

На правах рукописи



ВЕРЕЩЕТИН
Владимир Артурович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НИЗКОЭМИССИОННЫХ
ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КОТЛОВ ТЭС**

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»).

Научный руководитель –

Тугов Андрей Николаевич, доктор технических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Григорьев Константин Анатольевич, доктор технических наук, доцент, Открытое акционерное общество «Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова» (ОАО «НПО ЦКТИ»), главный научный сотрудник аналитического отдела

Прохоров Вадим Борисович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»), профессор кафедры «Тепловые электрические станции»

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО «НИТПУ»)

Защита состоится «28» июня 2018 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 222.001.01 при Открытом акционерном обществе «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» по адресу: 115280, г. Москва, ул. Автозаводская, 14.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ОАО «ВТИ» и на сайте: <http://vti.ru/activities/dissertation-council/informaciya-o-zawite-dissertacij/>.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



*Рябов
Георгий
Александрович*

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В России около 50 % электрической энергии вырабатывается за счет сжигания природного газа, а доля природного газа, потребляемого на тепловых электростанциях (ТЭС), составляет 75 %. При этом на большинстве ТЭС и практически во всех отопительных котельных для сжигания природного газа используют горелочные устройства, в которых газ, смешиваясь с воздухом, выгорает в топке котла при высокой температуре, в результате чего образуются оксиды азота (NO_x), которые являются основным загрязнителем воздушной среды для этих предприятий.

В РФ действует ГОСТ Р 50831–95, согласно которому при сжигании газообразного топлива в котельных установках концентрация NO_x в дымовых газах не должна превышать 125 мг/м^3 *. Европейские нормы еще жестче. Так, в соответствии с Директивой ЕС 2010/75/EU концентрация NO_x в уходящих газах должна быть менее 83 мг/м^3 .

Мероприятия, направленные на уменьшение выбросов NO_x с уходящими газами котлов, можно разделить на две основные группы:

- подавление образования NO_x в процессе горения топлива – это так называемые внутритопочные или технологические методы;
- превращение NO_x в N_2 в системе газоочистки с помощью аммиака или карбамида.

Несмотря на высокую эффективность (до 90 %) систем газоочистки, они заметно увеличивают капитальные и эксплуатационные затраты котельной установки. Поэтому их используют в тех случаях, когда оказывается невозможным обеспечить нормативные выбросы NO_x технологическими методами.

Одним из наиболее эффективных внутритопочных мероприятий, снижающих выбросы NO_x , является применение низкоэмиссионных горелок. Конструкция горелочного устройства во многом определяет интенсивность воспламенения факела, условия смешения топлива с воздухом и максимальный уровень температуры в ядре горения. Изменяя конструкцию горелки, можно влиять на эти параметры и уменьшать образование NO_x на 30–60 % без ухудшения процесса горения, при умеренных капитальных и эксплуатационных затратах.

Цель работы заключается в создании методических основ, разработке и экспериментальном обосновании рекомендаций по проектированию газогорелочных устройств с низким выходом NO_x .

* Здесь и далее значения концентрации вредных компонентов в продуктах сгорания приведены к нормальным условиям в пересчете на объем сухих дымовых газов при концентрации кислорода $\text{O}_2 = 6 \%$, что соответствует коэффициенту избытка воздуха 1,4.

Поставлены и решены следующие задачи:

- на основе обзора литературы выявлены тенденции и намечены пути совершенствования низкоэмиссионных газовых горелок;
- на стендовой установке исследовано влияние конструктивных особенностей горелок и режимных факторов на эмиссию вредных выбросов;
- на основе вычислительного эксперимента исследовано влияние конструкции и режимов работы горелочных устройств на внутрифакельные процессы;
- выполнено обобщение расчетных и экспериментальных исследований и разработаны рекомендации по проектированию низкоэмиссионных горелочных устройств;
- разработаны, внедрены и исследованы на действующих котлах низкоэмиссионные горелки.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- получены расчетные и экспериментальные зависимости влияния условий смесеобразования при стадийном сжигании природного газа на образование NO_x ;
- на основе вычислительного эксперимента установлено влияние конструкции основных типов амбразур газовых горелок на характер протекания процессов в факеле и генерацию NO_x ;
- получены расчетные и экспериментальные зависимости влияния внутренней рециркуляции дымовых газов и балластирования окислителя (внешней рециркуляции продуктов сгорания) в газовых горелках на выход NO_x .

Практическая значимость. На основе обобщения результатов комплексных исследований разработаны и апробированы рекомендации по созданию низкоэмиссионных газовых горелок. Результаты работы внедрены на энергетических котлах ТГМП-314 ТЭЦ-23 ПАО «Мосэнерго», Е-160-3,9-440 ГМ ГЭС-1 ПАО «Мосэнерго», водогрейном котле КВГМ-50 Шатурской ГРЭС, использованы в проектах реконструкции котлов ТП-108 Шатурской ГРЭС, Е-320-13,8-560 ГМ Уфимской ТЭЦ-2, БКЗ-420-140 НГМ Новостерлитамакской ТЭЦ, П-50Р Каширской ГРЭС и при проектировании котла Е-135,32-420ДГ Северной ЭС VKG Energia OÜ, а также использованы при разработке стандартов СО 153-34.02.304–2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций» и ИТС 38–2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии».

Достоверность полученных результатов работы обеспечивается применением современных вычислительных программных продуктов, апробированных математических моделей и методов вычислений при моделировании и обработке результатов испытаний; использованием проверенных методик проведения испытаний и аттестованных измерительных приборов; удовлетво-

рительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, полученных на стенде и в промышленных условиях, а также с данными других авторов там, где они имеются.

На защиту выносятся: результаты экспериментальных исследований горелок на стендовой установке; результаты вычислительного эксперимента; результаты промышленных испытаний пилотных образцов низкоэмиссионных горелочных устройств на водогрейных и энергетических котельных установках; рекомендации по созданию низкоэмиссионных горелочных устройств для сжигания газообразных топлив.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования; анализе теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации; разработке экспериментальной установки, схемы измерений и программы испытаний; проведении математического моделирования и численных исследований процессов горения и образования оксидов азота в пламени горелки; проведении промышленных испытаний, обработке, анализе и обобщении полученных результатов; разработке рекомендаций по проектированию малотоксичных горелочных устройств.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Втором конкурсе молодых специалистов (Москва, ВТИ, 2003), Девятой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Москва, МЭИ, 2003), Всероссийской конференции по итогам конкурса молодых специалистов организаций НПК ОАО РАО «ЕЭС России» (с. Дивноморское, 2005), XIII Международной конференции «Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики» (г. Ялта, пгт. Кореиз, Институт промышленной экологии, 2013), IX и XI международных научно-практических конференциях «Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии» (Москва, ФГУП «ГИНЦВЕТМЕТ», 2013 и 2015), XXI Международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии» (Москва, МЭИ, 2013), VII Всероссийской конференции «Реконструкция энергетики – 2015» (Москва, 2015), 7-th Baltic Heat Transfer Conf. «Advance in Heat Transfer» (г. Таллин, 2015), Всероссийской специализированной научно-практической конференции молодых специалистов с международным участием «Современные технологии в энергетике» (Москва, 2017), II Международной научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» (Москва, 2017) и на заседаниях НТС ОАО «ВТИ».

Публикации. По результатам проведенных исследований опубликовано 22 работы, в том числе 10 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований, изложена на 131 странице, имеет 52 рисунка и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечены научная новизна, практическая значимость полученных результатов и аннотированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор методов снижения образования NO_x , показаны основные тенденции совершенствования конструкций горелочных устройств.

В настоящее время известны три основных механизма образования оксидов азота при горении топлива:

- за счет окисления молекулярного азота воздуха непосредственно в зоне горения (термические оксиды азота);
- в процессе связывания азота углеводородными радикалами (быстрые);
- обусловленный окислением азота, находящегося в органической массе топлива (топливные).

Уменьшение выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов, в которых сжигают газообразное топливо, в основном обеспечивается снижением образования термических NO_x путем режимных мероприятий, направленных на уменьшение температуры и концентрации окислителя в зоне горения: двухступенчатое и нестехиометрическое сжигание, рециркуляция дымовых газов в зону горения, использование низкоэмиссионных горелок.

Анализ отечественного и зарубежного опыта использования низкоэмиссионных газогорелочных устройств для снижения образования NO_x показал, что усовершенствование их конструкции связано с организацией ступенчатого сжигания в факеле горелки и балластированием окислителя путем рециркуляции дымовых газов в горелки.

