклад диффузии кислорода определяется через эффективный коэффициент диффузии согласно [29] формуле

$$K_d = \frac{Sh M_C f_m D_{O_2}}{R d_p T_{GS}}, \quad (14)$$

где M_C — молярная масса углерода, Sh — число Шервуда (для сферических частиц принимаем $Sh = 2$), $T_{GS} = (T_G + T_p)/2$ — средняя температура смеси, T_G и T_p — температура газа и твердых частиц соответственно, $D_{O_2} = D_{0,O_2} (T_{GS}/T_0)^{1,75}$ — коэффициент диффузии кислорода к поверхности частицы (здесь $D_{0,O_2} = 3,49 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент самодиффузии при $T_0 = 1600 \text{ К}$ [29]), f_m — механизм-фактор, который равен единице для реакции с образованием CO_2 и двум для реакции с образованием CO .

Вклад химических реакций определяется через константу скорости химической реакции, которая выражается соотношением

$$K_{kin} = k_{0,C} e^{-E_{a,C}/RT_p}. \quad (15)$$

Кинетические параметры, используемые в расчетах, взяты из работы [30].

Модель сжигания угольной пыли, используемая в настоящей работе, учитывает интегральные реакции окисления компонентов топлива до стабильных конечных продуктов реакции. При этом реакции образования и изменения неустойчивых промежуточных продуктов не учитываются.

В качестве исследуемого объекта была выбрана топочная камера котла БКЗ-75 действующей Шахтинской ТЭЦ (г. Шахтинск, Казахстан), более подробное описание топочной камеры было приведено в работах [31 – 40]. В котле сжигается пыль карагандинского угля зольностью 35,1 % с выходом летучих 22 %, влажностью 10,6 % и теплотой сгорания 18,55 МДж/кг.

На рис. 1 представлена геометрия топочной камеры и компоновка горелок. В соответствии с заданной геометрией котла БКЗ-75 была создана конечно-разностная сетка для численного моделирования, которая для исследуемой камеры сгорания БКЗ-75 имела по осям x , y , z шаги $59 \times 32 \times 67$, что составляет 138355 контрольных объемов (рис. 2).

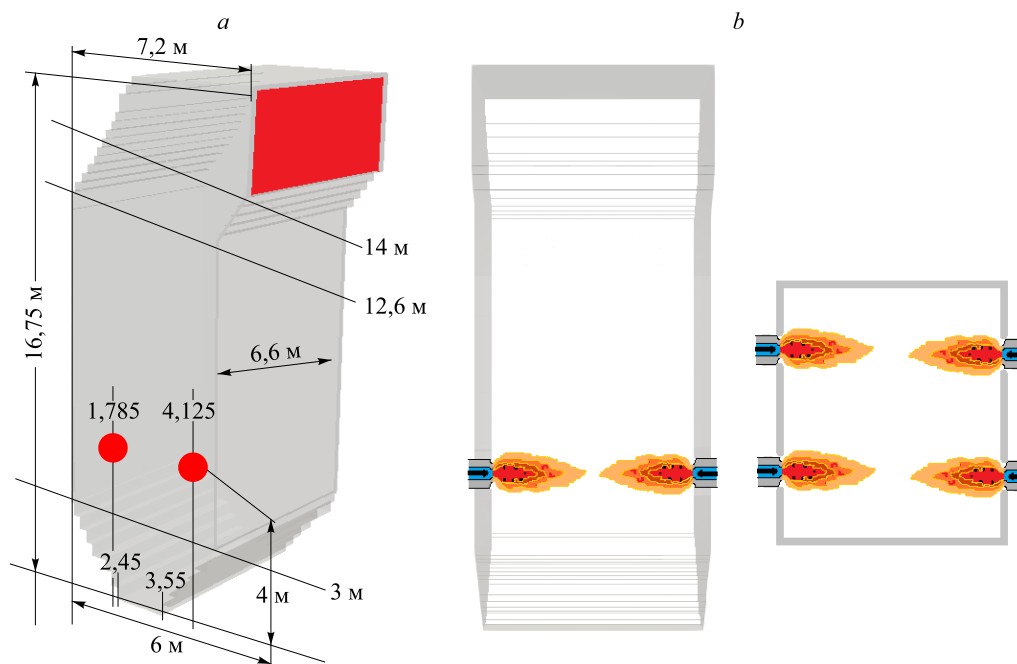


Рис. 1. Геометрия (а) и компоновка горелками (b) топочной камеры котла БКЗ-75.

Расчеты по численной модели выполнены для условий, принятых при организации реального технологического процесса сжигания топлива на ТЭС.

Для сжигания пылеугольного топлива применяются прямоточные либо вихревые горелки. В прямоточных горелках потоки топлива и воздуха вводятся в топку без закрутки. При использовании вихревых горелок закручивание потоков достигается с помощью улиточных закручивателей, устанавливаемых на входе в горелку [41, 42]. В данной работе проведено исследование двух вариантов поступления топлива через горелочные устройства: прямоточный способ подачи аэросмеси, когда горелки расположены на противоположных боковых стенках (рис. 3а), и вихревой способ подачи аэросмеси,

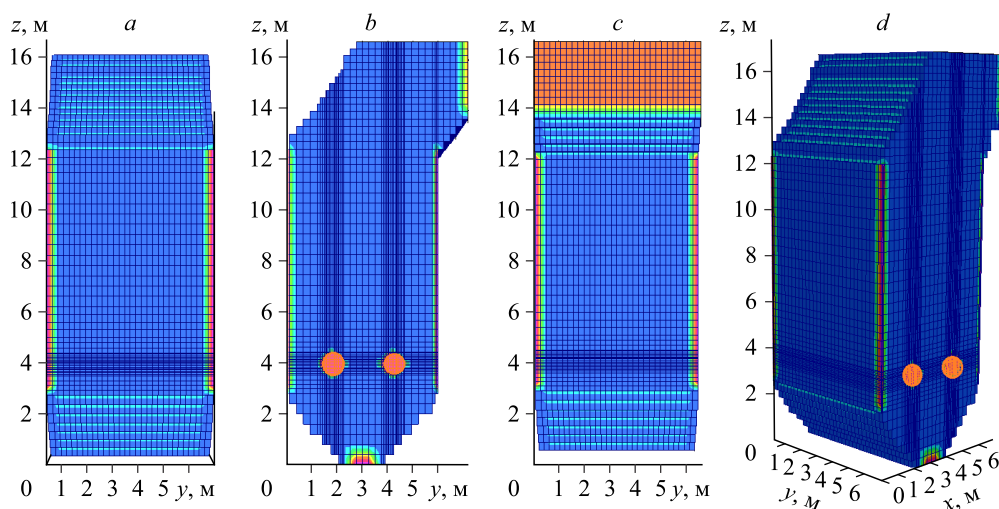


Рис. 2. Конечно-разностная сетка для проведения численного моделирования процессов сжигания твердого топлива в топочной камере котла БКЗ-75.

