

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПО ВЫБРОСАМ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ПАРОВОМ КОТЛЕ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ¹

© 2024 г. В. Б. Прохоров^a, *, В. С. Киричков^a, С. Л. Чернов^a, М. В. Фоменко^a

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

*e-mail: prokhorovvb@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2024 г.

После доработки 02.05.2024 г.

Принята к публикации 30.05.2024 г.

Продукты сжигания органического топлива являются одними из основных источников загрязнения атмосферного воздуха. При сжигании органического топлива в атмосферу поступают такие загрязняющие вещества, вредные для здоровья людей, как оксиды азота и серы, летучая зола с частицами негоревшего топлива, оксиды углерода, полициклические ароматические углеводороды, оксиды металлов. Наибольшими выбросами загрязняющих веществ в атмосферу сопровождается сжигание твердого топлива. В 2014 г. произошли значительные изменения в природоохранном законодательстве РФ, которые обязывают энергетические предприятия выполнять не только санитарно-гигиенические нормативы, но и технические и технологические. Для поддержания технологических показателей по удельным выбросам NO_x на котельном оборудовании на нормативном уровне необходимо будет применять в полном объеме первичные методы подавления образования оксидов азота, использовать малотоксичные горелки и схемы сжигания топлива, а в некоторых случаях потребуются дорогостоящая очистка газов от NO_x . На основании статистических данных в качестве прототипа для исследований выбран котел БКЗ-420-140 (Е-420-140). При работе котлов БКЗ-420-140 в заводском исполнении с применением вихревых горелок при сжигании бурого угля концентрация оксидов азота в дымовых газах составляет более 800 мг/м^3 , что существенно превышает действующие нормативы. В целях снижения выбросов оксидов азота при обеспечении высокой эффективности работы котельного оборудования для этого котла предложена схема сжигания твердых топлив с использованием прямоточных горелок и сопл. Показано, что при реализации разработанной схемы сжигания твердого топлива с применением прямоточных горелок и сопл на котлах БКЗ-420-140 можно будет повысить экономическую и экологическую эффективность их работы.

Ключевые слова: прямоточные горелки и сопла, технологические показатели, оксиды азота, численное моделирование, физическое моделирование, механический недожог, факельное сжигание угольной пыли

DOI: 10.56304/S0040363624700280

В 2014 г. были внесены значительные изменения в природоохранное законодательство РФ, в соответствии с которым необходимо выполнение не только санитарно-гигиенических, но и технических и технологических нормативов [1]. Целью этих изменений является улучшение экологической ситуации в стране путем внедрения наилучших доступных технологий на промышленных предприятиях, создания условий, при которых предприятия будут экономически заинтересова-

ны в модернизации имеющегося и разработке нового оборудования с показателями по энергоэффективности и экологической безопасности, соответствующими лучшим мировым образцам. До последнего времени энергетические предприятия не были экономически заинтересованы во внедрении природоохранных мероприятий, так как затраты на них значительно превышали снижение платы за загрязнение окружающей среды.

Технологические нормативы по удельным выбросам загрязняющих веществ энергетическим оборудованием впервые в России были приведены в [2]. Эти нормативы являются достаточно жесткими, и значительная часть котельных уста-

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

Таблица 1. Технологические показатели выбросов загрязняющих веществ, мг/м³, при сжигании природного газа* [3]

| Оборудование | Ввод оборудования в эксплуатацию | | | | | |
|--|----------------------------------|-----|-------------------------------|-----|-----------------|-----|
| | до 31.12.2000 | | с 01.01.2001 по 31.12.2025 | | с 01.01.2026 | |
| | NO _x | CO | NO _x | CO | NO _x | CO |
| Стационарные ГТУ (включая утилизационные ПГУ) при работе с нагрузкой 50% установленной мощности и более | 50 | 300 | 50 | 300 | 50 | 300 |
| Котельные установки (включая котлы-утилизаторы с дожиганием в составе утилизационных ПГУ и котлы в составе сбросных ПГУ) | 350 | 300 | 180 | 300 | 125 | 300 |

* Для котельных установок на сухие газы при 0°C и коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1.4$, для ГТУ и ПГУ на сухие газы при 0°C и $\alpha = 3.5$.

новок им не соответствовала. Обеспечить нормативные значения на старых котлах во многих случаях было невозможно, либо для этого требовались большие финансовые вложения, поэтому были разработаны новые технологические показатели по удельным выбросам загрязняющих веществ для энергетической отрасли, которые представлены в [3].

В табл. 1, 2 приведены технологические показатели по удельным выбросам загрязняющих веществ при сжигании природного газа и угля [3]. Как следует из представленных данных, технологические показатели выбросов загрязняющих веществ ранжируются в зависимости от вида топлива и года ввода оборудования в эксплуатацию. При сжигании угля (см. табл. 2) технологические показатели ранжируются не только по дате ввода оборудования в эксплуатацию, но и по виду угля (каменный или бурый), содержанию серы в топливе, тепловой мощности котла, зольности топлива и способу шлакоудаления.

Наиболее жесткие требования к выбросам вредных веществ относятся к оборудованию, которое будет вводиться в эксплуатацию с 2026 г. Так, технологические показатели по выбросам NO_x при сжигании природного газа для котлов, которые будут введены в эксплуатацию после 01.01.2026, в 2.8 раза меньше, чем для котлов, которые введены в строй до 2001 г., и в 1.44 раза меньше, чем для котлов, введенных в эксплуатацию в период 2001–2025 гг. При сжигании угля удельные выбросы оксидов азота от котлов, которые будут введены в эксплуатацию с 2026 г., должны быть в 1.56–2.70 раза меньше, чем от котлов, введенных в эксплуатацию до 31.12.2000.

Для выполнения более жестких требований по удельным выбросам NO_x на котельном оборудовании необходимо будет применять в полном объеме первичные методы подавления образования оксидов азота, малотоксичные горелки и схе-

мы сжигания топлива, а в некоторых случаях потребуется дорогостоящая очистка газов от NO_x.

ВЫБОР ХАРАКТЕРИСТИК И МАРКИ КОТЛА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

На базе статистических данных по котлам большой мощности и докритических параметров пара, работающим на твердом топливе и находящимся в эксплуатации на ТЭС России, приведенных в [4–8], выявлены наиболее типичные марки котлов и их количество, компоновка, уровень давления пара, способ шлакоудаления, проектный вид топлива, тип используемых горелочных устройств, наиболее характерные отношения ширины топки a к ее глубине b , основные показатели работы.

