

УДК 536.46:532.517.4

3D моделирование процессов тепломассопереноса при использовании «чистых технологий» производства энергии*

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

¹*Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, физико-технический факультет, 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

Выполнены исследования, позволяющие определить влияние OFA-технологии (Overfire Air) на характеристики процессов тепломассопереноса в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (Казахстан), сжигающей высокозольный карагандинский уголь. С помощью методов компьютерного моделирования изучены различные режимы подачи дополнительного воздуха через инжекторы, в которых OFA составляет 0 (базовый вариант), 5, 10, 15, 18 и 20 %. В результате проведения численного моделирования топочных процессов получены распределения вектора полной скорости, температурные поля, поля концентраций диоксида азота NO_2 по всему объему топочной камеры и на выходе из нее. Показано, что режим с OFA, равным 18 %, позволяет оптимизировать процесс сжигания высокозольного угля, поскольку в этом случае наблюдается увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе из камеры сгорания, что оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения. При использовании этого режима максимально уменьшается среднее значение концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочной камеры.

Ключевые слова: тепломассоперенос, численное моделирование; скоростные, температурные и концентрационные поля, ступенчатое сжигание.

Проблема выбросов парниковых газов переросла в настоящее время в общечеловеческую проблему, связанную с глобальным изменением климата на земле, затоплением огромных территорий суши, опустыниванием и др. [1]. Наибольший вред экологии наносят предприятия теплоэнергетики, черной и цветной металлургии, нефтегазовой отрасли и машиностроения. Доля энергетических предприятий в общем объеме загрязнения окружающей среды продуктами сгорания топлива достаточно велика. Особенно остро эта проблема стоит для Казахстана, поскольку основным источником получения тепловой и электрической энергии в республике является уголь. В основном на пылеугольных ТЭС

* Разработка схемы ступенчатого сжигания высокозольных энергетических твердых топлив на пылеугольных ТЭС выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН, исследование процессов тепло-массопереноса в топочных камерах выполнено за счет грантового финансирования МОН РК (AP09261161, AP08857288).

используются низкосортные казахстанские угли, обладающие высокой зольностью (30–50 %), влажностью (10–20 %), сернистостью (1–3 %) и сравнительно низким выходом летучих (20–25 %). Сжигание угля приводит к значительным экологическим трудностям, которые связаны с ухудшением воспламенения и выгорания топлива, с увеличением вредных пылегазовых выбросов (парниковых газов, золы, оксидов азота и серы и др.) [2–8]. Наиболее радикальным методом повышения эффективности использования низкосортных углей является их плазменная газификация [9, 10], но ее применение на действующих ТЭС весьма затруднительно.

Образование оксидов азота зависит от конструктивных параметров камеры сгорания, температуры и интенсивности факела, содержания азота в топливе, времени нахождения газообразных продуктов сгорания в зоне высоких температур, избыточной подачи воздуха в топочное пространство. Имеются различные методы сокращения выбросов оксидов азота [11–15]. Наиболее целесообразным из них является внедрение технологии подавления оксидов азота на стадии сжигания топлива в топочной камере. В настоящее время при сжигании угля применяются также методы уменьшения нагрузки котлоагрегата, оптимизации конструкции горелочного устройства, ступенчатого сжигания топлива, дожига топлива, рециркуляции отходящих газов, технологии кипящего слоя, впрыска воды или пара в топку котла, подачи к горелкам пыли высокой концентрации. К ступенчатому сжиганию топлива относится рассматриваемая в настоящей работе технология острого дутья (Overfire Air, OFA), которая является одним из эффективных методов снижения концентрации оксидов азота NO_x [16, 17]. На рис. 1 приведены различные варианты компоновок OFA-инжекторов.

Технология OFA со ступенчатой подачей воздуха в топку включает подачу всего объема воздуха для горения топлива в два этапа: 70–90 % воздуха подается в горелки и 10–30 % — в топочное пространство над горелочным устройством через OFA-инжекторы. При смешивании в горелке топлива с контролируемым потоком воздуха создается относительно низкотемпературная обедненная кислородом и обогащенная топливом зона горения в нижней части топочного устройства, что позволяет снизить образование NO_x из азота топлива (топливные NO_x). Относительно низкая температура в обогащенной кислородом зоне OFA-инжекторов приводит к минимизации образования NO_x из воздуха (термические NO_x) [18–20].

