

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ
ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СТУПЕНЧАТОМ СЖИГАНИИ
НИЗКОРЕАКЦИОННОГО УГЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРЯМОТОЧНЫХ ГОРЕЛОК¹

© 2023 г. В. Б. Прохоров^а, *, С. Л. Чернов^а, В. С. Киричков^а, В. Д. Апаров^а

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: ProkhorovVB@mail.ru

Поступила в редакцию 06.02.2023 г.

После доработки 23.02.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Уголь остается одним из главных видов минерального топлива в России, особенно в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах. При этом требования к сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу, в том числе оксидов азота NO_x , ужесточаются как в России, так и во всем мире. В этой связи перспективно применение вихревого способа сжигания угля с помощью щелевых горелок и сопл коллективного действия при ступенчатой подаче воздуха на горение. Однако при сжигании низкореакционного угля возникает необходимость добиться высокой полноты его сгорания, которую можно обеспечить только при правильной организации аэродинамики топки, включающей в себя расположение горелок и сопел, а также при оптимальном распределении долей первичного, вторичного и третичного воздуха. На примере вихревого сжигания тощего кузнецкого угля с использованием прямоточных горелок и сопел рассматривается возможность снижения выбросов оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива. В качестве объекта исследования принят котел паропроизводительностью 500 т/ч с твердым шлакоудалением. Две схемы сжигания угля были выбраны ранее с помощью численного и физического моделирования. Согласно проведенным расчетам обе схемы обеспечивают низкие тепловые потери с механическим недожогом – на уровне 0.7–1.9%. Численное моделирование процесса вихревого горения показало, что высокие максимальные температуры в зоне зажигания топлива при низких избытках воздуха не способствуют образованию оксидов азота, а, наоборот, содействуют их подавлению благодаря повышенной концентрации продуктов пиролиза в основной зоне горения. Температура на начальном этапе горения должна составлять примерно 2000 К, и этот показатель является более важным в сравнении с уменьшением избытков первичного воздуха с 0.3 до менее 0.1.

Ключевые слова: пылеугольные топki, ступенчатое сжигание, вихревое горение, прямоточные горелки и сопла, прямое вдувание, промежуточный бункер пыли, численное моделирование, продукты пиролиза, тепловые потери, механический недожог, оксиды азота

DOI: 10.56304/S0040363623090059

При современных темпах производства электрической и тепловой энергии экономически выгодных разведанных запасов угля хватает не менее чем на 150 лет. Особенно высокая доля угля в общей структуре расхода топлива на ТЭС России наблюдается в Сибирском и Дальневосточном округах РФ. За последние десятилетия требования по сокращению выбросов оксидов азота NO_x стали более жесткими во всем мире. По данным [1] в России норма выбросов NO_x для новых энерго-

блоков мощностью более 300 МВт, работающих на каменных углях, составляет 350 мг/м³. Это близко к стандартам в других странах. В Китае норматив по выбросам NO_x для котлов мощностью более 600 МВт на сверхкритические параметры пара находится в диапазоне 200–300 мг/м³ [2]. В Японии нормы выбросов NO_x при сжигании высокореакционных углей (при большом выходе летучих) в начале 2000-х годов были снижены и составляют менее 300 мг/м³. С 2016 г. в странах Европейского союза нормы выбросов NO_x были уменьшены до 200 мг/м³ на электростанциях мощностью более 500 МВт [3].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>).

В некоторых случаях при сжигании высококачественного, но низкорекреационного угля в вихревых горелках отсутствует возможность обеспечить ожидаемую стабильность пламени, работу на сниженных нагрузках, низкие уровни механического недожога при требуемых уровнях выбросов оксидов азота, а также сжигать альтернативные сорта угля и предотвратить шлакование поверхностей нагрева [4, 5]. Ступенчатое сжигание является одним из эффективных методов сокращения выбросов NO_x . Известно, что тангенциальное вихревое сжигание при угловом расположении щелевых горелок в топке эффективно для снижения выбросов NO_x при ступенчатой подаче воздуха и может использоваться для альтернативных видов угля [6]. Однако поддержание стабильного факела при высокой полноте сгорания низкорекреационного угля с малым содержанием летучих веществ является довольно сложной задачей, особенно при пониженных нагрузках котла.

ЦЕЛЬ И ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Снижение выбросов топливных и термических оксидов азота осуществляется благодаря образованию восстановительной области в основной зоне горения при подаче избыточного воздуха выше нее. Главным недостатком технологии ступенчатой подачи воздуха является взаимосвязь снижения выбросов NO_x и эффективности сгорания топлива. При недостатке кислорода в условиях сравнительно низкой температуры (ниже 1800 К) в зоне горения снижаются интенсивность образования оксидов азота и эффективность сгорания топлива. Напротив, продукты пиролиза угля наряду с самими коксовыми частями могут служить гетерогенным катализатором восстановления NO_x , а степень восстановления может достигать 93% [7, 8]. При этом по условиям эффективного пиролиза температура среды должна быть высокой (1800–2100 К).