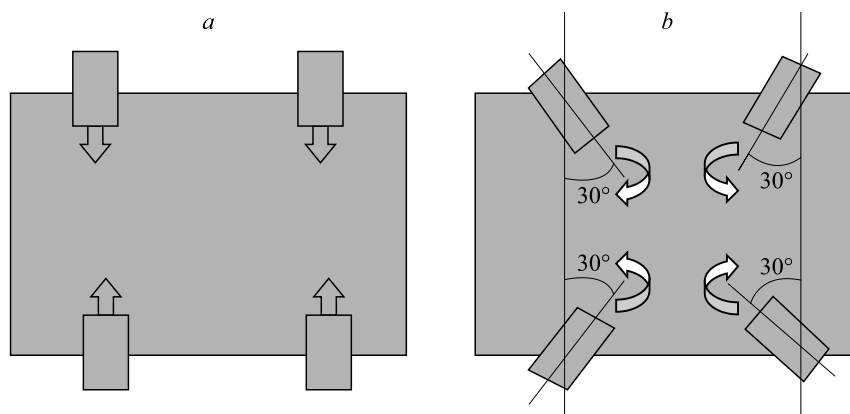


Рис. 3. Схема расположения горелочных устройств в топочной камере котла БКЗ-75.

a — прямоточные горелки, *b* — вихревые горелки.

когда используются горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов (рис. 3*b*).

На рис. 3 приведена схема расположения различных горелочных устройств (прямоточных и вихревых) в топочной камере котла БКЗ-75. Ниже представлены результаты исследования тепловых процессов, аэродинамических и концентрационных характеристик топочной камеры для указанных двух режимов подачи пылеугольного топлива.

Рис. 4 иллюстрирует картину распределения вектора полной скорости в продольном сечении ($x = 3$ м) топочной камеры котла БКЗ-75 при прямоточном и вихревом способах сжигания твердого топлива. Анализ рисунков показывает, что при прямоточном способе подачи аэросмеси потоки, соударяясь в центре под прямым углом, рассекаются и, объединившись в два основных потока, направляются к выходу из камеры сгорания (рис. 4*a*).

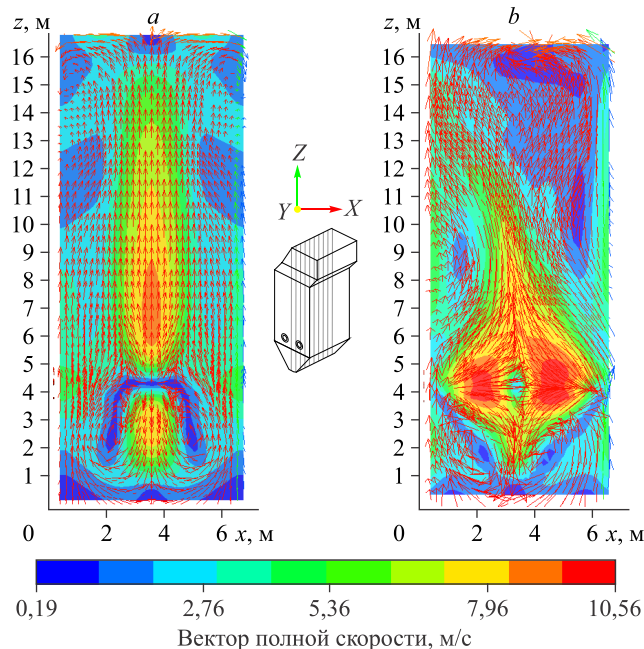


Рис. 4. Распределение вектора полной скорости в продольном сечении ($x = 3$ м) топочной камеры котла БКЗ-75 при прямоточном (*a*) и вихревом (*b*) способах подачи аэросмеси.

При вихревом способе четыре закрученных потока, направляющихся из вихревых горелок, соударяются между собой в центральной части под углом 30 градусов, а затем, объединившись, направляются к выходу из топочного пространства, образуя при этом вихревое течение большей интенсивности (рис. 4b). Как известно, угольные частицы в топочной камере сгорают не полностью, часть из них уносится дымовыми газами и выпадает в шлак, а это в свою очередь приводит к потере тепла, связанной с механическим недожогом топлива.

Анализируя картину течения, представленную на рис. 4, можно сделать вывод, что вихревой способ подачи аэросмеси способствует более интенсивному вихревому движению пылегазовых потоков внутри топочной камеры. Это увеличивает время пребывания угольной пыли в зоне горения, уменьшает механическую неполноту сгорания, что позволит оптимизировать процесс сжигания топлива в топочной камере.

На рис. 5 представлено распределение вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе ($h = 16,75$ м) из топочной камеры для двух исследуемых режимов. По мере удаления от области горелок поле вектора полной скорости выравнивается, вихревой характер течения ослабевает, поток расширяется и на выходе равномерно распределяется по всему сечению. При этом среднее по сечению значение вектора полной скорости при вихревом способе подачи аэросмеси на выходе из топочного пространства меньше (4,78 м/с), чем при прямоточном способе (5,55 м/с).

Методами компьютерного моделирования были получены температурные поля в различных сечениях топочной камеры для двух исследуемых режимов подачи аэросмеси (прямоточного и вихревого), которые приведены на рис. 6, 7. Трехмерные графики и шкала температур позволяют определить значение температуры в любой точке топочной камеры.

Распределения температуры в центральном сечении ($y = 3,3$) топочной камеры приведены на рис. 6. Анализируя поля температур, представленные на этих рисунках, можно сделать вывод о том, что для обоих рассматриваемых случаев подачи аэросмеси температура имеет максимальные значения в области, близкой к геометрическому центру топочного пространства.

В то же время область максимальных значений температуры при использовании прямоточных горелочных устройств располагается вблизи стенок камеры сгорания, что вызывает их дополнительную тепловую нагрузку (рис. 6a). Иным образом распределяется среднее значение температуры в случае использования вихревых горелок с углом

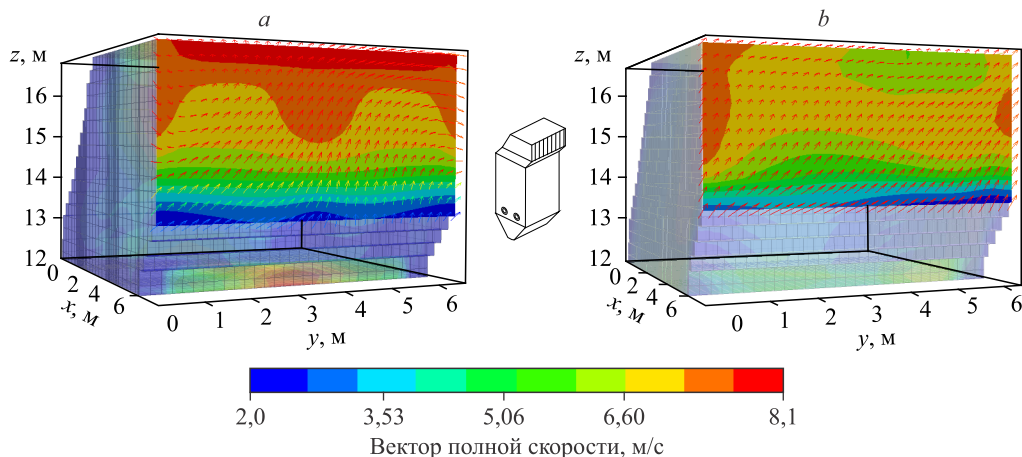


Рис. 5. Распределение вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе ($h = 16,75$ м) из топочной камеры котла БКЗ-75 при прямоточном (a) и вихревом (b) способах подачи аэросмеси.

Средние по сечению значения вектора полной скорости: 5,55 (a) и 4,78 (b) м/с.

