

УДК 621.181
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778
Шифр специальности ВАК: 1.3.14

Влияние изменения нагрузки котельного агрегата на топочные процессы

А.В. Гиль¹✉, К.И. Мальцев¹, Н.В. Абрамов¹, А.С. Заворин¹, А.В. Старченко²

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, г. Томск

✉ Angil@tpu.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью оценки стабильности горения, теплового напряжения и эмиссии оксидов азота (NO_x) при снижении нагрузки парового котла. Поскольку в перспективе большое внимание будет уделяться возобновляемым источникам энергии и АЭС, то угольные ТЭС будут работать на пониженных нагрузках, поэтому важно исследовать надежность эксплуатации и экологические параметры котельного агрегата при регулировании нагрузки. *Цель:* исследование выгорания пылеугольного топлива, температурных параметров и эмиссии NO_x при снижении нагрузки котельного агрегата до 50 % в базовой компоновке и с учетом наличия сопел третичного дутья. *Объекты:* топочная камера котельного агрегата с естественной циркуляцией паропроизводительностью 220 т/час в базовой компоновке и с соплами третичного дутья. *Методы.* Применен пакет прикладных программ FIRE-3D для численного исследования. Горение пылеугольного топлива является сложным физико-химическим процессом, поэтому взаимодействие газового потока и твердых частиц моделировалось с использованием эйлеровой и лагранжевой схем соответственно. В газовой фазе моделируется выгорание летучих веществ и СО с дальнейшим догоранием углеродного остатка. Прогноз эмиссии NO_x моделировался с помощью моделей постобработки, включающих образование быстрых, топливных и термических оксидов азота. *Результаты.* Получены поля температур, характеристики потока, выбросов NO_x для различных нагрузок топочной камеры котельного агрегата паропроизводительностью 220 т/час на основе численного моделирования. Получены количественные оценки параметров топочной среды, соответствующие нескольким уровням снижения нагрузки котла вплоть до 50 % от номинальной. Установка четырех сопел третичного дутья позволяет снизить выбросы NO_x на 12,75 % при теоретически необходимом количестве воздуха в горелочных устройствах ($\alpha=1,0$).

Ключевые слова: топочная камера, пылеугольное топливо, вихревые горелки, численное моделирование, нагрузка

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

Для цитирования: Влияние изменения нагрузки котельного агрегата на топочные процессы / А.В. Гиль, К.И. Мальцев, Н.В. Абрамов, А.С. Заворин, А.В. Старченко // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 10. – С. 32–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778

UDC 621.181
DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778

Impact of boiler unit load changes on furnace processes

A.V. Gil¹✉, K.I. Maltsev¹, N.V. Abramov¹, A.S. Zavorin¹, A.V. Starchenko²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

✉ andgil@tpu.ru

Abstract. Relevance. The need to assess the stability of combustion, thermal stress and nitrogen oxides (NO_x) emission during load reduction of a steam boiler. Since renewable energy sources and nuclear power plants will receive great attention in the future, coal-fired thermal power plants are to operate at reduced loads, so it is important to investigate the reliability of operation and environmental parameters of the boiler unit in case of load adjustment. **Aim.** To investigate pulverized coal fuel burnout, temperature parameters and NO_x emission at 50% reduction of boiler unit load in the base configuration and taking into account installation of tertiary blast nozzles. **Objects.** Furnace chamber of a natural circulation boiler unit with steam capacity of 220 t/h in the baseline layout and with tertiary air nozzles. **Methods.** The package of application programs FIRE-3D for numerical study was applied. Combustion of pulverized coal fuel is a complex physical and chemical process, therefore the interaction of gas flow and solid particles was modeled using Eulerian and Lagrangian schemes, respectively. In the gas phase, the combustion of volatiles and CO with further combustion of carbon residue are modeled. NO_x emission is modeled using post-treatment models including formation of fast, fuel and thermal nitrogen oxides. **Results.** Temperature fields, flow characteristics, NO_x emissions for different loads of the furnace chamber of the boiler unit with steam capacity of 220 t/hour are obtained on the basis of numerical modeling. The authors have obtained quantitative estimations of furnace environment parameters corresponding to several levels of boiler load reduction up to 50% of the nominal one. Installation of four tertiary blast nozzles allows reducing NO_x emissions by 12.75% at theoretically required amount of air in burner devices ($\alpha=1.0$).

Keywords: furnace chamber, pulverized coal fuel, vortex burners, numerical modeling, load

Acknowledgements: The research was carried out under the support of the grant of the Russian Science Foundation (Project no. 23-29-00274, <https://rscf.ru/project/23-29-00274>).

For citation: Gil A.V., Maltsev K.I., Abramov N.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Impact of boiler unit load changes on furnace processes. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 10, pp. 32–42. DOI: 10.18799/24131830/2024/10/4778

Введение

Угольные электростанции генерируют около 25 % мирового производства электроэнергии [1], а в странах СНГ этот показатель составляет от 20 до 70 % [2]. Пылеугольные котлы с факельным сжиганием широко распространены и используются на большинстве угольных электростанций благодаря своей высокой эффективности и хорошей технологической организации сгорания топлива. На протяжении всей своей истории данные установки подвергались постоянному совершенствованию и по мере эволюции повышались параметры эффективности, а также экологические составляющие работы.

Развитие топливно-энергетического комплекса ставит новые задачи перед угольной энергетикой, в частности, развитие возобновляемой энергетики вынуждает угольные электростанции сталкиваться с несвойственными ранее функциями и принимать меры по регулированию нагрузок в сети [3]. Существующие электростанции спроектированы для работы в базовом графике нагрузки и не могут эффективно работать с быстрыми темпами повышения или понижения мощности, а также в условиях нагрузки ниже минимального порога. Длительное отклонение от проектных условий порождает ряд проблем для пылеугольных котлов. Кроме наиболее распространенных проблем при работе с малой мощностью, таких как затруднения в обеспечении перегрева пара и шлакование поверхностей нагрева, данные агрегаты сталкиваются также со снижением эффективности сгорания и увеличением выбросов NO_x . При этом отсутствуют теоретические рекомендации и технологическая поддержка для

работы с переменной нагрузкой. А разработанные режимные карты не всегда соответствуют возможности долговременного эффективного несения пониженной нагрузки.

Для исследования процессов, происходящих в пылеугольных котлах при работе в различных режимах, как альтернативу натурным экспериментам возможно применение вычислительной гидродинамики, поскольку данный метод позволяет исследовать все необходимые аспекты работы наименее ресурсоёмким способом.

Численное моделирование успешно применяется для исследований пылеугольных котлов с факельным сжиганием, охватывая различные аспекты, такие как взаимодействие газовой фазы и твердых частиц [4, 5], отклонение температуры [6–9], а также полнота сгорания и выбросы NO_x [10–12]. Однако стоит отметить, что относительно небольшое количество исследований посвящено изучению сжигания угля и снижению выбросов NO_x при работе на низкой или переменной нагрузке.

