

УДК 621.181

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО КОТЛА

Мальцев Кирилл Иванович¹,
kim3@tpu.ru

Гиль Андрей Владимирович¹,
andgil@tpu.ru

Абрамов Никита Валерьевич¹,
nva12@tpu.ru

Пузырев Станислав Алексеевич¹,
sap34@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки полноты выгорания топлива, эмиссии вредных веществ и температурного напряжения экранных поверхностей топочной камеры пылеугольного котельного агрегата при его реконструкции для организации сжигания природного газа. В настоящее время перевод топливосжигающих установок с твердого топлива на природный газ является весьма актуальным в связи с существенно более низким выбросом углеродных соединений.

Цель: исследование физико-химических процессов в топочной камере на различных нагрузках с факельным сжиганием природного газа и оценка эффективности организации горения при реконструкции пылеугольного котла.

Объекты: топочная камера котельного агрегата паропроизводительностью 210 т/ч, горелочные устройства, параметры топочной среды.

Методы: сравнение результатов аналитических тепловых расчетов и результатов численного моделирования. Численное моделирование горения газового факела выполнено с использованием программного пакета ANSYS Fluent. Для описания турбулентного потока применялись подходы Reynold Avaraged Navier–Stokes, основанные на осреднении уравнений Навье–Стокса по числу Рейнольдса с дополнительными уравнениями массовой плотности турбулентной энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ .

Результаты. Проведено численное исследование физико-химических процессов в топочной камере котельного агрегата после его реконструкции под организацию сжигания природного газа. Получены зависимости изменения температурного уровня, гидродинамики и концентраций компонентов продуктов сгорания в объеме топки на различных нагрузках. Установлено перераспределение высокотемпературных продуктов сгорания к фронтальной и тыльной стенкам, что приводит к образованию зон в пристенном слое со значительным температурным градиентом. Сопла третичного дутья способствуют снижению эмиссии оксидов азота в топочном объеме за счет подавления их образования из-за недостатка кислорода в зоне горения, а также за счет снижения температуры факела в окислительной зоне.

Ключевые слова:

Котельный агрегат, горелочное устройство, газовый факел, численное моделирование, оксиды азота.

Введение

Тепловые электростанции (ТЭС) являются одним из наиболее распространенных источников производства электрической и тепловой энергии во всем мире [1]. Однако они также являются крупнейшими источниками выбросов вредных веществ в атмосферу, таких как оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x) и диоксид углерода (CO_2) [2, 3].

По данным Всемирной метеорологической организации, уровень парниковых газов в атмосфере продолжает расти, что может привести к серьезным последствиям для окружающей среды и здоровья людей. В связи с этим в 2015 г. было принято Парижское соглашение [4], целью которого является удержание роста глобальной средней температуры на уровне не выше 2 °С, повышение способности адаптации к последствиям изменения климата и переход на низкоуглеродное развитие с конечной целью достижения нулевых выбросов к 2050 г. [5].

Один из способов снижения выбросов вредных веществ от ТЭС – переход на сжигание природного газа вместо использования угля или мазута в качестве топлива, так как сжигание газа не производит практически никаких выбросов оксидов серы, а также значительно снижаются выбросы оксидов азота и диоксида углерода.

С начала XXI в. в России заметна тенденция к наращиванию доли природного газа в генерации электрической и тепловой энергии, которая наблюдается до сих пор. За период 2015–2018 гг. потребление угля и нефтепродуктов сократилось, их совокупная доля в балансе снизилась с 33 до 29 %, тогда как объем потребления газа увеличивался в среднем на 3,5 % в год (в том числе за счет роста объема полезного использования попутного нефтяного газа) [6].

Переход на наилучшие доступные технологии в топливноэнергетическом комплексе стимулирует замещение устаревших угольных теплоэлектростанций более экономичными энергоблоками, использующими природный газ и возобновляемую энергию [6, 7].

В связи с этим численное моделирование является стратегическим инструментом для достижения уровня передовых проектов топливосжигающих установок, поскольку позволяет оценить оптимальность компоновки горелочных устройств в совокупности с соплами третичного дутья или рециркуляции продуктов сгорания. Данные системы позволяют снизить выбросы вредных веществ без дорогостоящей очистки дымовых газов [8].

Объект исследования

Объектом исследования является барабанный паровой котел БКЗ-210-140 с П-образной компоновкой (рис. 1). Топочная камера открытого типа по всей высоте прямоугольного сечения имеет размеры по осям 7424×7808 мм. Стены топочной камеры экранированы трубами диаметром 60 мм. Котел спроектирован на сжигание бурых углей в топке с тангенциальной компоновкой прямоточных горелочных устройств.

С целью организации сжигания природного газа рассмотрена проектная схема реконструкции котельного агрегата. На боковых стенах топочной камеры установлены шесть низкоэмиссионных вихревых комбинированных газомазутных горелок ГМВИ (Ш)-30 тепловой мощностью 30 МВт, по схеме треугольника вершиной вниз.

Для подавления образования оксидов азота предусмотрена система двухступенчатого сжигания. Основная часть топлива сжигается при недостатке окислителя, а дожигание происходит за счет подачи воздуха в сопла третичного дутья [9]. Сопла установлены по два на боковых стенах топочной камеры выше верхнего яруса горелок, на высоте 10,5 м, сечением каждого 608×208 мм.