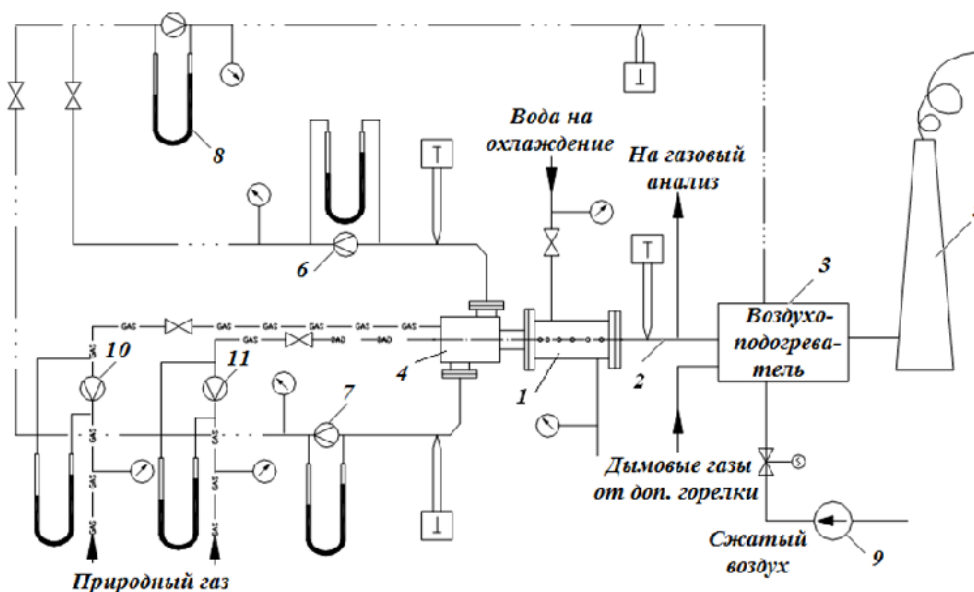
Определен перечень конструктивных и режимных параметров, которые необходимо исследовать, и обоснованы методы их исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальным исследованиям на стендовой установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.

Назначение стенда – исследование закономерностей образования NO_x в зависимости от конструктивных особенностей горелки, условий смесеобразования, наличия и отсутствия внутренней рециркуляции дымовых газов при сжигании природного газа.

Горение газовоздушной смеси происходит в камере сгорания 1, которая представляет собой горизонтальную трубу из нержавеющей стали диаметром 200 мм и длиной 600 мм. Она заключена в трубу большего диаметра, расположенную соосно с внутренней трубой, в которую предусмотрена подача охлаждающей воды. Давление и расход охлаждающей воды контролируются с помощью манометров, установленных на входе и на выходе воды из внешней трубы. По длине камеры сгорания расположены шесть лючков диаметром

14 мм, служащих для отбора проб газов и измерения температуры. Камера сгорания фланцевым соединением крепится к водоохлаждаемому газоходу 2, на котором предусмотрен штуцер для отбора проб продуктов сгорания на газовый анализ.



1 – камера сгорания; 2 – водоохлаждаемый газоход; 3 – воздухоподогреватель; 4 – модель горелки; 5 – дымовая труба; 6, 7, 8, 10, 11 – измерители расхода; 9 – воздуходувка.

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для исследований различных конструкций горелок

Из газохода газы попадают в теплообменник (воздухоподогреватель 3), служащий для нагрева воздуха, идущего на горение. Теплообменник снабжен заслонкой с приводом, которая позволяет изменять поверхность, омываемую дымовыми газами, регулируя тем самым температуру воздуха. Для поддержания стабильности температуры горячего воздуха, а также для нагрева его до высоких температур предусмотрена дополнительная горелка, при включении которой температура воздуха может повышаться до 400 °С. С противоположной стороны к камере сгорания 1 через фланцевое соединение подсоединяются различные конструкции горелочных устройств 4.

Экспериментально полученные графики выхода NO_x в зависимости от коэффициента избытка воздуха (α) при горении природного газа в кинетическом (с предварительным смешением топлива с окислителем) и диффузионном режимах горения приведены на рисунке 2, из которого видно, что обе кривые имеют экстремум в районе избытка воздуха 1,03–1,07.

Низкие значения концентраций NO_x в области с недостатком окислителя ($\alpha \approx 0,9$) как для кинетического, так и для диффузионного режимов дают возможность организации ступенчатого сжигания с пониженным выходом NO_x , при котором на первом этапе горение протекает с $\alpha < 1$, а затем в факел подмешивается окислитель для дожигания несгоревшего топлива.

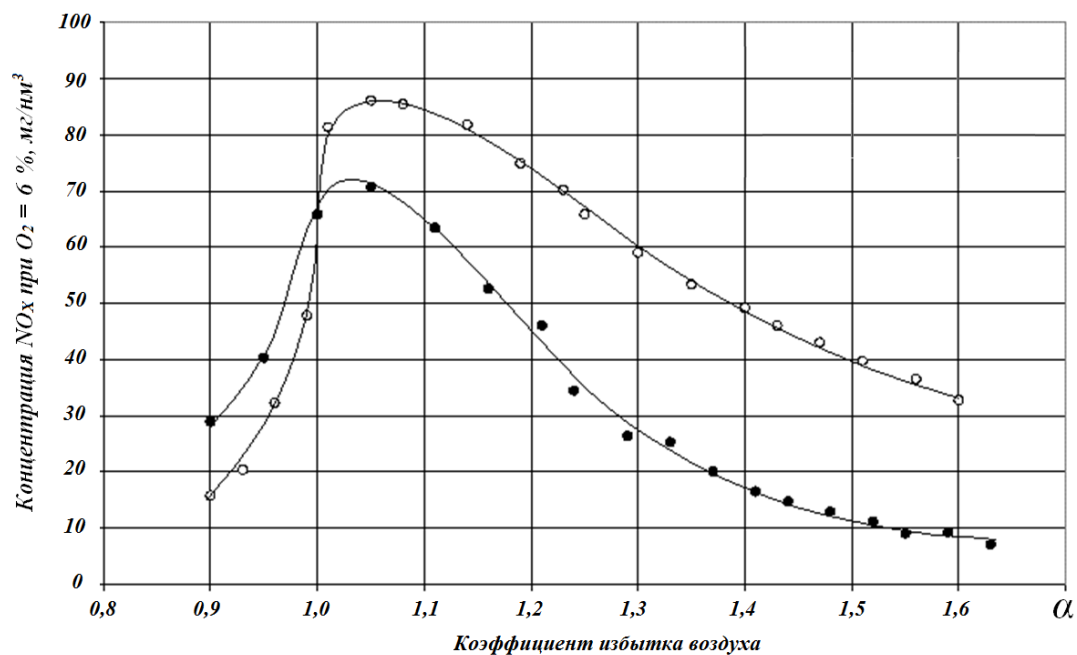
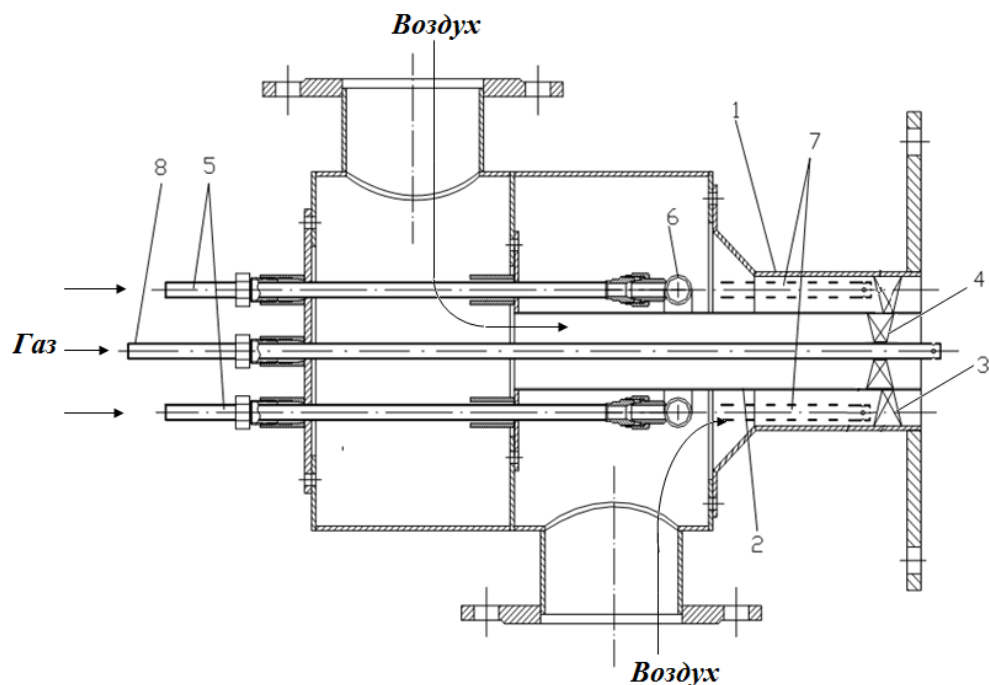


Рисунок 2 – Изменение выхода NO_x в зависимости от избытка воздуха (α) в диффузионной (○) и кинетической (●) области горения природного газа

Ступенчатое сжигание природного газа было исследовано на модели горелочного устройства, схема которого показана на рисунке 3.