Основываясь на этих принципах, авторы [9] разработали горелку с разделением потоков угля. Для угля с малым содержанием летучих веществ была создана многоструйная система сжигания, включающая в себя горизонтальную многоканальную горелку с богатыми/обедненными струями топлива и котел с многоугольной топкой и тангенциальным сжиганием [10]. Было показано, что на ранней стадии горения угля с низким содержанием летучих веществ возможны два способа увеличения концентрации пиролизных газов: повышение концентрации пылевидного угля и степени рециркуляции высокотемпературных дымовых газов для предварительного нагрева первичного воздуха. Было отмечено, что новая прямая многоканальная горелка имеет гораздо больший периметр сечения факела и это облегча-

ет контакт пылевидных частиц угля в концентрированном первичном потоке с горячими дымовыми газами. Исследования горелок проводились для многоугольной топки котла с тангенциальным сжиганием, который представлял собой комбинацию котла с тангенциальным сжиганием и традиционного четырехстенного котла. Первичный пылевоздушный поток совместно со вторичным воздухом образует воображаемый круг в центре топки. Такое расположение улучшает смешивание воздуха и частиц угля во всей топке и обеспечивает требуемую полноту сгорания.

В [11] показано, что наиболее экономичным и эффективным является комбинированный метод исследования, состоящий из изотермического физического моделирования поля скоростей потока в котле с дополнением численного моделирования рабочих параметров реального котла. Такие комплексные исследования пылеугольного котла мощностью 300 МВт после его модернизации продемонстрировали снижение выбросов NO_x на 56% без какого-либо негативного воздействия на рабочие параметры.

Влияние избытка первичного воздуха исследовалось в [12]. Трехмерная CFD-модель была создана для пылеугольного котла мощностью 660 МВт с камерной топкой на базе данных, полученных на действующем котле, и результатов математических расчетов. На каждой стене топки котла располагались действующие верхние, промежуточные и нижние основные горелки. Комплекты сопел вторичного воздуха были установлены над и под каждой основной горелкой, чтобы улучшить смешивание воздуха и частиц угля. Отдельные третичные сопла размещались в верхней области над факелом. Основные горелки и сопла вторичного воздуха были установлены на стенах топки, в то время как сопла третичного воздуха — в четырех углах. При увеличении избытка первичного воздуха с 0.325 до 0.550 общая производительность котла уменьшалась, а тепловой поток за счет излучения снижался на 35.2 МВт. Неблагоприятных последствий, вызванных повышенным содержанием первичного воздуха, можно избежать, если повысить температуру первичного воздуха.

В [2, 13] для промышленных котлов исследовались концентрация NO_x и содержание горючих в золе уноса на выходе из топки. В [14] данные, полученные в [2, 13], сравниваются с результатами исследований на экспериментальной вертикальной топке-трубе, состоящей из двух высокотемпературных электропечей. В первой печи уголь сжигался в условиях среды, обогашенной топливом. Затем в соединении между двумя печами подавался дополнительный воздух. Было показано, что наиболее важным фактором для горения с

низким образованием NO_x является повышение температуры до 1800–2100 К в зоне, обогащенной топливом. Напротив, выбросы NO_x увеличивались с уменьшением температуры ниже 1800 К в зоне, обогащенной топливом. Снижение выбросов NO_x в высокотемпературной обогащенной топливом зоне было обусловлено реакциями их гомогенного восстановления углеводородами (продуктами пиролиза угля). Таким образом, количество NO_x снижалось, когда угли были склонны к образованию продуктов пиролиза угля, т.е. условиями снижения выбросов оксидов азота были повышенная температура и малые избытки воздуха на начальном этапе горения. Увеличение температуры горения способствует реакциям окисления и газификации кокса, что приводит к снижению недожога в золе и повышению эффективности работы котла.

Хорошо изучен процесс образования NO_x при ступенчатом сжигании различных углей в области температур газов 1500–1800 К [15–17]. Влияние свойств угля на эмиссию NO_x при более высокой температуре исследовано в [18]. Существует разница в температурном воздействии при сжигании каменного и суббитуминозного (близкого по свойствам к бурому) углей. Показано, что при увеличении температуры в зоне, обогащенной топливом, выше 1800 К эффективность сжигания каменного угля повышается, а темпы образования NO_x снижаются. Напротив, для суббитуминозного угля с ростом температуры в этой же области концентрация NO_x увеличивалась, а эффективность сгорания снижалась. Это можно объяснить малыми концентрациями образовавшихся во втором случае углеводородов (продуктов пиролиза), что связано с меньшим содержанием в суббитуминозном угле твердого углерода (кокса) и большим содержанием летучих веществ. Таким образом, был сделан вывод, что качественная зависимость темпов образования оксидов азота от повышения температуры определяется количеством образовавшихся продуктов пиролиза угля. Для низкосортных углей (суббитуминозных и бурых) скорость образования продуктов пиролиза была меньше, чем для каменных углей [18].