Рассмотрено 16 типоразмеров котлов докритического давления, из них 15 барабанных котлов, 1 прямоточный котел, 6 котлов на каменном угле, 7 котлов на буром угле, 2 котла на торфе, 1 котел на антраците, 7 котлов с жидким шлакоудалением (4 из которых с пережимом топки, 3 без пережима), 9 котлов с твердым шлакоудалением, 8 котлов с прямоточными горелками, 8 с вихревыми горелками, 2 котла Т-образной компоновки, 14 котлов П-образной компоновки.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании статистических данных в качестве прототипа для дальнейших исследований был выбран котел БКЗ-420-140-6 (Е-420-140) производства Барнаульского котельного завода, работающий на твердом топливе, паропроизводительностью 420 т/ч с соотношением $a/b = 1.95$. Количество таких котлов всех модификаций в России составляет около 60.

Для проверки разработанной модели сжигания твердого топлива результаты численного мо-

Таблица 2. Технологические показатели выбросов загрязняющих веществ, мг/м³, при сжигании твердого топлива*¹ [3]

| Загрязняющее вещество | Ввод оборудования в эксплуатацию | | | | | |
|-----------------------|---|------|---|-----|---|-----|
| | до 31.12.2000 | | с 01.01.2001 по 31.12.2025 | | с 01.01.2026 | |
| | ТШУ | ЖШУ | ТШУ | ЖШУ | ТШУ | ЖШУ |
| NO _x | Бурый уголь | | Бурый уголь | | Бурый уголь | |
| | 600 | 800 | 500 | 500 | 300 | 300 |
| SO ₂ | Каменный уголь | | Каменный уголь | | Каменный уголь | |
| | 800 | 1000 | 550 | 650 | 470 | 640 |
| Зола твердого топлива | 1400* ² | | 700* ² | | 700* ² | |
| | 3000* ³ | | 1400* ³ | | 1400* ³ | |
| | Котлы входной тепловой мощностью до 500 МВт, паропроизводительностью до 670 т/ч | | Котлы входной тепловой мощностью до 500 МВт, паропроизводительностью до 670 т/ч | | Котлы входной тепловой мощностью менее 300 МВт, паропроизводительностью менее 420 т/ч | |
| | 600* ⁴ | | 250 | | 150* ⁴ | |
| СО | 600–900* ⁵ | | | | 150–250* ⁵ | |
| | 900* ⁶ | | | | 250* ⁶ | |
| | Котлы входной тепловой мощностью от 500 МВт и более, паропроизводительностью от 670 т/ч и более | | Котлы входной тепловой мощностью от 500 МВт и более, паропроизводительностью от 670 т/ч и более | | Котлы входной тепловой мощностью от 300 МВт и более, паропроизводительностью от 420 т/ч и более | |
| | 250* ⁷ | | 150 | | 50* ⁴ | |
| СО | 800* ⁸ | | | | 50–150* ⁵ | |
| | | | | | 150* ⁶ | |
| СО | ТШУ | ЖШУ | ТШУ | ЖШУ | ТШУ | ЖШУ |
| | 400 | 300 | 400 | 300 | 400 | 300 |

Примечание. S^r – содержание серы; A^r – зольность; ТШУ – твердое шлакоудаление; ЖШУ – жидкое шлакоудаление.

*¹ Для NO_x и SO₂ на сухие газы при 0°C и коэффициенте избытка воздуха α = 1.4, для золы при 0°C и α = 1.4.

*² S^r ≤ 0.5%. *³ S^r > 0.5%. *⁴ A^r < 10%. *⁵ 10 ≤ A^r ≤ 20%. *⁶ A^r > 20%. *⁷ A^r < 30%. *⁸ A^r ≥ 30%.

делирования сопоставлены с данными, полученными при режимно-наладочных испытаниях этого котла при сжигании угля.

Численное моделирование горения твердого топлива в топке котла – весьма сложная задача, так как горение является совокупностью сложных физических и химических процессов: турбулентности, переноса вещества, смещения, горения, конвективного и лучистого теплообмена и пр. Для численного моделирования выбраны математические модели, аналогичные применяемым в [9], непосредственное описание которых представлено в [10–12], и хорошо зарекомендовавший себя в решении подобного рода задач комплекс вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent [13, 14].

Котел БКЗ-420-140-6 имеет открытую призматическую топочную камеру с восемью вихревыми горелками, расположенными в два яруса на фронтальной стене топки (рис. 1). В 3D-модели в месте ввода потока в топку из горелок установле-

ны плоскости, соответствующие их каналам для уменьшения количества элементов расчетной сетки и снижения времени расчета. При этом параметры входящего потока на плоскости задаются в цилиндрических координатах с указанием центра горелки, а также осевой, радиальной и нормальной составляющих скорости. Выход потока из модели ограничен по высоте на уровне вершины аэродинамического выступа для уменьшения количества расчетных ячеек в сетке. Такое допущение не должно влиять на результаты численного моделирования, так как основные процессы горения и образования оксидов азота происходят в нижней части топки.

Расчетная сетка топочной камеры состоит из 1215708 элементов. По стенам топочной камеры выполнен призматический слой, а в областях расположения горелочных устройств – сгущение сетки.

В качестве топлива для проведения моделирования принят бурый уголь низшей теплотой сго-

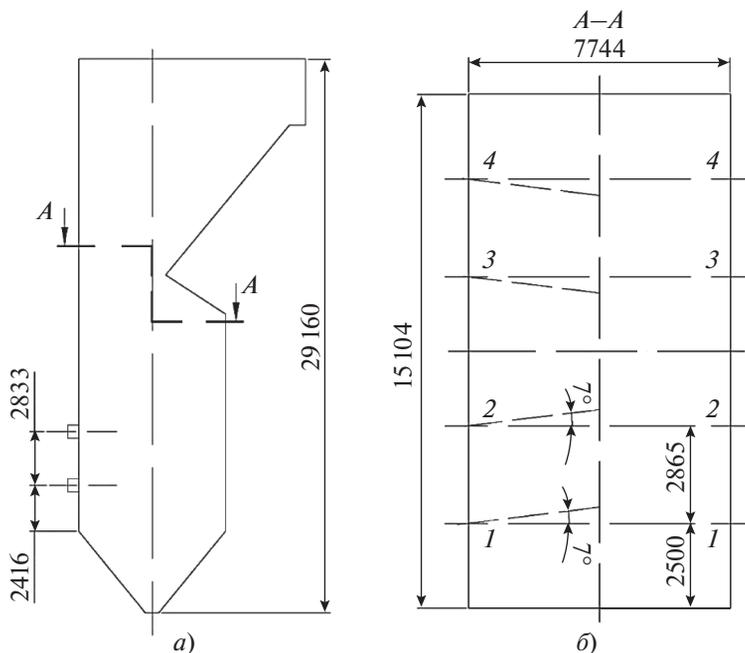


Рис. 1. Схема топочной камеры котла БКЗ-420-140. *a* – продольный разрез; *б* – разрез по А-А; 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 – оси горелок и вертикальные плоскости для визуализации

рования на рабочую массу топлива 16 446 кДж/кг, влажностью 27.0%, зольностью 13.9% и содержанием азота 0.9%.