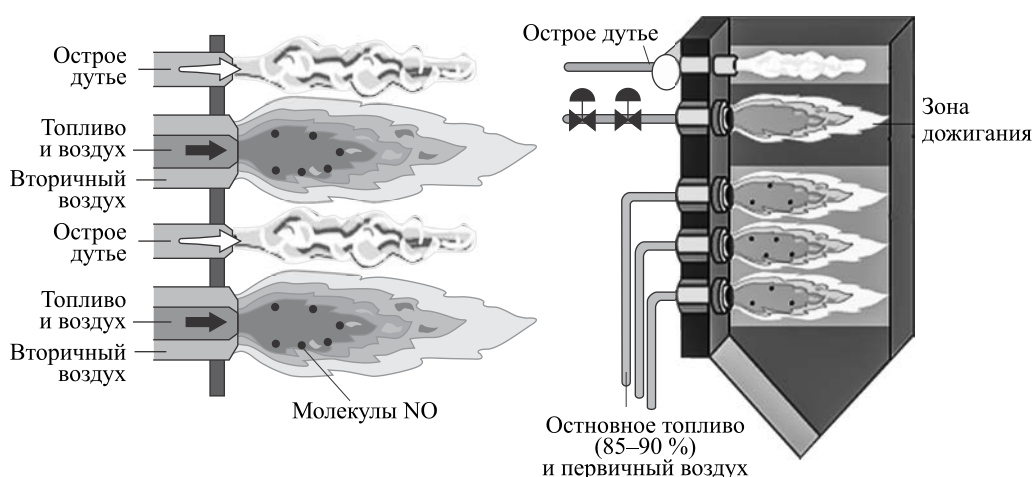


Рис. 1. Различные варианты компоновки OFA-инжекторов.

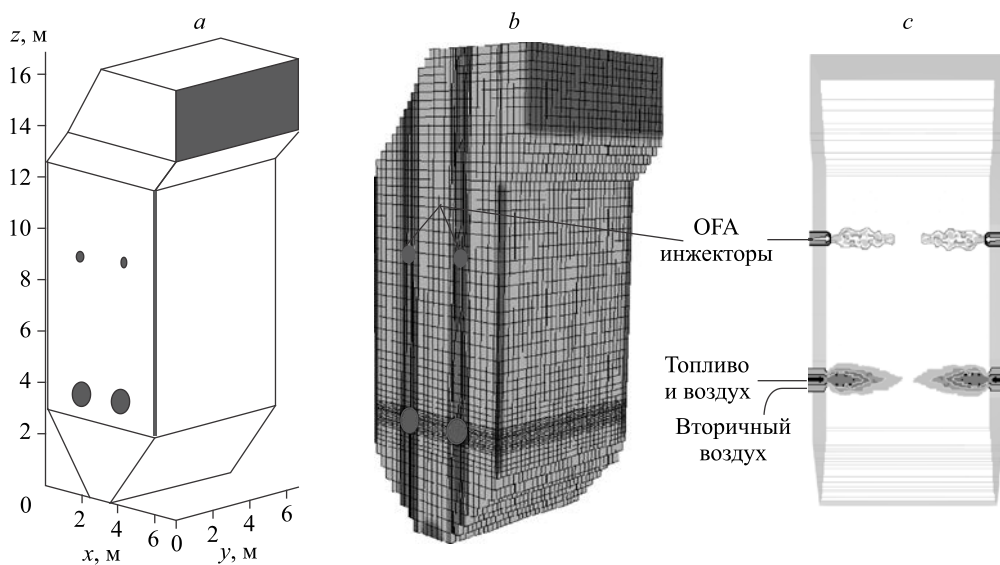


Рис. 2. Общий вид топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (а), разбивка ее на контрольные объемы (б) и компоновка горелочными устройствами и OFA-инжекторами (с).

Для проведения численных экспериментов по подавлению оксидов азота с помощью OFA-технологий была выбрана топочная камера котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (г. Шахтинск, Казахстан). Паровой котел заводской марки БКЗ-75 относится к типу вертикально-водотрубных и имеет производительность 75 т/час (51,45 Гкал/ч) [21–25]. Он оборудован четырьмя пылеугольными горелками, установленными по две горелки с фронта и с тыла в один ярус. 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. 2 представлен общий вид камеры сгорания котла БКЗ-75, разбивка его на контрольные объемы для проведения численного моделирования, компоновка горелочных устройств и OFA-инжекторов для внедрения технологии острого дутья. Конечно-разностная сетка (рис. 2б) для численного моделирования имеет шаги по осям X, Y, Z соответственно $90 \times 32 \times 158$, что составляет 455040 контрольных объемов. Основные конструктивные характеристики топочной камеры котла БКЗ-75 представлены в таблице.

Математическая модель, которая описывает течение газов и жидкостей, основана на уравнениях сохранения массы и импульса. Для потоков, в которых имеют место процессы теплопередачи, а также для сжимаемых сред необходимо дополнительно решать

Таблица
Конструктивные характеристики котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ при организации ступенчатого сжигания топлива

Характеристики	Величина
Количество OFA-горелок, шт	4
Производительность одной горелки по топливу, V_{Γ} , т/час	3,2
Высота топочной камеры, м	16,75
Высота расположения горелок, м	4
Высота расположения яруса OFA-горелок, м	9,4
Диаметр OFA-горелок, м	0,325
Температура горячего воздуха, $T_{ГВ}$, °С	290
Коэффициент избытка воздуха в топке, α	1,2
Температура аэросмеси, $T_{АС}$, °С	140

уравнение сохранения энергии. Для течений с процессами смешивания различных составляющих, с реакциями горения и др. необходимо добавить уравнение сохранения компонентов смеси. Для турбулентных течений система уравнений дополняется транспортными уравнениями для турбулентных характеристик. Для вращающихся потоков топлива и воздуха требуется в общем случае решение сложной трехмерной задачи.