Проведены натурные испытания модернизированного котла мощностью 330 МВт, работающего на низкорекреационном угле со ступенчатой подачей воздуха, с последующим численным моделированием этого промышленного эксперимента [19]. Показано, что для котла со встречно расположенными трехъярусными горелками при подаче обогащенной топливом смеси в центр потока температура газов на выходе из топки и механический недожог снижаются по сравнению с показателями до модернизации котла. После модернизации котла достигнут КПД выше 91% при

различных нагрузках и сокращены выбросы NO_x на 35.3% при номинальной нагрузке. При этом в области боковых стен топки наблюдаются относительно высокие концентрации кислорода, что позволяет предотвратить высокотемпературную коррозию и шлакование экранов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СЖИГАНИЯ УГЛЯ

При разработке эффективной схемы сжигания низкорекреационного каменного угля были приняты следующие решения, вытекающие из ранее приведенных данных:

- достижение максимальных температур в начальной зоне горения угольной пыли при минимальных избытках первичного воздуха;

- задержка смешения вторичного воздуха с топливным потоком и подача третичного воздуха на заключительной стадии сгорания в хвостовую часть пламени;

- внутренняя рециркуляция раскаленных дымовых газов в корень факела, образованного струями из горелок и сопл;

- рассредоточение ядра пламени в зоне основного горения для снижения в ней максимальной температуры;

- обеспечение раннего воспламенения угольной пыли;

- значительный наклон горелок с угольной пылью вниз для увеличения периметра воспламенения и времени нахождения продуктов сгорания в зоне высоких температур.

Учитывались еще два принципа, которые были получены в более ранних работах, а именно создание в топке условий для образования нескольких вихрей, соседние из которых вращаются в противоположных направлениях, и избегание зон повышенного динамического давления факела на экранные трубы.

В процессе исследований выполнен анализ влияния различных факторов при ступенчатом сжигании низкорекреационного топлива на образование оксидов азота при нормативном механическом недожоге топлива и надежной работе котла. В настоящей статье рассматриваются схемы сжигания тощего кузнецкого угля для двух основных из применяемых в энергетике типов системы подготовки и подачи угольной пыли в горелки камерной топки: с прямым вдуванием (ПВ) и с промежуточным бункером пыли (ПБП).

На рис. 1 показаны компоновочные схемы горелок и сопл для указанных вариантов. В варианте с ПБП осуществляются подача и сжигание угольной пыли высокой концентрации. В варианте с ПВ в топку подается пылевоздушная смесь с низким избытком первичного воздуха. Техно-

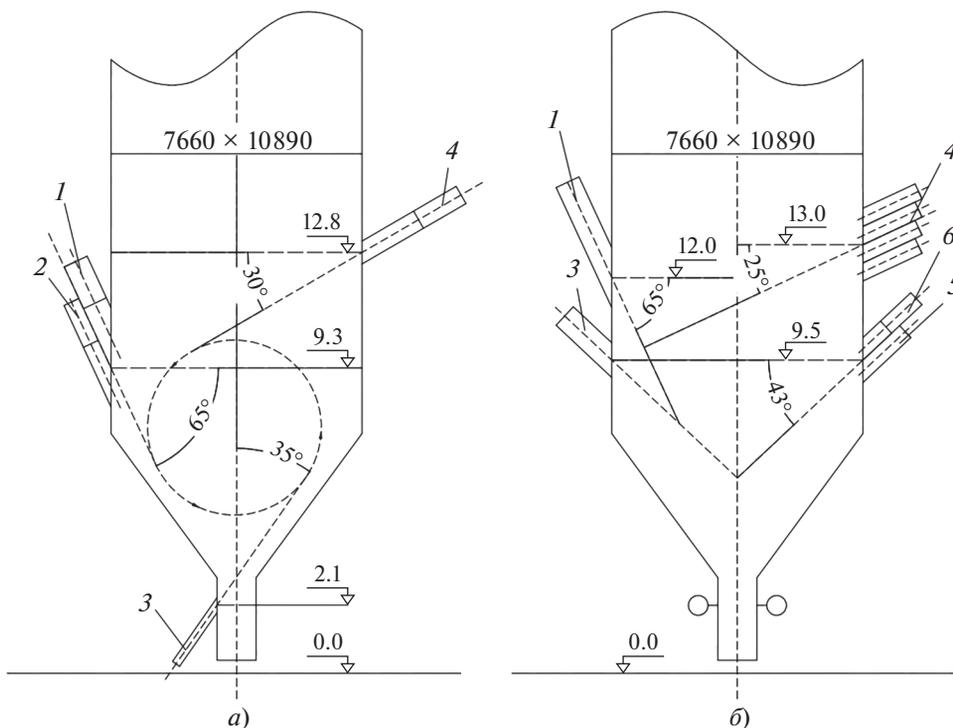


Рис. 1. Схемы расположения горелок и сопел при сжигании угля с прямым вдуванием (а) и промежуточным бункером пыли (б).

1, 2 – пылеугольная и газомазутная горелка; 3, 4 – сопло вторичного и третичного воздуха; 5, 6 – сопло воздуха для отжигания факела от стен и комбинированное (сбросное)

логия прямого вдувания пылевоздушной смеси в топку является наиболее простой и дешевой благодаря отсутствию промежуточных бункеров и пылеконцентраторов. Обе схемы могут быть использованы при реконструкции котлов либо при строительстве новых котельных агрегатов. Они должны обеспечивать устойчивое горение топлива с допустимыми потерями с механическим недожогом, надежной работой топочных экранов и низкими выбросами NO_x после перевода котлов на альтернативные виды топлива или при переходе с жидкого на твердое шлакоудаление.