1 — обечайка наружного (периферийного) воздушного канала; 2 — обечайка центрального воздушного канала; 3 — лопаточный завихритель в наружном (периферийном) канале; 4 — лопаточный завихритель в центральном канале; 5 — подвод газа в наружный (периферийный) канал; 6 — газовый коллектор; 7 — газораздающие трубки; 8 — подвод газа в центральный канал.

Рисунок 3 – Модель двухканального горелочного устройства

Исследование влияния условий смесеобразования на выход NO_x при ступенчатом сжигании проводилось в 2 этапа.

На первом этапе всё топливо подавалось в наружный (периферийный) канал горелки, ограниченный обечайками 1 и 2 (см. рисунок 3). На выходе этого канала имеется лопаточный завихритель 3 с углом установки лопаток 45° . Воздух в различных пропорциях подавался в периферийный и центральный каналы горелки, причем его общий избыток поддерживался постоянным в пределах 1,08–1,09. Таким образом, увеличение количества воздуха в центральном канале приводило к его уменьшению в наружном канале, и горение газа на начальном участке факела протекало при недостатке окислителя.

Опытами установлено (рисунок 4), что повышение доли вторичного воздуха, подаваемого в центральный канал, в пределах от 0 до 35 % и, соответственно, снижение избытка воздуха в газовоздушной смеси в периферийном канале ведут к уменьшению выхода NO_x примерно на 30 %. Однако при увеличении доли вторичного воздуха выше 30 % резко растет химический недожог (концентрация CO в продуктах сгорания).

На втором этапе исследований ступенчатое сжигание было организовано путем перераспределения подачи топлива между каналами горелки. При этом весь воздух направлялся в наружный канал, куда через коллектор 6 (см. рисунок 3) подавалась только часть природного газа. Остальной газ поступал через трубку 8, установленную в центральном канале.

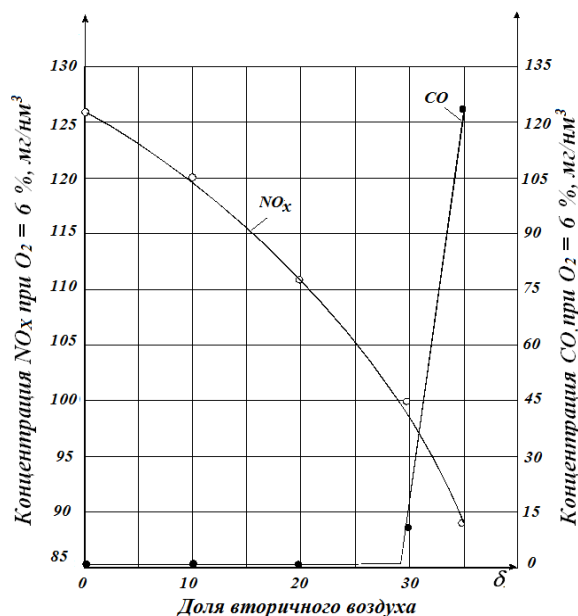


Рисунок 4 – Изменение концентрации NO_x и CO в зависимости от доли вторичного воздуха, подаваемого в центральный канал горелки

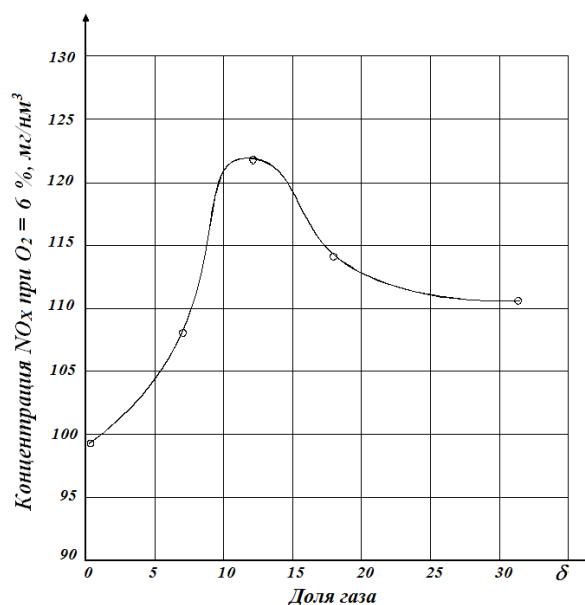
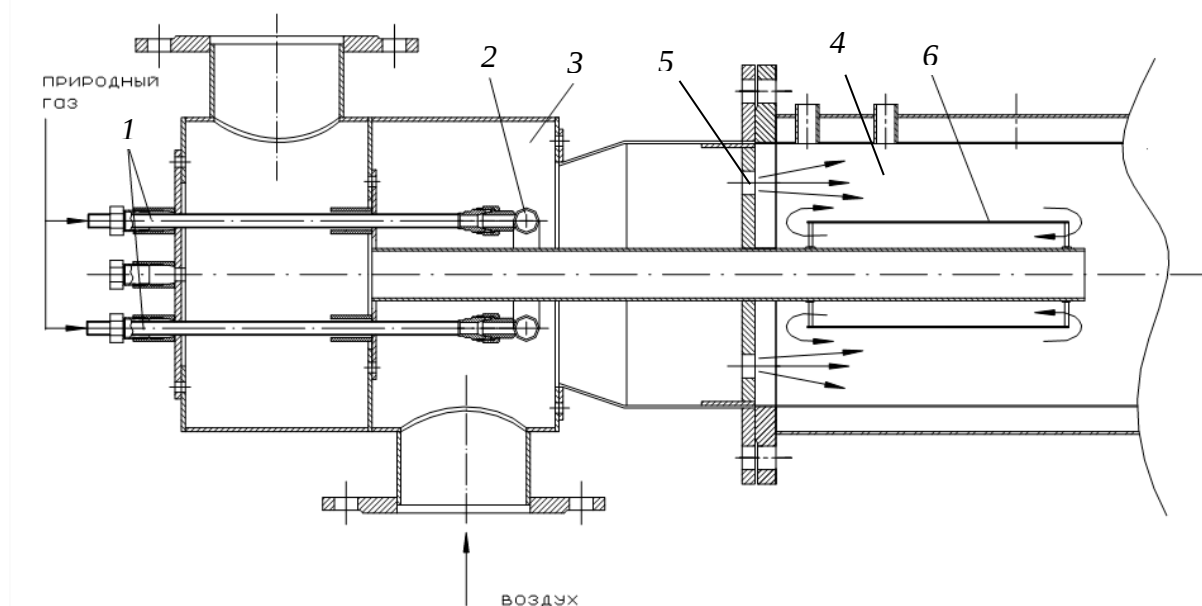


Рисунок 5 – Изменение концентрации NO_x в зависимости от доли газа, подаваемого в центральный канал горелки

На рисунке 5 представлена зависимость выхода NO_x от доли природного газа, подаваемого в центральный канал горелки. Она имеет экстремальный характер. Как видно из рисунка, на начальном участке графика наблюдается рост концентрации NO_x , а затем с увеличением доли природного газа, подаваемого в центральный канал, ее снижение со стабилизацией на уровне примерно 110 мг/м^3 при доле газа, подаваемого в центральный канал, более 30 %.

Рециркуляция дымовых газов как внутренняя, организованная в самой горелке, так и внешняя, за счет отбора продуктов сгорания из газохода котла и направления их в зону горения существенно уменьшает образование NO_x . На модели горелки, представленной на рисунке 6, снижение выхода NO_x осуществлялось с помощью внутренней рециркуляции продуктов сгорания. Газ по трубкам 1 поступал в коллектор 2, из которого далее равномерно выходил по окружности в смесительную камеру 3, куда подавался воздух. Природный газ перемешивался с воздухом до выхода в камеру сгорания 4, куда попадал затем прямыми струями через ряд отверстий 5, расположенных по окружности. Для создания внутренней рециркуляции продуктов сгорания к корню факела в камере была установлена цилиндрическая вставка 6. Через созданную ею кольцевую щель часть продуктов сгорания эжектируется в зону разрежения у корня факела и перемешивается с вытекающими из отверстий 5 струями.



1 – газораздающие трубки; 2 – газовый коллектор; 3 – смесительная камера; 4 – камера сгорания; 5 – отверстия; 6 – цилиндрическая вставка.

Рисунок 6 – Модель горелочного устройства с внутренней рециркуляцией

Результаты исследований влияния внутренней рециркуляции на выход оксидов азота показаны на рисунке 7, из которого видно, что за счет внутренней рециркуляции охлажденных продуктов сгорания к корню факела происходит некоторое снижение образования оксидов азота (около 20 %), однако не столь эффективное по сравнению с внешней рециркуляцией, как показано в главе 3.

