

Моделирование топочных процессов с целью снижения выбросов оксида азота от котлоагрегата типа БКЗ-320-140*

А.Д. УЛЬЯНОВ^а, М.И. ПОГОДАЕВ^б

РФ, 665709, Иркутская область, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Братский государственный университет

^а coberul@gmail.com ^б maks.pogodaev2012@yandex.ru

В статье представлены результаты численного моделирования процессов горения и образования оксидов азота NO_x в топочной камере котла БКЗ-320-140, работающего на высоковлажном буром угле Ирбейского месторождения, а также приведен примерный прогноз экономической эффективности рассмотренного метода оптимизации выбросов оксида азота. Целью работы стала оценка эффективности первичных методов снижения выбросов оксидов азота NO_x , в частности, модернизации котла с установкой низкоэмиссионных горелок и отглушением сбросных сопел. Моделирование выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent с использованием верифицированной математической модели, учитывающей многофазные потоки, турбулентность, горение угольной пыли и основные механизмы образования оксидов азота (термический, топливный, быстрый).

Проведенное исследование показало, что предложенное техническое решение позволяет снизить концентрацию оксидов азота NO_x в дымовых газах на 30 % – с 840 до 510 мг/м³. В статье рассмотрено, как аэродинамическая доводка топочного пространства влияет на сокращение выбросов: снижение окружной скорости, минимизация рециркуляционных течений и удлинение времени жизни газов в восстановительной зоне дают суммарный эффект. Предложенная расчетная схема верифицирована по промышленным данным, расхождение не превышает 3 %. Отметим, что такое техническое решение не противоречит приоритетам Энергостратегии России на период до 2035 года, а, напротив, соответствует ее разделам по моделированию ТЭК и переходу к наилучшим доступным технологиям. Ключевое преимущество подхода – модернизация без остановки и глубокой перестройки оборудования, что особенно актуально для угольной генерации (пример – Иркутская область). В перспективе увязка модели с прогнозом шлакования и коррозии, а также анализ динамических режимов работы котла. Рассматриваемый подход напрямую поддерживает политику технологического суверенитета, так как позволяет достигать жестких экологических нормативов с использованием отечественных инженерных решений и программного обеспечения, минимизируя зависимость от зарубежных систем газоочистки.

* Статья получена 11 декабря 2025 г.

Ключевые слова: котел БКЗ-320-140, оксиды азота, численное моделирование, низкоэмиссионные горелки, ступенчатое сжигание, топочные процессы, ANSYS Fluent, снижение выбросов, верификация модели, валидация модели, численное решение уравнений Навье – Стокса, Discrete Ordinates модель

ВВЕДЕНИЕ

Снабжение потребителей тепловой и электрической энергией является ключевым элементом развития современной мировой экономики. Согласно статистическим данным, в 2024 году 35,4 % мирового производства электроэнергии обеспечивали угольные тепловые электростанции [1]. Однако угольные энергоустановки являются крупнейшим источником выбросов загрязняющих веществ [2], в частности оксидов азота (NO_x). В России задача снижения эмиссии оксидов азота NO_x решается в рамках внедрения *наилучших доступных технологий (НДТ)*, регламентированных справочниками, например ИТС 2.3-2020 [3].

В качестве наиболее экономически целесообразных мер снижения выбросов рассматриваются *первичные (внутритопочные) методы*, среди которых доминируют *низкоэмиссионные горелки* и *ступенчатое сжигание*. В частности, при организации ступенчатого сжигания по воздуху сопла третичного дутья, располагаемые выше основных горелок, создают в ядре факела восстановительную зону с дефицитом кислорода, что подавляет образование оксидов азота NO_x . При этом такие меры одновременно позволяют минимизировать риски шлакования и выступают дополнительной защитой от коррозии топочных экранов.

Широкое распространение в энергетике получила тангенциальная схема сжигания, обеспечивающая высокую эффективность выгорания топлива. Тем не менее уникальная вращательная организация потока может вызывать эксплуатационные осложнения, такие как отклонение факела и тепловая неравномерность. В условиях бюджетных ограничений наиболее экономически целесообразным представляется модернизация устаревшего котельного оборудования с адаптацией НДТ при максимальном сохранении его основных элементов [3–5]. Таким образом, мероприятия по снижению концентрации оксидов азота NO_x в дымовых газах редко включают системы газоочистки и в основном базируются на применении режимных и малозатратных внутритопочных методов [6, 7].

Эффективность этих методов подтверждается численным моделированием в программных комплексах (ANSYS Fluent, SigmaFlow, FIRE-3D, FlowVision и др.). В работах [8, 9] подтверждается эффективность ступенчатого сжигания, позволяющего снизить выбросы оксидов азота NO_x на 30...60%. Несмотря на то что вторичные методы *селективного некаталитического (СНКВ)* и *селективного каталитического восстановления (СКВ)* обеспечивают очистку до 90 %, их высокая стоимость делает первичные меры более предпочтительными. При этом остается недостаточно изученным взаимное влияние тангенциальной аэродинамики и систем ступенчатого сжигания в котлах, работающих на высоковолажных бурых углях, где риски шлакования и коррозии ограничивают возможности оптимизации.

Статья состоит из трех разделов. В первом разделе описывается создание расчетной методики для исследования процессов в топке котла БКЗ-320-140.