В качестве объекта моделирования был выбран котел производительностью 500 т/ч пара, работающий в режиме твердого шлакоудаления на каменном угле, элементный состав и характеристики которого приведены далее:

Состав, %:	
углерод.....	68.62
водород.....	3.35
азот.....	1.75
сера.....	0.23
кислород.....	2.13

Зольность, %.....	16.92
Влажность, %.....	7.0
Выход летучих на горючую массу, %.....	16.6
Низшая теплота сгорания на рабочую массу топлива, кДж/кг.....	25 750
Температура, К:	
начала деформации золы.....	1613
размягчения золы.....	1693
начала жидкоплавкого состояния золы....	1753

За период 2016–2018 гг. были проведены качественные и количественные исследования на физической и математической моделях аэродинамики струйных течений, описание которых и результаты испытаний приведены в [20] для варианта с ПВ и в [21] для варианта с ПБП. Анализ результатов показал наличие интенсивного образования вихрей и перемешивание потоков в зоне активного горения. Были исследованы несколько режимов работы и определены оптимальные соотношения долей воздуха в каналах прямооточных горелок и сопел. В 2018 г. было проведено численное моделирование сжигания низкорекреационного топлива в

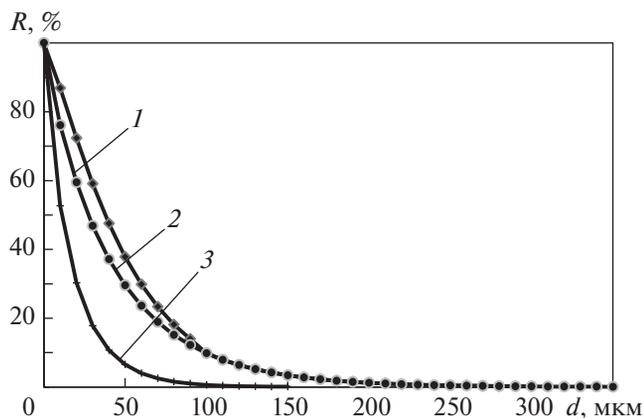


Рис. 2. Зависимость остатков угольной пыли на сите R от диаметра ее частиц d .
1 – валковые среднеходные мельницы (схема с ПВ);
2 – основные горелки (схема с ПБП); 3 – сбросные горелки (схема с ПБП)

разработанных схемах с ПВ и ПБП, целью которых было получить распределения температур, скоростей газов, концентраций продуктов сгорания, выбросов NO_x , определить степень выгорания в топочном объеме и другие характеристики, влияющие на эффективность, надежность и экологическую безопасность работы котла [22, 23]. Верификацию численного моделирования выполняли с помощью качественного сравнения траекторий струй из горелок и сопел с физической изотермической моделью, а температур газов по высоте топки – с результатами позонных расчетов топки.

Численное моделирование образования оксидов азота учитывает термические, быстрые и топливные NO_x . Образование термических NO_x принимается по механизму Зельдовича, быстрых – по механизму Фенимора. При сжигании углей превращение топливного азота в NO происходит через промежуточные вещества, для каменных углей – преимущественно через HCN [24]. В модели также учтено частичное восстановление NO , происходящее при ступенчатом сжигании топлива (ребернинге). При моделировании процесса образования NO приняты следующие настройки:

- промежуточное вещество HCN ;
- массовая доля азота в летучих 0.097;
- степень конверсии азота в летучих 0.5;
- массовая доля азота в коксе 0.0083;
- степень конверсии азота в коксе 0.5.

Влияние турбулентных пульсаций не учитывалось, эквивалентным топливом при моделировании ребернинга являлся CH_4 .

Фракционный состав угольной пыли, поступающей в горелки, определяется системой пыле-

приготовления. Остатки на сите R_{90} приняты из рекомендуемого диапазона в соответствии с размольными устройствами: для схемы с ПВ с валковыми среднеходными мельницами $R_{90} = 14\%$, для схемы с ПБП с шаровыми барабанными мельницами $R_{90} = 11\%$. С использованием уравнений материального баланса угольной пыли пересчитывали изменение фракционного состава основной и сбросной пыли. Было принято, что в схеме с ПБП в основные горелки подается 90% угольной пыли, а в сбросные горелки – 10%. Угольную пыль разбивали по составу на 10 фракций в соответствии с логарифмическим законом, наиболее подходящим для пыли тонкого помола. Интегральная зерновая характеристика угольной пыли приведена на рис. 2.

Выполненные расчеты показали, что обе схемы обеспечивают высокую полноту выгорания низкорекреационного угля: потери с механическим недожогом составили для схемы с ПВ 1.6–1.9%, для схемы с ПБП 0.7–0.8%. Несмотря на высокую полноту сгорания, концентрации оксидов азота находятся на низком уровне: для схемы с ПВ 269 мг/м^3 , для схемы с ПБП 347 мг/м^3 [22]. Нормативные удельные выбросы оксидов азота для котлов, введенных в строй в России после 2001 г. и работающих на каменных углях, составляют 450 мг/м^3 .