К примеру, в статье [13] рассматривается влияние режимов воздухораспределения и несения нагрузки на процесс сжигания топлива в котле. Для экспериментального и имитационного анализа в исследовании использован котел мощностью 200 МВт, в котором изучалась регулировка подачи третичного и вторичного воздуха для снижения выбросов оксидов азота. Методы включают испытания в холодном состоянии и моделирование для анализа воздушного потока и эффективности сгорания, при этом результаты показывают значительное снижение концентрации NO_x при различных

условиях нагрузки и распределения воздуха. Исследование подчеркивает важность оптимизации распределения воздуха при изменении нагрузки для повышения тепловой эффективности и снижения выбросов в угольных котлах.

В работе [14] разработана трехмерная модель для прогнозирования сложного процесса в двухфазных турбулентных потоках в котле с тангенциальным расположением горелок. В результате правильно предсказано влияние различных рабочих условий (выключение горелок и изменение нагрузки котла) на процессы горения.

Исследование [11] сосредоточено на анализе работы котла на низкой нагрузке, по мнению авторов этого исследования, использование численных методов в котлах, работающих на пылеугольном топливе, позволяет достичь высокого понимания сложных газодинамических процессов, обоснованно прогнозировать различные макроскопические явления и рассмотреть большое количество вариантов для оптимизации работы систем преобразования энергии.

В исследованиях [15, 16] изучена стабильность горения и характеристики выбросов NO_x для условий работы с различной нагрузкой в пылеугольных котлах разной мощности. При использовании математических моделей построена численная модель, удовлетворяющая характеристикам реального прототипа, проведены сравнения и оценка ключевых параметров, таких как поле скоростей, температура, состав газа в топке и выбросы NO_x на выходе из котла. Основываясь на оптимальном расположении горелки и соотношении подачи воздуха, авторы сопоставили влияние характеристик сгорания при различных значениях избытка воздуха. Установлено, что высокий избыток воздуха увеличивал количество NO_x , в то время как температура горения в камере сгорания значительно снижалась.

Также особое внимание уделяется перераспределению воздуха как в основных горелочных устройствах [17], так и между основными горелочными устройствами и соплами третичного дутья, устанавливаемыми выше горелок, с целью выявления изменения в топочных процессах при изменении нагрузки для обеспечения надежной, энергоэффективной и экологичной работы котлов [18, 19].

В соответствии с вышеизложенным и тенденциями публикуемых исследований в данной работе рассмотрены изменения гидродинамики, выгорания полифракционного пылеугольного топлива, концентраций составляющих веществ газовой фазы в объеме топочной камеры парового котла при изменении нагрузки от 100 до 50 %. Наряду с этим проведен анализ топочных процессов при наличии сопел третичного дутья.

Объект исследования

Рассмотрен котельный агрегат П-образной компоновки, работающий на каменном кузнецком угле марки Д, с номинальными параметрами: паропроизводительность 220 т/час, давление пара 9,8 МПа, температура перегретого пара 540 °С. Топочная камера имеет форму прямоугольной призмы с размерами в сечении 9536×6656 мм, высотой 22800 мм (рис. 1), сформирована вертикальными трубными экранными поверхностями с естественной циркуляцией. В нижней части топки располагается холодная воронка для выхода твердого шлака, в верхней части на тыльном экране выполнен аэродинамический выступ для улучшения аэродинамики газового потока на выходе из топки и для частичного затенения ширмового пароперегревателя.

Вихревые горелочные устройства располагаются на боковых стенах, по три на каждой стене. Горелки установлены по углам треугольника вершиной вниз (рис. 1, а). С целью уменьшения присосов горелочные устройства приварены к экранным поверхностям и при тепловых расширениях перемещаются вместе с ними.

Пылеугольное топливо подается в горелочные устройства пылепитателями из бункера пыли и далее транспортируется первичным воздухом, поступающая в центральный кольцевой канал и образуя на выходе закрученный пылевоздушный поток. Вторичный воздух проходит через периферийный кольцевой канал с лопаточным завихрителем.

С целью снижения генерации NO_x рассматривается модифицированный вариант топочной камеры с учетом сопел третичного дутья, установленных над основными горелками (рис. 1, б). На высотной отметке 10900 мм установлены четыре сопла, по два на каждой из боковых стен. Размеры выходного сечения каждого из сопел составляют 500×242 мм.

Кузнецкий уголь марки Д широко распространен на ТЭС отечественного энергетического комплекса, поскольку имеет умеренную зольность и влажность при высоком выходе летучих веществ, что обеспечивает устойчивое воспламенение на номинальной нагрузке. Теплотехнические характеристики кузнецкого угля на рабочую массу представлены в таблице.

Таблица. Теплотехнические характеристики угля

Table. Thermotechnical specifications of coal

Параметр/Parameter	Значение/Value
Зольность/Ash content, %	10,2
Влажность/Moisture content, %	17,6
Содержание углерода/Carbon content, %	56
Содержание водорода/Hydrogen content, %	4
Содержание кислорода/Oxygen content, %	10
Содержание серы/Sulfur content, %	0,3
Содержание азота/Nitrogen content, %	1,9
Теплота сгорания, МДж/кг/Calorific value, MJ/kg	20,72

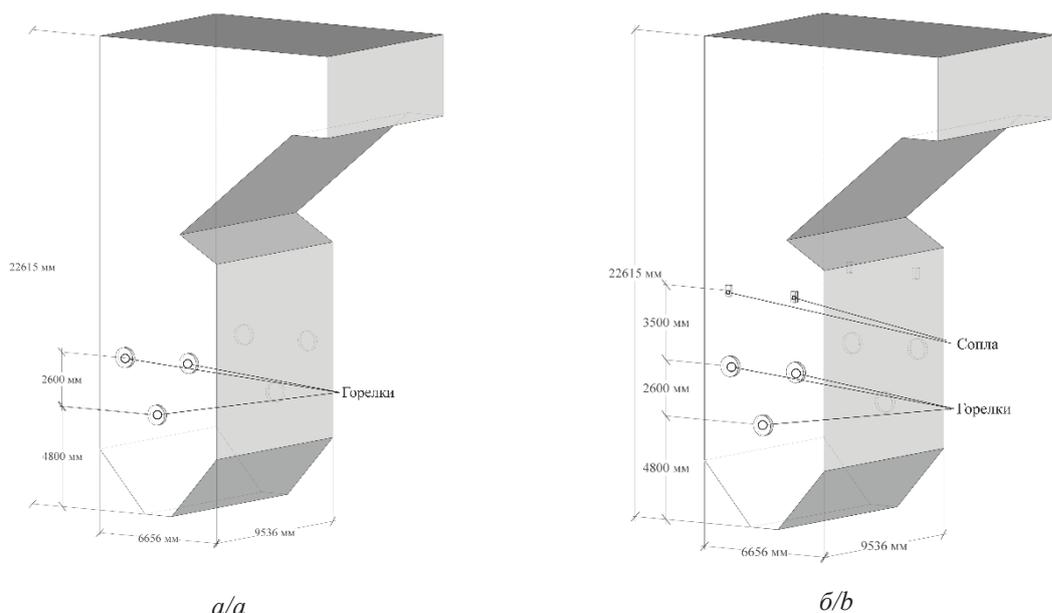


Рис. 1. Геометрическая модель топочной камеры: а) базовая компоновка; б) с соплами третичного дутья
Fig. 1. Geometric model of the furnace chamber: a) base layout; b) with tertiary air nozzles