Необходимые исходные данные (расход топлива, расход и температура первичного и вторичного воздуха и т.д.) получены при расчетах теплового баланса котла, расчетах теплообмена в топке и тепловых расчетах системы пылеприготовления по методам [15, 16]. Исходные данные, принятые при режимно-наладочных испытаниях котла на номинальной нагрузке, приведены далее:

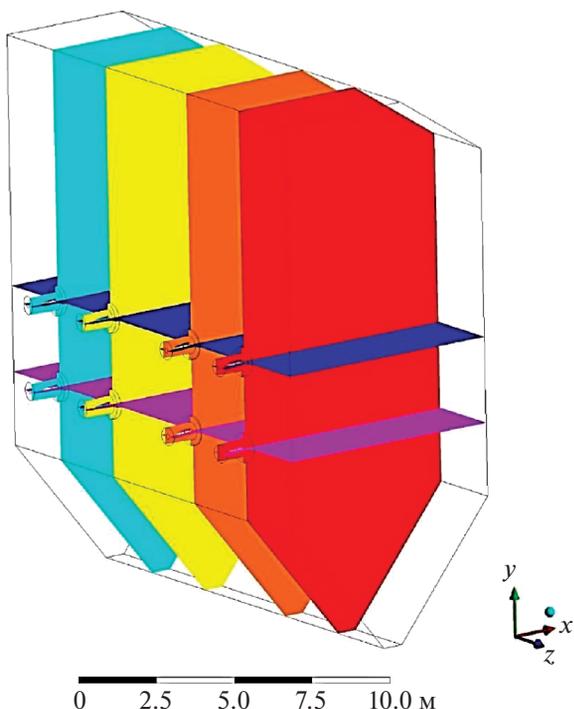


Рис. 2. Расположение плоскостей для визуализации результатов численного моделирования топочной камеры

| | |
|---|------|
| Паропроизводительность, т/ч | 420 |
| Температура, °С: | |
| питательной воды | 222 |
| свежего пара | 549 |
| холодного воздуха | 51 |
| горячего воздуха | 286 |
| аэросмеси за мельницей | 56 |
| уходящих газов | 159 |
| Давление, МПа: | |
| питательной воды | 20.9 |
| в барабане котла | 14.6 |
| свежего пара | 13.2 |
| Коэффициент избытка воздуха α : | |
| на выходе из топки | 1.2 |
| в уходящих газах | 1.28 |
| Тонкость пыли по R_{90} , % | 40 |
| Влажность пыли, % | 5.5 |
| Содержание NO_x , мг/м ³ , в дымовых газах, приведенное к $\alpha^* = 1.4$ | 869 |
| Потери тепла с механическим недожогом топлива, % | 0.2 |

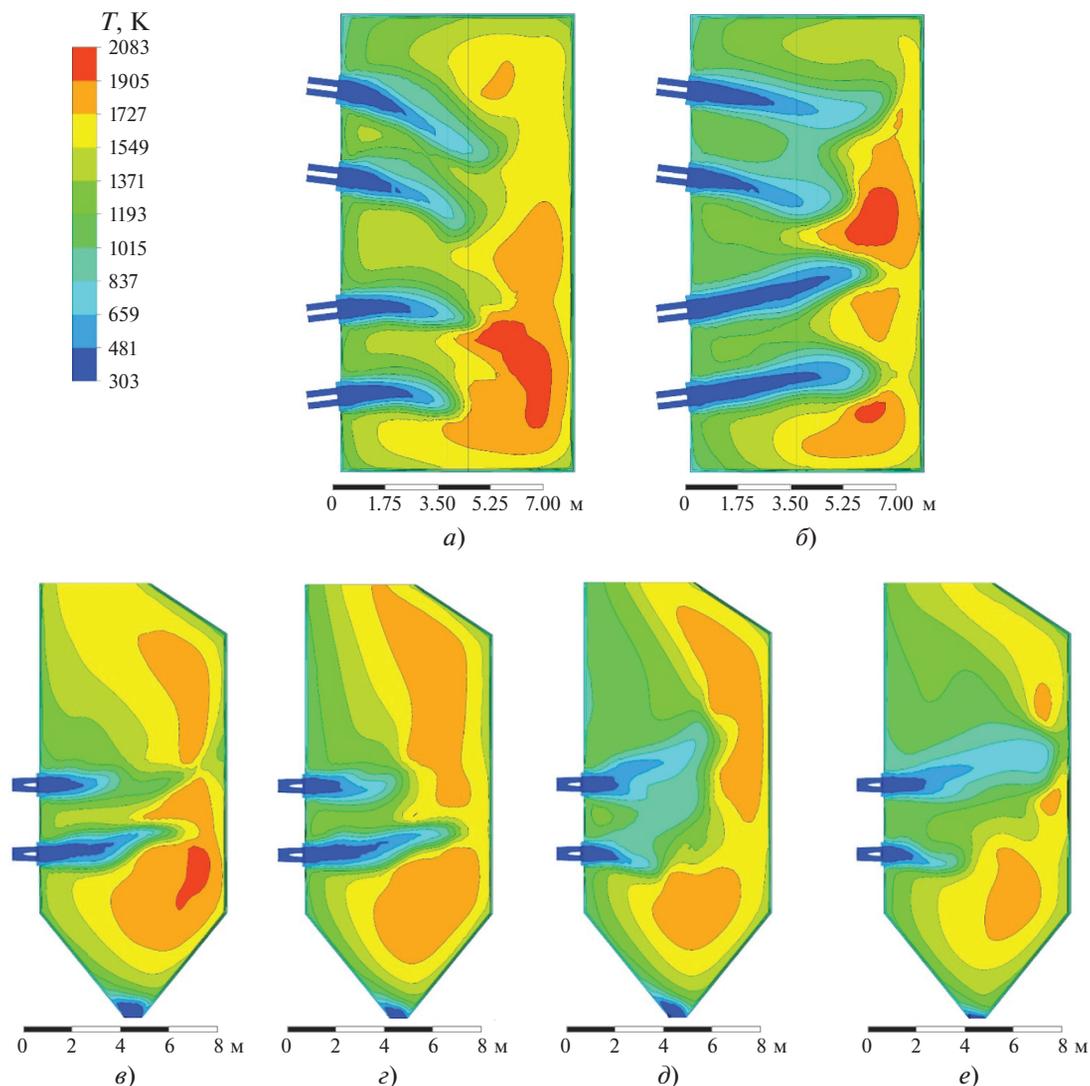


Рис. 3. Поля температур, полученные в результате численного моделирования горения в топке при верификации. Сечение (см. рис. 1, 2): горизонтальное на уровне горелок первого (а) и второго (б) ярусов; вертикальное 1–1 (в), 2–2 (г), 3–3 (д), 4–4 (е)

Для определения температуры дымовых газов по высоте на уровне вершины аэродинамического выступа выполнен позонный тепловой расчет топki.