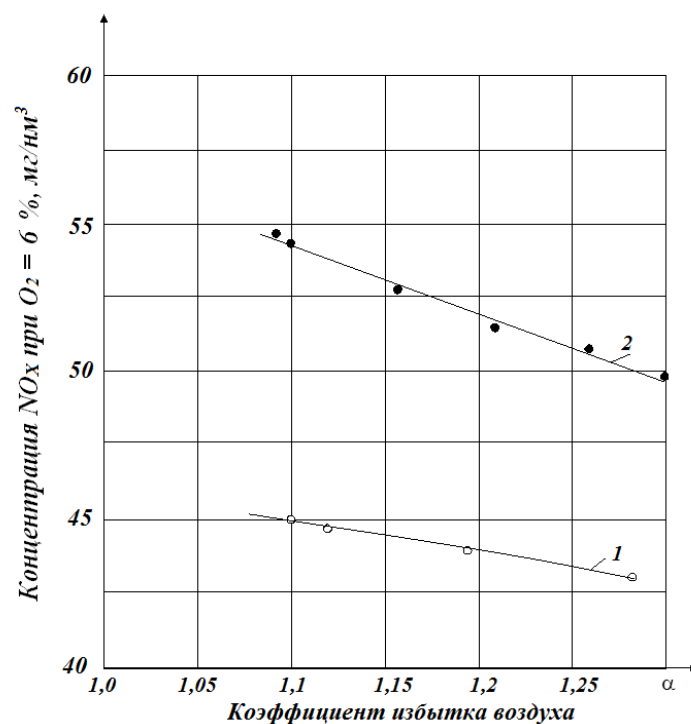


Рисунок 7 – Изменение концентрации NO_x в зависимости от избытка воздуха при наличии внутренней рециркуляции дымовых газов (1) и без нее (2)

Оценка влияния внешней рециркуляции дымовых газов и некоторых других параметров на образование NO_x , исследование которых на стенде достаточно трудоемко, проводилась по результатам математического моделирования.

В третьей главе представлены результаты численного исследования влияния конструктивных элементов горелки, конфигурации амбразуры и внешней рециркуляции дымовых газов на образование NO_x в пламени горелки.

В качестве базовой для моделирования была взята вихревая двухпоточная по воздуху горелка с двумя независимыми вводами природного газа (рисунок 8).

Для численного моделирования горения углеводородного топлива использовался программный комплекс ANSYS CFX 14.5.

Геометрия расчётной области создавалась в программном комплексе твердотельного моделирования SolidWorks, а расчётная сетка – в программе Meshing. Сходимость счёта определялась по значениям невязок решаемых уравнений и стабилизации основных параметров. Выполнялся также контроль по массовому балансу веществ и максимальной температуре горения в расчётной области.

При проведении расчетов:

- в качестве топлива был принят метан, являющийся основным (до 98 %) компонентом природного газа;
- не учитывалось образование загрязнений на поверхностях;
- течение среды считалось установившимся (решение в стационарной постановке).

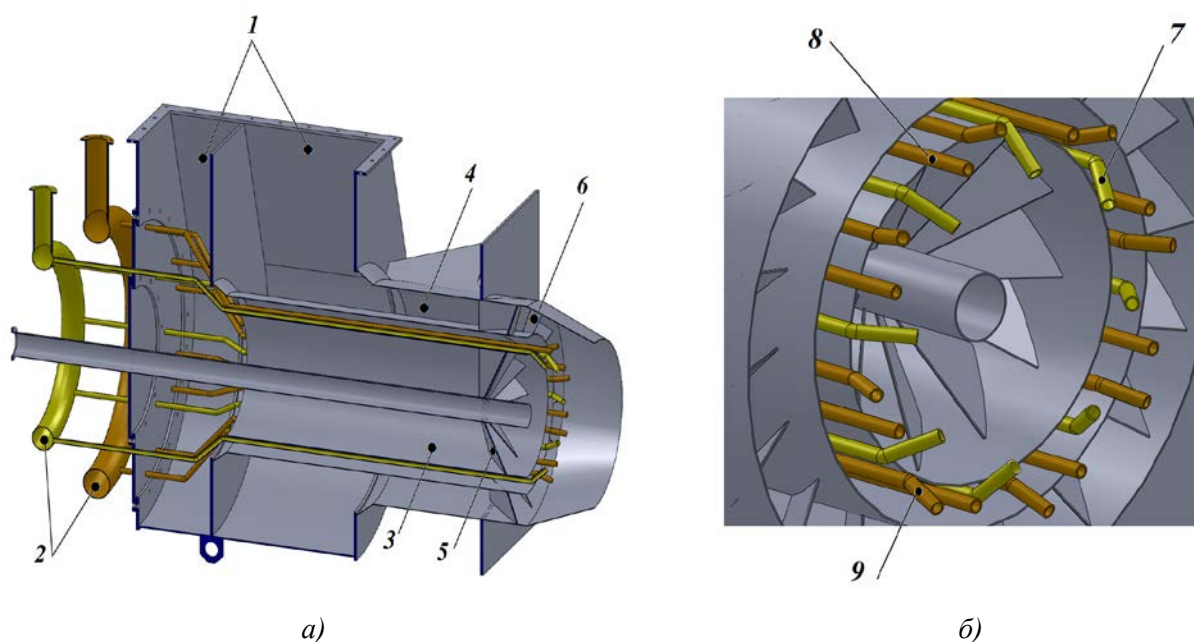


Рисунок 8 – Базовая модель горелки

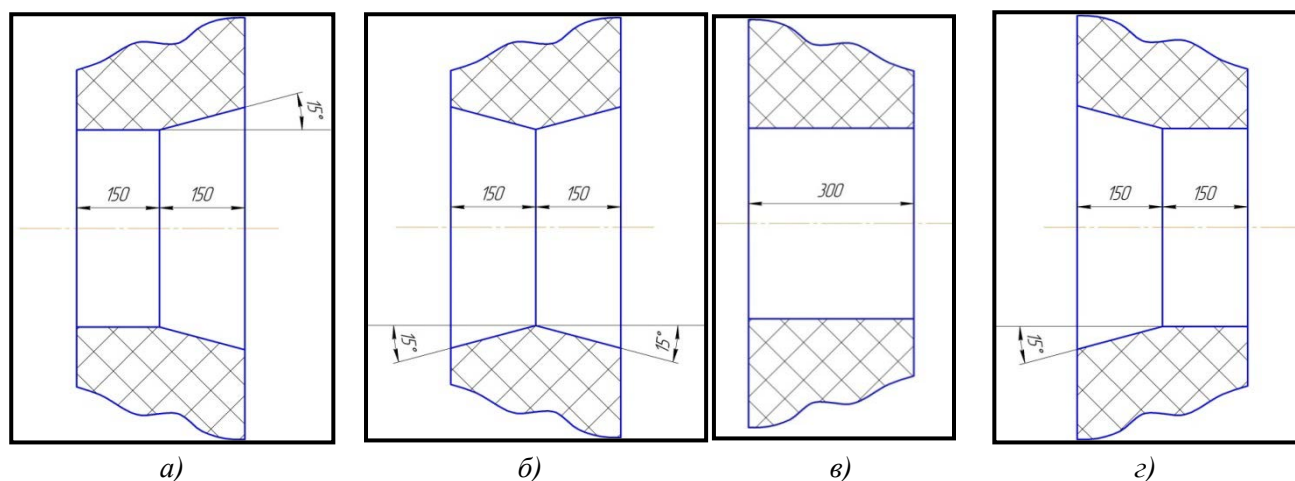
Разработана и протестирована математическая модель горения газообразного топлива в горелочном устройстве, при создании которой использовались:

- модель распада турбулентного вихря – Eddy Dissipation Model (EDM);
- модель турбулентности $k - \epsilon$, использующая уравнения переноса кинетической энергии турбулентности (k) и скорости ее диссипации (ϵ);
- модель лучистого теплообмена – P1, или метод сферических гармоник в 1 приближении;
- термический (thermal NO) и быстрый (Prompt NO) механизмы образования NO_x .

Для сравнения и анализа полученные при численном моделировании данные отображались в виде графических зависимостей температуры, скорости сред, концентраций NO_x и CO по длине факела, а также полей распределения этих величин в заданных плоскостях.

Исследования влияния конструкции амбразуры на характер горения и образования NO_x выполнялись для четырех типов амбразур горелки: диффузорной, биконической, цилиндрической и конфузорной (рисунок 9).

Результаты численного моделирования показали, что наименьшие значения NO_x обеспечивает амбраура диффузорного типа. Конфузорная и биконическая амбразуры заметно улучшают смешение топлива с воздухом. Это делает менее выраженным разделение на зоны горения с недостатком и избытком воздуха. Вследствие этого в факеле горелок с такими амбразурами выросли уровни температур (рисунок 10), что сказалось на увеличении выбросов NO_x . Горелка с цилиндрической амбразурой занимает промежуточное положение.