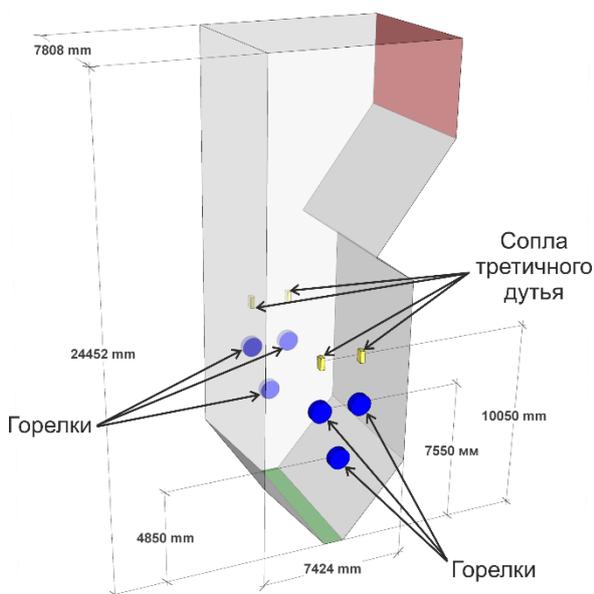


Рис. 1. Геометрическая модель топочной камеры
 Fig. 1. Geometrical model of a boiler furnace chamber

Математическая модель

Для топочной камеры создана CAD-модель, которая была дискретизирована для возможности числен-

ного решения. Расчетная сеточная модель состоит из 1142560 ячеек и обеспечивает сеточно-независимое решение. Моделирование топочных процессов выполнено с использованием программного комплекса ANSYS Fluent. Связь давления и скорости разрешалась с помощью алгоритма SIMPLE с фазовой связью при использовании противоточной схемы второго порядка точности для оценки конвективных условий. Градиент давления рассчитывался по схеме Standard. Второй порядок аппроксимации использовался для решения уравнений сохранения импульса, турбулентной кинетической энергии, скорости диссипации энергии турбулентности и средней доли смеси. Расчет выполнялся до тех пор, пока невязка по уравнению неразрывности не составляла $<10^{-5}$, для остальных уравнений $<10^{-6}$. Указанные параметры невязок достигались при выполнении ≈ 1000 итераций.

В численном моделировании процессов горения важную роль играет распределение скоростей в потоке. Модель турбулентности k-ε позволяет описать диссипацию энергии турбулентных вихрей и перенос их импульса, что позволяет определить характеристики потока. Преимуществом модели k-ε является ее высокая точность и сравнительно низкая вычислительная стоимость. При этом поток можно считать несжимаемым вследствие относительно низких скоростей, существенное изменение градиента давления не наблюдается, соответственно турбулентное течение уподоблено, как в пограничном слое плоской пластины [10, 11].

Теплофизические процессы в топочной камере происходят при высоких температурах, поэтому излучение является одним из основных процессов теплообмена. Для достоверного распределения температуры в топочной камере используется модель излучения P-1, в которой газ принимался как серое тело [12, 13].

Поток излучения описывается уравнением:

$$q_j = - \frac{1}{3 \cdot (a + \sigma_s) - C \sigma_s} + \nabla G,$$

где a – коэффициент поглощения; σ_s – коэффициент рассеивания; $C \sigma_s$ – линейно-анизотропный коэффициент фазовой функции; ∇ – оператор набла; G – падающее излучение.

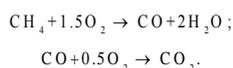
Уравнение переноса для падающего излучения:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4an^2 \sigma T^4 = S_G,$$

где n – показатель преломления среды; T – температура газов; S_G – определяемый источник излучения; σ – постоянная Стефана–Больцмана.

Модель P-1 проста и надежна, доказано, что применительно к сжиганию газового топлива она может давать результаты, аналогичные по точности результатам, полученным с использованием более сложных и вычислительно затратных моделей излучения [14, 15]. Рассеянием пренебрегают, так как ожидается, что молекулярное влияние будет пренебрежимо мало, как и количество образующейся сажи, и ее влияние.

Механизм горения газа описан упрощенным способом, который включает двухступенчатое сжигание метана (главного компонента природного газа) с кислородом и окисление монооксида углерода [16, 17]:



Для учета турбулентной диффузии использовалась модель переноса, соответственно выражения аррениусовского типа не использовались для описания кинетики реакций. Предполагается о том, что лимитирующим этапом реакции является перемешивание и что фактическая кинетика не имеет значения, оправдано для реагирующих потоков с высокими числами Дамкёлера, для которых реакция протекает мгновенно по сравнению с турбулентным перемешиванием. Поскольку горение происходит на много порядков быстрее, чем турбулентное перемешивание, в этом случае уместно использовать модель «смешивание–реакция». Массовые доли топлива, окислителей и продуктов сгорания были получены с помощью модели Eddy-Break-Up (EBU), основанной на предположении, что турбулентное перемешивание контролирует скорость реакции [18].

Эмиссия оксидов азота оценивалась с помощью постобработки процессов горения в топочной камере. Соответственно, генерация NO_x не оказывает влияния на поля температур, скорость, давление и состав топочной среды. Это подтверждается низкими концентрациями NO_x в расчетной области. Генерация NO_x рассчитана с учетом образования быстрых и термических оксидов азота по механизму Зельдовича [19, 20].