Для исследования процессов тепломассопереноса в высокотемпературных средах в настоящей работе используются физико-математическая и химическая модели, включающие в себя систему трехмерных уравнений Навье–Стокса и уравнений тепломассопереноса с учетом источниковых членов, которые определяются химической кинетикой процесса, нелинейными эффектами теплового излучения, межфазного взаимодействия, а также многостадийностью химических реакций [26–29].

Основные уравнения, которые описывают процессы тепломассопереноса в топочной камере, можно записать в обобщенном виде следующим образом:

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} = - \frac{\partial \rho u_i \varphi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_i} \right) + S_\varphi, \quad (1)$$

где φ — обобщенная транспортная переменная, 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. Система уравнений (1) решается численно с использованием метода контрольного объема, который подробно описывался в работах [30–36] и использовался при проведении вычислительных экспериментов по сжиганию высокозольного угля на казахстанских ТЭС.

В представленной работе методами компьютерного моделирования исследовались различные режимы подачи в топочную камеру котла БКЗ-75 дополнительного воздуха через OFA-инжекторы при OFA = 0 (базовый вариант), 5, 10, 15, 18 и 20 %. В результате проведенных вычислительных экспериментов были получены распределения вектора полной скорости, температурные поля, поля концентраций диоксида азота NO₂ по всему объему камеры сгорания и проведен сравнительный анализ для всех исследуемых режимов.

На рис. 3 представлено поле вектора полной скорости в продольном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 при двух разных объемах воздуха (OFA = 0 и OFA = 18 %), подаваемого через сопла. Видно, что в том и в другом случае ядро факела расположено в центре топочного пространства и определяется областью столкновения потоков из противогорелок. По мере удаления от области распространения струй из горелок поле скоростей выравнивается и к выходу из топки скорость отходящих газов снижается.

При дополнительной подаче воздуха через инжекторы для случая OFA = 18 % максимальные значения вектора полной скорости сконцентрированы также в ядре факела. В этом случае после соударения потоки рассекаются дополнительно на два вертикальных вихря выше области установки горелок, ближе к центру камеры сгорания, что благоприятно влияет на перемешивание топлива и окислителя и, соответственно, на полноту сгорания пылеугольной пыли. На высоте топочной камеры $h = 9,4$ м отчетливо видна подача воздуха через OFA-инжекторы (см. рис. 3b).

Распределение вектора полной скорости на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 представлено на рис. 4. Анализ рисунка показывает, что в отличие от традиционного сжигания пылеугольного топлива (OFA = 0 %, рис. 4a) вихревой характер течения на выходе из топки при использовании «Overfire Air»-технологии ослабевает (рис. 4b), что приводит к уменьшению средней скорости.

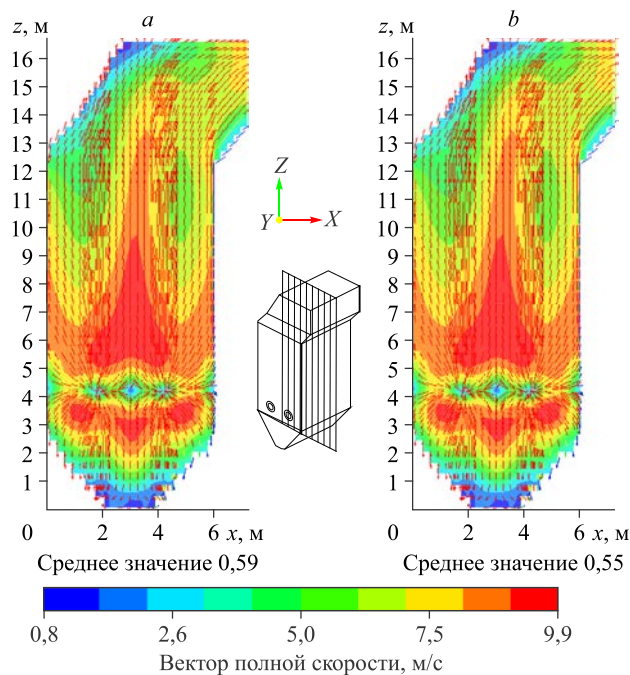


Рис. 3. Поле вектора полной скорости в продольном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 при двух разных объемах воздуха, подаваемого через сопла.
OFA = 0 (a), 18 (b) %.