Во втором разделе проведен анализ базового режима работы котла и осуществлено моделирование модернизированной топки. В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований и рассмотрены перспективы для будущей работы.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объектом настоящего исследования является топочная камера парового котла БКЗ-320-140. Обобщенная схема котла представлена на рис. 1. Котел полуоткрытого типа рассчитан на сжигание бурых углей Канско-Ачинского бассейна. Конструкция топки с пережимом обусловлена системой жидкого шлакоудаления: пережим выделяет камеру горения, обеспечивая высокотемпературный режим, необходимый для плавления шлака. Геометрические характеристики камеры: $12\ 100 \times 5900$ мм при высоте 34 000 мм. Паропроизводительность агрегата 320 т/ч с параметрами пара 140 кгс/см^2 и $560\text{ }^\circ\text{C}$ [10].

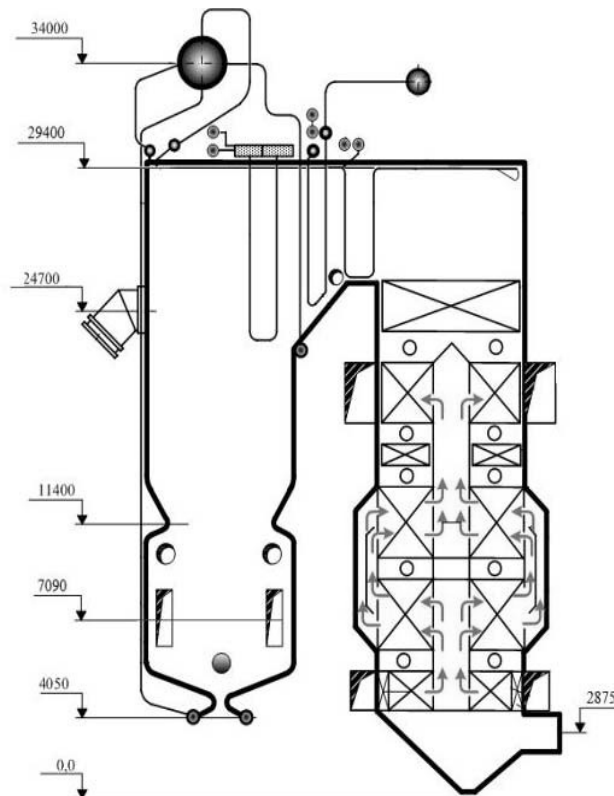


Рис. 1. Схема котла типа БКЗ-320-140 ПТ

Fig. 1. Diagram of the BKZ-320-140 PT boiler type

Практическая значимость: разработанная модель и результаты исследований позволяют обосновать техническое решение для модернизации действующих котлов, обеспечивающее снижение выбросов оксидов азота NO_x до уровня, соответствующего требованиям НДТ, с минимальными капитальными затратами по сравнению с установкой систем конечной очистки газов.

Для организации процесса горения используются два яруса прямооточных горелочных устройств с размером устья 1400×400 мм. Моделирование и анализ выполняются для режима сжигания Ирбейского угля марки 2БВ со следующими характеристиками рабочей массы [11]:

- низшая теплота сгорания 4097 ккал/кг;
- зольность 9,9 %;
- влажность 30,0 %;
- выход летучих веществ 44,7 %;
- элементный состав: углерод 43,0 %, водород 2,56 %, сера 0,25 %, кислород 15,94 %.

Таким образом, работа котла типа БКЗ-320-140 ПТ сводится к оптимизации топливоподачи и подготовке топлива, а также к совершенствованию системы золоудаления и газовоздушного тракта для повышения надежности, снижения износа и улучшения эффективности при работе на различных видах твердого топлива, таких как уголь и древесно-стружечные отходы.

РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Численное трехмерное моделирование топочного процесса на котлах серии БКЗ-320-140 ПТ проводилось с использованием специализированного программного обеспечения ANSYS Fluent.

ANSYS Fluent – это коммерческое программное обеспечение (ПО) для вычислительной гидродинамики (CFD), основанное на методе конечных объемов и предназначенное для моделирования широкого класса задач механики жидкости и газа, тепломассопереноса и химических реакций [12].

В контексте моделирования топочных процессов, таких как сжигание угольной пыли, можно выделить следующие возможности рассматриваемого ПО.

- Моделирование многофазных потоков для учета движения угольных частиц с использованием *модели дискретных частиц* (Discrete Phase Model – DPM), которая работает в рамках эйлерово-лагранжевого подхода [12].

- *Непрерывная фаза* (газ), которая описывается уравнениями Навье – Стокса в эйлеровой постановке [13]:

1) уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0, \quad (1)$$

2) уравнение сохранения импульса

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \rho v^2 = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g, \quad (2)$$

3) уравнение сохранения энергии

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho v h) = \nabla(\alpha \nabla h) + S_h, \quad (3)$$

где ρ – плотность газа, v – скорость, t – время, p – давление, τ – тензор вязких напряжений, g – ускорение свободного падения, h – энтальпия, α – коэффи-

циент теплопроводности, S_h – источниковый член, который включает тепло-выделение от химических реакций.

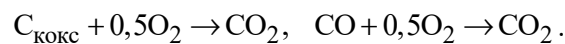
• **Дискретная фаза** (частицы угля) отслеживается в лагранжевой системе отсчета.