При численном моделировании были получены следующие данные:

потери тепла от механического недожога составили 0.23% (по данным испытаний 0.20%, абсолютная разница 0.03%);

температура дымовых газов на выходе из модели равна 1216°C (по данным позонного расчета топki 1211°C, относительная разница 0.4%);

концентрация оксидов азота в дымовых газах, приведенная к нормальным условиям и $\alpha = 1.4$, составила 888 мг/м³ (по данным испытаний 869 мг/м³, относительная разница 2.2%).

Расположение плоскостей для проведения численного моделирования топочной камеры представлено на рис. 2. Визуализация результатов численного моделирования в этих плоскостях (векторные поля температур T и поля скоростей w) приведена на рис. 3, 4. Разработанная численная модель горения твердого топлива в топке котла БКЗ-420-140 показала удовлетворительные результаты.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМЫ СЖИГАНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯМОТОЧНЫХ ГОРЕЛОК И СОПЛ ДЛЯ КОТЛА БКЗ-420-140

Для определения возможных диапазонов изменений характеристик альтернативных топлив, которые могли бы применяться вместо основного,

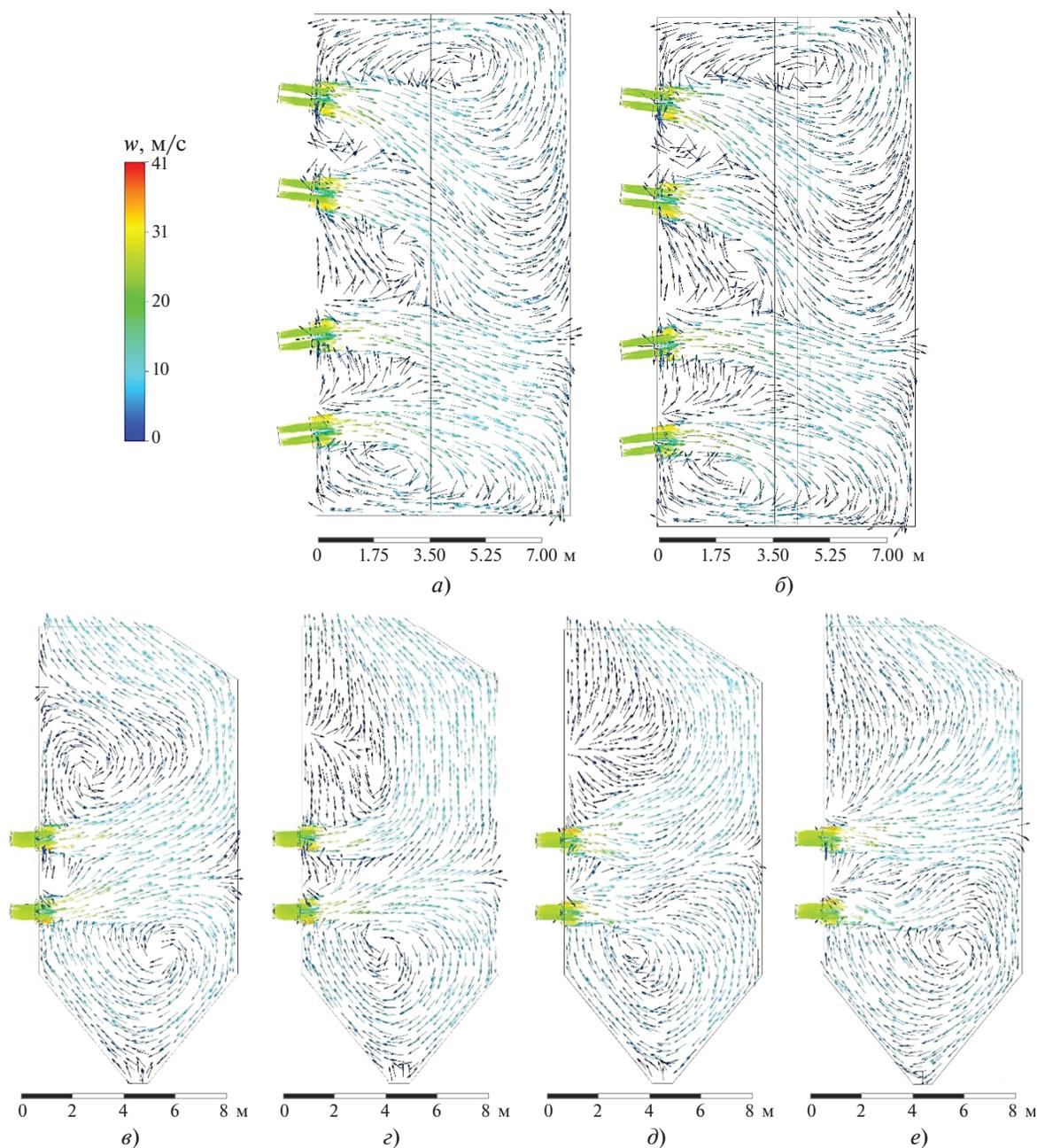


Рис. 4. Векторные поля скоростей, полученные в результате численного моделирования горения в топке при верификации.

Обозначения см. рис. 3

были проведены многовариантные расчеты сжигания разных углей в топке котла БКЗ-420-140 с использованием вихревых горелок. При этом было отмечено значительное превышение концентраций оксидов азота в уходящих газах относительно существующих технологических показателей. Для снижения выбросов оксидов азота при обеспечении высокой эффективности работы котельного оборудования для данного котла была предложена схема сжигания твердых топлив с использованием прямоточных горелок и сопел.

Для решения поставленной задачи разработана первоначальная схема расположения прямоточных горелок и сопел, в которой применена встречносмещенная схема размещения топочно-горелочных устройств в четырех вертикальных сечениях топки (рис. 5).