Распределение температуры в продольном сечении и на выходе из топочного пространства камеры сгорания БКЗ-75 для базового случая (OFA = 0 %) и с применением технологии «острого дутья» (OFA = 10 % и OFA = 18 %) представлены на рис. 5, 6. Анализ рис. 5 показывает, что при увеличении объема воздуха, подаваемого через сопла OFA, температура в центре топочной камеры сгорания увеличивается, а в области расположения OFA-инжекторов уменьшается. Это приводит к тому, что средние значения температуры по продольному сечению топочной камеры для всех трех случаев отличаются

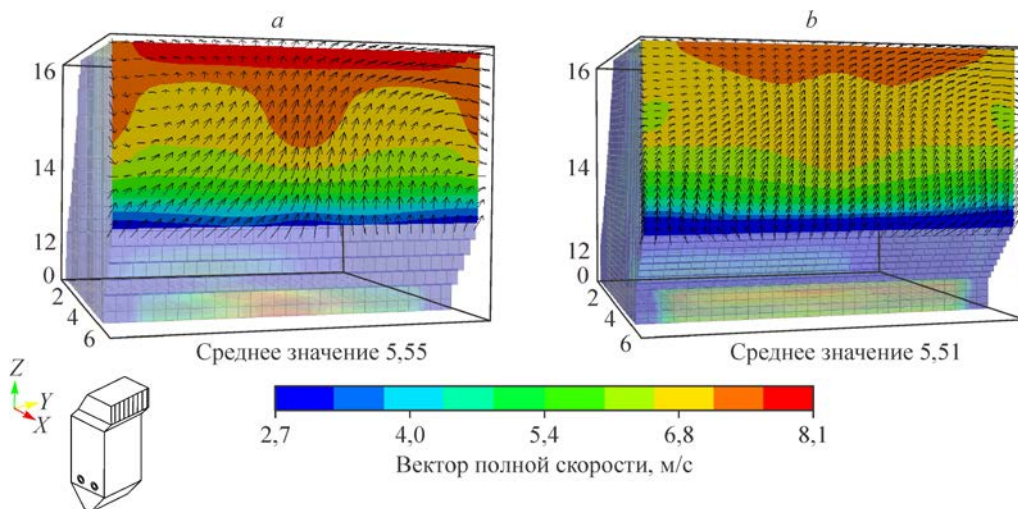


Рис. 4. Поле вектора полной скорости на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через сопла.
OFA = 0 (a), 18 (b) %.

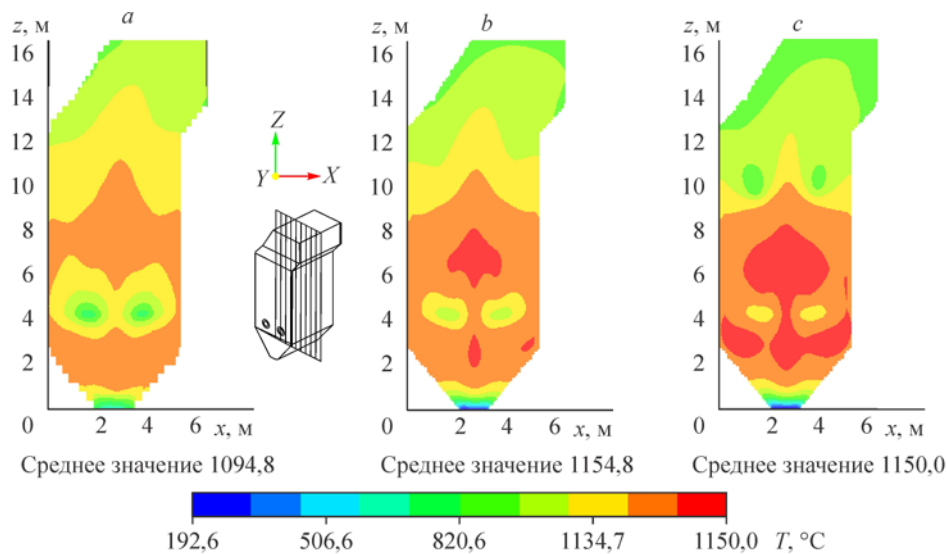


Рис. 5. Распределение температуры T в продольном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через сопла.
OFA = 0 (a), 10 (b) %, 18 (c) %.

незначительно: для OFA = 0 % температура составляет 1094,8 °C, для OFA = 10 % — 1154,8 °C и для OFA = 18 % — 1150,0 °C. По мере продвижения к выходу из топочной камеры поле температуры выравнивается и различия в значениях средней температуры для разных случаев OFA уменьшаются (рис. 6). Для OFA = 0 % температура составляет 885,79 °C, для OFA = 10 % — 865,91 °C и для OFA = 18 % — 856,27 °C.

На рис. 7 представлен сравнительный анализ распределения средней в сечении температуры по высоте топочной камеры для исследуемых режимов: OFA = 0, 10 и 18 %. При увеличении объема воздуха, подаваемого через сопла OFA, наблюдается смещение местоположения ядра факела и увеличение протяженности зоны максимальных температур. Увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения, поскольку температура является основным фактором при определении скорости реакции горения компонентов топливной смеси. Распределение температуры по высоте топочной камеры h подтверждается экспериментальными данными, полученными непосредственно на ТЭЦ [37]. На выходе из топочного пространства ($h = 16,75$ м) среднее значение температуры T