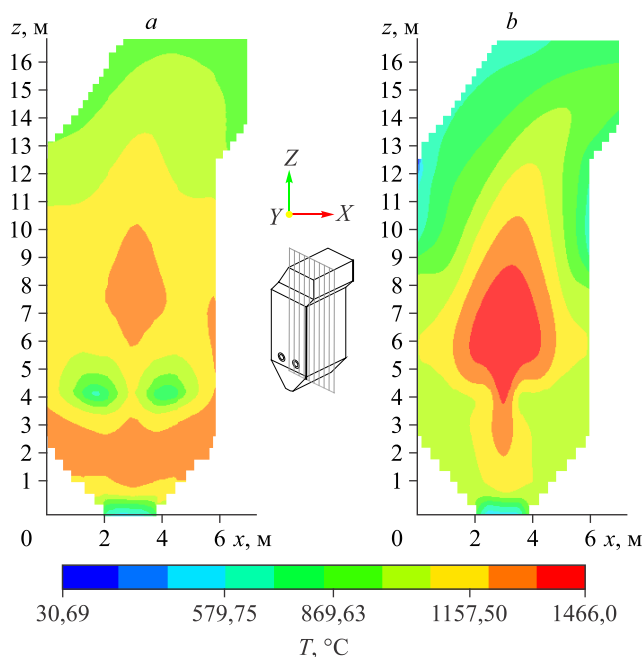


Рис. 6. Распределение температуры в центральном сечении ($y = 3,3$) топочной камеры котла БКЗ-75 при прямоточном (а) и вихревом (б) способах подачи аэросмеси.

Средние значения температуры: 1094, 80 (а) и 1074, 68 (б) °С.

закрутки 30 градусов. Здесь ядро факела располагается в центре топочной камеры сгорания (рис. 6б), тем самым снижая тепловую нагрузку на ее стенки. Это связано с более интенсивным характером вихревого течения, обеспечивающим максимальный конвективный перенос и увеличение времени пребывания угольных частиц в топочной камере котла.

Изложенное выше подтверждается трехмерным изображением (рис. 7а) и двумерным (рис. 7б) графиком распределения температуры T по высоте топочной камеры котла

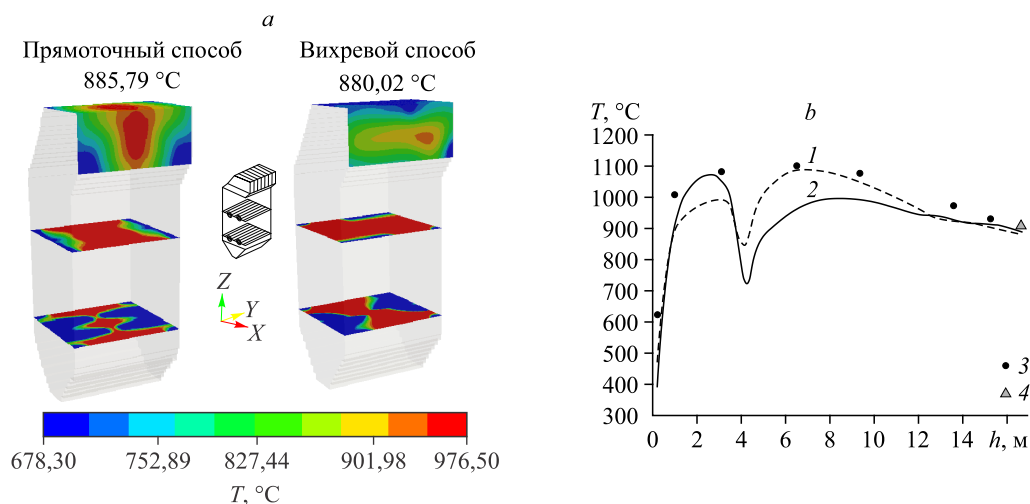


Рис. 7. Трехмерное (а) и двумерное (б) распределения температуры T по высоте h топочной камеры котла БКЗ-75 при прямоточном (1) и вихревом (2) способах подачи аэросмеси.

3 — экспериментальные значения [43, 44], 4 — теоретическое значение [45].

БКЗ-75 для двух исследуемых режимов подачи аэросмеси (прямоточного и вихревого). Здесь приведены кривые распределения средней температуры T в каждом сечении по высоте топочной камеры. Минимумы на кривых связаны с низкой температурой аэросмеси, поступающей в топочную камеру через горелки. При вихревом способе подачи аэросмеси наблюдается увеличение протяженности зоны максимальных температур.

На выходе из топочной камеры среднее значение температуры при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет $885,79^\circ\text{C}$ (рис. 7а и 7б, кривая 1), а при использовании вихревых горелочных устройств — $880,02^\circ\text{C}$ (рис. 7а и 7б, кривая 2). Здесь же нанесены экспериментальные точки, которые указывают на хорошее согласование результатов численного моделирования с натурным экспериментом [43–44]. Температура на выходе из топочной камеры подтверждается ее теоретическим значением, рассчитанным по методике Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ) для прямоточной подачи аэросмеси через горелочные устройства [45].

Из азота воздуха и азотсодержащих компонентов топлива в топке образуется некоторое количество оксидов азота NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$). До выхода из топочной камеры часть их переходит в диоксид азота NO_2 . Эмиссия оксидов азота NO_x определяется не только характером сжигаемого топлива (как в случае SO_2 или золых частиц), но также конструкцией горелочных устройств. Образование окиси углерода CO зависит от температуры и концентрации кислорода в зоне реакции и поэтому может быть снижено повышенным избытком воздуха и высокими температурами. Однако это в свою очередь приводит к увеличению образования окислов азота NO_x [46–48].

Источниками оксидов азота являются молекулярный азот воздуха, который используется в качестве окислителя при горении, и азотсодержащие компоненты топлива. В связи с этим принято делить оксиды азота на воздушные и топливные. Воздушные, в свою очередь, можно разделить на термические, образующиеся при высоких температурах за счет окисления молекулярного азота атомарным кислородом (механизм Зельдовича), и так называемые «быстрые» оксиды азота, образующиеся в зоне сравнительно низких температур в результате реакции углеводородных радикалов с молекулярным азотом и последующего взаимодействия атомарного азота с гидроксидом OH .

Практически во всех теориях, описывающих формирование NO_x в процессе горения, используются три общепринятых механизма: термический, быстрый и топливный.

Термические NO_x образуются в результате окисления молекулярного азота в горячем газе. Формирование термических NO_x увеличивается с температурой по экспоненциальному закону. При температурах выше 1100°C термический процесс образования оксидов азота является преобладающим. Следовательно, для процессов горения он играет наиболее значительную роль. Этот механизм становится еще более важным в том случае, когда используется предварительный воздушный нагрев или кислородное обогащение горючего воздуха, что приводит к увеличению температуры пламени.

Быстрые NO_x образуются в результате реакций между молекулярным азотом и углеводородными радикалами. Процесс образования таких оксидов азота протекает с относительно высокой скоростью и в целом вклад их в общее количество NO_x незначителен — около 5 % для пылеугольного горения.

Топливные NO_x образуются в результате реакции окисления азота топлива, связанного в комплексные органические соединения. При горении пылеугольного топлива реакции с образованием оксидов азота учитывают распределение азота топлива в летучих и полукоксе. Полагается, что эти азотсодержащие компоненты выделяются в процессе выхода летучих. Они быстро превращаются в цианистый водород HCN или аммиак NH_3 .

Степень преобразования топливного азота в NO_x зависит от локальных особенностей горения, начальной концентрации азотсодержащих соединений и объема кислорода, доступного для реагирования с азотом во время выделения летучих угля на ранних стадиях горения.