Для расчета траекторий дисперсной фазы в рамках представленного исследования использовалась модель DPM [12]. Уравнение движения частицы имеет вид

$$m_p \left(\frac{d\vec{v}_p}{dt} \right) = \sum \vec{F}_i, \quad (4)$$

где F_g – сила тяжести, F_d – сила сопротивления, m_p – масса частицы (для угольной частицы может меняться со временем из-за нагрева, испарения влаги, дегазации и выгорания кокса).

Для моделирования процессов горения коксового остатка применяется диффузионно-кинетическая модель горения [14]. Механизм горения коксового остатка состоит из двух реакций:



При моделировании лучистого теплообмена использована модель излучения **Discrete Ordinates (DO)**. Модель турбулентного потока и влияние турбулентности потока на траектории угольных частиц производится путем применения стандартной k - ϵ -модели турбулентности [12]. Таким образом, рассмотренный комплекс математических моделей позволяет получить оптимальное решение для полей скорости, температуры и концентраций основных компонентов продуктов сгорания.

Для оценки экологических характеристик процесса горения проведено построение математической модели образования оксидов азота. Учитывая, что массовая доля оксидов азота NO_x пренебрежимо мала и не оказывает обратного влияния на основные параметры течения и горения, расчет их образования выполнялся в режиме последующей обработки на основе замороженных полей скорости, температуры и концентраций ключевых компонентов [13].

В процессе моделирования учитывались три основных вида оксидов азота.

1. **Термические оксиды азота NO_x** : механизм, описанный цепочкой реакций Зельдовича, доминирует при высоких температурах (свыше 1500 °C) и обусловлен окислением молекулярного азота, присутствующего в воздухе [15];

2. **Быстрые оксиды азота NO_x** (по Фенимору) [15]: образование быстрых оксидов азота NO_x происходит в зонах, богатых углеводородными радикалами. Хотя данный механизм вносит незначительный вклад в общий выход оксидов азота NO_x при сжигании угля, он был учтен в общей схеме химических реакций.

3. **Топливные оксиды азота NO_x** [15]: этот вид оксидов азота формируется в результате окисления азотосодержащих соединений, изначально присутствующих в топливе. Топливный азот в ходе пиролиза переходит в газовую фазу преимущественно в форме промежуточных соединений, таких как HCN и NH_3 . Для минимизации выхода топливных оксидов азота NO_x необходима организация таких условий, при которых высвобождение летучих веществ и последующие реакции протекают в восстановительной среде, обогащенной топливом, что смещает баланс в сторону образования молекулярного азота.

Для сравнительных расчетов приняты параметры энергетического котла БКЗ-320-140 при работе на четырех мельницах с Ирбейским углем. Расчетный расход топлива составил 50,4 т/ч: 90 % пыли – в основные горелки, 10 % мелкой фракции – в сбросные горелки. Влажность топлива 30 %, пыли – 14 %.

Параметры подачи воздуха и газов:

- вторичный воздух: температура 382 °С, расход 167 128,8 $\text{м}^3/\text{ч}$;
- пар от эжектора ПВКр с расходом 3,3 т/ч при температуре 350 °С;
- сбросные газы (при работе двух мельниц): температура 70 °С, расход 72 000 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Для оценки выбросов оксидов азота и задачи настроек в расчетной модели необходимо принять значение выбросов котлоагрегатов при номинальной нагрузке. Исходя из сравнительного анализа данных отчетов энергоугольных компаний, опыта работ с котлами, использующими жидкое шлакоудаление, и нормативной литературы принято, что текущей нормой для числового моделирования будут выбросы $\sim 800 \text{ мг}/\text{м}^3$ при номинальной нагрузке. Достоверность результатов численного моделирования была проверена в рамках процедуры верификации, которая включала в себя тестовые расчеты, сравнение с натурными экспериментальными данными и оценку погрешностей.

В качестве тестового расчета была выбрана двумерная осесимметричная задача о турбулентной струе с химической реакцией (водород – воздух), имеющая эталонное решение [8]. Сравнение рассчитанных профилей скорости и температуры с данными [8] показало оптимальное качественное и количественное согласование.

Для анализа сходимости решения проводился мониторинг невязок уравнений неразрывности, импульса, энергии, а также концентраций ключевых компонентов (CO_2 , O_2). Расчет считался сходящимся при снижении нормированных невязок ниже уровня 10^{-6} для всех уравнений, за исключением уравнения энергии (10^{-8}), что является стандартной практикой для реакционных течений [12].

Основная валидация разработанной модели проводилась путем сравнения результатов моделирования с эксплуатационными данными, полученными для котла БКЗ-320-140 при номинальной нагрузке. Сравнялись интегральные параметры, измеренные на выходе из топочной камеры.

Сравнение результатов моделирования с эксплуатационными данными
Comparison of simulation results with operational data

Параметр	Экспериментальное значение	Результат расчета	Относительная погрешность, %
Температура газов на выходе из топки, °С	1150 ± 25	1124	-2,3
Объемная доля O ₂ на выходе, %	3,8 ± 0,2	3,92	+3,2
Концентрация NO _x , мг/нм ³ (при O ₂ = 6 %)	820 ± 40	840	+2,4
Средняя относительная погрешность	4,1	2,58	2,6

Согласно данным таблицы, расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 3,2 % по всем ключевым параметрам. Наибольшее согласование наблюдается для температуры и концентрации оксидов азота, что подтверждает адекватность выбранных моделей горения и образования оксидов азота NO_x.