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Представляется интересным объяснить более низкие выбросы NO_x для схемы с ПВ по сравнению со схемой с ПБП, применяя приведенные в начале статьи механизмы образования оксидов азота. С этой точки зрения целесообразно рассмотреть температурные поля в горизонтальных сечениях топки. На рис. 3 выделены следующие зоны по высоте топки: начало холодной воронки, уровень пылеугольных горелок, уровень третичного дутья. Видно, что максимальная температура горения для схемы с ПВ выше, чем для схемы с ПБП, и составляет 2010 К против 1962 К. Однако максимумы наступают в разных зонах: для схемы с ПВ – это зона начала холодной воронки, которая обогащена топливом, для схемы с ПБП – это зоны на уровне пылеугольных горелок и третичного дутья, обогащенных кислородом. Максимальная температура зоны, обогащенной топливом, составляет для схемы с ПБП 1755 К. Объясняется это более низким расположением (почти на 3 м) пылеугольных горелок для схемы с ПВ, чем для схемы с ПБП (см. рис. 1), а также концентрированной подачей угля в зону горения для схемы с ПБП. Можно предположить, что в зонах a , z (см. рис. 3) условия для возникновения процесса пиролиза угля существенно лучше в схеме с ПВ, чем с ПБП. В обоих случаях зона обеднена кислоро-

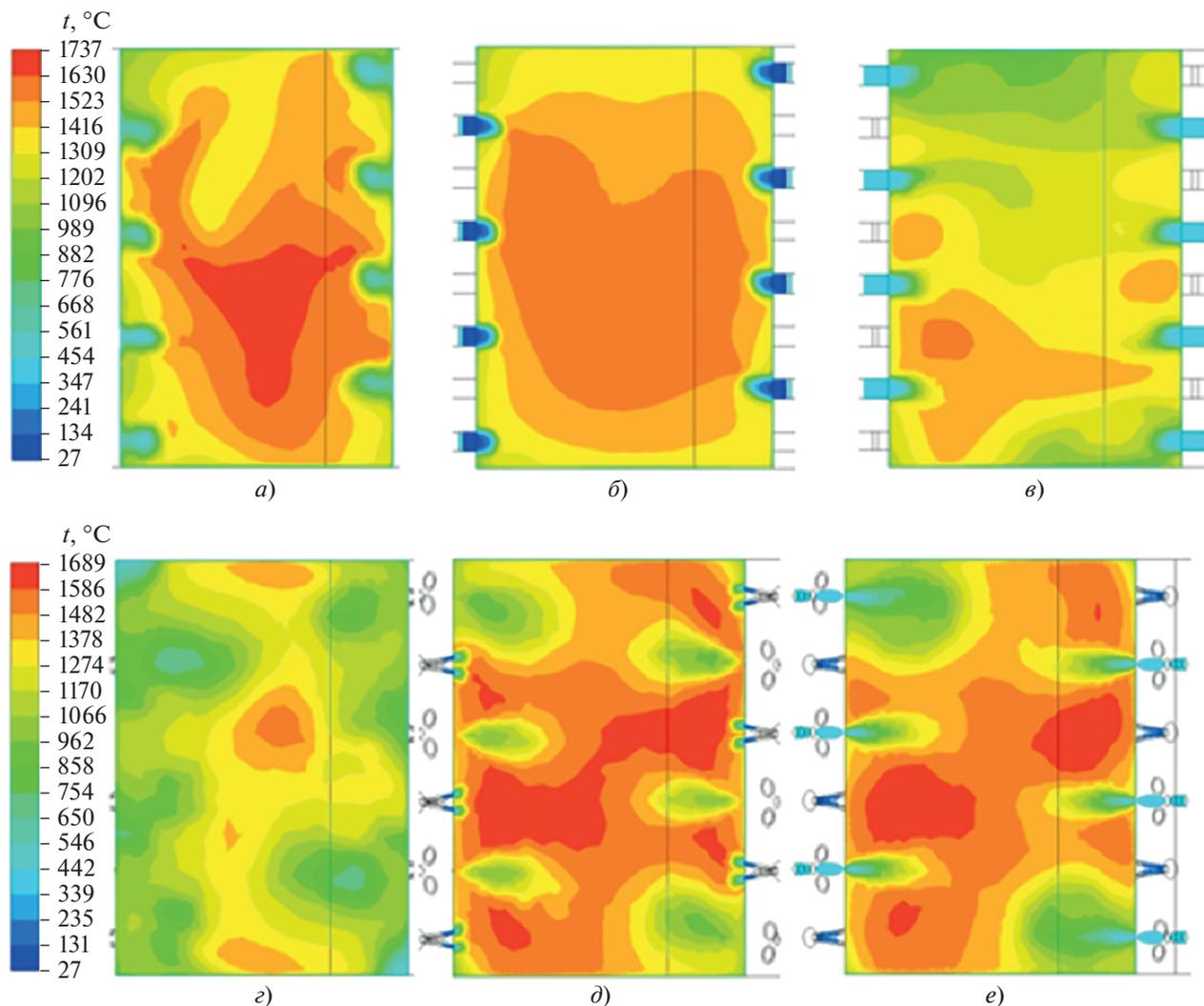


Рис. 3. Температура t в горизонтальных сечениях топки в начале холодной воронки (а, г), на уровне пылеугольных горелок (б, д) и третичного дутья (в, е) в схеме с ПВ (а–в) и схеме с ПБП (г–е)

дом, но температура в схеме с ПВ существенно выше (2010 К), чем в схеме с ПБП (1755 К). Как показано в таблице, избытки первичного воздуха в схеме с ПБП составляли 0.079, что существенно меньше, чем при ПВ, – 0.288. Учитывая, что для схемы с ПБП выбросы NO_x выше по-

чти на 100 мг/м^3 , чем для схемы с ПВ, можно сделать вывод, что уровень температуры в зоне, обогащенной топливом, является основным фактором образования углеводородов пиролиза угольной пыли, которые снижают скорость образования оксидов азота.