В работе [49] была разработана математическая модель формирования оксидов азота NO в процессе пылеугольного горения с учетом кинетического механизма, вовлекающего 12 глобальных химических реакций. Наиболее важным в этой модели является описание образования оксида азота из связанного в топливе азота при горении. В предложенной кинетической модели принимаются во внимание реакции пиролиза угля, гомогенного горения углеводородсодержащих соединений, гетерогенного горения кокса, образование термических и топливных оксидов азота.

В представленной работе моделирование формирования и деструкции оксидов азота проводилось на основе предложенной в работе [49] модели Mitchell-Tarbell. По результатам вычислительных экспериментов были построены распределения концентраций диоксида азота NO_2 для двух случаев подачи аэросмеси в следующих областях топочной камеры котла БКЗ-75: в продольном сечении $x = 3$ м (рис. 8) и на выходе из камеры сгорания (рис. 9). Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что зоной максимального образования NO_2 является область высоких температур и интенсивного вихревого течения.

Равномерное снижение концентрации NO_2 наблюдается по мере удаления, т.е. по мере продвижения к выходу из топочной камеры, поскольку эта область содержит в себе меньше кислорода и компонент топлива. В случае использования вихревых горелочных устройств монотонное снижение температуры по высоте топочной камеры ускоряется, в результате чего уменьшается и скорость образования NO_2 (рис. 8, 9).

Среднее значение концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочной камеры при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет $564,34 \text{ мг/м}^3$ (рис. 9а и 9б, кривая 1), а при использовании вихревого способа подачи топлива — $439,35 \text{ мг/м}^3$ (рис. 9а и 9б, кривая 2), что на 125 мг/м^3 меньше, т.е. около 20 %. На рис. 9б представлено изменение средних по сечению значений концентрации оксидов азота NO_2

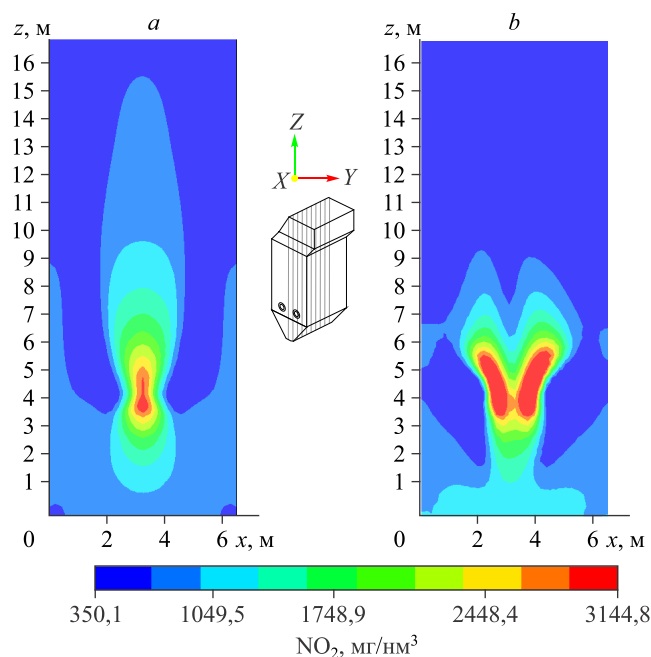


Рис. 8. Распределение концентрации диоксида азота NO_2 в продольном сечении ($x = 3$ м) топочной камеры котла БКЗ-75 при прямоточном (а) и вихревом (б) способах подачи аэросмеси.

Среднее значение концентрации NO_2 : $837,12$ (а) и $759,35$ (б) мг/м^3 .

по высоте топочной камеры h . Формирование и деструкция оксидов азота NO_x при сжигании угольного топлива являются сложными химическими процессами, описываемыми сотнями элементарных химических реакций, на которые оказывают влияние такие показатели, как температура T (или энергия активации E), концентрация кислорода и азота, парциальное давление, C-N-связи в топливе (в виде реагентов), время пребывания в зоне реакции, конструкция горелочных устройств и многие другие. Из анализа рис. 9 следует, что процесс образования диоксида азота является сложным и неоднозначным и зависит от многих факторов.

Снижение концентрации диоксида азота NO_2 выше отметки 6 м можно объяснить тем, что несмотря на высокие значения температуры (термические NO_x) эта область содержит в себе меньше кислорода и азотсодержащих компонентов топлива (топливные NO_x). Поскольку вихревой способ подачи аэросмеси способствует более интенсивному вихревому движению пылегазовых потоков в ядре факела, то при такой организации сжигания топлива выше отметки 6 м наблюдается меньшая концентрация оксидов азота. Кроме того, в данной области протекают также эндотермические реакции восстановления молекулярного азота. В этом случае степень образования оксидов азота зависит от локальных особенностей горения, начальной концентрации азотсодержащих соединений и объема кислорода, доступного для реагирования с азотом во время выделения летучих угля на ранних стадиях горения.

В котельном агрегате в процессе эксплуатации могут возникать ситуации, требующие снижения нагрузки или останова котла (планового и аварийного) [51]. В представленной работе проведено исследование основных характеристик процессов тепломассопереноса в топочной камере котла БКЗ-75 при снижении его нагрузки. Была смоделирована указанная ситуация и выполнены вычислительные эксперименты по изучению различных режимов подачи пылеугольного топлива в топочную камеру для работы котла при пониженной нагрузке:

- прямоточный способ подачи аэросмеси, когда из четырех горелок работают только две прямоточные горелки, а две другие отключены (рис. 10а);
- вихревой способ подачи аэросмеси, когда из четырех горелок работают только две вихревые горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов, а две — отключены (рис. 10б).

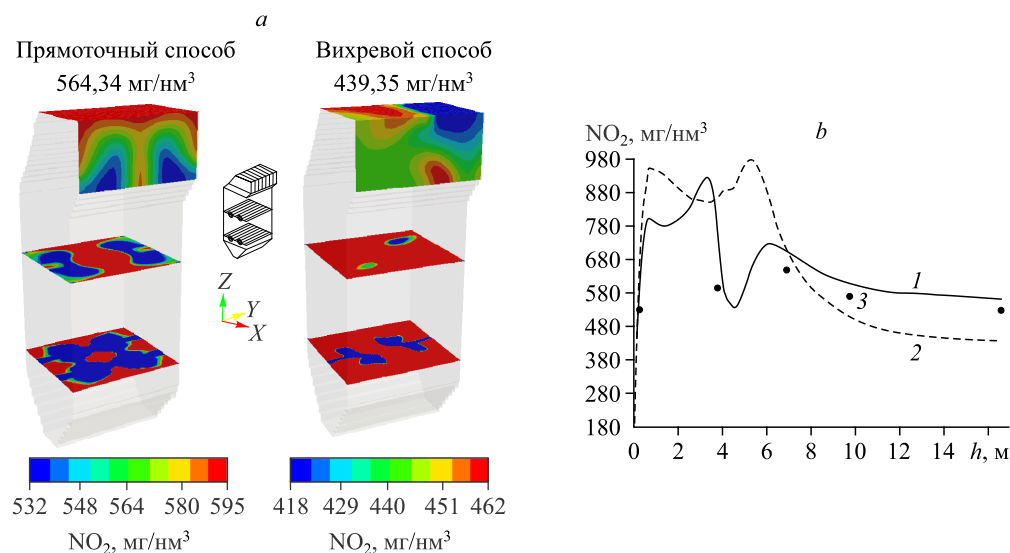


Рис. 9. Трехмерное (а) и двумерное (б) распределения концентрации диоксида азота NO_2 по высоте топочной камеры h котла БКЗ-75 при прямоточном (1) и вихревом (2) способах подачи аэросмеси. 3 — экспериментальные значения [43, 44, 50].