а – диффузорная; *б* – биконическая; *в* – цилиндрическая; *г* – конфузорная.

Рисунок 9 – Типы амбразур

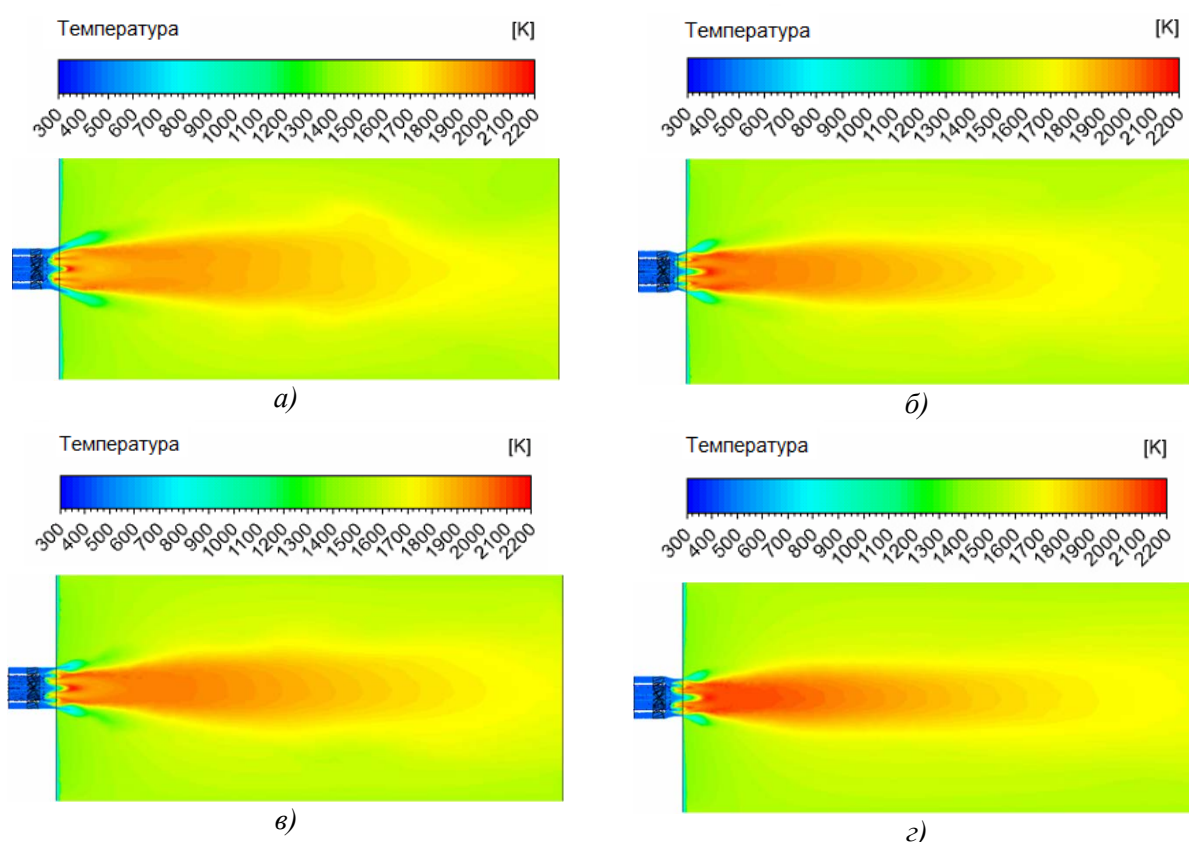


Рисунок 10 – Поля температур при использовании диффузорной (*а*), биконической (*б*), цилиндрической (*в*) и конфузорной (*г*) амбразур

При увеличении угла установки лопаток завихрителя в наружном канале горелок (поз. 6 на рисунке 8) возрастает угол раскрытия и укорачивается начальный участок факела; при этом максимальная температура в факеле снижается (рисунок 11) и выход NO_x уменьшается (рисунок 12).

При исследовании влияния места ввода природного газа в воздушные потоки горелки, перераспределение его расхода моделировалось изменением угла установки периферийных 9 и прямых 8 газовых насадков (см. рисунок 8).

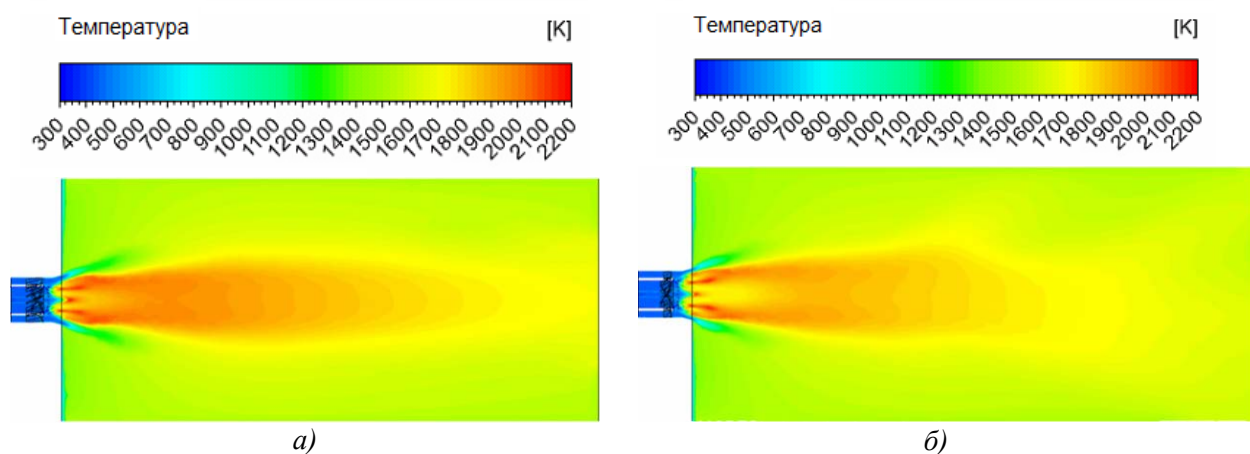


Рисунок 11 – Поля температур при угле установки лопаток 25° (а) и 50°(б)