Избытки воздуха для схем с ПВ и ПБП при присосах в топку 0.05

Схема	Поток топлива и воздуха (см. рис. 1)					
	1	2	3	4	5	6
ПВ	0.288	0.325	0.081	0.456	–	–
ПБП	0.079	–	0.237	0.366	0.120	0.348

На рис. 4 показаны распределения концентраций некоторых компонентов продуктов сгорания для данных схем: кислорода O_2 , оксида углерода CO и оксидов азота NO_x . Пик образования CO в схеме с ПВ приходится на зону холодной воронки, и можно с большой долей вероятности предположить, что в этой же зоне образуются и другие компоненты неполного сгорания, а именно углеводороды. Распределение кислорода по высоте топки имеет более сложный характер, связанный со ступенчатой подачей топлива, что приводит к

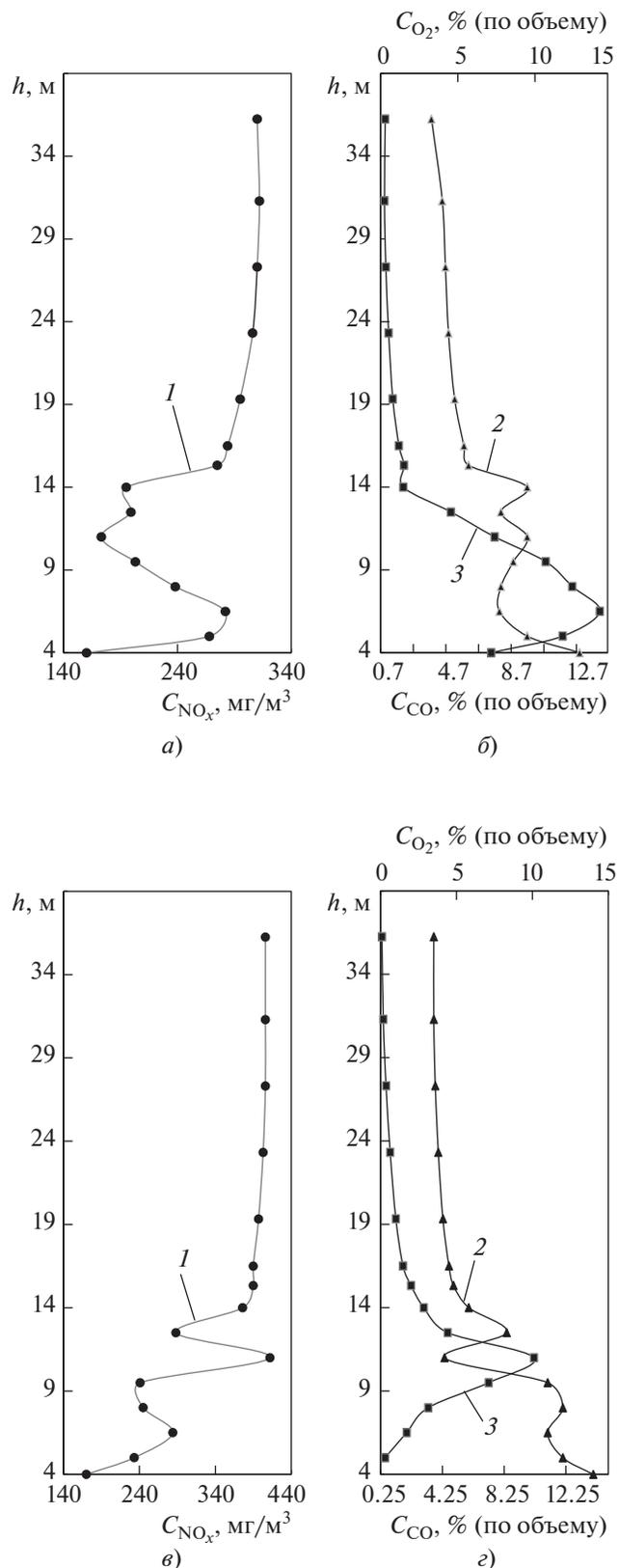


Рис. 4. Зависимость средних по сечению концентраций оксидов азота (1), кислорода (2) и оксидов углерода (3) от высоты топки h для схем с ПВ (а, б) и с ПБП (в, г)

нескольким пульсациям доли воздуха в зоне расположения горелок.