Верификация математической модели проводилась на основе сравнения результатов моделирования с результатами поверочного расчёта топочной камеры при нагрузках 100 и 70 % от номинальной (рис. 2). По результатам сравнения отклонение температур на выходе из топочной камеры составляет не более 45 °С, что является допустимым согласно [21].

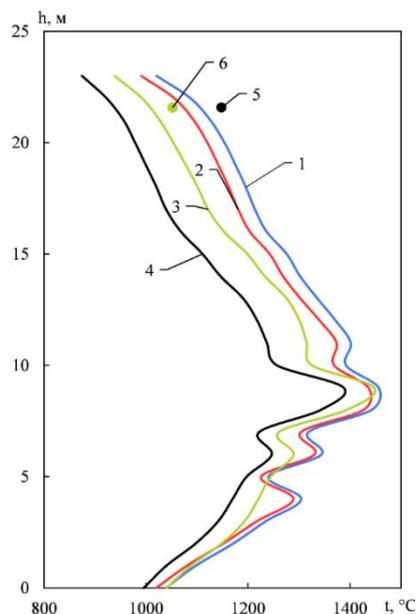


Рис. 2. Распределение температуры по высоте топочной камеры (%): 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50; 5 – 100 (поверочный расчет); 6 – 70 (поверочный расчет)

Fig. 2. Distribution of temperature along the furnace chamber (%): 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50; 5 – 100 (checking calculator); 6 – 70 (checking calculator)

Исходными данными для математического моделирования являются результаты теплового расчета согласно [21].

Подача топлива и окислителя (воздуха) в топочную камеру задавались через массовый расход (кг/с). Доля воздуха, подаваемого через сопла третичного дутья, составляет 30 % на всех рассматриваемых нагрузках. Температура природного газа, подаваемого в топку, принята 30 °С. Температура горячего воздуха составляет 273 °С.

Граничные условия определяются температурой стенки топочной камеры, которая принимается равной 380 °С, и коэффициентом тепловой эффективности экранов, равным 0,65.

Результаты исследования

Распространение потоков газозвушной смеси в топочной камере является определяющим фактором для обеспечения полноты выгорания топлива, устойчивости горения и распределения теплового напряжения по поверхностям нагрева [22].

Аэродинамическая структура топочной среды в поперечных и горизонтальных сечениях при номинальной паровой нагрузке представлена на рис. 3, 4. В сечении по центральной оси топочной камеры (рис. 3, а), согласно встречной компоновке горелок от нижнего яруса, обеспечивается встречно-направленное движение топлива и окислителя со скоростью порядка 20 м/с. Затем потоки соударяются в центральной части топочной камеры и растекаются в нижнюю часть топки (область холодной воронки) с образованием двух горизонтальных вихрей относительно продольной оси топочной камеры, а в верхнюю часть – без формирования крупных вихрей, поскольку восходящие потоки оказываются под существенным влиянием горелочных струй второго яруса. Наличие сопел третичного дутья над горелками второго яруса приводит к снижению скорости потока восходящего потока (6–7 м/с) и его турбулизации (рис. 3, б).

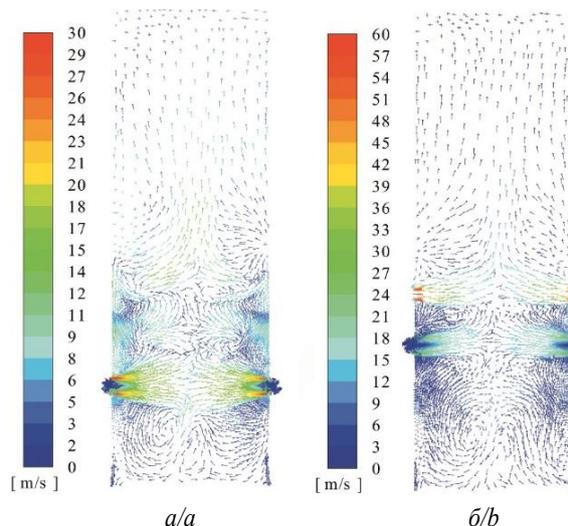


Рис. 3. Векторное поле скоростей (м/с) в поперечном сечении топочной камеры: а) центральная ось топки; б) ось сопел третичного дутья

Fig. 3. Velocity vector field in a transverse section of the furnace chamber: а) central axis of the furnace; б) axis of the tertiary air nozzles

Из результатов моделирования аэродинамики в горизонтальных сечениях топочной камеры (рис. 4) наблюдается столкновение закрученных потоков, истекающих из горелочных устройств (рис. 4, а, б) и прямооточных струй

третьичного воздуха (рис. 4, в), что приводит к движению основной массы потока к фронтальной и тыльной стенам от центральной оси топочной камеры с образованием вертикальных вихрей в каждом углу топки.