По результатам численного моделирования (рис. 6) были отмечены высокие температуры газов вблизи экранной системы труб, что неизбежно привело бы к шлакованию топочных экранов. Чтобы устранить эту проблему, были рассмотре-

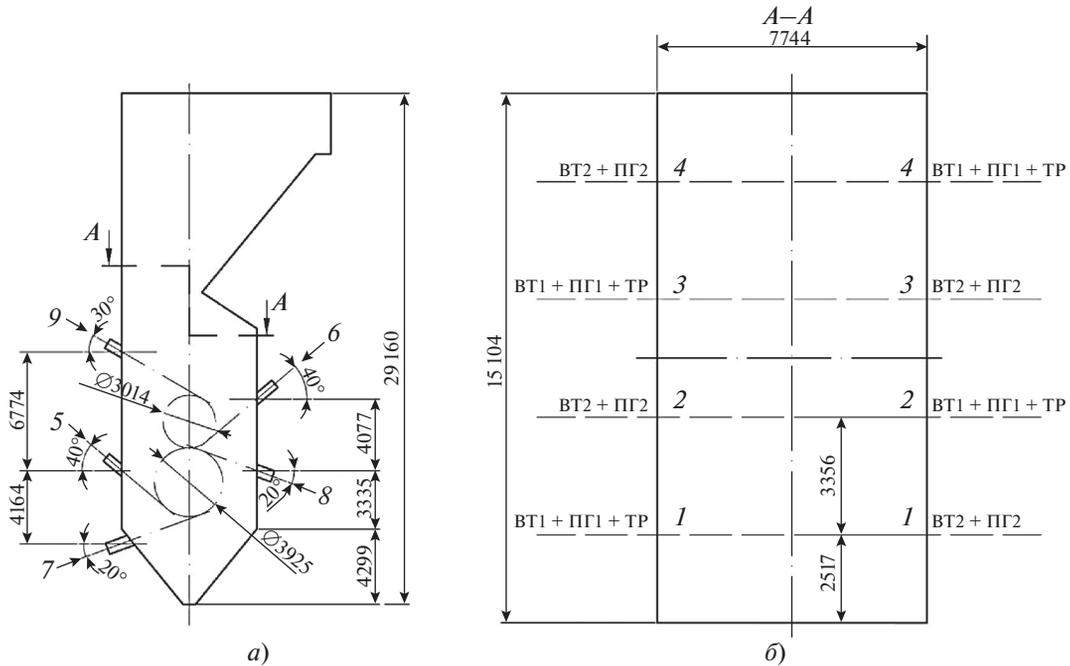


Рис. 5. Первоначальная схема расположения прямоточных горелок и сопел на котле БКЗ-420-140. *a* – продольный разрез; *б* – разрез по А-А; 1-1, 2-2, 3-3, 4-4 – сечения в размещении горелок и сопел; 5, 6 – прямоточные горелки первого (ПГ1) и второго (ПГ2) ярусов; 7, 8 – сопла вторичного воздуха первого (ВТ1) и второго (ВТ2) ярусов; 9 – сопла подачи третичного воздуха (ТР)

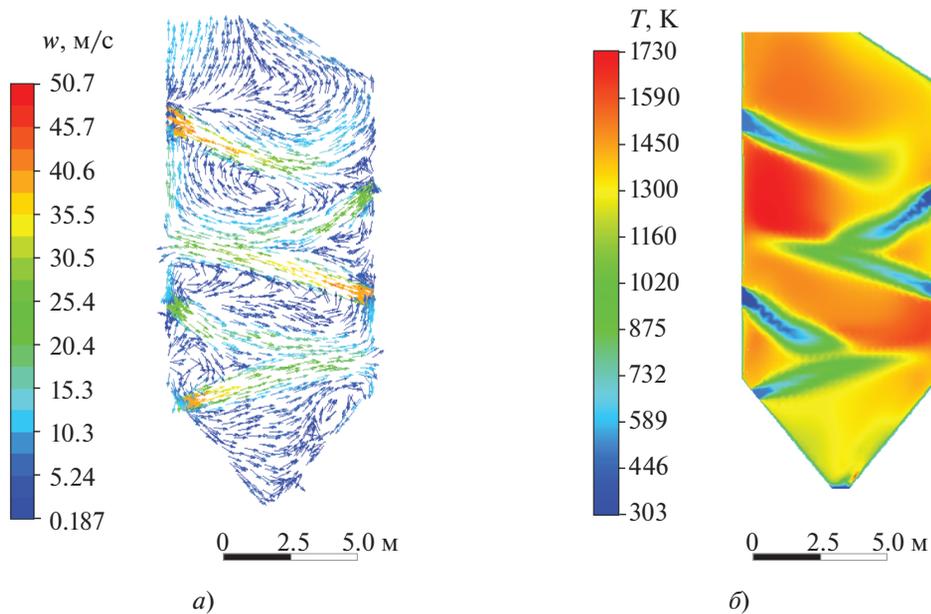


Рис. 6. Векторные поля скоростей (*a*) и температурные поля (*б*) в сечении 3-3 по результатам численного моделирования первоначальной схемы расположения прямоточных горелок и сопел

ны еще семь схем сжигания и их вариаций. Оптимальной оказалась схема расположения прямоточных горелок и сопел, приведенная на рис. 7.

Отличительной особенностью данной схемы является расположение прямоточных горелок и сопел по встречносмещенной схеме в восьми вертикальных сечениях топки. Горелки и сопла раз-

мещены в два яруса, организовано третичное дутье воздуха в верхнюю часть топки. В расчетах приняты следующие доли необходимого количества воздуха:

| | |
|----------------------|------|
| $\alpha_{ПГ1}$ | 0.21 |
| $\alpha_{ПГ2}$ | 0.09 |
| $\alpha_{ВТ1}$ | 0.44 |