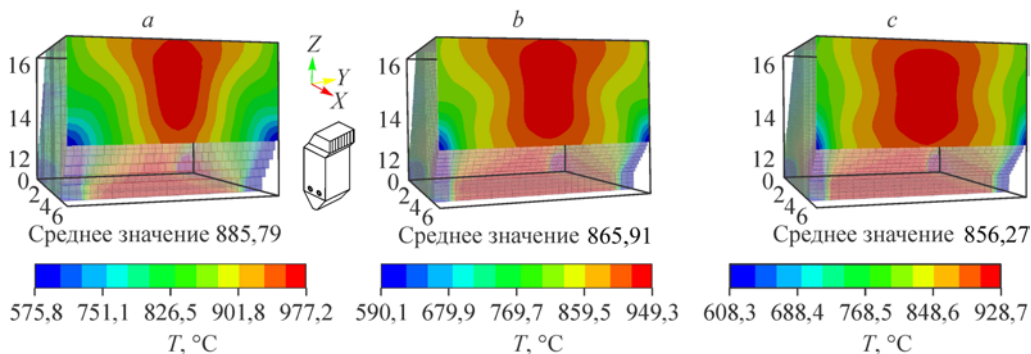
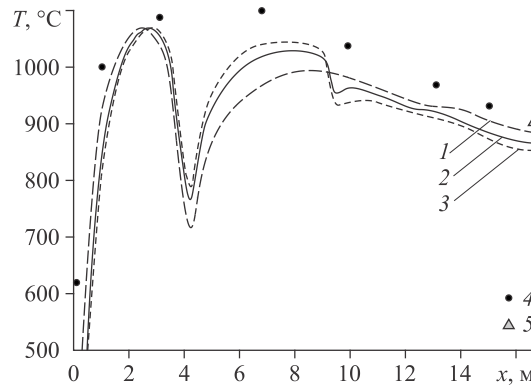


Рис. 6. Распределение температуры T на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через сопла OFA.
OFA = 0 (a), 10 (b) %, 18 (c) %.

Рис. 7. Распределение средней температуры T по высоте топочной камеры h котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через сопла OFA. OFA = 0 (1), 10 (2), 18 (3) %, 4 — данные эксперимента на ТЭЦ [37], 5 — теоретическое значение, полученное по методу ЦКТИ [38].

для базового варианта (OFA = 0 %, кривая 1) близко к ее теоретическому значению, рассчитанному по методу ЦКТИ, разработанному в Центральном котлотурбинном институте [38].



На рис. 8–10 представлены распределения концентраций диоксида азота NO_2 в поперечном, продольном сечениях и на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 для трех вариантов подачи дополнительного воздуха через OFA-инжекторы: OFA = 0, 10 и 18 %.

Анализ рис. 8, 9 показывает, что с увеличением объема воздуха, подаваемого через сопла OFA, возрастает количество диоксида азота, образующегося в области пояса горелок топочной камеры, по сравнению с базовым вариантом: при OFA = 0 % концентрация NO_2 составляет (здесь и далее — при нормальных условиях) $492,48 \text{ мг/м}^3$, при OFA = 10 % — $819,13 \text{ мг/м}^3$, при OFA = 18 % — $714,51 \text{ мг/м}^3$. Это связано с увеличением температуры в данной области, когда основным источником окислов азота является азот топлива (топливные NO_x), а термическое окисление азота воздуха играет незначительную роль.

Анализ поля концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочного пространства свидетельствует о существенном влиянии технологии острого дутья на распределение концентрации этого компонента (рис. 10). Видно, что при увеличении объема воздуха, подаваемого через сопла OFA, происходит значительное уменьшение концентрации NO_2 на выходе из топочной камеры по сравнению с базовым режимом: при OFA = 0 % она составляет $564,4 \text{ мг/м}^3$, при OFA = 10 % — $509,44 \text{ мг/м}^3$, при OFA = 18 % — $424,88 \text{ мг/м}^3$, что

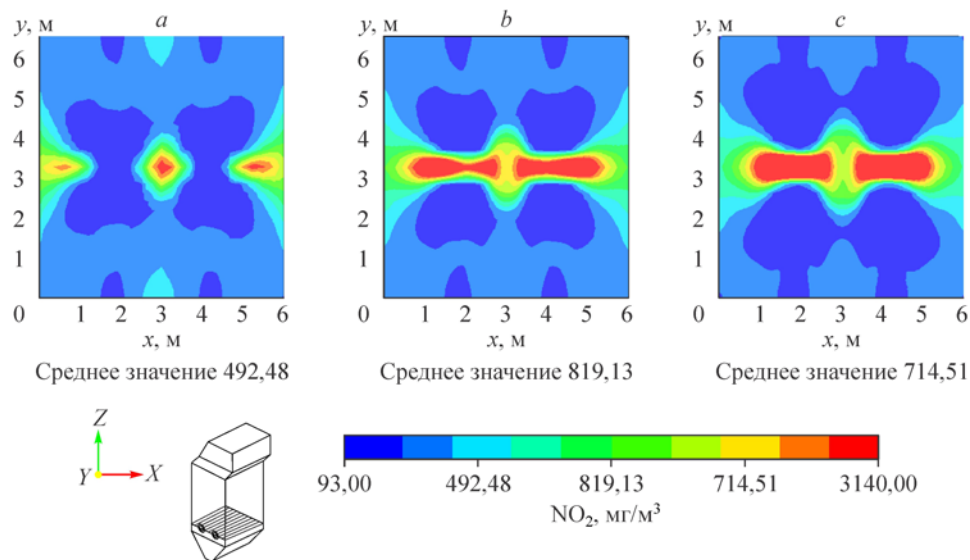


Рис. 8. Распределение концентрации диоксида азота NO_2 в области расположения горелочных устройств. OFA = 0 (a), 10 (b), 18 (c) %.