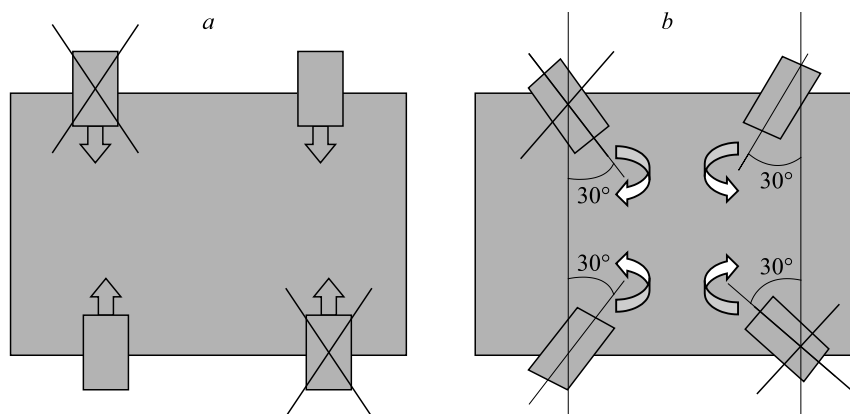


Рис. 10. Схема расположения горелочных устройств в топочной камере котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла.

а — прямоточные горелки, б — вихревые горелки.

На рис. 10 приведена схема расположения различных горелочных устройств в топочной камере котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла (две выключенные горелки отмечены крестиком) для прямоточного и вихревого способов подачи пылеугольного топлива.

Выполненные вычислительные эксперименты позволили получить основные характеристики процесса тепломассопереноса: распределения вектора полной скорости, поля температуры и концентраций вредных веществ (диоксид азота NO_2) в объеме топочной камеры и на выходе из нее для указанных двух случаев подачи пылеугольного топлива при пониженной нагрузке котла.

На рис. 11 приведено распределение вектора полной скорости в продольном сечении ($x = 3$ м) топочной камеры при пониженной нагрузке котла для прямоточного и вихревого

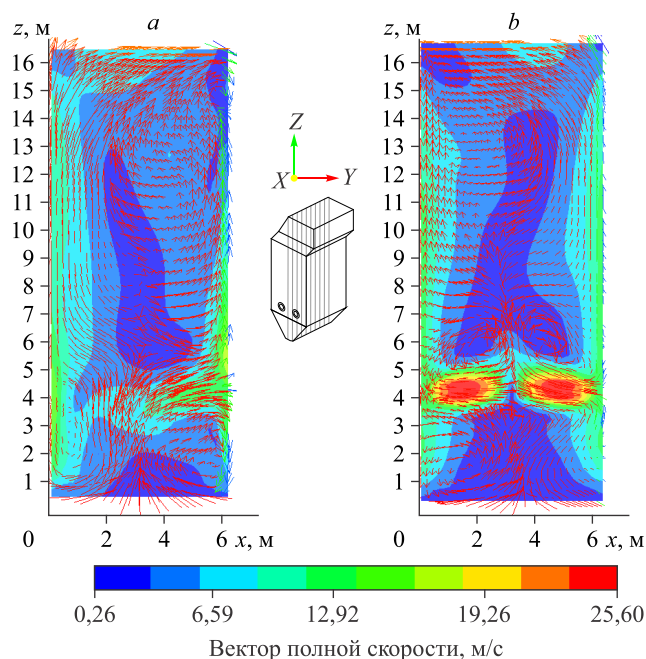


Рис. 11. Распределение вектора полной скорости в продольном сечении ($x = 3$ м) топочной камеры котла БКЗ-75 при его пониженной нагрузке. Прямоточный (а) и вихревой (б) способы подачи аэросмеси.

способов подачи аэросмеси. Можно заметить, что скорость для двух исследуемых случаев имеет максимальные значения в так называемой «зоне активного горения», расположенной в области пояса горелочных устройств. Далее часть потоков опускается вниз в область холодной воронки, образуя вихревые течения, а другая часть направляется вверх к выходу из топочной камеры. Анализ рис. 11 показывает, что главным достоинством вихревого способа подачи аэросмеси является обеспечение интенсивного теплообмена в топливной смеси благодаря устойчивому высокотурбулентному вихревому течению.

Рис. 12 иллюстрирует картину распределения вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе ($h = 16,75$ м) из топочной камеры при пониженной нагрузке котла для двух рассматриваемых случаев. Анализ рисунка показывает, что по мере продвижения к выходу из топочного пространства поле скоростей выравнивается, вихревой характер течения ослабевает и к выходу скорость газов снижается. На выходе из топочной камеры среднее по сечению значение скорости потока при пониженной нагрузке котла для прямоточного способа подачи аэросмеси составляет 5,14 м/с, а для вихревых горелок — 4,21 м/с.

Распределения температуры в продольных сечениях ($x = 3$ м) топочной камеры котла БКЗ-75 при его пониженной нагрузке для двух рассматриваемых случаев представлены на рис. 13. Проанализировав поля температур, можно сделать вывод о том, что по сравнению с использованием прямоточного способа подачи аэросмеси (рис. 13а) среднее по сечениям топочной камеры котла значение температуры T при вихревом способе подачи аэросмеси увеличивается (рис. 13б). А это, как уже отмечалось выше, связано с вихревым характером течения, обеспечивающим максимальный конвективный перенос и увеличение времени пребывания угольных частиц в зоне активного горения в топочной камере котла. К выходу из топочной камеры в том и другом случае температура плавно снижается, что наглядно демонстрирует рис. 14, где представлено трехмерное (рис. 14а) и двумерное (рис. 14б) распределения температуры T по высоте топочной камеры h при пониженной нагрузке котла для двух исследуемых способов подачи аэросмеси.

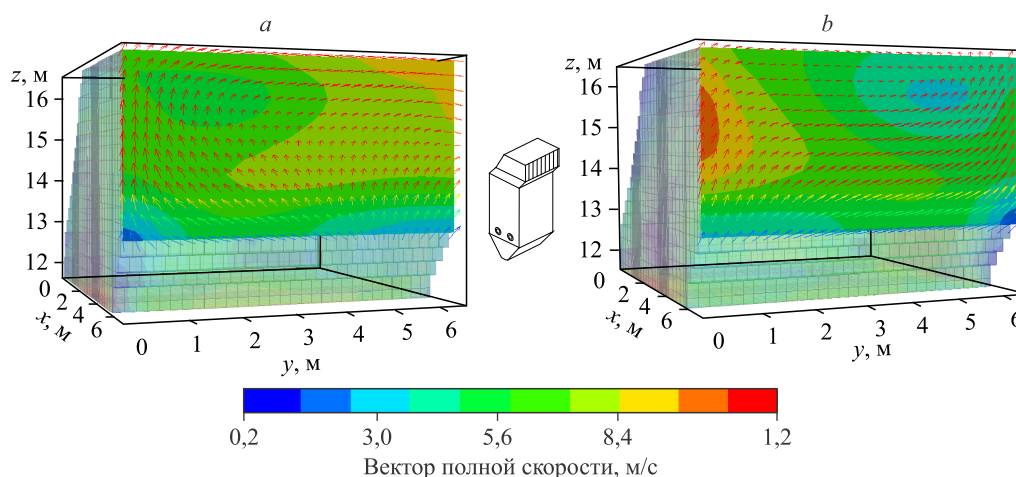


Рис. 12. Распределение вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе ($h = 16,75$ м) из топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла.