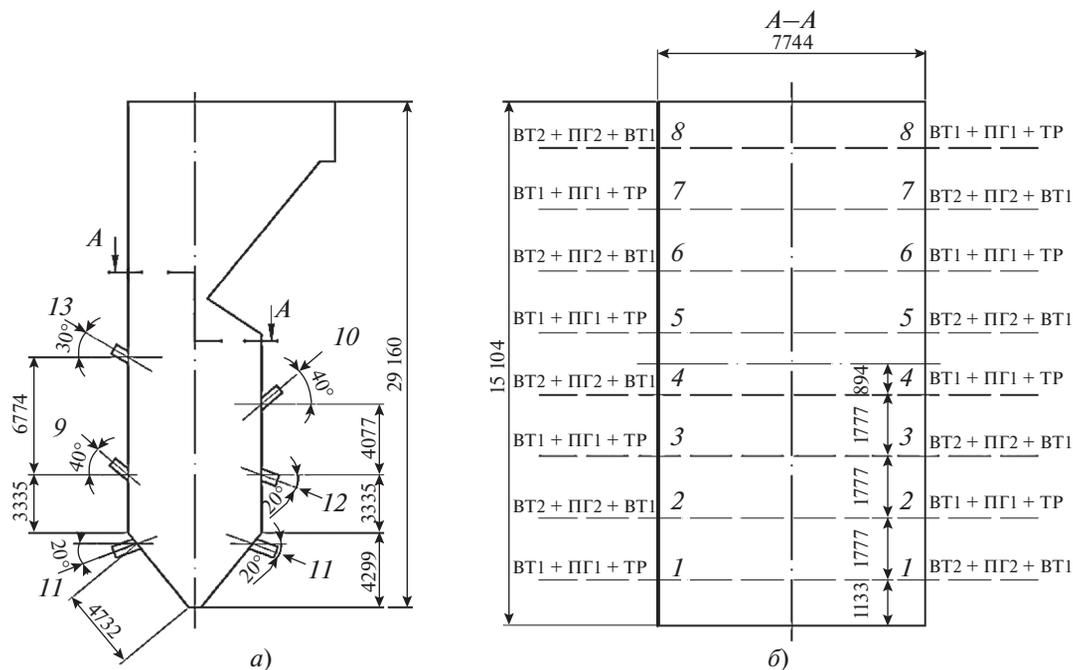


Рис. 7. Встречносмещенная схема расположения прямоточных горелок и сопл на котле БКЗ-420-140. *а* – продольный разрез; *б* – разрез по А–А; 1–1 – 8–8 – сечения в размещении горелок и сопл; 9, 10 – прямоточные горелки первого (ПГ1) и второго (ПГ2) ярусов; 11, 12 – сопла вторичного воздуха первого (BT1) и второго (BT2) ярусов; 13 – сопла подачи третичного воздуха (ТР)

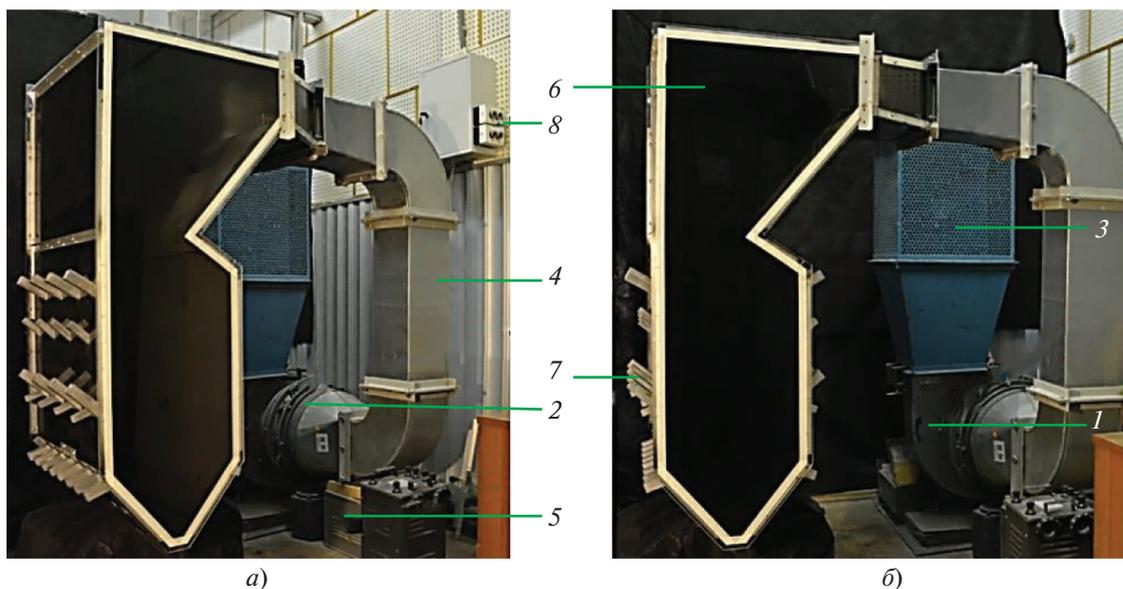


Рис. 8. Общий вид экспериментальной установки (*а*) с физической моделью топки (*б*). 1 – рабочее колесо вентилятора ВР 12-26-4К1; 2 – направляющий аппарат; 3 – искрогаситель; 4 – соединительный короб; 5 – опора; 6 – модель топки котла; 7 – патрубки прямоточных горелок и сопл; 8 – устройство электропитания

| | |
|------------------------|------|
| α_{BT2} | 0.11 |
| $\alpha_{ТР}$ | 0.30 |
| $\Delta\alpha_T$ | 0.05 |

$\Delta\alpha_T$ – присосы воздуха в топку.

Топливо между горелками первого и второго ярусов перераспределено в соотношении 70/30% соответственно. Расчеты проведены для сжигания бурого угля, характеристики которого приведены ранее.