Концентрации NO_x в схеме с ПВ резко уменьшаются в зоне расположения горелок благодаря повышенному содержанию в продуктах сгорания, образовавшихся в зоне начала холодной воронки, продуктов пиролиза угля. В схеме с ПБП картина выгорания топлива качественно иная. Пик концентрации CO приходится на зону расположения горелок, тогда как холодная воронка слабо задействована в процессе горения. Следствием этого является меньшая концентрация углеводородов в промежуточных реакциях горения. В схеме с ПБП в холодной воронке образуется некоторая доля топливных оксидов, связанная с большими локальными избытками воздуха (более 2). Основная часть оксидов азота образуется на уровне горелок.

Сравнение температур газов на выходе из каждой зоны, полученных численным моделированием в ANSYS Fluent с результатами позонных тепловых расчетов, показало их хорошее совпадение (расхождение не более 30°C). В схеме с ПВ положение ядра факела сильно занижено и находится в холодной воронке, что и объясняет снижение температуры газов на выходе из топки на 30°C по сравнению со схемой с ПБП. Зона активного горения в схеме с ПВ более растянута по высоте (примерно на 2 м), чем в схеме с ПБП, что благоприятно для выгорания низкорекреационного топлива.

ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов численного моделирования показал, что при ступенчатом сжигании топлива высокие температуры на этапе зажигания низкорекреационного угля в зоне низких избытков воздуха не только не способствуют образованию оксидов азота, но и приводят к их подавлению.

2. Температура для активного образования продуктов пиролиза (углеводородов) должна быть равна примерно 2000 К. Этот фактор является более значимым для снижения интенсивности образования NO_x , чем уменьшение избытков воздуха на начальном этапе горения с 0.3 до менее 0.1.

3. Сравнение результатов физического и численного моделирования аэродинамики процесса горения в топке котла, наряду с сопоставлением результатов позонного расчета топки, позволило провести успешную верификацию исследования схем с прямым вдуванием и промежуточным бункером пыли. Две рассмотренные схемы сжигания кузнечного тощего угля обеспечивают удельные выбросы оксидов азота и механический недожог топлива ниже установленных в России нормативов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Информационно-технический** справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС-38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2022.
2. **PDA** research on a novel pulverized coal combustion technology for a large utility boiler / W. Fan, Y. Li, Z. Lin, M. Zhang // *Energy*. 2010. V. 35. P. 2141–2148.
3. **Coal** combustion modeling of large power plant NO_x abatement / L.B. Thoma, C. Francisco, P. Stanislas, C. Sebastien, B. Jacques, B. Bernard // *Fuel*. 2007. V. 86. P. 2213–2220.
4. **Effect** of coal blending and particle size on NO_x emission and burnout / H. Maier, H. Spliethoff, A. Kicherer, A. Fingerle, K.R.G. Hein // *Fuel*. 1994. V. 73. P. 1447–1452.
[https://doi.org/10.1016/0016-2361\(94\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-2361(94)90060-4)
5. **Asay B.W., Lahjaily L.D., Hedman P.O.** Effect of coal moisture on burnout and nitrogen oxide formation // *Combust. Sci. Technol.* 1983. V. 35. P. 15–31.
6. **Influence** of combustion system retrofit on NO_x formation characteristics in 300 MWe tangentially fired furnace / L. Shi, Z. Fu, X. Duan, C. Cheng, Y. Shen, B. Liu, R. Wang // *Appl. Therm. Eng.* 2016. V. 98. P. 766–777.
7. **Study** of C-NO_x reaction by using isotopically labeled C and NO_x / P. Chambrion, H. Orikasa, T. Suzuki, T. Kyotany, A. Tomita // *Fuel*. 1997. V. 76. P. 493–498.
8. **Experimental** study of the reduction mechanism of NO emission in decoupling combustion of coal / J. He, W. Song, S. Gao, L. Dong, M. Barz, J. Li, W. Lin // *Fuel Process. Technol.* 2006. V. 87. P. 803–810.
9. **No** smoke burning coal method for control nitrogen oxide and stove and application / J. Li, G. Xu, M. Guo, J. Zhang, Y. Guo, Z. Zhou // *CN, CN 1110776 A[P]*. 1995.
10. **Cold** experimental investigations into gas/particle flow characteristics of a low-NO_x axial swirl burner in a 600-MWe wall-fired pulverized-coal utility boiler / Z. Li, L. Zeng, G. Zhao, J. Li, S. Chen, F. Zhang // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2012. V. 37. P. 104–112.
11. **Numerical** simulation and cold experimental research of a low-NO_x combustion technology for pulverized low-volatile coal / J. Wang, K. Zheng, R. Singh, H. Lou, J. Hao, B. Wang, F. Cheng // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 114. P. 498–510.
12. **Influence** of increased primary air ratio on boiler performance in a 660 MW brown coal boiler / Z. Li, Z. Miao, Y. Zhou, S. Wen, J. Li // *Energy*. 2018. V. 152. P. 804–817.
13. **Richardson M., Shimogori Y., Kidera Y.** Supercritical boiler technology matures. Accessed on 14 March 2011. Available online: http://www.hitachipowersystems.us/supporting-docs/forbus/hpsa/technical_papers/CG2004.pdf ().
14. **Staged** combustion properties for pulverized coals at high temperature / M. Taniguchi, Y. Kamikawa, T. Tatsumi, K. Yamamoto // *Combust. Flame*. 2011. V. 158. P. 2261–2271.
15. **The effect** of air staged combustion on NO_x emissions in dried lignite combustion / J. Wang, W. Fan, Y. Li, M. Xiao, K. Wang, P. Ren // *Energy*. 2012. V. 37. P. 725–736.
16. **Coal** characterization for NO_x prediction in air-staged combustion of pulverized coals / C.K. Man, J.R. Gibbins, J.G. Witkamp, J. Zhang // *Fuel*. 2005. V. 84. P. 2190–2195.
17. **Pulverized** coal combustion: NO_x formation mechanisms under fuel rich and staged combustion conditions / J.O.L. Wendt, D.W. Pershing, J.W. Lee, J.W. Glass // *Symposium on Combustion and Flame, and Explosion Phenomena*. 1979. V. 17. No. 1. P. 77–87.
[https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(79\)80011-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(79)80011-9)
18. **Taniguchi M., Kamikawa Y., Yamamoto K.** Comparison of staged combustion properties between bituminous coals and low-rank coal; Fiber-shaped crystallized carbon formation, NO_x emission and coal burnout properties at very high temperature // *Combust. Flame*. 2013. V. 160. P. 2221–2230.
19. **Combustion** characteristics and NO_x formation of retrofitted low-volatile coal-fired 330 MW utility boiler under various loads with deep-air-staging / S. Li, Z. Chen, E. He, B. Jiang, Z. Li, Q. Wang // *Appl. Therm. Eng.* 2017. V. 110. P. 223–233.
20. **Исследование** аэродинамики топки котла ТПП-210А при переводе его на твердое шлакоудаление и организации вихревого сжигания топлива / Э.П. Волков, В.Б. Прохоров, А.М. Архипов, С.Л. Чернов, В.С. Киричков // *Теплоэнергетика*. 2018. № 10. С. 21–28.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618100120>
21. **Эффективность** использования прямоточных горелок и сопел при реализации твердого шлакоудаления в топке котла ТПП-210А / А.М. Архипов, А.А. Канунников, В.С. Киричков, В.Б. Прохоров, М.В. Фоменко, С.Л. Чернов // *Теплоэнергетика*. 2017. № 2. С. 63–70.
<https://doi.org/10.1134/S0040363617020011>
22. **Исследование** процесса сжигания твердого топлива в топках с прямоточными горелками / Э.П. Волков, В.Б. Прохоров, С.Л. Чернов, В.С. Киричков, А.А. Каверин // *Теплоэнергетика*. 2020. № 6. С. 47–56.
<https://doi.org/10.1134/S0040363620060119>
23. **Furnace** numerical model development for checking the possibility of boiler retrofitting from liquid to dry ash removal / V.B. Prokhorov, S.L. Chernov, V.S. Kirichkov, A.A. Kaverin // *Proc. of the AIP Conf. on Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows (HMTHSF-2019)*. Rybinsk, Russia, 16–18 Oct. 2019. Art. No. 2211. P. 070006-1–070006-8.
24. **Some** aspects of modelling NO_x formation arising from the combustion of 100% wood in a pulverised fuel furnace / L.I. Darvell, L. Ma, J.M. Jones, M. Pourkashanian, N. Williams // *Combust. Sci. Technol.* 2014. No. 186. P. 672–683.