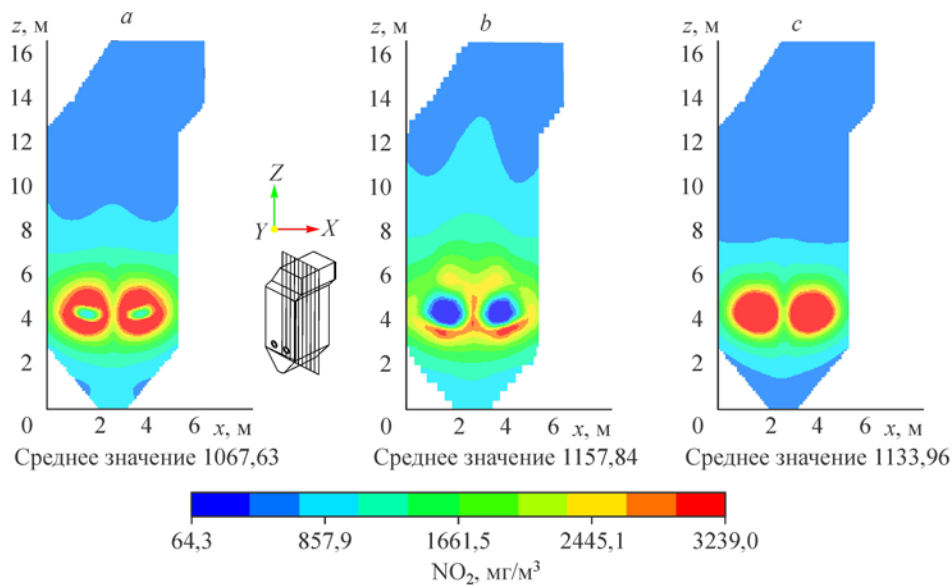


Рис. 9. Распределение концентрации диоксида азота NO_2 в продольном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через сопла OFA. OFA = 0 (a), 10 (b), 18 (c) %.

в первую очередь связано с уменьшением температуры в этой области топки. Предельно допустимая концентрация для оксидов азота NO_x , принятая в Казахстане, составляет порядка 850 мг/м^3 . Подтверждение такому характеру поведения концентрации NO_2 можно видеть на рис. 11, где представлено распределение концентрации диоксида азота NO_2 по высоте топочной камеры h котла БКЗ-75 для случаев OFA = 0, 10, 18 %. Анализ этого рисунка показывает, что основное газообразование NO_x происходит в области распространения потоков из горелок. Характер распределения кривых неоднозначен, что свидетельствует о сложном процессе образования диоксидов азота NO_2 в этой области и о влиянии технологии подавления оксидов азота на процесс формирования этих компонентов. Так, при OFA = 18 % концентрация NO_2 на выходе уменьшается почти на 25 % (рис. 10b и рис. 11, кривая 3).

На рис. 12 представлена зависимость температуры и концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочной камеры от различных режимов подачи дополнительного воздуха через инжекторы, когда OFA = 0 %, 5, 10, 15, 18 и 20 %. Анализируя

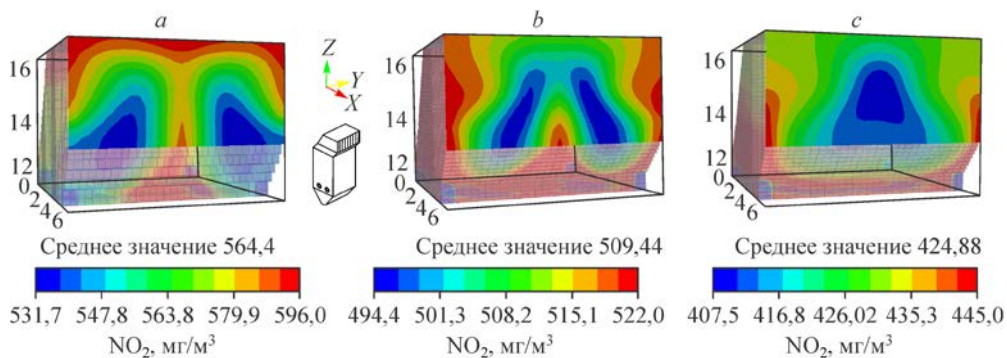


Рис. 10. Распределение концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через сопла OFA. OFA = 0 (a), 10 (b), 18 (c) %.