Математическая модель

В представленной работе для анализа газовой фазы и горения твердых частиц на основе численного моделирования используется эйлерово-лагранжев подход, а взаимодействие между фазами прогнозируется с использованием метода двусторонней связи. Для газовой фазы это описывается усредненными по времени уравнениями Навье–Стокса для глобальной массы, импульса, энтальпии и массовой доли частиц в эйлеровой системе координат [20]. Для связи скорости и давления в уравнениях Навье–Стокса используется SIMPLE-алгоритм [21], а для описания этих уравнений используется стандартная k - ϵ турбулентная модель.

Эти методы включают как классический подход усреднения по времени уравнений Навье–Стокса, так и более современный подход условного усреднения. При использовании методов замыкания момента модель турбулентности используется для обеспечения замыкания напряжений Рейнольдса в уравнениях количества движения, а модель горения – для получения усредненных по времени скоростей реакции в уравнениях непрерывности для частиц и энергии. Модель турбулентности k - ϵ является наиболее широко используемой моделью для получения напряжений Рейнольдса [22, 23]. В этой модели решаются два уравнения переноса, аналогичные другим уравнениям движения: одно для турбулентной кинетической энергии (k), а другое для скорости диссипации (ϵ) кинетической энергии. Значения k и ϵ используются с несколькими константами пропорциональности для расчета локальных значений вихревой вязкости.

Фазовое движение частиц рассчитывается по второму закону Ньютона в лагранжевой схеме [24],

а метод стохастического слежения Лагранжа используется для расчета индивидуальных траекторий дисперсных частиц пылевидного угля [25].

В качестве механизма деволатилизации принята односкоростная модель типа Аррениуса. Горение угля моделируется с учетом как кинетического, так и диффузионного механизмов. Модель, ограниченная кинетикой/диффузией, предполагает, что два механизма действуют одновременно, и их эффект взвешивается для определения скорости горения.

Моделирование генерации NO_x выполнено на основе модели постобработки, в которой учитываются химические реакции образования быстрых, топливных и термических оксидов азота [26]. В основе модели положен кинетический механизм генерации NO_x с учетом конвективно-диффузионного переноса. Суммарные реакции, описывающие генерацию NO_x при выгорании пылеугольного топлива, учитывают пиролиз угольных частиц, гетерогенное горение углеродного остатка и образование оксидов азота.

Расчетная область моделирования состоит из объема топочной камеры, горелочных устройств и сопел третичного дутья. При этом для снижения вычислительной мощности и пульсаций значений расчетных параметров горелочные устройства представлены в виде колец на стенах топочной камеры. Расчетная сетка в районах расположения горелок и сопел третичного дутья постепенно сгущается с учетом градиентного изменения параметров.

Коэффициент избытка воздуха при проведении численных экспериментов на различных нагрузках составлял 1,2, хотя в реальности при снижении нагрузки коэффициент избытка воздуха увеличива-

ется. В вариантах с установкой сопел доля третичного воздуха составляла 0,2 во всех случаях.

Расход топлива при 100 % нагрузке 7,8 кг/с, скорость первичного воздуха 20,0 м/с, а вторичного воздуха 25,5 м/с. Температура первичного воздуха 70 °С, вторичного и третичного 380 °С.

Для оценки сеточно-независимого решения были рассмотрены варианты с 104760, 271760 и 516344 ячейками. Из результатов сравнительного анализа среднеинтегральных температур по высоте топочной камеры определено, что наибольшая разность температур между первым и вторым вариантами составляет 100 °С, а между вторым и третьим – 30 °С. Таким образом, для моделирования была выбрана сеточная система с 104760 ячейками, обеспечивающая баланс между числовой точностью и вычислительными затратами.

Результаты исследования

Уделяя основное внимание влиянию различных нагрузок на процессы горения пылеугольного топлива и эмиссию NO_x , численное моделирование проведено для диапазона нагрузок от 100–50 % с шагом в 10 %. В качестве основных численных экспериментов к рассмотрению приняты варианты 100, 80 и 50 %. При нагрузке в 50 % нижний ярус горелок отключался. В вариациях с установкой сопел третичного дутья коэффициент расхода воздуха в основных горелках оставался постоянным со значением 1,0.

На рис. 2 представлены результаты моделирования интенсивности скоростного потока и векторное поле в продольном сечении топочной камеры, из которых видно, что с увеличением нагрузки наблюдается возрастание скорости потока. В частности, при нагрузке в 50 % скорость составляет от 2 до 5 м/с (рис. 2, а), соответственно, это препят-

ствует эффективному перемешиванию топлива с воздухом и снижает теплообмен. Возрастание нагрузки приводит к большему заполнению восходящим потоком сечения топочной камеры, положительно влияя на снижение неравномерности потоков в целом по объему топочной камеры. При 100 % нагрузке скорость высокотемпературных продуктов сгорания составляет от 4 до 13 м/с (рис. 2, в), что усиливает теплообмен и способствует выгоранию пылеугольного топлива.

Установка сопел третичного дутья приводит к снижению скорости потока в нижней части топочного объема до уровня их расположения, что в совокупности со снижением доли окислителя в зоне горелочных устройств еще более интенсивно влияет на снижение выгорания топлива и теплообмен (рис. 3). Также стоит отметить, что при наличии сопел третичного дутья вблизи аэродинамического выступа не обеспечивается более полное омывание продуктами сгорания и, соответственно, эффективный теплообмен поверхностей нагрева, расположенных в верхнем углу топочной камеры. Таким образом, наличие сопел третичного дутья увеличивает неравномерность тепловосприятия по стенам топочной камеры и в дальнейшем по ступеням пароперегревателя.