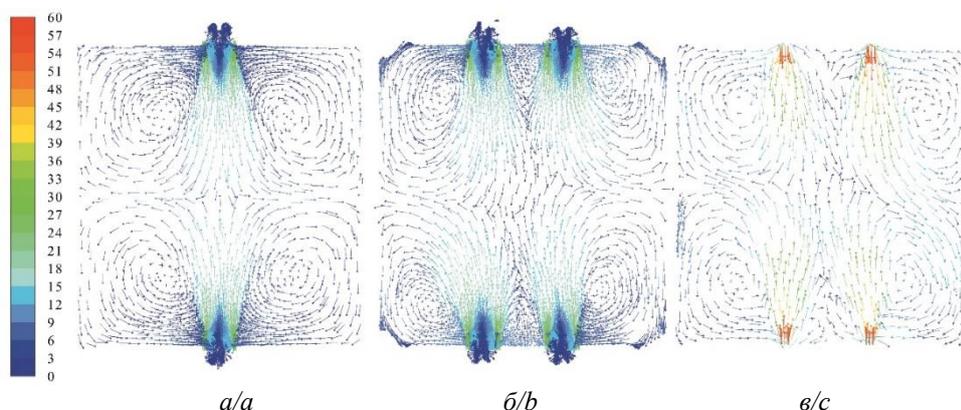


Рис. 4. Векторное поле скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры: а) 1 ярус горелок; б) 2 ярус горелок; в) сопла третичного дутья

Fig. 4. Velocity vector field in a horizontal section of the furnace chamber: а) first tier of burners; б) second tier of burners; в) over-fire air nozzles

Поскольку природный газ является высокорреакционным топливом, соответственно ядро горения располагается на уровне горелочных устройств (рис. 5, б). В среднем значения температур в ядре горения составляют от 1380 до 1480 °С (рис. 2, 5), при этом вследствие столкновения противоположно направленных горелочных струй высокотемпературные потоки вытесняются к фронтальной и тыльным стенам топочной камеры вдоль продольной оси (рис. 5, б, а, б). Так как сопла третичного дутья установлены непосредственно над горелочными устройствами, то и выше ядра горения потоки с более высокой температурой, чем в среднем по сечению, поднимаются вдоль фронтального и тыльного топочных экранов (рис. 6, в, г).

В связи с выявленным перераспределением потоков выполнена оценка температурного уровня непосредственно в пристенном слое на отметках размещения второго яруса горелок и сопел третичного дутья (рис. 7). Стоит отметить, что по мере приближения к панелям фронтального и тыльного экранов топки наблюдается значительный градиент температур на уровне расположения второго яруса горелок (до 500 °С) (рис. 7, а, б). На уровне расположения сопел третичного дутья температурная неравномерность в пристенном слое снижается и не превышает 200 °С, а по ширине тыльной стены наблюдаются более низкие значения (рис. 7, в, г).

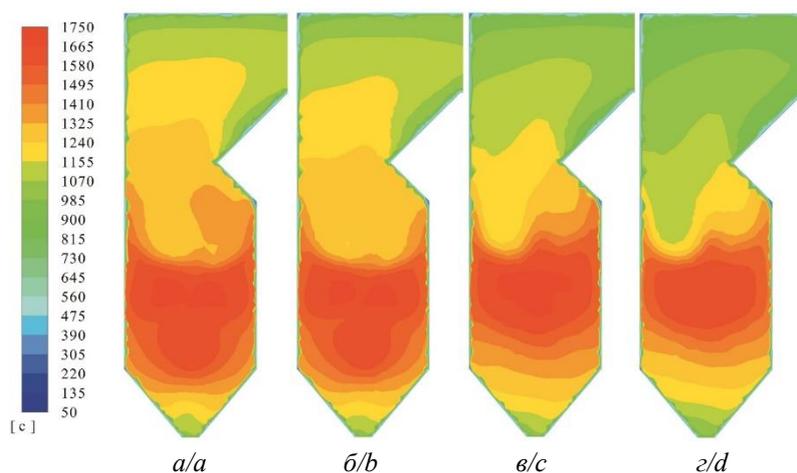


Рис. 5. Распределение температур (°С) в продольном сечении топочной камеры. Нагрузка (%): а) 100; б) 90; в) 70; г) 50

Fig. 5. Distribution of temperature (°C) in a longitudinal section of the furnace chamber. Boiler load (%): а) 100; б) 90; в) 70; г) 50

На рис. 8, 9 представлены результаты эмиссии оксидов азота в топочном объеме при исследуемых нагрузках. Согласно представленным результатам

наиболее интенсивно эмиссия NO_x наблюдается в зоне активного горения при нагрузках 100 и 90 %, что связано с большей зоной активного горения и кон-

центрацией окислителя. При отключении нижнего яруса горелок эмиссия NO_x в зоне активного горения значительно снижается (рис. 8, 9, в, г). Наличие сопел третичного дутья способствует снижению эмиссии

оксидов азота выше зоны активного горения за счет подавления их образования из-за недостатка кислорода в зоне горения, а также за счет снижения температуры факела в окислительной зоне.

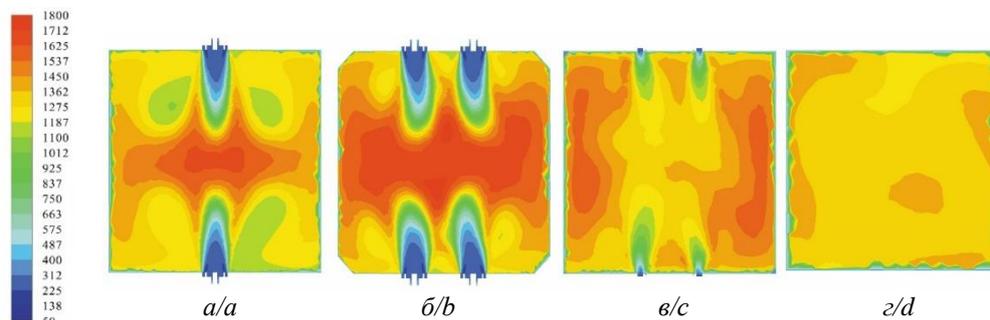


Рис. 6. Распределение температур ($^{\circ}\text{C}$) в горизонтальном сечении топочной камеры при номинальной нагрузке: а) 1 ярус горелок; б) 2 ярус горелок; в) сопла третичного дутья; г) на уровне аэродинамического выступа