**2. АНАЛИЗ БАЗОВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ТОПКИ**

Результаты моделирования, представленные в виде полей концентраций оксидов азота NO_x в различных сечениях на рис. 2 и 3, показали средний уровень эмиссии 840 мг/нм³. Анализ пространственного распределения оксидов азота выявил локальные очаги их образования, связанные с зонами высоких температур и избытка воздуха в предтопочной области. Установлено, что формирование однотипных картин концентраций для котлов данной серии свидетельствует об общем механизме образования оксидов азота NO_x, обусловленном аэродинамикой предтопок. Полученные данные верифицировали расчетную модель и определили корректные параметры для последующего моделирования технических решений.

В ходе исследования методом математического моделирования была проанализирована технология установки восьми низкоэмиссионных горелок вертикально-щелевого типа. Реконструированные горелки расположены угловым способом (по 4 на каждый предтопок) и оснащены нижним воздушным сектором и контуром сброса сушильного агента.

Система топливоподачи включает:

- подачу угольной пыли из промбункера через пылепитатели;
- использование слабозапыленного отработанного сушильного агента;
- подачу горячего воздуха с температурой 382 °С.

В рамках реализации проекта существующие сбросные сопла были демонтированы (заглушены), а также учтено влияние неорганизованных присосов и присосов сушильного агента. Режимные параметры горения характеризуются коэффициентом избытка воздуха в активной зоне горения $\alpha_{a,r} = 1,11$

и коэффициентом избытка воздуха на выходе из топки $\alpha_T'' = 1,2$. Такая конфигурация направлена на оптимизацию процесса сжигания и снижение эмиссии загрязняющих веществ.



Рис. 2. Концентрации NO_x в продольных осевых сечениях полутопков и котла до введения низкоэмиссионных горелок, $\text{мг}/\text{нм}^3$

Fig. 2. NO_x concentrations in the longitudinal axial sections of semi-furnaces and boiler before low emission burners adding, mg/nm^3

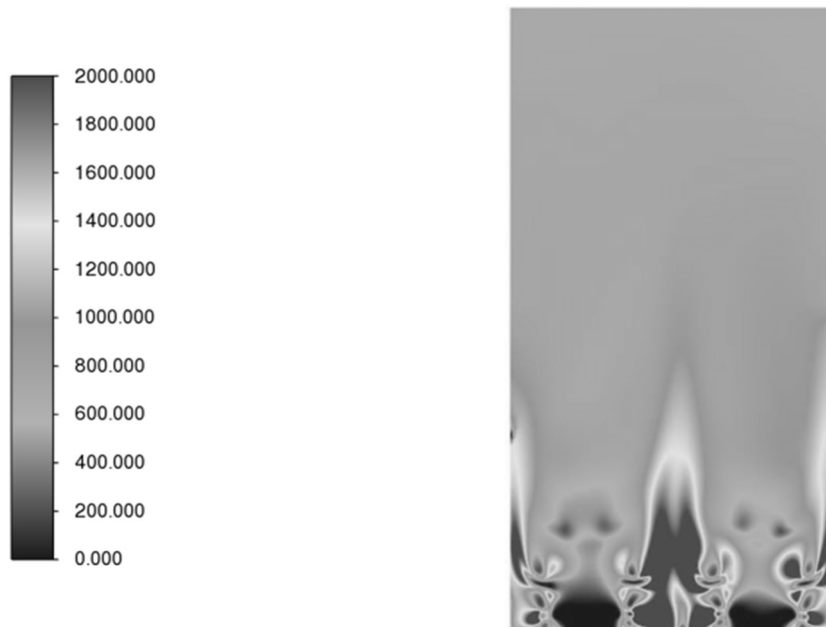


Рис. 3. Концентрация NO_x в поперечной оси топки до введения низкоэмиссионных горелок, $\text{мг}/\text{нм}^3$

Fig. 3. NO_x concentration in the transverse axis of the furnace before low emission burners adding, mg/nm^3

По результатам численного моделирования котла с низкоэмиссионными горелками на номинальном режиме концентрации оксидов азота NO_x на выходе из топки находятся в диапазоне $500 \dots 520 \text{ мг/нм}^3$ (рис. 4 и 5).