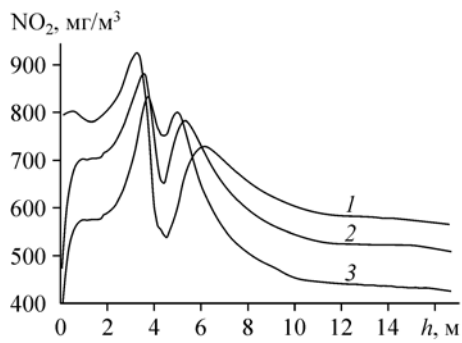


Рис. 11. Распределение концентрации диоксида азота NO_2 по высоте h топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы. $\text{OFA} = 0$ (1), 10 (2), 18 (3) %.

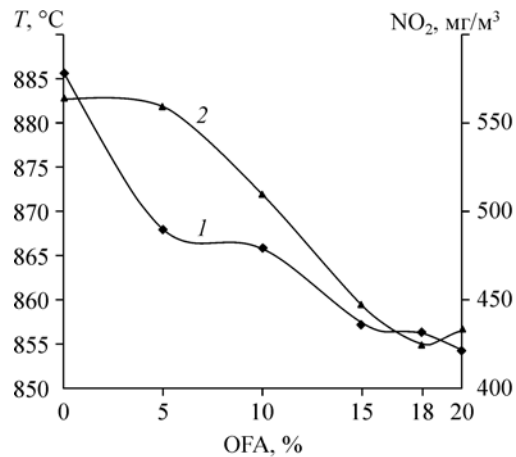


Рис. 12. Зависимость температуры T и концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочной камеры от объема воздуха, подаваемого через OFA-инжекторы. 1 — T , 2 — NO_2 .

исследуемые варианты подачи дополнительного воздуха через OFA-инжекторы, представленные на графике, можно заметить тенденцию уменьшения температуры T и концентраций диоксида азота NO_2 в топочном пространстве. Видно, что при внедрении OFA-технологии на котле БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ оптимальным вариантом снижения (почти на 25 %) концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочной камеры является использование инжекторов при $\text{OFA} = 18\%$ (рис. 12, кривая 2).

Заключение

С применением численных методов проведены исследования, позволяющие определить влияние OFA-технологии на основные характеристики топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ, сжигающей высокозольный карагандинский уголь. С помощью методов компьютерного моделирования исследованы различные режимы подачи дополнительного воздуха через инжекторы, когда $\text{OFA} = 0$ (базовый вариант), 5, 10, 15, 18 и 20 %. Определено, что при дополнительной подаче воздуха через OFA-инжекторы потоки после соударения рассекаются дополнительно на два вертикальных вихря выше области установки горелок ближе к центру камеры сгорания, что благоприятно влияет на перемешивание топлива и окислителя и, соответственно, на полноту сгорания пылеугольной пыли. Получено, что при увеличении объема воздуха, подаваемого через сопла OFA, наблюдается смещение местоположения ядра факела и увеличение протяженности зоны максимальных температур. Увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения, и в первую очередь на распределение концентраций оксидов азота NO_x в топочном пространстве.

Использование OFA-технологии на котле БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ способно привести к значительному уменьшению концентрации диоксида азота NO_2 . Показано, что одним из оптимальных вариантов снижения (почти на 25 %) концентрации диоксида азота NO_2 на выходе из топочной камеры является использование инжекторов при $\text{OFA} = 18\%$. На примере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ показана возможность и эффективность применения ступенчатого сжигания (технология Overfire Air) высокозольного угля на реальных теплоэнергетических объектах. Это позволит решить экологические проблемы путем уменьшения вредных пылегазовых выбросов, характерных при сжигании на ТЭС низкосортных угольных топлив Казахстанских месторождений.