Fig. 6. Distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$) in a horizontal section of the furnace chamber at nominal boiler load: a) first tier of burners; b) second tier of burners; c) over-fire air nozzles; d) aerodynamic nose

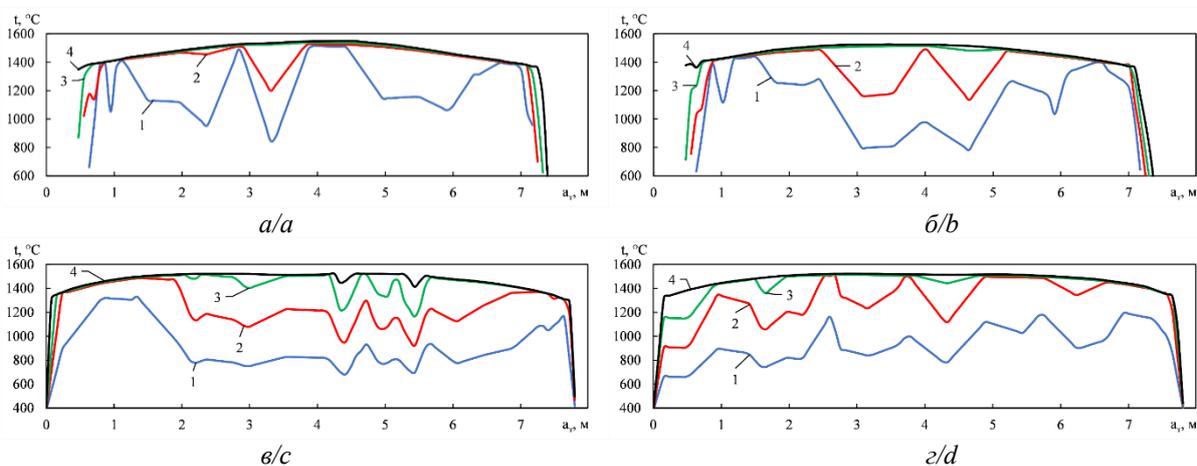


Рис. 7. Распределение температуры в пристенном слое по ширине топочной камеры: а) фронт, верхний ярус горелок; б) тыл, верхний ярус горелок; в) фронт, сопла третичного дутья; г) тыл, сопла третичного дутья. Расстояние от экранных труб (мм): 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200

Fig. 7. Distribution of temperature in the near-wall layer along the furnace chamber width: a) front, second tier of burners; b) rear, second tier of burners; c) front, over-fire air nozzles; d) rear, over-fire air nozzles. Distance from waterwall tubes (mm): 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150; 4 – 200

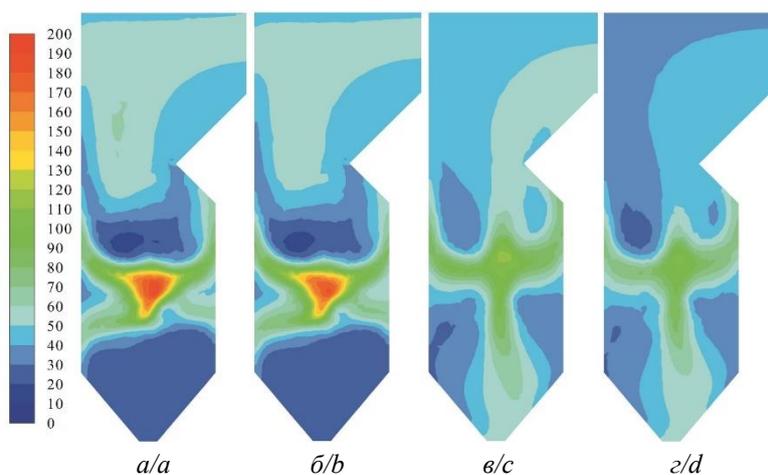


Рис. 8. Распределение оксидов азота ($\text{мг}/\text{м}^3$) в продольном сечении топочной камеры. Обозначения – рис. 5

Fig. 8. Distribution of nitrogen oxides in a longitudinal section of the furnace chamber. See Fig. 5 for legend

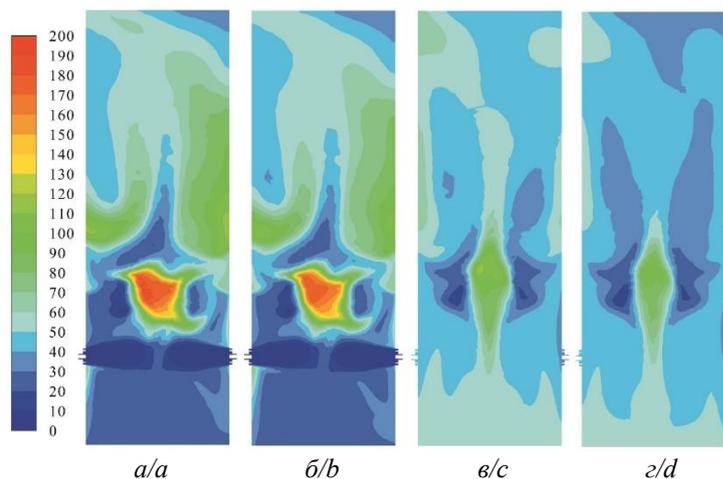


Рис. 9. Распределение оксидов азота ($\text{мг}/\text{м}^3$) в поперечном сечении топочной камеры. Обозначения – рис. 5
Fig. 9. Distribution of nitrogen oxides in a transverse section of the furnace chamber. See Fig. 5 for legend