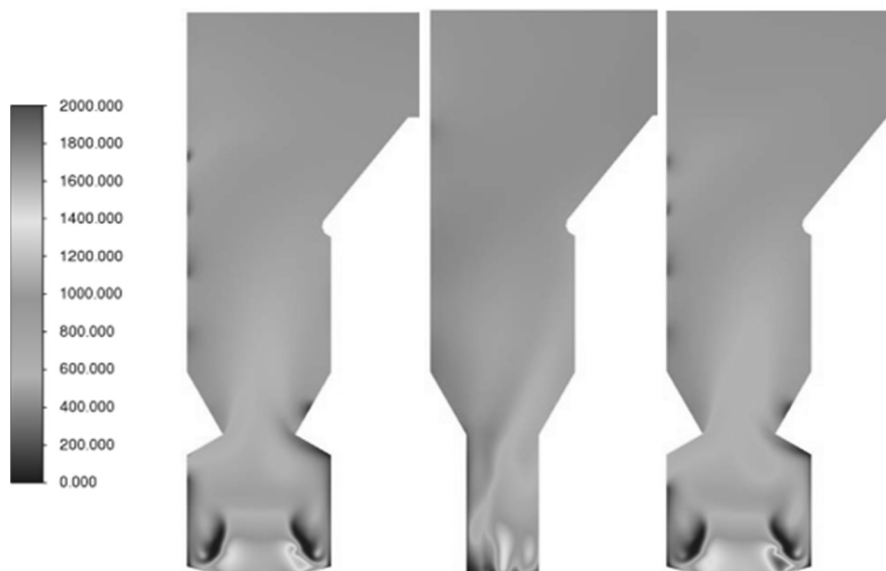


Рис. 4. Концентрации NO_x в продольных осевых сечениях полутопков и котла после введения низкоэмиссионных горелок, мг/нм^3

Fig. 4. NO_x concentrations in the longitudinal axial sections of semi-furnaces and boiler after low emission burners adding, mg/nm^3



Рис. 5. Концентрация NO_x в поперечной оси топки после введения низкоэмиссионных горелок, мг/нм^3

Fig. 5. NO_x concentration in the transverse axis of the furnace after low emission burners adding, mg/nm^3

Базовая схема характеризуется классическим тангенциальным движением с хорошо организованным вихрем. Однако наблюдается значительная неравномерность распределения скоростей с локальными зонами обратных токов в углах топки, что способствует заносу крупных частиц топлива и потенциальному шлакованию.

Таким образом, проведенное численное моделирование отражает свою экологическую эффективность в снижении выбросов оксидов азота NO_x . Однако для обеспечения долгосрочной эксплуатационной надежности необходимо разработать и реализовать меры по устранению выявленных аэродинамических недостатков (неравномерность и обратные токи), чтобы минимизировать риски шлакования и повысить общий КПД котла.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведенное комплексное исследование, основанное на численном моделировании топочных процессов в котле БКЗ-320-140, позволило получить следующие основные научные и практические результаты.

Впервые для котлов БКЗ-320-140 с жидким шлакоудалением методом CFD-моделирования установлен количественный эффект от применения низкоэмиссионных горелок и отглушения существующих сбросных горелок.

Разработанная и верифицированная модель позволяет проводить оценку эффективности и оптимизацию низкоэмиссионных мероприятий для действующего парка энергетических котлов типа БКЗ-320-140. Результаты работы были использованы для разработки технического решения по модернизации топочной камеры, которое обеспечивает снижение выбросов оксидов азота NO_x на 30 % (с 840 до 510 мг/м^3) без установки дорогостоящего оборудования концевой очистки газов. Реализация этого решения позволяет предприятию соответствовать требованиям законодательства в области НДТ с минимальными капитальными затратами, оцениваемыми в 3–4 раза ниже, чем при внедрении систем СКВ/СНКВ.

Стоит отметить, что кроме экологического эффекта важным преимуществом предлагаемой модернизации является ее экономическая целесообразность. В отличие от систем концевой очистки газов, требующих значительных капитальных и эксплуатационных затрат, первичные методы снижения выбросов позволяют достичь нормативных показателей с минимальными вложениями.

На основе анализа результатов исследований в области модернизации аналогичных энергоблоков можно привести ориентировочную оценку затрат: капитальные затраты на установку низкоэмиссионных горелок и отглушение сбросных сопел для котла составляют 37,2 млн рублей без учета НДС (стоимость может варьироваться в зависимости от производителя и условий монтажа); эксплуатационные расходы при этом не увеличиваются, а в некоторых случаях снижаются за счет оптимизации аэродинамики и уменьшения потерь тепла.

Таким образом, предлагаемое решение позволяет снизить капитальные затраты в 2–3 раза, а также избежать регулярных эксплуатационных издержек, характерных для систем концевой очистки. Дополнительным экономическим эффектом является снижение рисков штрафных санкций за превышение

нормативов выбросов, что особенно актуально в условиях ужесточения экологического законодательства.

Более подробный расчет экономической эффективности для конкретных условий эксплуатации может быть выполнен с использованием методик, приведенных в аналогичных исследованиях [14, 15], а также на основе данных моделирования, представленных в настоящей работе.

Перспективы дальнейших исследований:

- расширение модели для оценки динамических режимов работы котла (переменные нагрузки, розжиг, пылепродувки) с целью прогнозирования выбросов в нестационарных условиях;

- интеграция модели образования оксидов азота с моделью шлакования и коррозии теплообменных поверхностей для комплексной оптимизации экологических и эксплуатационных показателей;

- исследование эффективности комбинированного применения первичных методов (ступенчатое сжигание) с системами впрыска реагентов (например, аммиака) в топку для достижения нормативов, соответствующих перспективным требованиям НДТ;

- адаптация разработанной методики для моделирования процессов сжигания композитных топливных смесей на основе угля и биомассы.