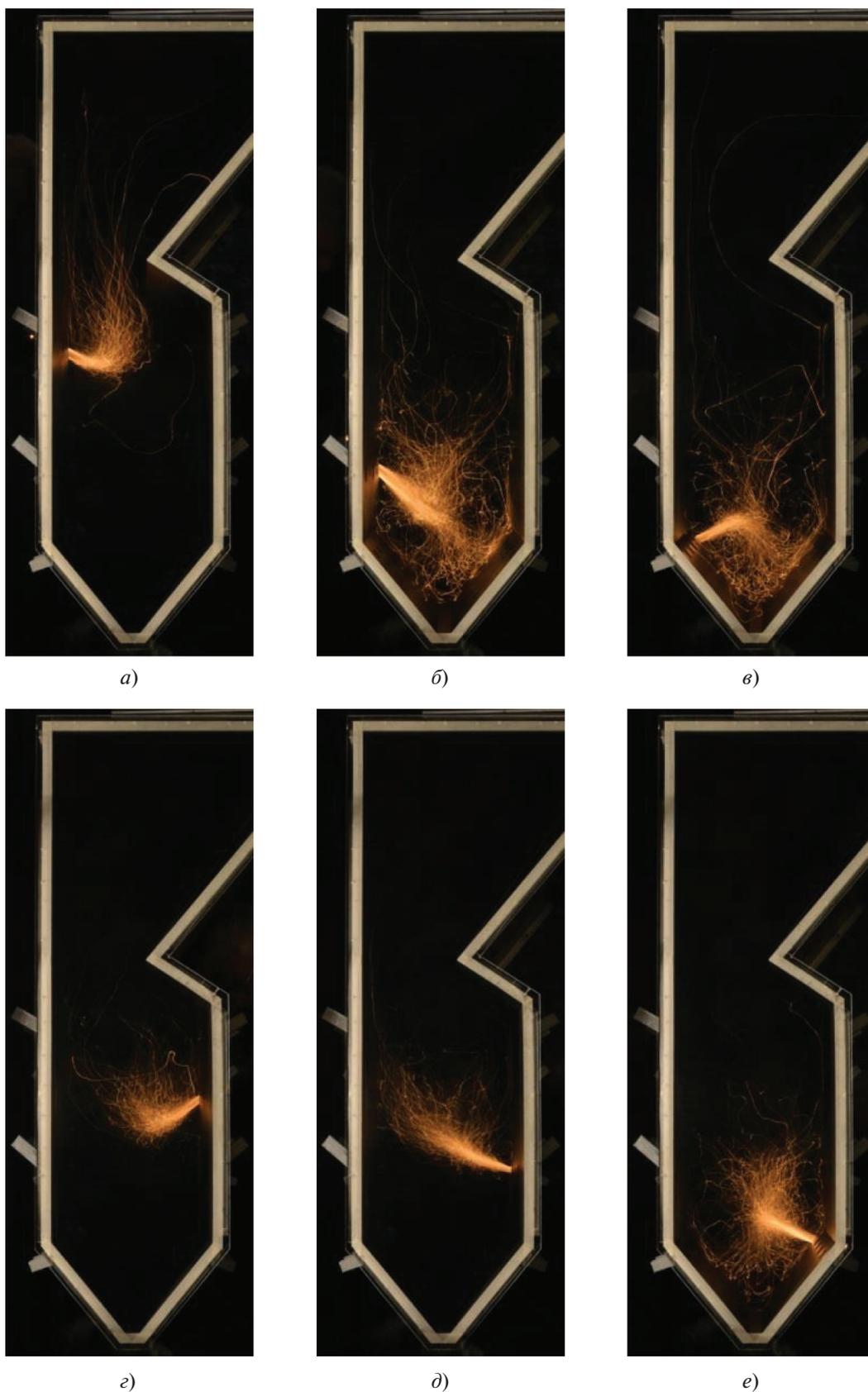


Рис. 9. Траектории движения струй ТР (а), ПГ1 (б), ВТ1 (в), ПГ2 (г), ВТ2 (д) и ВТ1 (е) в сечении 5–5

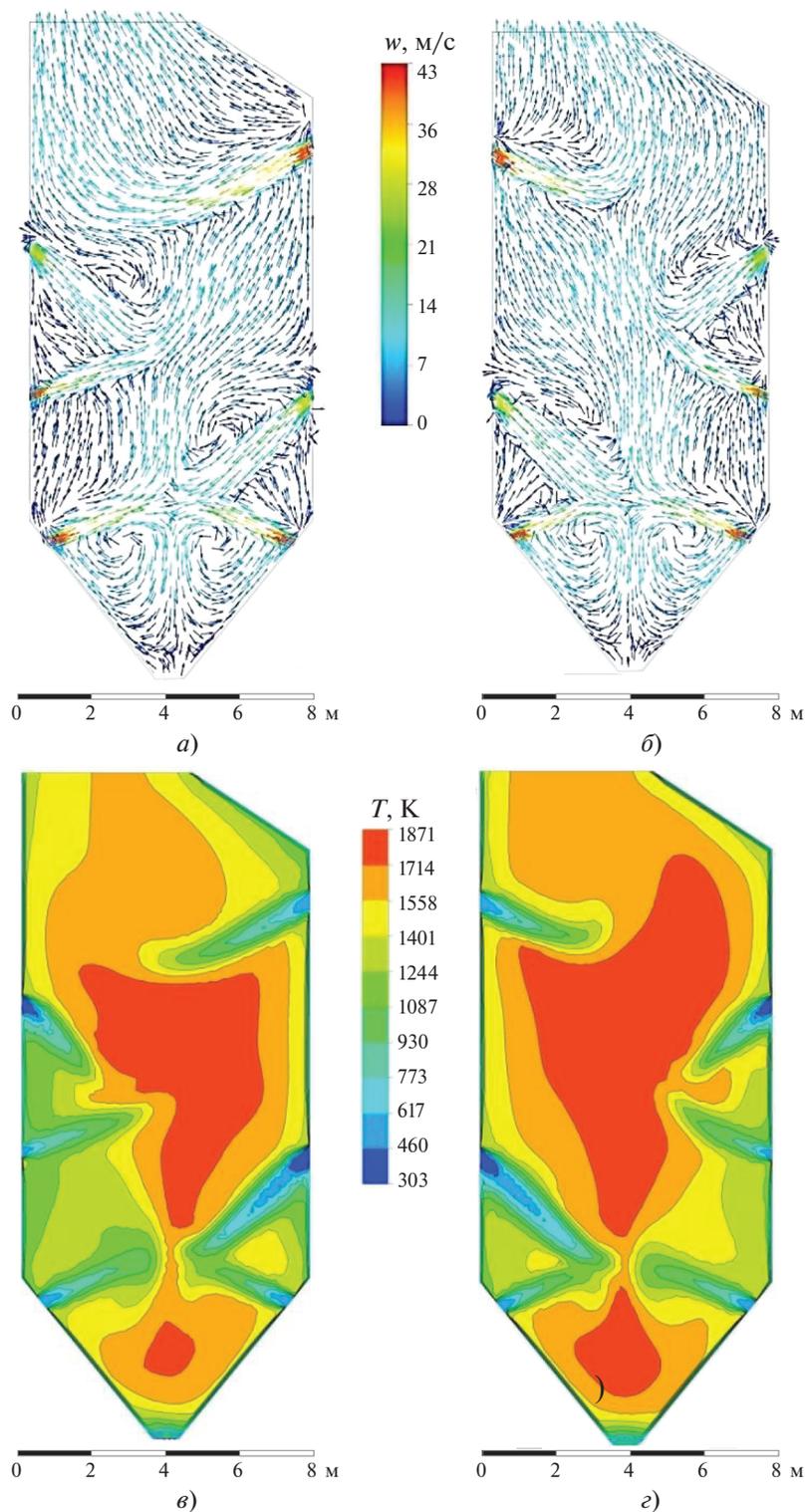


Рис. 10. Векторные поля скоростей (а, б) и температурные поля (в, г) в сечениях 2–2 (а, в) и 5–5 (б, г), полученные при численном моделировании горения твердого топлива в топке

Для верификации численной модели были проведены исследования схемы сжигания с использованием прямооточных горелок и сопел на физической изотермической модели. При со-

блюдении критериев моделирования и подобия была рассчитана, спроектирована и изготовлена модель топочной камеры котла БКЗ-420-140. На рис. 8 представлены фотоснимки

изготовленной в масштабе 1/25 модели топки котла.

Были выполнены исследования аэродинамики топочного объема путем проведения искровых продувок модели. На рис. 9 показаны траектории движения струй из горелок и сопл, находящихся в сечении 5–5 модели топочной камеры (см. рис. 7). Из рисунка следует, что применение такой схемы позволяет организовать ступенчатое сжигание твердого топлива с рассредоточением ядра факела по ширине, глубине и высоте топочной камеры. Показано, что обеспечиваются интенсивное перемешивание реагентов в объеме топки и активная внутритопочная рециркуляция продуктов сгорания к корням струй. В то же время отсутствуют признаки повышенного динамического давления горелочных струй на стены топочной камеры, что следует из анализа траекторий их движения.