Прямоточный (а) и вихревой (б) способы подачи аэросмеси;
значения средней по сечению скорости потока: 5,114 (а) и 4,21 (б) м/с.

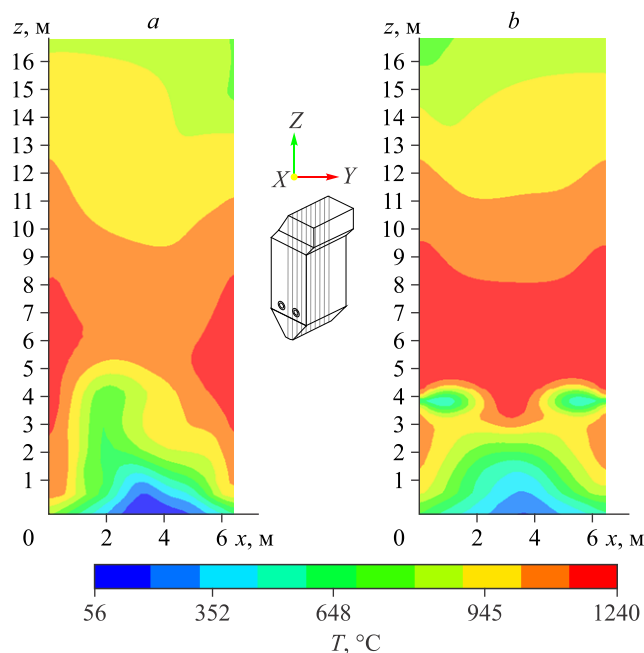


Рис. 13. Распределение температуры T в продольном сечении ($x = 3$ м) топочной камеры котла БКЗ-75 при его пониженной нагрузке.

Прямоточный (а) и вихревой (b) способы подачи аэросмеси; значения средней по сечениям топочной камеры котла температуры: 961,05 (а) и 1029,15 (b) °С.

Сравнивая результаты, можно заметить увеличение зоны максимальных температур (рис. 14а и 14b, кривая 2) при вихревом способе подачи аэросмеси. В то же время значение температуры на выходе из топочного пространства в этом случае меньше ($T = 836,58$ °С), чем при прямоточном способе подачи аэросмеси, когда оно равно 847,08 °С (рис. 14а и 14b, кривая 1).

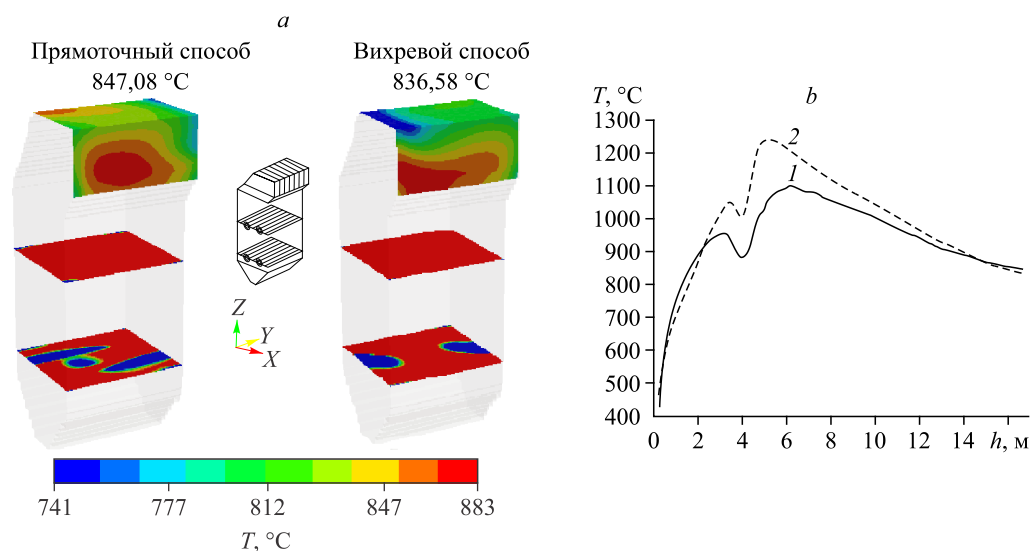


Рис. 14. Трехмерное (а) и двумерное (b) распределения температуры T по высоте топочной камеры h при пониженной нагрузке котла.

Прямоточный (1) и вихревой (2) способы подачи аэросмеси.

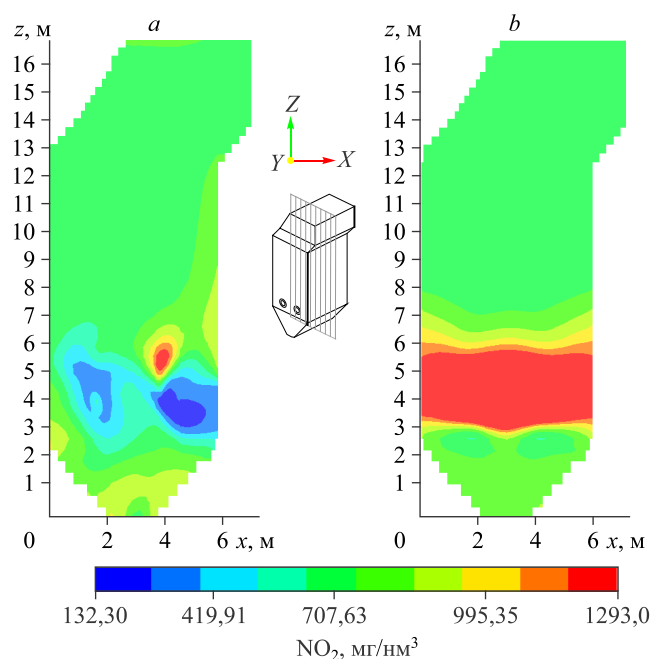


Рис. 15. Распределение концентрации диоксида азота NO_2 в центральном сечении ($y = 3,3$ м) топочной камеры котла БКЗ-75 при его пониженной нагрузке.

Прямоточный (a) и вихревой (b) способы подачи аэросмеси; средние значения концентрации NO_2 : 596,53 (a) и 1237,38 (b) мг/м^3 .

Выполненные вычислительные эксперименты позволили определить основные закономерности образования диоксида азота NO_2 , распределение его концентрации в топочном пространстве и количественные значения концентраций NO_2 в различных сечениях камеры сгорания (рис. 15, 16).