Таким образом, работа вносит существенный вклад в развитие методов численного моделирования и создание научно обоснованных решений для снижения экологической нагрузки объектов теплоэнергетики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках статьи программный продукт ANSYS Fluent послужил инструментом для комплексного анализа функционирования котла БКЗ-320-140. Полученные результаты показали: первичные меры подавления NO_x эффективны. Разработанная математическая модель после верификации по эксплуатационным замерам сошлась с ними с погрешностью менее 3 %. Отсюда следует возможность ее применения как рабочего инструмента для оценки топочных процессов и их последующей оптимизации.

Численное моделирование использовалось не как иллюстрация, а как средство проверки ключевого предположения: определяющий фактор снижения эмиссии NO_x – аэродинамическая организация топочной камеры. Модель позволила не фиксировать итоговую концентрацию (500...520 мг/м³), а установить количественные связи между конструктивными изменениями и химией горения, выстроив причинно-следственные цепочки.

В расчет вводились вертикально-щелевые горелки и отключение сбросных сопел. Полученные поля аэродинамических параметров зафиксировали ряд изменений.

- Восстановительная зона: распределение концентраций O_2 и топлива дало возможность визуализировать область с пониженным α , где идут восстановительные реакции, подавляющие генерацию как термических, так и топливных оксидов азота. Размеры и устойчивость этой зоны были оценены количественно.

- **Время пребывания:** по расчетным траекториям и векторным полям скоростей выявлено, как новая конфигурация снижает тангенциальную составляющую потока. Следствие – увеличение времени нахождения газовой фазы в высокотемпературной области. Этого достаточно, чтобы промежуточные азотсодержащие компоненты (HCN, NH₃) успели окислиться до N₂ к моменту ввода избыточного воздуха ($\alpha^m = 1,2$).

В базовом случае (тангенциальный вихрь) моделирование зафиксировало интенсивное турбулентное смешение и локальные пики температур – классические факторы образования термических NO_x. Поэтапно вводя в расчет новые условия (щелевые горелки, отключенные сопла, измененные коэффициенты избытка воздуха), удалось количественно увидеть: модификация аэродинамики подавляет механизмы генерации NO_x через управление температурными полями, распределением концентраций и временем пребывания среды.

Важно, что расчет предсказал не только целевой результат, но и нежелательные явления: существенную неравномерность скоростного поля и формирование обратных токов в угловых зонах. Следовательно, модель правильно отражает сложную многопараметрическую реальность и пригодна для итерационной доводки (например, для поиска конфигурации с минимизацией рисков шлакования без повышения эмиссии).

Построенная модель обеспечила прямое количественное доказательство связи между управляемыми аэродинамическими параметрами (структура потока, время пребывания) и итоговым экологическим показателем – содержанием NO_x. Это позволяет рассматривать ее как расчетную базу при проектировании низкоэмиссионных топочных устройств и прогнозировании их характеристик.

Фактически достигнутое снижение концентрации NO_x с 840 до 510 мг/нм³ (30 %) соответствует нормативам наилучших доступных технологий и не требует дорогостоящей концевой очистки (СКВ, СНКВ). Сравнительная оценка альтернатив показывает: капитальные затраты на предложенное решение ниже в 3–4 раза, эксплуатационные расходы не возрастают. Для эксплуатационных организаций, нацеленных на снижение экологической нагрузки без значительного удорожания, такая модернизация экономически привлекательна. При необходимости детального технико-экономического обоснования верифицированная модель может дополняться стандартными методиками оценки инвестиционной эффективности природоохранных проектов.

Перспективы дальнейших исследований видятся в интеграции модели с оценкой шлакования и коррозии, в исследовании динамических режимов работы и адаптации методики для сжигания композитных топливных смесей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Energy Institute. Statistical Review of World Energy 2024. EI, 2024. – URL: https://www.bpb.de/system/files/dokument_pdf/Statistical_Review_of_World_Energy_2024.pdf (accessed: 04.05.2026).
2. Pulverized coal-fired boilers: future directions of scientific research / M. Ochowiak, Z. Bielecki, A. Krupińska, M. Matuszak, S. Włodarczak, M. Bielecki, D. Choiński, J. Smyła, K. Jagiełło // *Energies*. – 2023. – Vol. 16 (2). – P. 935. – DOI: 10.3390/en16020935.
3. 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. – DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101842.
4. Алехнович А.Н. Реконструкция и новые котлы отечественных ТЭС. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 320 с.
5. ИТС 38-2022. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – М.: Бюро НДТ, 2022. – 275 с.
6. 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. – DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4475.
7. Алехнович А.Н. Распределение воздуха и топлива по горелкам котлов. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. – 128 с.
8. Gómez A., Fueyo N., Díez L.I. Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in the convective zone of a power-generation boiler // *Applied Thermal Engineering*. – 2008. – Vol. 28 (5). – P. 532–546. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.019.
9. Modlinski N. Computational modeling of a utility boiler tangentially-fired furnace retrofitted with swirl burners // *Fuel Processing Technology*. – 2010. – Vol. 91 (11). – P. 1601–1608. – DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.06.008.
10. Кайкин Г.М. Автоматизация барабанного котла БКЗ-320-140. – Иваново, 2023. – 71 с.
11. Улучшение качества бурых углей марки 2БР-В2 и 2БОМСШ-Б2 с помощью химической обработки / Ф.М. Юсупов, А.А. Кўчаров, М.М. Маманазаров, Х.Н. Саъдуллаева // *Universum: технические науки*. – 2020. – № 3-2 (72). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluchshenie-kachestva-buryh-ugley-marki-2br-v2-i-2bomssh-b2-s-pomoschyu-himicheskoy-obrabotki> (дата обращения: 28.04.2026).
12. Реготов Г.А. Численное моделирование процесса псевдооживления в ANSYS Fluent // *Universum: технические науки*. – 2019. – № 7 (64). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-protssesa-psevdoozhizheniya-v-ansys-fluent> (дата обращения: 28.04.2026).
13. Особенности формирования вихревого следа в дозвуковом двухфазном потоке / Е.С. Байметова, Е.А. Митрюкова, А.А. Чернова, А.Р. Шигапова // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 124–133. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-vihrevogo-sleda-v-dozvukovom-dvuhfaznom-potoke> (дата обращения: 28.04.2026).
14. Расчетное исследование процессов кислородного горения и газификации пылеугольного топлива в энергетических объектах разной мощности / Д.М. Божеева, В.А. Кузнецов, А.А. Дектерев, А.В. Минаков // *Уголь*. – 2025. – № 1. – С. 27–32. – DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-27-32. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnoe-issledovanie-protssessov-kislorodnogo-goreniya-i-gazifikatsii-pyleugolnogo-topliva-v-energeticheskikh-obektah-raznoy> (дата обращения: 28.04.2026).
15. Шеленова Д.Д. Мероприятия по снижению вредных выбросов с применением плазмотрона для очистки дымовых газов // *Вестник науки*. – 2025. – № 6 (87), т. 2. – С. 2268–2280. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/meropriyatiya-po-snizheniyu-vrednyh-vybrosov-s-primeneniem-plazmotrona-dlya-ochistki-dymovyh-gazov> (дата обращения: 28.04.2026).