Распространение струй из сопел третичного дутья, представленное на рис. 4, показывает достаточно полное их проникновение в топочный объем по ширине топки, что способствует обеспечению окисления продуктов неполного горения и коксового остатка. С ростом нагрузки интенсивность проникновения струй третичного воздуха возрастает так, что при номинальной нагрузке происходит столкновение встречно-направленных потоков (рис. 4, в).

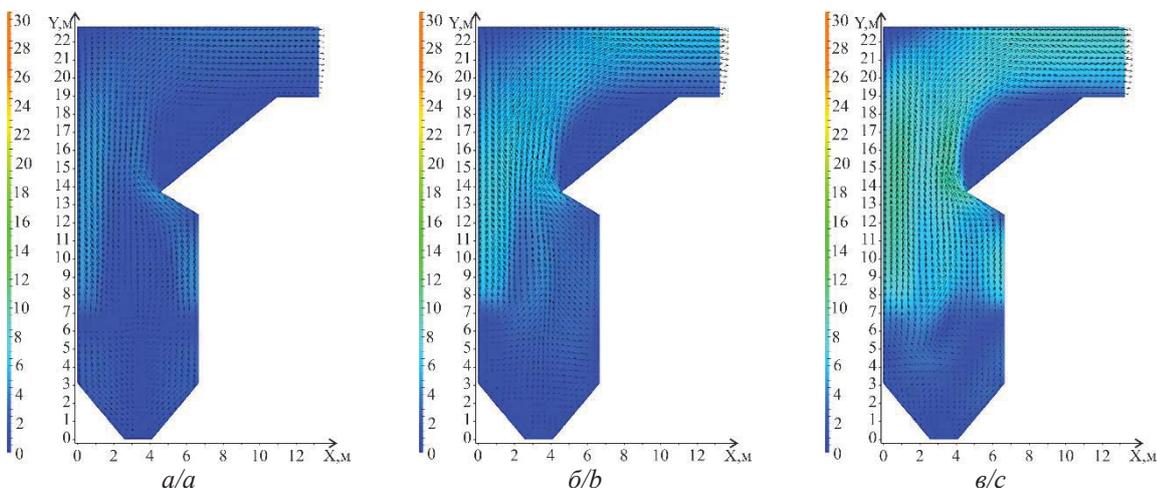


Рис. 2. Распределение скоростей (м/с) в продольном сечении топочной камеры: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 2. Velocity distribution (m/s) in the longitudinal section of the furnace chamber: a) 50% load; b) 80% load; c) 100% load

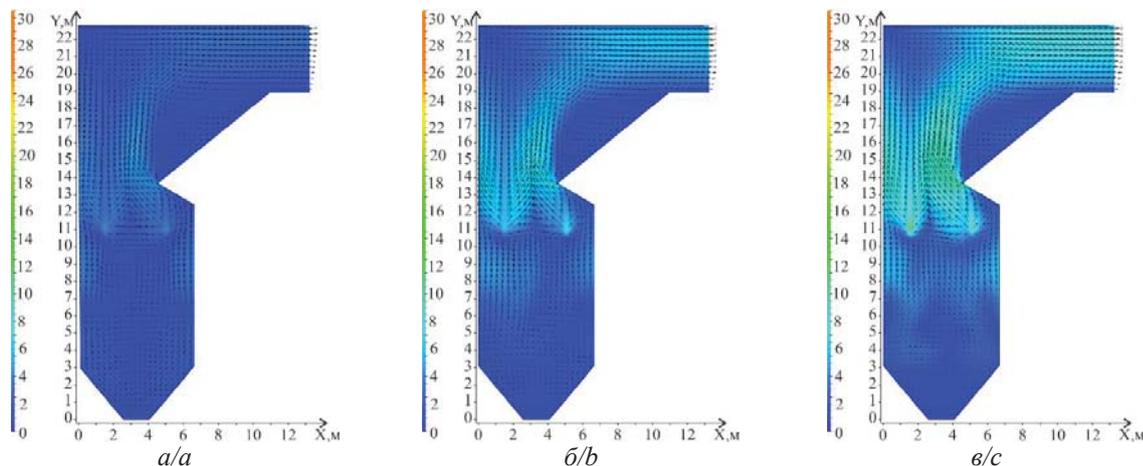


Рис. 3. Распределение скоростей (м/с) в продольном сечении топочной камеры с соплами третичного дутья: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 3. Velocity distribution (m/s) in the longitudinal section of the furnace chamber with tertiary air nozzles: а) 50% load; б) 80% load; в) 100% load

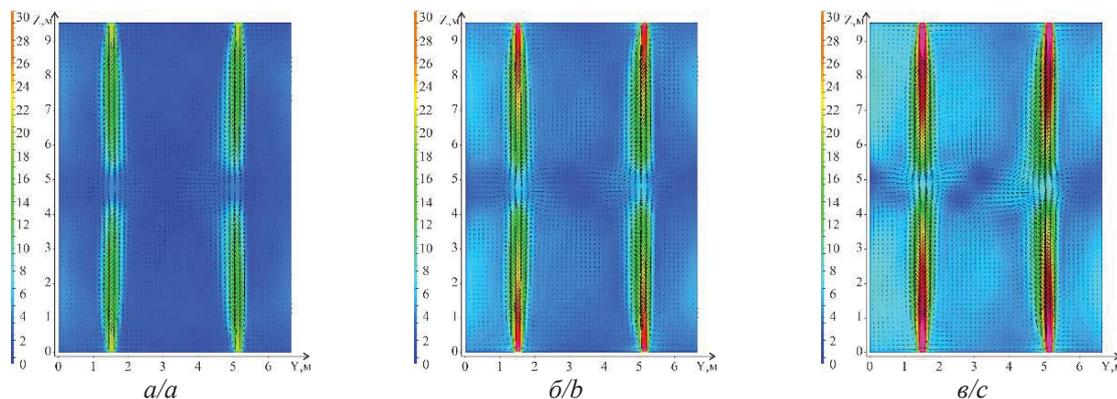


Рис. 4. Распределение скоростей (м/с) в горизонтальном сечении топочной камеры на уровне сопел третичного дутья: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 4. Distribution of velocities (m/s) in the horizontal section of the furnace chamber at the level of tertiary air nozzles: а) 50% load; б) 80% load; в) 100% load

Контуры температур в топочном объеме представлены на рис. 5, 6. В целом при различной нагрузке и в вариантах с соплами третичного дутья (рис. 6) и без сопел (рис. 5) в зоне холодной воронки температура имеет более низкое значение, а в области расположения горелочных устройств при окислении топлива выделяется большое количество тепла и температура достигает максимальных значений. В дальнейшем вследствие теплообмена между высокотемпературными продуктами сгорания и экранами топочной камеры температура постепенно снижается.