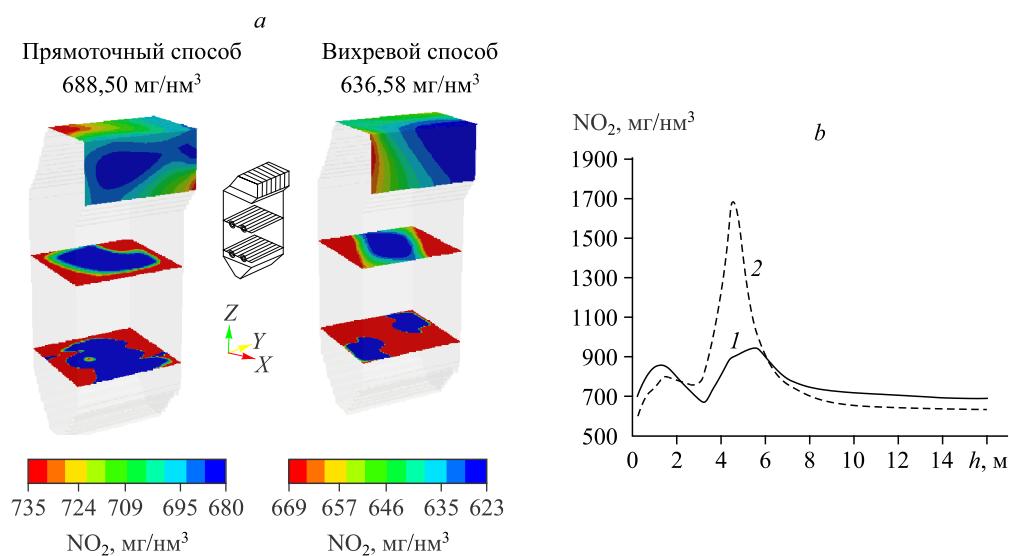


Рис. 16. Трёхмерное (a) и двумерное (b) распределения концентрации диоксида азота NO_2 по высоте h топочной камеры котла БКЗ-75 при его пониженной нагрузке.

Прямоточный (1) и вихревой (2) способы подачи аэросмеси.

Распределения концентраций диоксида азота NO_2 при пониженной нагрузке котла в центральном сечении ($y = 3,3$ м) для прямоточного и вихревого способов подачи аэросмеси представлены на рис. 15. Видно, что основное образование диоксида азота NO_2 для двух способов подачи аэросмеси происходит в области расположения горелочных устройств. Именно здесь присутствует максимальная концентрация топлива и окислителя и наблюдается высокий уровень температуры. При направлении к выходу из топочной камеры химические реакции окисления азота ослабевают и на этом участке имеет место снижение концентрации NO_2 .

На рис. 16 представлено трехмерное и двумерное распределения концентрации диоксида азота NO_2 по высоте h топочной камеры при пониженной нагрузке котла для двух рассматриваемых случаев (прямоточного и вихревого). Видно, что максимальных значений концентрация NO_2 достигает в области пояса горелок, характеризующейся высоким значением температуры.

Далее, по мере удаления от области расположения горелочных устройств среднее значение концентрации диоксида азота NO_2 уменьшается и на выходе из топочной камеры имеет минимальные значения (рис. 16б, кривые 1, 2). Это связано с уменьшением в верхних слоях температуры и концентраций азота топлива и окислителя, который уже химически прореагировал внизу в области пояса горелок.

На выходе из топочной камеры среднее по сечению значение концентрации NO_2 при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет $688,50 \text{ мг/м}^3$ (рис. 16а и 16б, кривая 1), а при использовании вихревого способа подачи топлива — $636,58 \text{ мг/м}^3$ (рис. 16а и 16б, кривая 2). Концентрация диоксида азота NO_2 на выходе из топки при вихревом способе подачи топливной смеси уменьшилась на 8 % по сравнению с прямоточным способом ее подачи.

Заключение

По результатам исследований можно сформулировать следующие выводы.

1. Исследовано влияние закрутки пылеугольного потока на характеристики процессов тепломассопереноса (вектор полной скорости, распределение температуры, концентрация продуктов горения). Установлено, что при вихревой подаче топливной аэросмеси (с помощью горелок с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов) наблюдается увеличение протяженности зоны максимальных температур, рост температуры в ядре факела и снижение ее на выходе из топочной камеры, что оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения.

2. Показано, что средние значения концентрации диоксида азота NO_2 при использовании горелочных устройств с закруткой потока аэросмеси уменьшаются на выходе из топочной камеры (не более 20 %) и соответствуют нормам предельно допустимой концентрации для действующего энергетического котла БКЗ-75, использующего высококалорийный карагандинский уголь.

3. Исследованы топочные процессы при пониженной нагрузке котла (при отключении части горелочных устройств). В этом случае при использовании вихревых горелок значительный уровень турбулентности течения и наличие высоких скоростей встречного тангенциального движения реагирующих потоков обеспечивают более тщательное перемешивание аэросмеси.

4. Показано, что при пониженной нагрузке котла использование вихревых горелочных устройств с закруткой потока аэросмеси приводит к уменьшению концентраций диоксида азота NO_2 (на 8 %) на выходе из топочной камеры по сравнению с прямоточным способом подачи топливной смеси.

Список литературы

1. Левинзон С.В. Энергоресурсы: прогнозы и реальность // Академия Естествознания. 2008. 65 с.
2. Алексеев С.В., Бурдуков А.П., Чернова Г.В., Чурашев В.Н. Энергоэффективные и экологически чистые технологии реконструкции и модернизации угольной теплоэнергетики // Изв. РАН. Энергетика. 2003. Т. 2. С. 52–63.
3. Leithner R., Epple B., Walter H. Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen. Springer-Verlag: Vienna, 2009. 702 p.
4. Terekhov V.I., Terekhov V.V., Volchikov E.P. Simulation of boundary-layer flows with combustion at various wall thermal conditions // Proc. of 7th Int. Symposium on Heat Transfer (ISHT'08). Beijing, China. 2008. 12 p.
5. Askarova A.S., Leithner R., Muller H., Magda A., Lavrisheva Ye.I. Combustion of low-rank coals in furnaces of Kazakhstan coal-firing power plants // VDI Berichte. 2007. No. 1988. P. 497–502.
6. Beketayeva M., Bekmukhamet A., Bolegenova S., Gabitova Z. Control harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic // Proc. Inter. Conf. on Future Information Engng, Beijing, Peoples China. 2014. Vol. 10. P. 252–258.
7. Мессерле В.Е., Аскарова А.С., Белегенова С.А., Максимов В.Ю., Нугыманова А.О. Процессы тепло-массообмена в топочных камерах при горении термохимически активированного топлива // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 6. С. 977–989.
8. Bolegenova S., Georgiev A., Baizhuma Zh. The use of a new “clean” technology for burning lowgrade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs // J. Bulgarian Chemical Communications. 2018. Vol. 50. P. 53–60.
9. Safarik P., Nugymanova A.O. 3-D modeling of heat and mass transfer process during the combustion of solid fuel in a swirl furnace // J. Acta Polytechnica. 2019. Vol. 59, No. 6. P. 543–553.
10. Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmukhamet A. Mathematical simulation of pulverized coal in combustion chamber // Procedia Engng. 2012. Vol. 42. P. 1150–1156.
11. Shortanbayeva Zh., Bolegenova S., Mazhrenova N. 3D modeling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel // J. Bulg. Chem. Commun. 2016. Vol. 48. P. 229–235.
12. Maximov V.Yu., Beketayeva M. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan // J. Bulgarian Chemical Communications. 2016. Vol. 48, Iss. E2. P. 260–265.
13. Muller H. Numerische Berechnung Dreidimensionaler Turbulenter Strömungen in Dampferzeugern Mit Wärmeübergang und Chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung. Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, 1992. Vol. 6, No. 268. 158 s.
14. Leithner R., Muller H., Askarova A., Heierle Ye. CFD code FLOREAN for industrial boilers simulations // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 4, No. 4. P. 98–107.
15. Bolegenova S.A., Beketayeva M., Ospanova Sh.S., Maximov V.Yu. The computational study of heat and mass transfer processes at combustion of pulverized kazakh coal in real conditions of energy objects // J. Bulgarian Chemical Communications. 2018. Vol. 50. P. 61–67.
16. Boranbayeva A.E., Bolegenova S.A., Aldiyarova A.N. Mathematical modeling of heat and mass transfer in the presence of physicalchemical processes // J. Bulg. Chem. Commun. 2016. Vol. 48, No. E. P. 272–277.
17. Ospanova Sh., Bekmukhamet A., Bolegenova S., Gabitova Z. Using 3D modeling technology for investigation of conventional combustion mode of BKZ-420-140-7C combustion chamber // J. Engng and Applied Sci. 2014. Vol. 9, No. 1. P. 24–28.
18. Maximov V.Yu., Beketayeva M.T., Bolegenova S.A. Modeling of heat mas transfer in high-temperature reacting flows with combustion // High Temperature. 2018. Vol. 56, No 5. P. 738–743.
19. Beketayeva M., Ergalieva A. 3D modeling of heat and mass transfer during combustion of solid fuel in BKZ-420-140-7C combustion chamber of Kazakhstan // J. Applied Fluid Mechanics. 2016. P. 699–709.
20. Leithner R., Bolegenova S., Beketayeva M., Nugymanova A. Computational modeling of heat and mass transfer processes in combustion chamber at power plant of Kazakhstan // Proc. MATEC Web of Conf. 2016. Vol. 76. P. 06001-1–06001-5.
21. Pilipenko N.V., Baktybekov K.S. Investigation of the different Reynolds numbers influence on the atomization and combustion processes of liquid fuel // J. Bulgarian Chemical Communications. 2018. Vol. 50. P. 68–77.
22. Shortanbayeva Zh., Gabitova Z. Simulation of the aerodynamics and combustion of a turbulent pulverized-coal flame // 4th Int. Conf. on Math. and Comp. in Sciences. and in Industry. (MCSI 2017). Corfu Island, Greece, 2017. P. 92–97.
23. Safarik P., Bolegenova S., Maximov V. Numerical investigation of heat and mass transfer processes in the combustion chamber of industrial power plant boiler. Pt 1. Flow field, temperature distribution, chemical energy distribution // J. Applied and Computational Mechanics. 2017. Vol. 11. P. 115–128.
24. Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Beketayeva M. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // Int. J. of Mechanics. 2013. Vol. 7, No 3. P. 343–352.
25. Устименко А.Б., Белегенова С.А., Максимов В.Ю. Уменьшение выбросов вредных веществ при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ с применением технологии «Overfire Air» // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23, № 1. С. 131–141.
26. Harmor R.J. Kinetics of combustion of pulverized brown coal char // Combust. Flame. 1973. № 21. P. 153–162.
27. Edelman R.B., Fortune O.F. A quasi-global chemical kinetic model for the finite rate combustion of hydrocarbon fuels with application to turbulent burning and mixing in hypersonic engines and nozzles // AIAA 7th Aerospace Sci. Meeting. New York, 1969. P. 69–86.