Ульянов Александр Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент Братского государственного университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование. Имеет более 40 печатных работ. E-mail: coberul@gmail.com

Погодаев Максим Игоревич, аспирант направления «Математическое моделирование и численные методы», Братский государственный университет. Основное направление научных исследований – комплексное моделирование взаимосвязанных процессов. E-mail: maks.pogodaev2012@yandex.ru

Ulyanov Alexandr D., associate professor, PhD in Engineering, Bratsk State University. His primary research focus is on mathematical modeling. He has published over 40 papers. E-mail: coberul@gmail.com

Pogodaev Maxim I., postgraduate student in Mathematical Modeling and Numerical Methods, Bratsk State University. His primary research focus is on complex modeling of interconnected processes. E-mail: maks.pogodaev2012@yandex.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-83-98

Modeling of combustion processes to reduce nitrogen oxide emissions from a boiler unit of the BKZ-320-140 type*

D.A. ULYANOV^a, M.I. POGODAEV^b

Bratsk State University, 40 Makarenko Street, Bratsk, 665709, Russian Federation

^a coberul@gmail.com ^b maks.pogodaev2012@yandex.ru

Abstract

This article presents the results of numerical modeling of combustion processes and nitrogen oxide formation in the combustion chamber of a BKZ-320-140 boiler fired with a high-moisture brown coal from the Irbeyskoye deposit. It also provides an approximate cost-effectiveness forecast for the considered method for optimizing nitrogen oxide emissions. The objective of the study was to evaluate the effectiveness of primary methods for reducing nitrogen oxide emissions, specifically, upgrading the boiler with low-emission burners and shutting off exhaust nozzles. The modeling was performed in the ANSYS Fluent software using a verified mathematical model that takes into account multiphase flows, turbulence, coal dust combustion, and the main mechanisms of nitrogen oxide formation (thermal, fuel, and fast).

The study showed that the proposed technical solution can reduce NO_x concentrations in flue gases by 30 % – from 840 to 510 mg/nm³. It has been found that optimizing combustion chamber aerodynamics is a key factor in reducing emissions: reducing the tangential velocity component, minimizing reverse flow zones, and creating a stable recovery zone with an increased gas phase residence time. The developed model demonstrated an optimal agreement with operating data (average error less than 3 %). The solution discussed in this article is fully consistent with the strategic goals of the Energy Strategy of the Russian Federation through 2035 in terms of modeling energy processes and implementing best available technologies. The study demonstrates a practical way to improve the environmental efficiency of existing power units without extensive reconstruction, which is critical for the sustainable development of coal-fired generation in regions such as the Irkutsk Region. Further research involves integrating the model with slagging and corrosion assessments, as well as studying the dynamic operating modes of the boiler. This approach directly supports the policy of technological sovereignty, as it enables the achievement of stringent environmental standards using domestic engineering solutions and software, minimizing dependence on foreign gas cleaning systems.