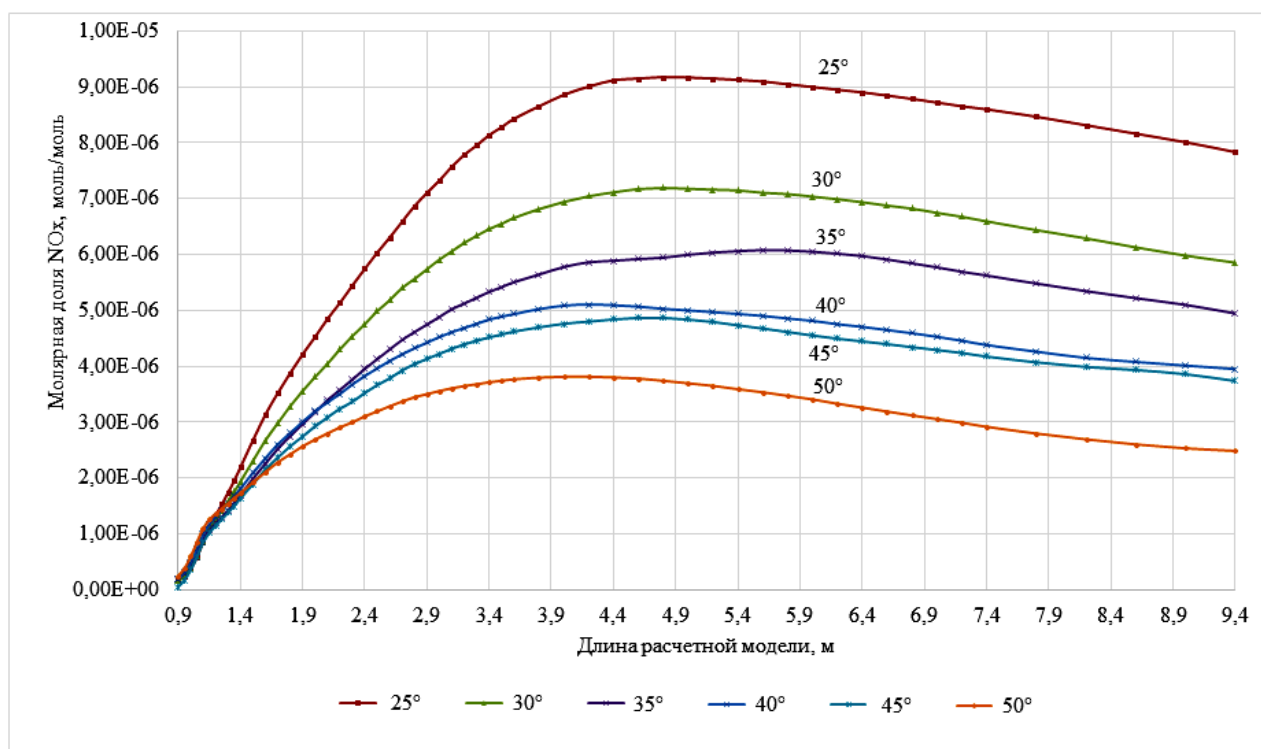
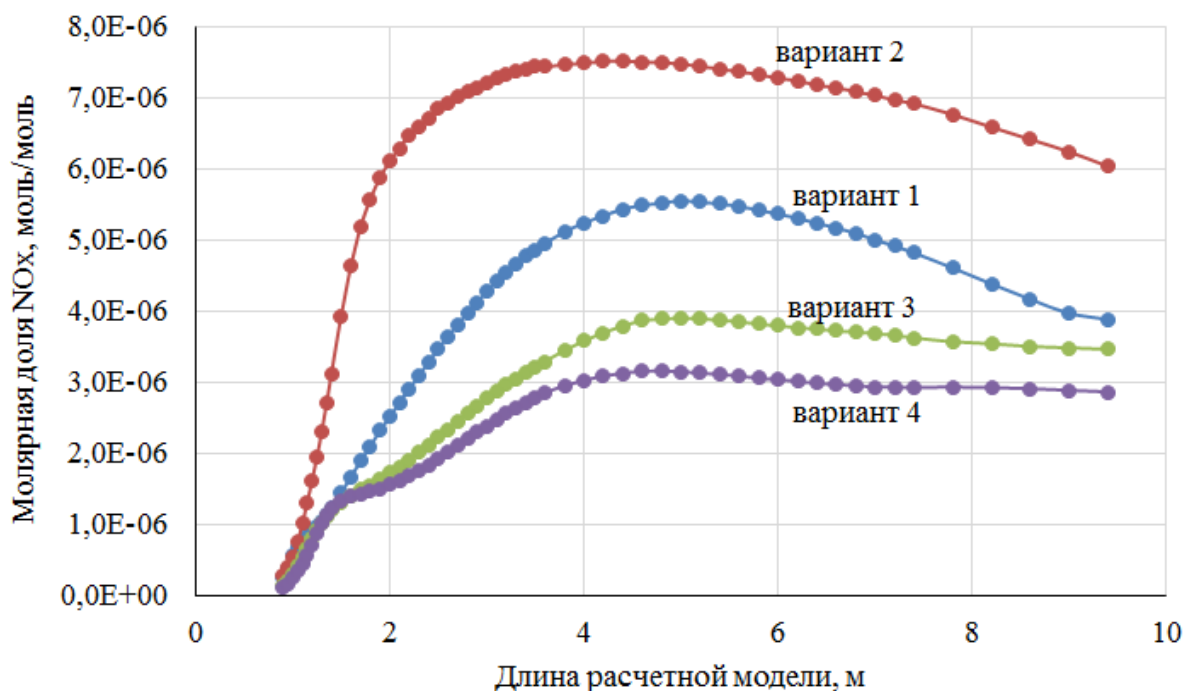


Рисунок 12 – Влияние угла установки лопаток завихрителя в наружном воздушном канале горелки на образование NO_x

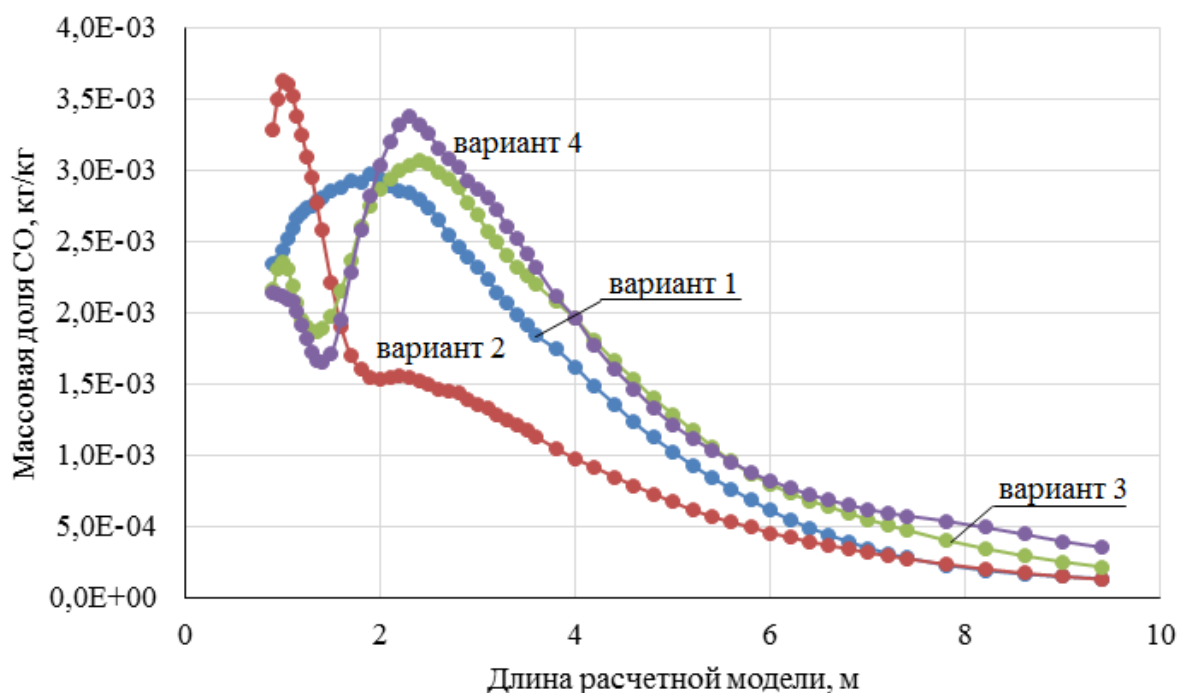
Установлено, что наименьшие концентрации NO_x образуются при подаче большей части топлива в центральную зону, где его горение происходит с недостатком окислителя.

Далее по факелу происходит смешение зон и догорание топлива, несгоревшего в центральной зоне. Чем сильнее разнесены зоны и позже происходит перемешивание, тем меньше выход NO_x (рисунок 13), однако возрастает химический недожог (рисунок 14).



вариант 1 (исходный) – $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 20^\circ$; вариант 2 – $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 40^\circ$; вариант 3 – $\alpha = 30^\circ$ (в центр), $\beta = 20^\circ$; вариант 4 – $\alpha = 50^\circ$ (в центр), $\beta = 20^\circ$.

Рисунок 13 – Изменение концентрации NO_x по длине факела в зависимости от схемы подачи топлива в окислитель [здесь α и β – углы наклона прямых и периферийных насадков горелки соответственно (см. рисунок 8, б)]



вариант 1 (исходный) – $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 20^\circ$; вариант 2 – $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 40^\circ$; вариант 3 – $\alpha = 30^\circ$ (в центр), $\beta = 20^\circ$; вариант 4 – $\alpha = 50^\circ$ (в центр), $\beta = 20^\circ$.

Рисунок 14 – Изменение концентрации CO по длине факела в зависимости от схемы подачи топлива в окислитель [здесь α и β – углы наклона прямых и периферийных насадков горелки соответственно (см. рисунок 8, б)]

Влияние внешней рециркуляции продуктов сгорания исследовалось для двух вариантов: газы рециркуляции подаются отдельным каналом между воздушными каналами и в смеси с дутьевым воздухом (рисунок 15).