При нагрузке 50 % зона активного горения имеет незначительные размеры, а с ростом нагрузки ядро горения с однородной температурой заполняет больший объем топочной камеры. Влияние различных по нагрузке режимов работы на температуру в основном отражается в большем отличии температуры дымовых газов вблизи выхода из горе-

лок. По мере увеличения нагрузки температура возле выхода из горелок заметно возрастает из-за большего количества пылевидного угля и соответствующего увеличения объема воздуха, что приводит к увеличению объемного теплонапряжения. Кроме того, увеличение нагрузки приводит к соответствующему увеличению температуры дымовых газов на выходе из топочной камеры.

При нагрузке 80 % в численном эксперименте без сопел третичного дутья наблюдается неравномерный уровень температур относительно поперечной оси топки на уровне горелок второго яруса (рис. 5, б). Это вызвано интенсивным вовлечением топочной среды в зону эжекции горелочных устройств, расположенных справа от поперечной оси топки. Таким образом, уровень температур с правой стороны выше непосредственно на выходе из горелочных устройств и снижается по мере приближения к сечению по продольной оси, а с левой стороны картина обратная.

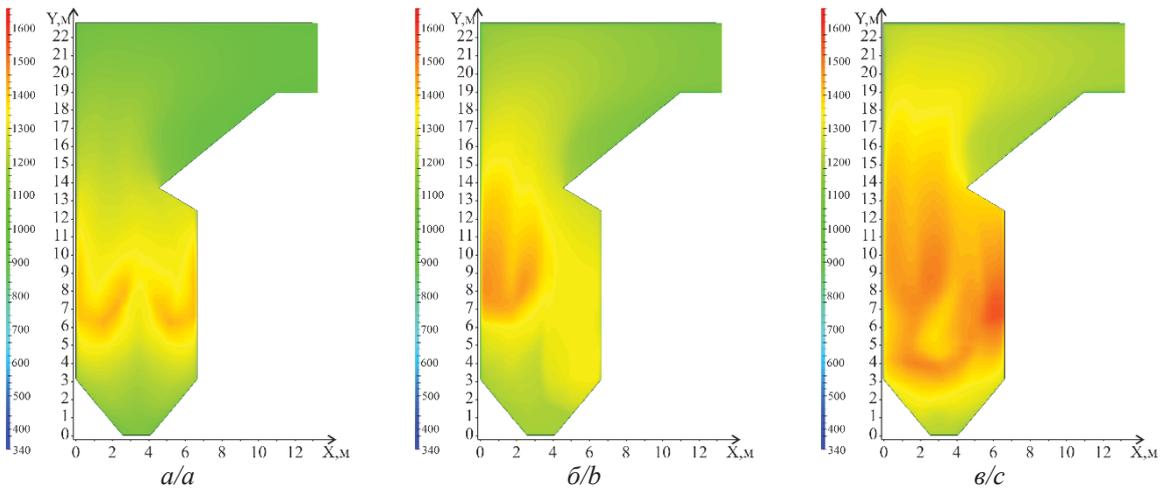


Рис. 5. Распределение температуры (K) в продольном сечении топочной камеры: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 5. Temperature distribution (K) in the longitudinal section of the furnace chamber: a) 50% load; b) 80% load; c) 100% load

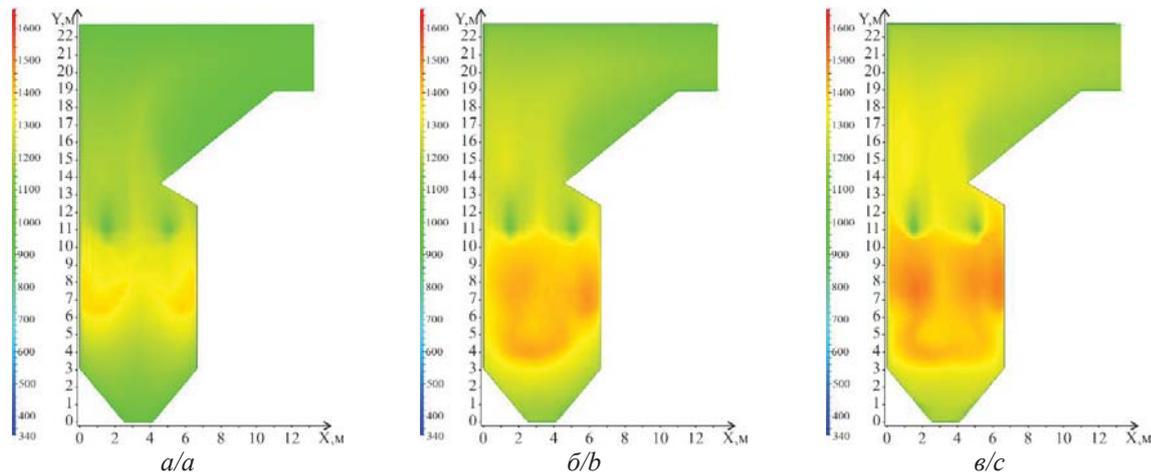


Рис. 6. Распределение температуры (K) в продольном сечении топочной камеры с соплами третичного дутья: а) нагрузка 50 %; б) нагрузка 80 %; в) нагрузка 100 %

Fig. 6. Temperature distribution (K) in the longitudinal section of the furnace chamber with tertiary air nozzles: a) 50% load; b) 80% load; c) 100% load

Действие сопел третичного дутья приводит к снижению интенсивности окисления и выгорания пылеугольного топлива на выходе из горелочных устройств, поскольку помимо снижения доли кислорода, подаваемого в горелочные устройства, уменьшается и параметр крутки. Соответственно уменьшается как само ядро горения, так и уровень температур в его объеме. Стоит отметить, что при нагрузке в 80 % (рис. 6, б) неравномерность температурного уровня снизилась по сравнению с базовым вариантом (рис. 5, б). Температура на выходе из топочной камеры с соплами третичного дутья снижается вследствие значительного количества относительно холодного воздуха на выходе из сопел.

На рис. 7 представлены моделируемые температуры и концентрации NO_x , усредненные по сечени-

ям на различных высотах и при различных нагрузках котельного агрегата. В целом при рассмотрении профилей температур по высоте топочной камеры в базовом варианте и с установкой сопел третичного дутья можно отметить следующее: в нижней части топочной камеры наблюдается низкий уровень температур, который в дальнейшем с ростом высотной отметки увеличивается (рис. 7, а, б). На отметках расположения горелочных устройств и сопел третичного дутья наблюдается снижение температур вследствие поступления относительно холодных больших объемов топливно-воздушной смеси и воздуха. После аэродинамического выступа температуры снижаются вследствие теплообмена с ограждающими поверхностями.