Keywords: BKZ-320-140 boiler, nitrogen oxides, numerical simulation, low-emission burners, staged combustion, combustion processes, ANSYS Fluent, emission reduction, model

* Received 11 December 2025.

verification, model validation, numerical solution of the Navier-Stokes equations, Discrete Ordinates model

REFERENCES

1. Energy Institute. *Statistical Review of World Energy 2024*. EI, 2024. Available at: https://www.bpb.de/system/files/dokument_pdf/Statistical_Review_of_World_Energy_2024.pdf (accessed 04.05.2026).
2. Ochowiak M., Bielecki Z., Krupińska A., Matuszak M., Włodarczak S., Bielecki M., Choiński D., Smyła J., Jagiełło K. Pulverized coal-fired boilers: future directions of scientific research. *Energies*, 2023, vol. 16 (2), p. 935. DOI: 10.3390/en16020935.
3. 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. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.101842.
4. Alekhovich A.N. *Rekonstruktsiya i novye kotly otechestvennykh TES* [Reconstruction and new boilers of domestic thermal power plants]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2022. 320 p.
5. ITS 38-2022. *Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii* [Fuel combustion on large plants for production of energy]. Information and technical handbook on best available techniques. Moscow, Bureau of NDT Publ., 2022. 275 p.
6. Gil A.V., Maltsev K.I., Abramov N.V., Zavorin A.S., Starchenko A.V. Chislennoe issledovanie vliyaniya izbytkha pervichnogo vozdukhha na protsessy goreniya v topochnoi kamere energeticheskogo kotla s mnogokanal'nymi vikhrevymi gorelkami [Combustion in a chamber furnace with a tangentially swirling vortex]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 7–16. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4475.
7. Alekhovich A.N. *Raspredelenie vozdukhha i topliva po gorelkam kotlov* [Air and fuel distribution to boiler burners]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2023. 128 p.
8. Gómez A., Fueyo N., Díez L.I. Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in the convective zone of a power-generation boiler. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 28 (5), pp. 532–546. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.04.019.
9. Modlinski N. Computational modeling of a utility boiler tangentially-fired furnace retrofitted with swirl burners. *Fuel Processing Technology*, 2010, vol. 91 (11), pp. 1601–1608. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.06.008.
10. Kaikin G.M. *Avtomatizatsiya barabannogo kotla BKZ-320-140* [Automation of the BKZ-320-140 drum boiler]. Ivanovo, 2023. 71 p.
11. Yusupov F.M., Kucharov A.A., Mamanazarov M.M., Sa'dullayeva Kh.N. Uluchshenie kachestva burykh uglei marki 2BR-V2 i 2BOMSSH-B2 s pomoshch'yu khimicheskoi obrabotki [Improving the quality of brown coal brand 2BP-B2 and 2BOMCIII-B2 with the help of chemical treatment]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical Sciences*, 2020, no. 3-2 (72). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/uluchshenie-kachestva-buryh-ugley-marki-2br-v2-i-2bomssh-b2-s-pomoschyu-himicheskoy-obrabotki> (accessed 28.04.2026).
12. Regotov G.A. Chislennoe modelirovanie protsessha psevdoozhizheniya v ANSYS Fluent [Numerical simulation of the fluidization process in ANSYS Fluent]. *Universum: tekhnicheskie nauki = Universum: Technical Sciences*, 2019, no. 7 (64). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-protsessha-psevdoozhizheniya-v-ansys-fluent> (accessed 28.04.2026).
13. Baymetova E.S., Mitryukova E.A., Chernova A.A., Shigapova A.R. Osobennosti formirovaniya vikhrevogo sleda v dozvukovom dvukhfaznom potoke [Peculiarities of vortex trace formation in subsonic two-phase flow]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya = Chemical Physics and Mesoscopy*, 2025, vol. 27 (2), pp. 124–133. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-formirovaniya-vihrevogo-sleda-v-dozvukovom-dvuhfaznom-potoke> (accessed 28.04.2026).
14. Bozheeva D.M., Kuznetsov V.A., Dekterev A.A., Minakov A.V. Raschetnoe issledovanie protsessov kislородnogo goreniya i gazifikatsii pyleugol'nogo topliva v energeticheskikh ob'ektakh raznoi moshchnosti [Computational study of the oxygen combustion and gasification of pulverized coal

fuel processes at power generating facilities of different capacities]. *Ugol' = Russian Coal Journal*, 2025, no. 1, pp. 27–32. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-27-32. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/raschetnoe-issledovanie-protsessov-kislorodnogo-goreniya-i-gazifikatsii-pyleugolnogo-topliva-v-energeticheskikh-obektah-raznoy> (accessed 28.04.2026).

15. Shelepova D.D. Meropriyatiya po snizheniyu vrednykh vybrosov s primeneniem plazmotrona dlya ochistki dymovykh gazov [Measures to reduce harmful emissions using a plasma torch for flue gas purification]. *Vestnik nauki = Bulletin of Science*, 2025, no. 6 (87), vol. 2, pp. 2268–2280. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/meropriyatiya-po-snizheniyu-vrednyh-vybrosov-s-primeneniem-plazmotrona-dlya-ochistki-dymovykh-gazov> (accessed 28.04.2026).

Для цитирования:

Ульянов А.Д., Погодаев М.И. Моделирование топочных процессов с целью снижения выбросов оксида азота от котлоагрегата типа БКЗ-320-140 // Системы анализа и обработки данных. – 2026. – № 2 (102). – С. 83–98. – DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-83-98.

For citation:

Ulyanov A.D., Pogodaev M.I. Modelirovanie topochnykh protsessov s tsel'yu snizheniya vybrosov oksida azota ot kotloagregata tipa BKZ-320-140 [Modeling of combustion processes to reduce nitrogen oxide emissions from a boiler unit of the BKZ-320-140 type]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2026, no. 2 (102), pp. 83–98. DOI: 10.17212/2782-2001-2026-2-83-98.