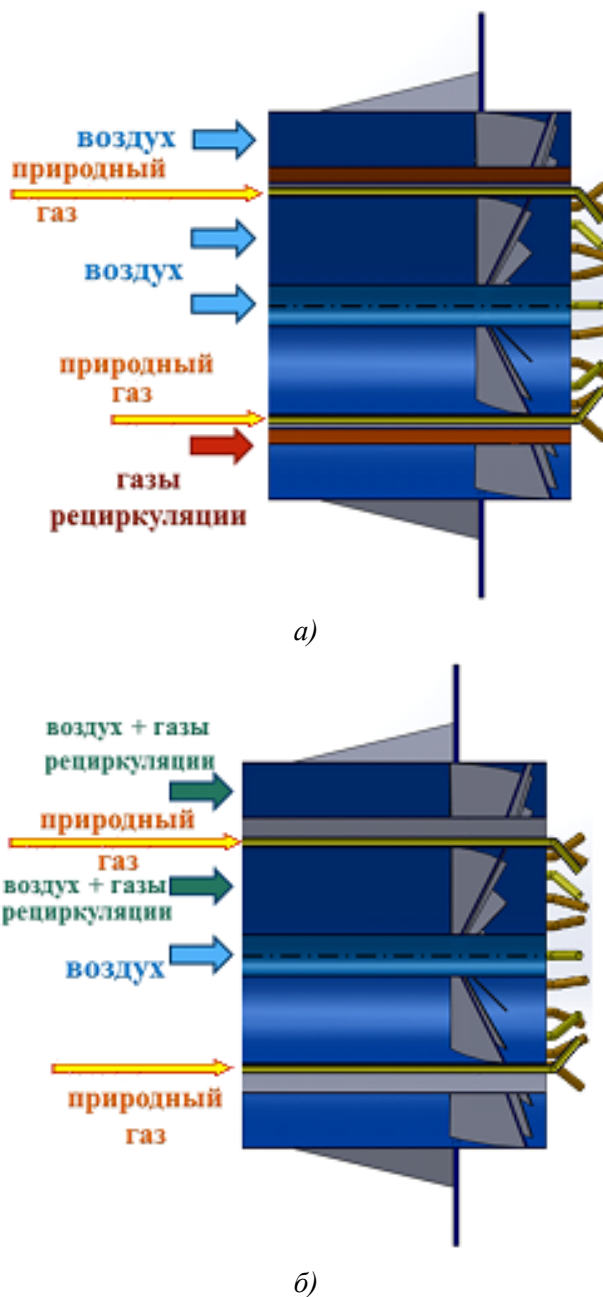
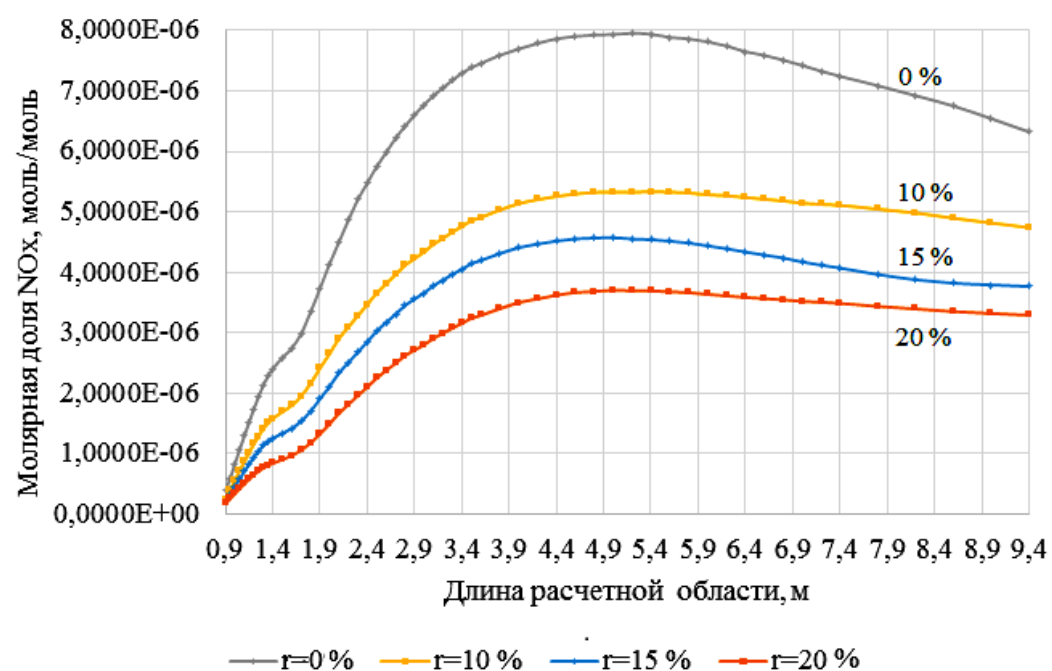


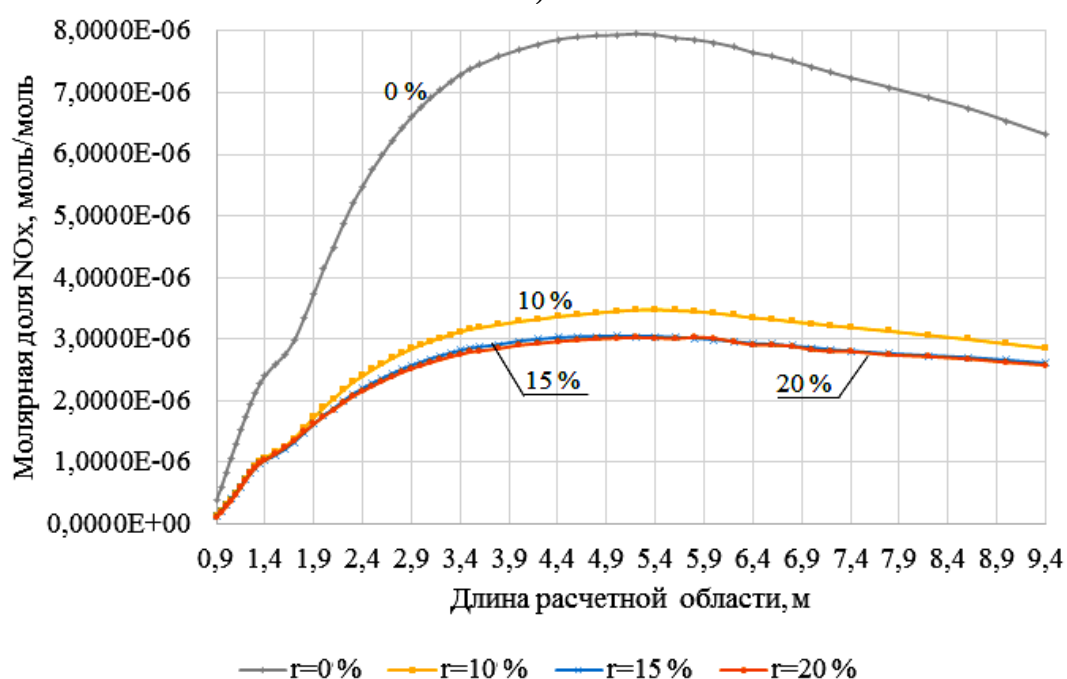
Рисунок 15 – Горелки с подачей газов рециркуляции отдельным каналом (а) и в смеси с воздухом (б)

На рисунке 16 показано, как меняется концентрация оксидов азота по длине факела при доле газов рециркуляции от 0 до 20 % для обоих вариантов.

Видно, что подача газов рециркуляции в горелку как отдельным каналом, так и в смеси с дутьевым воздухом существенно снижает эмиссию NO_x . При доле рециркуляции 20 % для обоих вариантов концентрация NO_x на выходе из горелки уменьшилась более чем в 2,5 раза.



а)

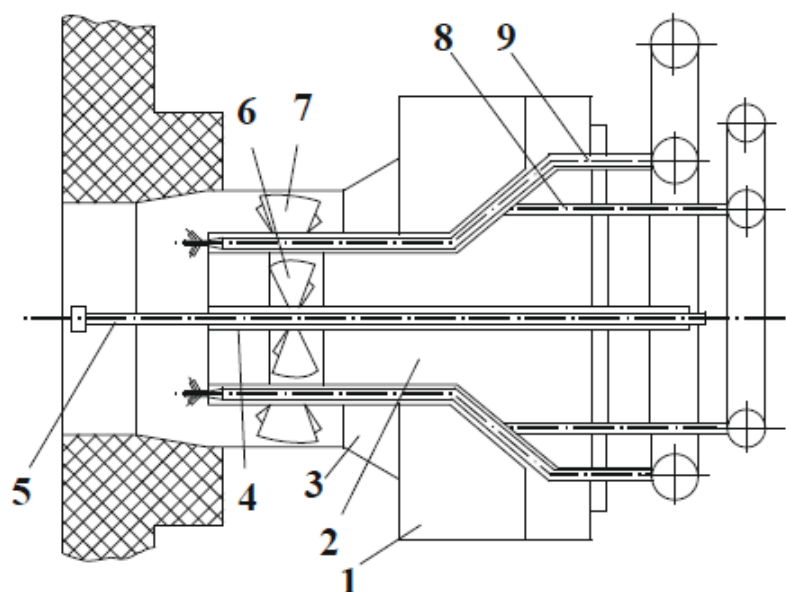


б)

Рисунок 16 – График образования NO_x по длине факела при подаче газов рециркуляции отдельным каналом (а) и в смеси с воздухом (б)

В четвертой главе представлены результаты промышленных испытаний низкоэмиссионных горелочных устройств, в которых реализованы разработанные рекомендации.

На котле КВГМ-50 Шатурской ГРЭС-5 была испытана газомазутная горелка, схема которой представлена на рисунке 17.



1 – воздухоподводящий короб; 2 – центральный канал; 3 – периферийный канал; 4 – труба под форсунку; 5 – мазутная форсунка; 6 – центральный аксиальный завихритель; 7 – периферийный аксиальный завихритель; 8 – газораздающие трубки I ступени; 9 – газораздающие трубки II ступени.

Рисунок 17 – Газомазутная горелка ВТИ

Анализ результатов испытаний показал, что за счет конструктивного исполнения самой горелки концентрация NO_x при сжигании природного газа сократилась примерно на 40 % и не превосходит 90 мг/м^3 ($\alpha = 1,4$).