Параллельно были выполнены исследования аэродинамики топочного объема котла при сжигании твердого топлива с использованием прямооточных горелок и сопл с помощью численного моделирования. На рис. 10 показаны векторные поля скоростей и поля температур продуктов сгорания в сечениях 2–2 и 5–5 топки (см. рис. 7). При сопоставлении траекторий движения прямооточных струй в объеме модели (см. рис. 9) с векторными полями скоростей, полученными при численном моделировании (см. рис. 10, б), наблюдается хорошее соответствие моделей, что свидетельствует о достоверности результатов исследований. Из рис. 10, в, г следует, что температуры продуктов сгорания существенно снижаются и выравниваются относительно первоначально предложенной схемы (см. рис. 6, б).

Согласно результатам численного моделирования, концентрация оксидов азота в уходящих газах при $\alpha = 1.4$ равняется 273 мг/м^3 , потеря тепла с механическим недожогом топлива составляет 0.69%, температура газов на выходе из топки — 1176°C , места интенсивного развития шлакования топочных экранов не выявлены (условием шлакования [17] в модели принято касание стенки частицей при температуре последней равной температуре начала шлакования или большей нее).

Таким образом, разработанная схема сжигания твердого топлива с использованием прямооточных горелок и сопл при реализации ее на котлах БКЗ-420-140 позволит повысить экономическую и экологическую эффективность их работы.

ВЫВОДЫ

1. По данным режимно-наладочных испытаний и численного моделирования, при сжигании бурого угля Азейского месторождения в котлах

БКЗ-420-140 заводского исполнения с применением вихревых горелок концентрация оксидов азота в дымовых газах составляет более 800 мг/м^3 , что существенно превышает действующие нормативы.

2. Проведенные исследования разработанной схемы сжигания азейского бурого угля с использованием прямооточных горелок и сопл для котла БКЗ-420-140 показали, что при ее реализации концентрация NO_x в уходящих газах при $\alpha = 1.4$ составит 273 мг/м^3 , потеря тепла с механическим недожогом топлива — 0.69% при отсутствии интенсивного шлакования топочных экранов.

3. Реализация схемы сжигания угля на котлах БКЗ-420-140 с использованием прямооточных горелок и сопл позволит существенно повысить экономическую и экологическую эффективность их работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** от 21.07.2014 № 219-ФЗ “О внесении изменений в Федеральный закон “Об охране окружающей среды” и отдельные законодательные акты Российской Федерации”.
2. **ГОСТ Р 50831-95**. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. М.: Госстандарт России, 1996.
3. **ИТС 38-2022**. Сжигание топлива на крупных установках с целью производства энергии: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Росстандарт, 2022.
4. **Паровые котлы** большой мощности / под общ. ред. Н.В. Голованова, В.В. Лебедева, В.В. Митора. Л.: НПО ЦКТИ, 1982.
5. **Котлы** большой мощности: Каталог-справочник К2-69. М.: НИИинформтяжмаш, 1970.
6. **Котлы** паровые большой мощности: Промышленный каталог. М.: ВНИИАМ, 2009.
7. **Котлы** большой мощности: Отраслевой каталог. М.: НИИЭинформэнергомаш, 1985.
8. **Мейкляр М.В.** Современные котельные агрегаты ТКЗ. М.: Энергия, 1978.
9. **Prokhorov V.B., Fomenko M.V., Fomenko N.E.** Solid fuel combustion processes modelling in the furnace in terms of the boiler K-50-14-250 // J. Phys.: Conf. Series. 2020. V. 1683. Is. 4. P. 042050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1683/4/042050>
10. **Ranade V.V., Gupta D.F.** Computational modeling of pulverized coal fired boilers. CRC press, 2014.
11. **Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р.** Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ: пер. с англ. Г.Л. Агафонова / под ред. П.А. Власова. М.: Физматлит, 2006.
12. **ANSYS FLUENT**, 14.5. 2014. User's and theory guide.
13. **Constenla I., Ferrín J.L., Saavedra L.** Numerical study of a 350 MWe tangentially fired pulverized coal furnace of the as Pontes Power Plant // Fuel Process. Technol. 2013. V. 116. P. 189–200.

14. **Engineering Simulation & 3-D Design Software [ANSYS]**. <https://www.ansys.com/> (Accessed 12.03.2018.)
15. **Абрютин А.А., Карасина Э.С., Петросян Р.А.** Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. СПб.: ВТИ; НПО ЦКТИ, 1998.
16. **Расчет** и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (нормативные материалы) / под общ. ред. Н.В. Соколова, М.Л. Кисельгофа Л.: НПО ЦКТИ; ВТИ, 1971.
17. **Фоменко М.В., Прохоров В.Б., Фоменко Н.Е.** Оптимизация схемы сжигания кузнечного тощего угля с использованием прямооточных горелочных устройств и сопел с твердым шлакоудалением // Вестник МЭИ. 2023. № 4. С. 72–79. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2023-4-72-79>

Ensuring Technological Indicators for Nitrogen Oxide Emissions during Solid-Fuel Combustion in a High-Power Steam Boiler

V. B. Prokhorov^{a, *}, V. S. Kirichkov^a, S. L. Chernov^a, and M. V. Fomenko^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: prokhorovvb@mail.ru

Abstract—Organic fuel combustion products are one of the main sources of air pollution. When burning fossil fuels, pollutants harmful to human health, such as nitrogen and sulfur oxides, fly ash with particles of unburned fuel, carbon oxides, polycyclic aromatic hydrocarbons, and metal oxides, are released into the atmosphere. The largest emissions of pollutants into the atmosphere are accompanied by the combustion of solid fuels. In 2014, significant changes took place in the environmental legislation of the Russian Federation [1], which oblige energy enterprises to comply not only with sanitary and hygienic standards but also with technical and technological standards. To maintain technological indicators for specific NO_x emissions on boiler equipment at the regulatory level, it will be necessary to fully apply primary methods for suppressing the formation of nitrogen oxides, use low-toxic burners and fuel combustion schemes, and, in some cases, expensive gas purification from NO_x will be required. Based on statistical data, the BKZ-420-140 (E-420-140) boiler was selected as a prototype for research. When BKZ-420-140 boilers in the factory version operate using vortex burners when burning brown coal, the concentration of nitrogen oxides in the flue gases is more than 800 mg/m³, which significantly exceeds current standards. In order to reduce emissions of nitrogen oxides while ensuring high operating efficiency of boiler equipment, a solid-fuel combustion scheme using direct-flow burners and nozzles has been proposed for this boiler. It is shown that it will be possible to increase the economic and environmental efficiency of BKZ-420-140 boilers' operation by implementing the developed solid-fuel combustion scheme using direct-flow burners and nozzles on them.

Keywords: direct-flow burners and nozzles, technological indicators, nitrogen oxides, numerical modeling, physical modeling, mechanical underburning, flaring of coal dust