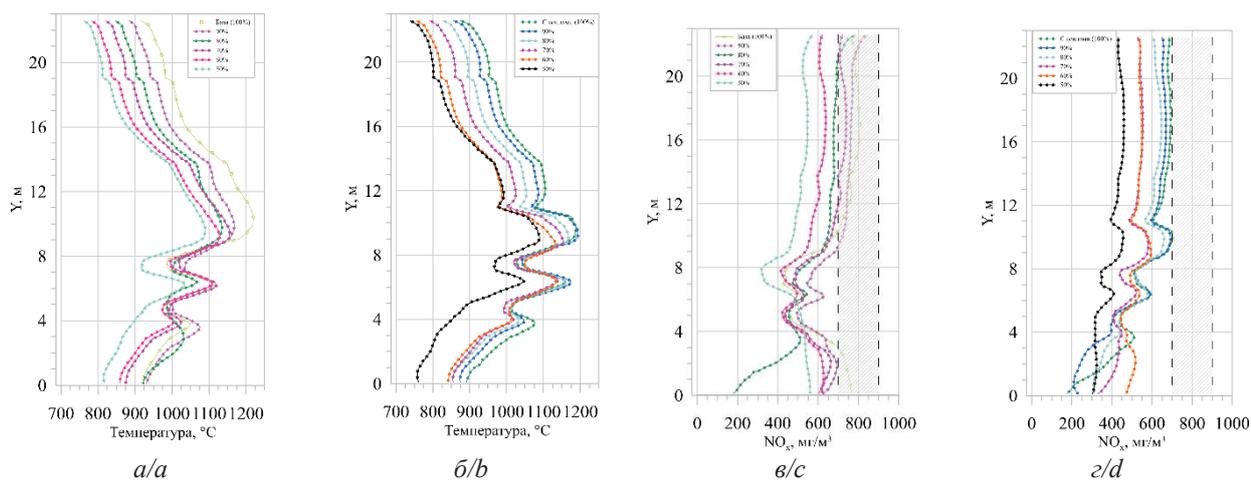


Рис. 7. Распределение среднеинтегральной величины в горизонтальных сечениях по высоте топки: а) температуры в базовом варианте; б) температуры с соплами третичного дутья; в) NO_x в базовом варианте; г) NO_x с соплами третичного дутья

Fig. 7. Distribution of the average integral value in horizontal sections along the height of the furnace: a) temperature in the base design; b) temperature with tertiary air nozzles; c) NO_x in the base design; d) NO_x with tertiary air nozzles

При нагрузке 50 % температура по высоте топки имеет минимальные значения, при этом на уровне середины холодной воронки она составляет 833 °С, на высоте порядка 10 м достигается максимальное значение 1090 °С, а на выходе из топки составляет 840 °С (рис. 7, а). При наличии сопел третичного дутья на данной нагрузке температура еще более снижается (рис. 7, б): на уровне середины холодной воронки наблюдается наибольший градиент (56 °С), в дальнейшем по высоте топочной камеры снижение температуры составляет (10–15 °С).

Максимальное значение среднеинтегральной температуры 1220 °С наблюдается при номинальной нагрузке на высоте 10,5 м, а максимальные значения температуры при 100 % нагрузке достигают 1518 °С для базовой компоновки горелок в топочной камере. Установка сопел третичного дутья приводит к снижению среднеинтегральной температуры на данном уровне до 1200 °С (рис. 7, б), а максимального значения до 1500 °С. Таким образом, при 100 % нагрузке с установкой сопел температура по высоте топочной камеры снижается примерно на 20 °С.

Профили температурных кривых по высоте топки при других исследованных нагрузках с постепенным снижением их значений укладываются между 100 и 50 %. Незначительно выбиваются значения температур в холодной воронке при 90 и 80 % нагрузке в связи с перераспределением потоков от нижнего яруса горелок.

В зоне активного горения азотосодержащие продукты подвергаются окислению, что приводит к образованию NO_x и увеличению их концентрации выше уровня расположения горелочных устройств (рис. 7, в, г). При базовой компоновке эмиссия NO_x снижается после высотной отметки 10 м во всех исследованных вариантах. Аналогично, как и с

температурным уровнем по высоте топочной камеры, наибольшая концентрация NO_x наблюдается при 100 % нагрузке, а наименьшая – при 50 %, и на выходе из топки имеет значение 800 и 544 мг/м^3 соответственно при приведении к коэффициенту избытка воздуха 1,4.

Наличие сопел третичного дутья позволяет снизить содержание оксидов азота в топочном объеме (рис. 7, г). В частности, после высотной отметки 8 м наблюдается рост содержания NO_x , но на уровне расположения сопел концентрация скачкообразно снижается, и эмиссия оксидов азота затухает. При 100 % нагрузке концентрация NO_x составляет 698 мг/м^3 .

Заштрихованная область в диапазоне 703–992 мг/м^3 , показанная на рисунке 7, в, г, отражает диапазон данных с испытаний котельного агрегата БКЗ-220-100 при номинальной нагрузке и сжигании исследуемого угля. Измерение концентрации NO_x проводилось за пароперегревателем. Соответственно, можно констатировать, что полученные численные данные хорошо согласуются с натурными испытаниями, а установка сопел третичного дутья по принятой схеме позволит довести выбросы NO_x до нижнего уровня, фиксированного на станции.

Заключение

Проведено численное исследование характеристик потока, температуры и концентрации компонентов при различных нагрузках в топке котельного агрегата паропроизводительностью 220 т/час, а также при установке сопел третичного дутья с одинаковым коэффициентом расхода воздуха в зоне горелочных устройств (1,0). На основании полученных результатов сделаны следующие выводы.

При снижении нагрузки происходит уменьшение скорости потоков, размера ядра горения и температуры продуктов сгорания. Несмотря на данное изменение параметров топочного процесса, стабильность горения сохраняется даже при перераспределении части вторичного воздуха на третичное дутье.

При этом выявлено, что при снижении нагрузки возможно неравномерное распределение потоков в области второго яруса горелок, исходящее от нижних горелочных устройств, и интенсивное их вовлечение в область эжекции горелок с существенным увеличением угла раскрытия факела горелоч-

ных устройств второго яруса. Впоследствии это приводит к неравномерности распределения температурных полей в топочном объеме. Данный эффект наблюдался на нагрузках 80 и 90 % в базовой компоновке.

Наличие сопел третичного дутья приводит к значительному снижению температурного уровня в топочном объеме и на выходе из топки, это позволяет снизить выбросы оксидов азота, согласно предложенной компоновке сопел, на 12,75 %.