Выгорание природного газа в топочной камере происходит в полном объеме (рис. 10, а), так при нагрузках 90 и 100 % максимальная концентрация СО наблюдается на уровне расположения горелочных устройств, а при снижении нагрузки максимальная концентрация – выше горелок, но на выходе из топочной камеры стремится к нулевым значениям во всех исследованных случаях. Концентрация O_2 на уровне расположения горелочных устройств имеет минимальное значение вследствие недостатка окислителя из-за перераспределения части воздуха на третичное дутье. В дальнейшем по высоте топки концен-

трация возрастает и в выходном окне топки имеет значения от 1,18 до 3,15 %.

При нагрузках 90 и 100 % максимальная концентрация оксидов азота $260 \text{ мг}/\text{м}^3$ в зоне активного горения при пересчете на избыток воздуха 1,4, при нагрузках 70 и 50 % максимальная концентрация не превышает $200 \text{ мг}/\text{м}^3$ (рис. 10, в). На выходе из топочной камеры во всех исследованных вариантах содержание NO_x составляет порядка $100 \text{ мг}/\text{м}^3$ и соответственно не превышает предельно допустимых значений согласно [23].

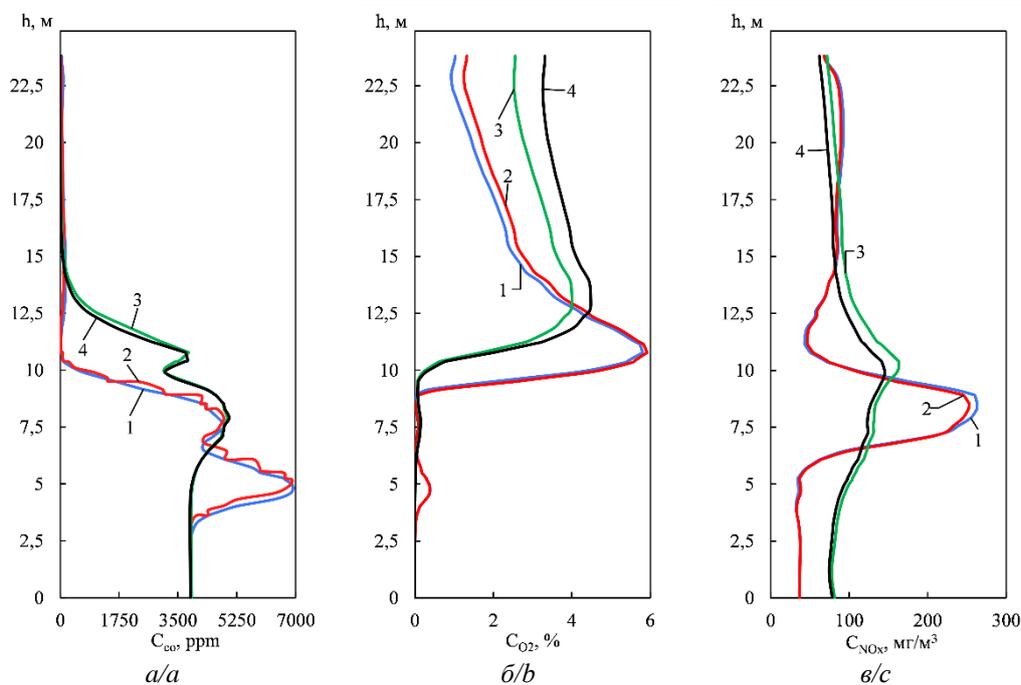


Рис. 10. Распределение среднееинтегральной в горизонтальных сечениях концентрации монооксида углерода (а), кислорода (б) и оксидов азота (в) по высоте топочной камеры. Нагрузка, %: 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50

Fig. 10. Distribution of average integral concentration of (a) carbon oxide, (b) oxygen, and (c) nitrogen oxides in horizontal sections along the furnace chamber height. Boiler load, %: 1 – 100; 2 – 90; 3 – 70; 4 – 50

Заключение

При эксплуатации котельных агрегатов после проведенных реконструкционных работ, связанных с изменением схем сжигания, распространенной проблемой является перегрев стенок экранных труб, что может привести к коррозии и разрыву труб, отключению котла и даже к авариям. Также зачастую происходят изменения, связанные с экологическими показателями. Поэтому в данной работе на основе пакета прикладных программ ANSYS Fluent смоделированы топочные процессы при различных нагрузках.

На основании отлаженной модели определено наличие высокотемпературных зон у фронтальной и тыльной стен, а также значительные градиенты температур. Поскольку температурный уровень в пристенных зонах (особенно при номинальной нагрузке)

превышает допустимые значения (450 °С) для углеродистой стали, это может негативно отразиться на механической прочности испарительных поверхностей нагрева. Существенные температурные градиенты по ширине стен котельного агрегата также могут привести к негативным последствиям, связанным с гидравлической неравномерностью по отдельным трубам в экранных поверхностях.