Investigation into the Influence of Temperature on the Formation of Nitrogen Oxides during the Staged Combustion of Low-Reactive Coal with the Use of Direct-Flow Burners

V. B. Prokhorov^{a, *}, S. L. Chernov^a, V. S. Kirichkov^a, and V. D. Aparov^a

^a National Research University Moscow Energy Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: ProkhorovVB@mail.ru

Abstract—Coal remains one of the main types of mineral fuel in Russia, especially in the Siberian and Far Eastern federal districts. At the same time, the requirements for reducing emissions of harmful substances into the atmosphere, including nitrogen NO_x , are becoming tougher both in Russia and around the world. In this regard, it is promising to use the vortex method of coal combustion using slot burners and collective action nozzles with a stepped air supply for combustion. However, when burning low-reactivity coal, it becomes necessary to achieve high combustion efficiency, which can only be ensured with the correct organization of the furnace aerodynamics, including the location of burners and nozzles, as well as with the optimal distribution of the shares of primary, secondary, and tertiary air. Using the example of vortex combustion of lean Kuznetsk coal using direct-flow burners and nozzles, the possibility of reducing nitrogen oxide emissions during staged fuel combustion is considered. A boiler with a steam capacity of 500 t/h with solid ash removal was taken as an object. Two schemes of coal combustion were chosen earlier with the help of numerical and physical modeling. According to the calculations, both schemes provide low heat losses with mechanical underburning, at the level of 0.7–1.9%. Numerical modeling of the vortex combustion process showed that high maximum temperatures in the fuel ignition zone at low air excesses do not contribute to the formation of nitrogen oxides, but, on the contrary, contribute to their suppression due to the increased concentration of pyrolysis products in the main combustion zone. The temperature at the initial stage of combustion should be approximately 2000 K, and this figure is more important than reducing the excess of primary air from 0.3 to less than 0.1.

Keywords: pulverized coal furnaces, staged combustion, vortex combustion, direct-flow burners and nozzles, dust injection, intermediate dust bin, numerical simulation, pyrolysis products, heat losses, mechanical underburning, nitrogen oxides