Полученные результаты численного моделирования имеют хорошее согласование с натурными испытаниями котельного агрегата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прогноз и развитие энергетики мира и России 2019 / под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. – М.: ИНЭИ РАН-Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019. – 210 с.
2. Тумановский А.Г. Перспективы развития угольных ТЭС России // Теплоэнергетика. – 2017. – № 6. – С. 3–13.
3. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China / Y.J. Gu, J.X. Dong, C. Chen, Z. Wang, Q.Q. Li // Renewable & Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 54. – P. 723–731.
4. Sun W., Zhong W., Echehki T. Large eddy simulation of the interactions between gas and particles in a turbulent corner-injected flow // Advanced Powder Technology. – 2019. – Vol. 30. – № 10. – P. 2139–2149.
5. Sun W., Zhong W., Yu A. Gas-particle turbulent flow of foursquare tangential jets in a simplified pulverized-coal firing boiler // Advanced Powder Technology. – 2018. – Vol. 29. – № 6. – P. 1463–1473.
6. Numerical and experimental investigations on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NO_x, tangentially fired pulverized coal boiler / H. Park, S. Baek, Y. Kim, T.H. Kim, D. Kang, D. Kim // Fuel. – 2013. – Vol. 104. – P. 641–646.
7. Numerical investigation of low NO_x combustion strategies in tangentially-fired coal boilers / X. Zhang, J. Zhou, S. Sun, R. Sun, M. Qin // Fuel. – 2015. – Vol. 142. – P. 215–221.
8. A compatible configuration strategy for burner streams in a 200 MWe tangentially fired oxy-fuel combustion boiler / J. Guo, Z. Liu, F. Hu, P. Li, W. Luo, X. Huang // Appl Energy. – 2018. – Vol. 220. – P. 59–69.
9. Numerical simulation research on the unique thermal deviation in a 1000 MW tower type boiler / X. Wu, W. Fan, Y. Liu, B. Bian // Energy. – 2019. – Vol. 173. – P. 1006–1020.
10. Combustion optimization and NO_x reduction of a 600 MWe down-fired boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air / W. Yang, B. Wang, S. Lei, K. Wang, T. Chen, Z. Song, C. Ma, Y. Zhou, L. Sun // J Clean Prod. – 2019. – Vol. 210. – P. 1120–1130.
11. CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NO_x emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions / J. Chang, X. Wang, Z. Zhou, H. Chen, Y. Niu // Advanced Powder Technology. – 2021. – Vol. 32. – № 2. – P. 290–303.
12. CFD modeling of flow, combustion and NO_x emission in a wall-fired boiler at different low-load operating conditions / H. Wang, H. Wang, H. Jin, Z. Yang, S. Deng, X. Wu, J. An, R. Sheng, S. Ti // Appl Therm Eng. – 2024. – Vol. 236. – P. 121824.
13. The Effect of Air Distribution Modes and Load Operations on Boiler Combustion / Y. Jin, C. Tian, Y. Xing, M. Quan, J. Cheng, Y. Yan, J. Guo // Advances in Heat Transfer and Thermal Engineering. – Singapore: Springer, 2021. – P. 827–831.
14. Achievement in ultra-low-load combustion stability for an anthracite- and down-fired boiler after applying novel swirl burners: from laboratory experiments to industrial applications / Q. Wang, Z. Chen, L. Li, L. Zeng, Z. Li // Energy. – 2020. – Vol. 192. – P. 116623.
15. A numerical study of a utility boiler tangentially-fired furnace under different operating conditions / S. Belosevic, M. Sijercic, D. Tucakovic, N. Crnomarković // Fuel. – 2008. – Vol. 87. – № 15–16. – P. 3331–3338.
16. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NO_x emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler / Y. Jiang, B. Lee, D.H. Oh, C.H. Jeon // Fuel. – 2021. – Vol. 306. – P. 121727.
17. 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.
18. Numerical study on the effects of primary air ratio on ultra-low-load combustion characteristics of a 1050 MW coal-fired boiler considering high-temperature corrosion / W. Jin, F. Si, S. Kheirkhah, C. Yu, H. Li, Y. Wang // Appl Therm Eng. – 2023. – Vol. 221. – P. 119811.
19. Insights into the causes and controlling strategies of gas temperature deviation in a 660 MW tangentially fired tower-type boiler / L. Ma, X. Chen, J. Liu, Q. Fang, C. Zhang, Y. Li, R. Mao, L. Ren, P. Zhang, G. Chen // Applied Thermal Engineering. – 2021. – Vol. 196. – P. 117297.
20. Rawlins B.T., Laubscher R., Rousseau P. A fast thermal non-equilibrium eulerian-eulerian numerical simulation methodology of a pulverised fuel combustor // Thermal Science and Engineering Progress. – 2023. – Vol. 41. – P. 101842.
21. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas / Z. Li, Q. Yi, Y. Zhang, H. Zhou, Y. Zhao, H. Yi, D. Gao, Y. Hao // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 252. – P. 119656.

22. Evaluation of numerical modeling and combustion characteristics of hydrogen oxy-fuel combustion in a semi-industrial furnace / G. Daurer, S. Schwarz, M. Demuth, C. Gaber, C. Hochenauer // *Fuel*. – 2024. – Vol. 369. – P. 131690.
23. Jingwen L., Yifan Z., Hao Z. Numerical simulation study on combustion characteristics and NOx emission of COREX gas swirl burner and boiler // *Fuel*. – 2023. – Vol. 352. – P. 129128.
24. Validation of a Eulerian–Lagrangian numerical algorithm for simulating ultra-coarse particles transported in horizontal and vertical hydraulic pipes / R. Zhao, Y. Zhang, X. Zhang, X. Wang // *Computers and Fluids*. – 2024. – Vol. 276. – P. 106263.
25. A coupled smoothed finite element method and Lagrangian particle tracking model for three-dimensional dilute particle-laden flows / G. Zhou, T. Wang, C. Jiang, F. Shi, L. Zhang, Y. Wang, B. Yang // *Applied Mathematics and Computation*. – 2024. – Vol. 475. – P. 128726.
26. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140 / N.V. Vizgavljust, A.V. Gil, T.S. Taylasheva, A.V. Starchenko // *EPJ Web of Conferences*. – 2015. – P. 01040.