Схема ступенчатого сжигания с соплами третичного дутья не приводит к потере экономичности работы котельного агрегата от неполноты выгорания топлива, а оказывает положительное влияние на снижение эмиссии оксидов азота.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ember. Global Electricity Review 2023. URL: <https://emberclimate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/> (дата обращения 17.04.2023)
2. Жабо В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
3. Росляков П.В. Современные воздухоохраные технологии на тепловых электростанциях (обзор) // Теплоэнергетика. – 2016. – № 7. – С. 46–62.
4. United Nations Climate Change. The Paris Agreement // UNCC. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (дата обращения 10.04.2023).
5. Сценарии декарбонизации в России. URL: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/9b713c16-cfb4-4da3-aea-66061e1d14f5/SKOLKOVO_EneC_RU_Decarbonisation_Scenarios_in_Russia.pdf (дата обращения 17.04.2023).
6. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утв. распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2020 г. № 3052-р. – 37 с.
7. ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. – М.: Бюро НДТ, 2017. – 271 с.
8. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
9. Алехнович А.Н. Снижение оксидов азота в энергетических котлах, сжигающих газ. – Челябинск: Цицеро, 2018. – 74 с.
10. Low NOx burner technology for ethylene cracking furnaces / W. Bussman, R. Poe, B. Hayes, J. McAdams, J. Karan // AIChE Ethylene Producers Conference Proceeding. – 2001. – V. 10. – P. 793–796.
11. Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a methane-air diffusion flame on its combustion characteristics / A.A. Hosseini, M. Ghodrati, M. Moghiman, S.H. Pourhoseini // Case Studies in Thermal Engineering. – 2020. – V. 18. – 100610.
12. Karpilov I., Pashchenko D. Effect of methane reforming before combustion on emission and calorimetric characteristics of its combustion process // International Journal of Hydrogen Energy. – 2021. – V. 46. – P. 38106–38118.
13. Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками / А.В. Гиль, А.С. Заворин, О.М. Кокшарев, Е.С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 18–27.
14. Numerical investigation of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200 MW package boiler / M.A. Habib, E.M.A. Mokheime, S.Y. Sanusi, M.A. Nemitallah // Energy Conversion and Management. – 2014. – V. 83. – P. 296–305.
15. Численное исследование топочных процессов при сжигании непроектных углей в котле производительностью 220 т/ч / К.И. Мальцев, А.В. Гиль, А.С. Заворин, Д.В. Лебедь // Теплоэнергетика. – 2022. – № 12. – С. 73–83.
16. Investigation on the combustion performance enhancement of the premixed methane/air in a two-step micro combustor / J. E. H. Liu, X. Zhao, D. Han, Q. Peng, W. Zuo, T. Meng, R. Qio // Applied Thermal Engineering. – 2018. – V. 141. – P. 114–125.
17. FLUENT Theory Guide, Version 17.2. – Canonsburg, PA: ANSYS, Inc., 2016. – 812 p.
18. Habibi A., Mercier B., Heynderichx G. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces // Computers and Chemical Engineering. – 2007. – V. 31. – P. 1389–1406.
19. Baukal C.E. The John Zink Hamworthy Combustion handbook. 2nd ed. V. 1. Fundamentals. – Boca Raton: CRC Press, 2012. – 588 p.
20. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation. – Heidelberg: Springer Berlin, 2006. – 378 p.
21. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
22. Хзмалян Д.М. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 484 с.
23. ГОСТ Р 55173-2012. Установки котельные. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2014. – 32 с.

Поступила: 15.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 26.05.2023 г.

Информация об авторах

Мальцев К.И., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гиль А.В., кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Абрамов Н.В., аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Пузырев С.А., студент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.181

THERMOPHYSICAL AND ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF NATURAL GAS UTILIZATION IN THE RECONSTRUCTION OF A PULVERIZED COAL-FIRED BOILER

Kirill I. Maltsev¹,
kim3@tpu.ru

Andrey V. Gil¹,
andgil@tpu.ru

Nikita V. Abramov¹,
nva12@tpu.ru

Stanislav A. Puzyrev¹,
sap34@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the investigation is caused by the need to assess the completeness of fuel combustion, harmful emissions, and temperature stress of the screen surfaces of a pulverized coal-fired boiler during its reconstruction for natural gas combustion. Currently, the conversion of solid fuel combustion installations to natural gas is highly relevant due to significantly lower emissions of carbon compounds.

The main aim of this research is to study the physicochemical processes in the combustion chamber at various loads with flammable natural gas combustion and evaluate the effectiveness of combustion organization during the reconstruction of a pulverized coal-fired boiler.

Objects: combustion chamber of a boiler unit with a steam capacity of 210 t/h, burners, parameters of the combustion chamber environment.

Methods: comparison of results obtained from analytical thermal calculations and numerical modeling. The numerical simulation of gas flare combustion was performed using the ANSYS Fluent software package. Reynolds Averaged Navier–Stokes approaches based on averaging the Navier–Stokes equations over the Reynolds number with additional equations for the turbulent kinetic energy k and the rate of turbulent kinetic energy dissipation ϵ were applied to describe the turbulent flow.