Список литературы

1. Изменение климата. Организация Объединённых Наций. <https://www.un.org/ru/sections/issues-depth/climate-change/index.html>.
2. Beketayeva M., Gabitova Z., Bekmukhamet A., Bolegenova S.A. Control harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic // Proc. of Intern. Conf. on Future Information Engng, Beijing, Peoples China. 2014. Vol. 10. P. 252–258.
3. Maximov V.J., Askarova A., Bolegenova S.A., Beketayeva M. CFD study of harmful substances production in coal-fired power plant of Kazakhstan // Bulgarian Chemical Communications. 2016. Vol. 48, Iss. E2. P. 260–265.
4. Gabitova Z., Bolegenova S.A., Nugimanova A.O. et al. 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.
5. Bolegenova S., Beketayeva M., Leithner R., Ergaliev A., Nugymanova A. et al. 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.
6. 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.
7. Baizhuma Zh., Georgiev A., Bolegenova S. 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.
8. Askarova A., 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.
9. Messerle V.E., Ustimenko A.B. Solid fuel plasma gasification // Advanced Combustion and Aerothermal Technologies: Environmental Protection and Pollution Reductions / Eds. N. Syred, A. Khalatov. Springer, 2007. P. 141–156.
10. Matveev I.B., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Plasma Gasification of Coal in Different Oxidants // IEEE Transactions on Plasma Sci. 2008. Vol. 36, Iss. 6. P. 2947–2954.
11. Buchmann M., Askarova A. 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.
12. Bolegenova S., Safarik P., Askarova A., Maximov V., Bolegenova S. 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.
13. Kuang M., Li Zh., Jing X., Zeng X. Characterization of combustion and NO_x emissions with respect to overfire air damper opening in a down-fired pulverized-coal furnace // Energy Fuels. 2013. Vol. 27, No. 9. P. 5518–5526.
14. Messerle V.E., Loktionova I.V., Karpenko E.I. Optimization of the combustion of power station coals using plasma technologies // J. Thermal Engng. 2004. Vol. 51, No. 6. P. 488–493.
15. Shortanbayeva Z.K., Beketayeva M.T., Askarova A.S., Bolegenova S.A. On the effect of the temperature boundary conditions on the walls for the processes of heat and mass transfer // Intern. J. Mechanics. 2016. Vol. 10. P. 349–355.
16. Fan W., Lin Zh., Li Y. Experimental flow field characteristics of OFA for large-angle counter flow of fuel-rich jet combustion technology // Appl. Energy. 2010. Vol. 87. P. 2737–2745.
17. Hunt T., Muzio L., Smith R., Hanley T.J. Integrating low-NO_x burners, overfire air, and selective non-catalytic reduction on a utility coal-fired boiler // Environmental Progress. 1995. Vol. 14, No. 2. P. 115–120.
18. Саломасов Ю.М., Коняшкин В.Ф., Серант Ф.А., Гордеев В.В. Двухступенчатое сжигание высокозольного экибастузского угля на модернизированном котле ПК-39-2М энергоблока 325 МВт электростанции АО «ЕЭК» г. Аксу Казахстан // XIII Всерос. междуна. конф. «Горение твердого топлива», 13–16 ноября 2012. Новосибирск, 2012. С. 92.1–92.9.
19. Мессерле В.Е., Аскарлова А.С., Устименко А.Б., Болегенова 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.
20. Мессерле В.Е., Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю. Процессы тепломассопереноса в топочных камерах при горении термохимически активированного топлива // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 6. С. 977–989.
21. Safarik P., Nugymanova A., Bolegenova S., Askarova A., Maximov V., Bolegenova S. Simulation of low-grade coal combustion in real chambers of energy objects // J. Acta Polytechnica. 2019. Vol. 59, No. 2. P. 98–108.
22. 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. of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1261, No. 1. P. 12–22.
23. Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т. Трёхмерное моделирование аэродинамики и теплообмена в камере сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 2. P. 317–335.

24. **Maksimov V.Yu., Bekmuhamet A., Ospanova Sh.S., Askarova A.S., Bolegenova S.A.** Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // Proc. Engng. 2012. Vol. 42. P. 1250–1259.
25. **Beketayeva M., Bolegenova S., 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.
26. **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.
27. **Safarik P., Askarova A.**, 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.
28. **Muller H., Leithner R., Askarova A.S., Lavrisheva Ye.I., Magda A.** Combustion of low-rank coals in furnaces of Kazakhstan coal-firing power plants // VDI Berichte. 2007. No. 1088. P. 497–502.
29. **Aldiyarova A.N., Boranbayeva A.E., Bolegenova S.A.**, 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.
30. **Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Bekmuhamet A.** Mathematical simulation of pulverized coal in combustion chamber // Procedia Engng. 2012. Vol. 42. P. 1150–1156.
31. **Horst M., Askarova A., Yevgeniya H., Reinhard L.** CFD code FLOREAN for industrial boilers simulations // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. 2009. Vol. 4, No. 4. P. 98–107.
32. **Bekmukhamet A., Ospanova S., Gabitova Z.K., Bolegenova S.** 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.
33. **Mazhrenova N., Shortanbayeva Zh., Bolegenova S.** 3D modeling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel // J. Bulg. Chem. Commun. 2016. Vol. 48. P. 229–235.
34. **Bolegenova S.A., Maximov V.Y., Beketayeva M.T.** Modeling of heat mas transfer in high -temperature reacting flows with combustion // High Temperature. 2018. Vol. 56, No 5. P. 738–743.
35. **Askarova A.S., Bolegenova S.A., Bolegenova S.A., Maximov V.Y.** Influence of boundary conditions to heat and mass transfer processes // Intern. J. of Mechanics. 2016. Vol. 10. P. 320–325.
36. **Ospanova Sh.S., Maximov V.Yu., Bolegenova S.A., Beketayeva M.** 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.
37. **Алияров Б.К., Алиярова М.Б.** Сжигание казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных: опыт и проблемы. Алматы: Гылым ордасы, 2012. 306 с.
38. **Thermal** calculation of boilers (normative method). Publishing House AOOT "NCPO CKTI", 1998. 270 p.

*Статья поступила в редакцию 4 июня 2020 г.,
после доработки — 5 июля 2020 г.,
принята к публикации 5 августа 2020 г.*