28. Magnussen B.F. On the mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion // Works 16th Int. Symp. on Combustion. Pittsburgh, 1976. P. 719–729.
29. Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B., Hawksley P.G.W. Combustion of pulverized coal. England: BCURA. Leatherhead, Surrey, 1967. 186 p.
30. Görner K. Technische Verbrennungssysteme — Grundlagen, Modellbildung, Simulation. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. 198 p.
31. Safarik P., Nugymanova A.O., Maximov V.Yu. Simulation of low-grade coal combustion in real chambers of energy objects // J. Acta Polytechnica. 2019. Vol. 59, No. 2. P. 98–108.
32. Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т. Трехмерное моделирование аэродинамики и теплообмена в камере сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 2. P. 317–335.
33. Bolegenova S.A., Nugymanova A.O., Gabitova Z. Three-dimensional modeling of heat and mass transfer during combustion of low-grade Karaganda coal // 22nd Intern. Congress of Chemical and Process Engng. CHISA 2016 and 19th Conf. on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction, Press. 2016. P. 1093–1102.
34. Maximov V.Y., Bolegenova S.A. Influence of boundary conditions to heat and mass transfer processes // Intern. J. of Mechanics. 2016. Vol. 10. P. 320–325.
35. Askarova A., Bolegenova S., Nugymanova A., Maximov V. Computer technologies of 3d modeling by combustion processes to create effective methods of burning solid fuel and reduce harmful dust and gas emissions into the atmosphere // Energies. 2021. Vol. 14, No. 5. P. 1236–1–1236–25.
36. Manatbayev R.K., Shortanbaev Zh.K., Safarik P. Reduction harmful emissions at the pulverized fuel combustion in the furnace chamber // J. Bulgarian Chemical Communications. 2020. Vol. 52. P. 26–31.
37. Safarik P., Nugymanova A. Minimization of toxic emissions during burning low-grade fuel at Kazakhstan thermal power plant // Acta Polytechnica. 2020. Vol. 60, No. 3. P. 206–213.
38. Askarova A., Safarik P., Bolegenova S., Nugymanova A. 3D modelling of heat and mass transfer during combustion of low-grade coal // Thermal Sci. 2020. Vol. 24, No. 5(A). P. 2823–2832.
39. Safarik P., Ospanova Sh., Nugymanova A. Combustion processes of pulverized coal in existing combustion chambers of real power boilers of TPP of the Republic of Kazakhstan // 23rd Intern. Congress of Chemical and Process Engng. CHISA 2018 and 21st Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, PRES 2018. 2018. No. 1. P. 437–452.
40. Gabitova Z.K., Maximov V.Y., Beketayeva M.T. Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High Temperature. 2015. Vol. 53, No. 5. P. 751–757.
41. Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Топливо и теория горения. Часть II. Теория горения. Учебное пособие. СПб, 2011. 84 с.
42. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Glavniy V.G., Krasinsky D.V., Rakhmanov V.V., Salomatov V.V., Shadrin E.Y. Study of 3D flow structure and heat transfer in a vortex furnace // Heat Transfer Research. 2016. Vol. 47, No. 7. P. 653–667.
43. Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и проблемы. Алматы: Гылым ордасы, 2012. 306 с.
44. Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок. Алма-Ата: Наука, 1982. 208 с.
45. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). СПб.: Изд-во АООТ «НПО ЦКТИ», 1998. 270 с.
46. Messerle V.E., Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V., Nugymanova A. 3D-modelling of Kazakhstan low-grade coal burning in power boilers of thermal power plant with application of plasma gasification and stabilization technologies // J. Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1261, No. 1. P. 12–22.
47. Buchmann M. Structure of the flame of fluidized-bed burners and combustion processes of high-ash coal // Proc. of 18th Dutch-German Conf. on Flames: Gesell Energietechn., «Combustion and Incineration» VDI Berichte. 1997. Vol. 1313. P. 241–244.
48. Messerle V.E., Ustimenko A.B., Askarova A.S., Karpenko A.B. Optimization of the combustion of power station coals using plasma technologies // J. Thermal Engng. 2004. Vol. 51, No. 6. P. 488–493.
49. Mitchell J.W., Tarbel, J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // AIChE J. 1982. Vol. 28. P. 302–320.
50. Messerle V.E., Nagibin A.O., Ustimenko A.B. Mathematical modeling of the combustion of a pulverized coal flame in the furnace of a BKZ-75 boiler equipped with plasma-fuel systems // Reports of the National Academy of Sci. of the Republic of Kazakhstan. Physics. 2009. Vol. 2. P. 16–23.
51. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки. Уч. для вузов. М.: Стройиздат, 1986. 559 с.

*Статья поступила в редакцию 26 августа 2021 г.,
после доработки — 11 ноября 2021 г.,
принята к публикации 14 декабря 2021 г.*