Информация об авторах

Андрей Владимирович Гиль, кандидат технических наук, доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; angil@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6816-7876>

Кирилл Иванович Мальцев, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; kim3@tpu.ru

Никита Валерьевич Абрамов, аспирант научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; nva12@tpu.ru

Александр Сергеевич Заворин, доктор технических наук, профессор, руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; zavorin@tpu.ru

Александр Васильевич Старченко, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной математики и компьютерного моделирования, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; starch@math.tsu.ru

Поступила в редакцию: 17.07.2024

Поступила после рецензирования: 19.08.2024

Принята к публикации: 10.09.2024

REFERENCES

1. *Prognosis and development of World and Russian Energy 2019* Eds. A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin. Moscow, INEI RAN-Moscow School of Management SKOLKOVO Publ., 2019. 210 p. (In Russ.)
2. Tumanovsky A.G. Prospects for the development of coal-fired power plants in Russia. *Thermal Engineering*. 2017, vol. 6, pp. 3–13. (In Russ.)
3. Gu Y.J., Dong J.X., Chen C., Wang Z., Li Q.Q. Overall review of peak shaving for coal-fired power units in China. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 54, pp. 723–731.
4. Sun W., Zhong W., Echehki T. Large eddy simulation of the interactions between gas and particles in a turbulent corner-injected flow. *Advanced Powder Technology*, 2019, vol. 30 (10), pp. 2139–2149.
5. Sun W., Zhong W., Yu A. Gas-particle turbulent flow of foursquare tangential jets in a simplified pulverized-coal firing boiler. *Advanced Powder Technology*, 2018, vol. 29 (6), pp. 1463–1473.
6. Park H., Baek S., Kim Y., Kim T.H., Kang D., Kim D. Numerical and experimental investigation on the gas temperature deviation in a large scale, advanced low NOx, tangentially fired pulverised coal boiler. *Fuel*, 2013, vol. 104, pp. 641–646.
7. Zhang X., Zhou J., Sun S., Sun R., Qin M. Numerical investigation of low NOx combustion strategies in tangentially-fired coal boilers. *Fuel*, 2015, vol. 142, pp. 215–221.
8. Guo J., Liu Z., Hu F., Li P., Luo W., Huang X. A compatible configuration strategy for burner streams in a 200 MWe tangentially fired oxy-fuel combustion boiler. *Appl Energy*, 2018, vol. 220, pp. 59–69.
9. Wu X., Fan W., Liu Y., Bian B. Numerical simulation research on the unique thermal deviation in a 1000 MW tower type boiler. *Energy*, 2019, vol. 173, pp. 1006–1020.
10. Yang W., Wang B., Lei S., Wang K., Chen T., Song Z., Ma C., Zhou Y., Sun L. Combustion optimization and inhibition of NOx of a 600 MWe down-fired boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air. *J Clean Prod.*, 2018, vol. 210, pp. 1120–1130.
11. Chang J., Wang X., Zhou Z., Chen H., Niu Y. CFD modeling of hydrodynamics, combustion and NOx emission in a tangentially fired pulverized-coal boiler at low load operating conditions. *Adv Powder Technol.*, 2020, vol. 32, pp. 290–303.
12. Wang H., Jin H., Yang Z., Deng S., Wu X., An J., Sheng R., Ti S. CFD modeling of flow, combustion and NOx emission in a wall-fired boiler at different low-load operating conditions. *Appl Therm Eng.*, 2024, vol. 236, p. 121824.
13. Jin Y., Tian C., Xing Y., Quan M., Cheng J., Yan Y., Guo J. The effect of air distribution modes and load operations on boiler combustion. *Advances in Heat Transfer and Thermal Engineering*. Singapore, Springer, 2021. pp. 827–831.

14. Wang Q., Chen Z., Li L., Zeng L., Li Z. Achievement in ultra-low-load combustion stability for an anthracite- and down-fired boiler after applying novel swirl burners: From laboratory experiments to industrial applications. *Energy*, 2020, vol. 192, pp. 116623.
15. Belosevic S., Sijercic M., Tucakovic D., Crnomarković N. A numerical study of a utility boiler tangentially-fired furnace under different operating conditions. *Fuel*, 2008, vol. 87, pp. 3331–3338.
16. Jiang Y., Lee B., Oh D.H., Jeon C.H. Optimization of operating conditions to achieve combustion stability and reduce NOx emission at half-load for a 550-MW tangentially fired pulverized coal boiler. *Fuel*, 2021, vol. 306, pp. 121727.
17. Gil A.V., Zavorin A.S., Koksharev O.M., Vorontsova E.S. Numerical study of the effect of excess primary air on combustion processes in the furnace of an energy boiler with multi-channel swirl burners. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 9, pp. 18–27. (In Russ.)
18. Jin W., Si F., Kheirkhah S., Yu C., Li H., Wang Y. Numerical study on the effects of primary air ratio on ultra-low-load combustion characteristics of a 1050 MW coal-fired boiler considering high-temperature corrosion. *Appl Therm Eng.*, 2022, vol. 221, pp. 119811.
19. Ma L., Chen X., Liu J., Fang Q., Zhang C., Li Y., Mao R., Ren L., Zhang P., Chen G. Insights into the causes and controlling strategies of gas temperature deviation in a 660 MW tangentially fired tower-type boiler. *Appl Therm Eng.*, 2021, vol. 196, pp. 117297.
20. Rawlins B.T., Laubscher R., Rousseau P. A fast thermal non-equilibrium Eulerian-Eulerian numerical simulation methodology of a pulverised fuel combustor. *Therm Sci Eng Prog.*, 2023, vol. 41, pp. 101842.
21. Li Z., Yi Q., Zhang Y., Zhou H., Zhao Y., Yi H., Gao D., Hao Y. Numerical study and design strategy for a low emission coke oven system using oxy-fuel combustion of coke oven gas. *J Clean Prod.*, 2019, vol. 252, pp. 119656.
22. Daurer G., Schwarz S., Demuth M., Gaber C., Hochenauer C. Evaluation of numerical modeling and combustion characteristics of hydrogen oxy-fuel combustion in a semi-industrial furnace. *Fuel*, 2024, vol. 369, pp. 131690.
23. Liu J., Zhu Y., Zhou H. Numerical simulation study on combustion characteristics and NOx emission of COREX gas swirl burner and boiler. *Fuel*, 2023, vol. 352, pp. 129128.
24. Zhao R., Zhang Y., Zhang X., Wang X. Validation of a Eulerian–Lagrangian numerical algorithm for simulating ultra-coarse particles transported in horizontal and vertical hydraulic pipes. *Comput Fluids*, 2024, vol. 276, pp. 106263.
25. Zhou G., Wang T., Jiang C., Shi F., Zhang L., Wang Y., Yang B. A coupled smoothed finite element method and Lagrangian particle tracking model for three-dimensional dilute particle-laden flows. *Appl Math Comput.*, 2024, vol. 475, pp. 128726.
26. Vizgavljist N.V., Starchenko A.V., Gil A.V., Taylasheva T.S. The processes of formation of nitrogen oxides in the boiler furnace BKZ 320-140. *EPJ Web Conf.*, 2015, vol. 82, pp. 01040.

Information about the authors

Andrey V. Gil, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6816-7876>; angil@tpu.ru

Kirill I. Maltsev, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; kim3@tpu.ru

Nikita V. Abramov, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; nva12@tpu.ru

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; zavorin@tpu.ru

Alexander V. Starchenko, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk State University, 36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; starch@math.tsu.ru

Received: 17.07.2024

Revised: 19.08.2024

Accepted: 10.09.2024