Results. A numerical study of the physicochemical processes in the combustion chamber of a boiler unit was conducted after its reconstruction for natural gas combustion. Dependencies of temperature level changes, hydrodynamics, and concentrations of combustion products components in the volume of the combustion chamber at various loads were obtained. It was found that high-temperature combustion products are redistributed towards the front and rear walls, resulting in the formation of zones in the wall layer with a significant temperature gradient. The nozzles of the tertiary air contribute to the reduction of nitrogen oxide emissions in the combustion chamber by suppressing their formation due to oxygen deficiency in the combustion zone, as well as by lowering the temperature of the flame in the oxidizing zone.

Key words:

Boiler unit, burner, gas flame, numerical modelling, nitrogen oxides.

The research was supported by Russian Science Foundation no. 23-29-00274, <https://rscf.ru/en/project/23-29-00274/>.

REFERENCES

1. Ember. *Global Electricity Review 2023*. Available at: <https://ember-climate.org/insights/research/global-electricity-review-2023/> (accessed 17 April 2023).
2. Zhabo V.V. *Okhrana okruzhayushchey sredy na TES i AES* [Environmental protection in the TPP and NPP]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p.
3. Roslyakov P.V. Modern air protection at thermal power plants (review). *Thermal Engineering*, 2016, no. 7, pp. 46–62. In Rus.
4. *United Nations Climate Change. The Paris Agreement. UNCC*. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (accessed 10 April 2023).
5. *Sisenarii dekarbonizatsii v Rossii* [Decarbonization scenarios in Russia]. Available at: https://sk.skolkovo.ru/storage/file_storage/9b713c16-cfb4-4da3-aea-66061e1d14f5/SKOLKOVO_EneC_RU_Decarbonisation_Scenarios_in_Russia.pdf (accessed 17 April 2023).
6. *Strategiya sotsialno-economiceskogo razvitiya Rossiiskoy Federatsii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyykh gazov do 2050 goda* [Strategy for socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050]. Approved Decree of the Government of the Russia Federation of October 29, 2020 No. 3052 p. 37 p.
7. ITS 38-2017. *Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva enegii* [Combustion of fuel in large installations for energy production]. Moscow, Byuro Standartinform Publ., 2017. 271 p.
8. Pomerantsev V.V., Arefev K.M., Akhmedov D.B. *Osnovy prakticheskoy teorii gorennya* [Fundamentals of practical combustion theory]. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 312 p.
9. Alekhovich A.N. *Snizhenie oksidov azota v energeticheskikh kotlakh, szhigayushikh gaz* [Nitrogen oxide reduction in power boilers burning gas]. Chelyabinsk, Tsitsero Publ., 2018. 74 p.
10. Bussman W., Poe R., Hayes B., McAdams J., Karan J. Low NO_x burner technology for ethylene cracking furnaces. *AIChE Ethylene Producers Conference Proceeding*, 2001, vol. 10, pp. 793–796.
11. Hosseini A.A., Ghodrati M., Moghiman M., Pourhoseini S.H. Numerical study of inlet air swirl intensity effect of a methane-air diffusion flame on its combustion characteristics. *Case Studies in the Thermal Engineering*, 2020, vol. 18, 100610.
12. Karpilov I., Pashchenko D. Effect of methane reforming before combustion on emission and calorimetric characteristics of its combustion process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, pp. 38106–38118.
13. Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M., Vorontsova E.S. Numerical study of effect of primary air excess on combustion in a furnace chamber of a utility boiler with multi-channel swirl burners. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 18–27. In Rus.

14. Habib M.A., Mokheime E.M.A., Sanusi S.Y., Nemitallah M.A. Numerical investigation of combustion and emissions of syngas as compared to methane in a 200 MW package boiler. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 83, pp. 296–305.
15. Maltsev K.I., Gil A.V., Zavorin A.S., Lebed D.V. Numerical study of furnace processes during combustion of off-design coals in a 220 t/h boiler. *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69, pp. 971–980.
16. E J., Liu H., Zhao X., Han D., Peng Q., Zuo W., Meng T., Qio R. Investigation on the combustion performance enhancement of the premixed methane/air in a two-step micro combustor. *Applied Thermal Engineering*, 2018, vol. 141, pp. 114–125.
17. *FLUENT Theory Guide, Version 17.2*. Canonsburg, PA, ANSYS, Inc., 2016. 812 p.
18. Habibi A., Merci B., Heynderichx G. Impact of radiation models in CFD simulations of steam cracking furnaces. *Computers and Chemical Engineering*, 2007, vol. 31, pp. 1389–1406.
19. Baukal C.E. *The John Zink Hamworthy Combustion handbook. Vol. 1. Fundamentals*. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2012. 588 p.
20. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion. Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments, pollutant formation*. Heidelberg, Springer Berlin, 2006. 378 p.
21. *Teplovoy raschet kotlov (normativny metod)* [Boiler thermal design (standard approach)]. St Petersburg, NPO CKTI Publ., 1998. 256 p.
22. Khzmalyan D.M. *Teoriya gorennya i topochnye ustroystva* [Theory of combustion and combustion devices]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 484 p.
23. GOST R 55173-2012. *Ustanovki kotelnye. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* [SS R 55173-2012. The boiler installations. General technical requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 32 p.

Received: 15 May 2023.
Reviewed: 26 May 2023.

Information about the authors

Kirill I. Maltsev, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Andrey V. Gil, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic.

Nikita V. Abramov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Stanislav A. Puzryev, student, National Research Tomsk Polytechnic University.