Подача ($r = 10 \div 11 \%$) рециркулирующих дымовых газов в горелки в смеси с общим воздухом дополнительно снижает концентрацию NO_x еще в 2 раза, до $40\text{--}45 \text{ мг/м}^3$ (рисунок 18).

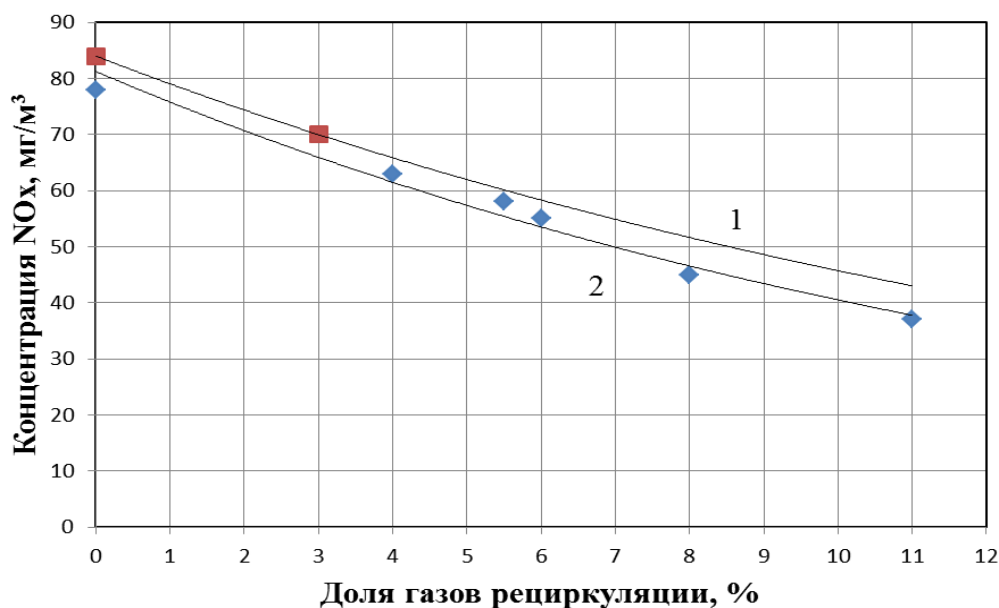
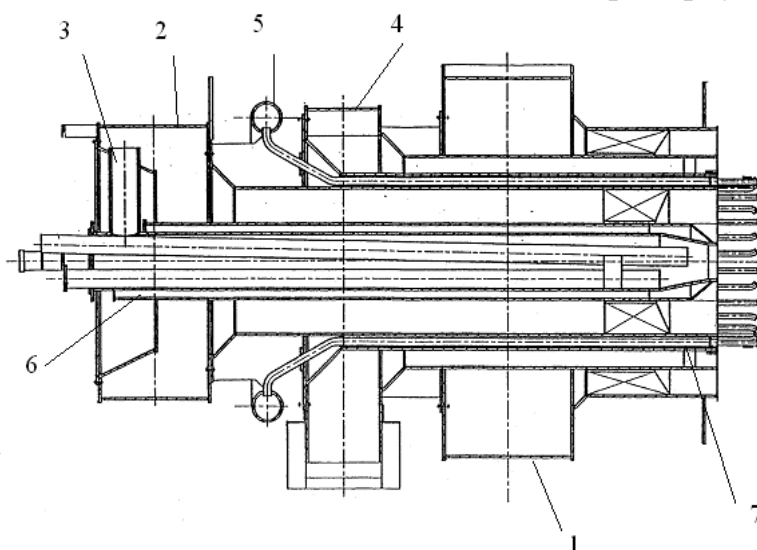


Рисунок 18 – Изменение концентрации NO_x в уходящих газах котла КВГМ-50 в зависимости от доли рециркуляции дымовых газов в горелки конструкции ВТИ при теплопроизводительности котла 47 (1) и 40 МВт (2)

Эффективность предложенных по результатам исследований конструктивных решений была подтверждена и на котле Е-160-3,9-440 ГМ ГЭС-1 ПАО «Мосэнерго», где такие же горелки были расположены в 2 яруса по две на фронтальной стене. При работе котла на номинальной нагрузке приведенная концентрация NO_x в уходящих газах при ступенчатом сжигании и доле рециркуляции дымовых газов, равной примерно 16 %, составила 64 мг/м^3 , что существенно ниже нормативных требований.

Конструктивные решения, связанные с вводом газов рециркуляции по отдельному каналу, были реализованы в комбинированной горелке, схема которой показана на рисунке 19. В этом случае поток рециркулирующих газов отделяется на начальном участке факела наружный поток воздуха от внутреннего, который интенсивно смешивается с топливом и газами рециркуляции.



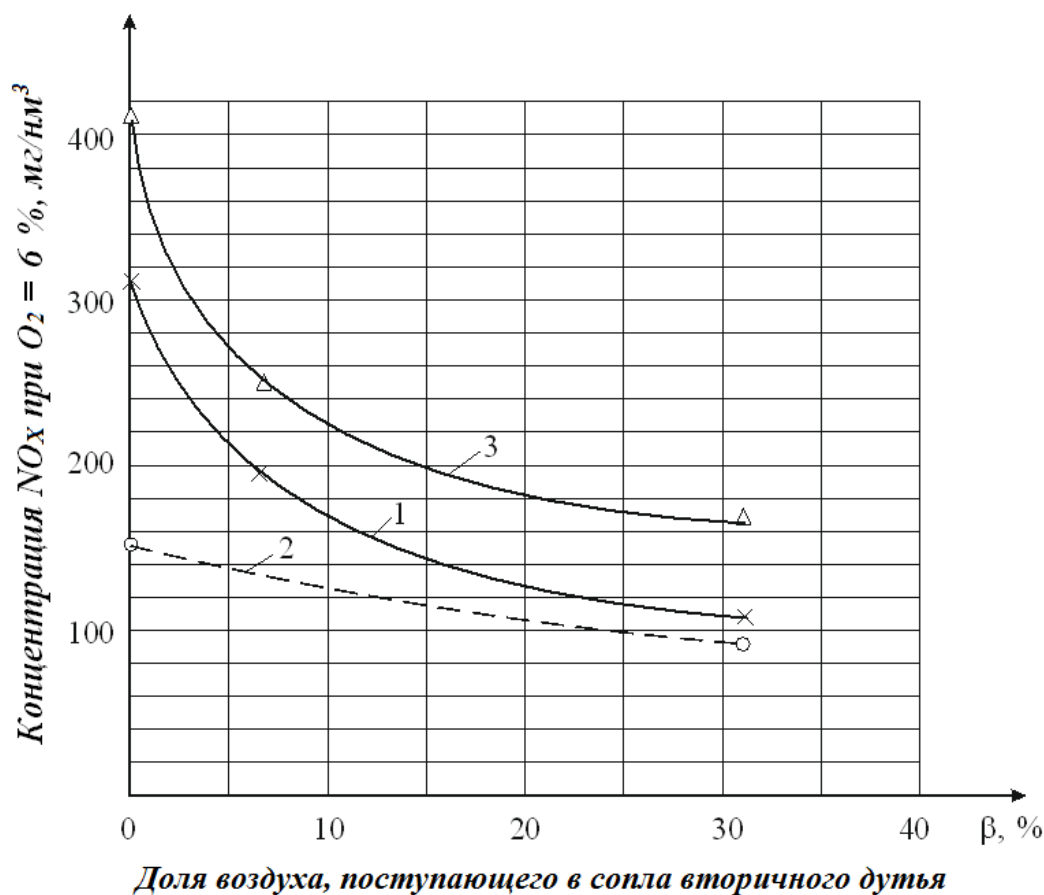
1, 2, 3 – воздух; 4 – газы рециркуляции; 5, 6 – природный газ; 7 – газораздающие трубы.

Рисунок 19 – Комбинированная газомазутная горелка

Испытания такой горелки были проведены на котлах ТГМП-314 ТЭЦ-23 ПАО «Мосэнерго», где они установлены на фронтальной и задней стенах топки встречно, по 8 горелок в два яруса.

Дополнительно на котле были организованы ступенчатое сжигание топлива (путём подачи 30–35 % воздуха через 16 сопел вторичного дутья, смонтированных встречно на фронтальной и задней стенах топки) и рециркуляция продуктов сгорания.

На рисунке 20 представлены результаты испытаний котла на нагрузке, близкой к номинальной. Благодаря разработанным и внедренным в эту горелку конструктивным решениям, а также дополнительным средствам подавления образования NO_x ($r = 6\text{--}8\%$, $\beta = 32\%$, при $\alpha_{\text{эк}}'' = 1,09$) удалось добиться снижения приведенной концентрации NO_x в уходящих газах котла до 100 мг/м^3 (рисунок 20, кривая 2).



1 – топливо–газ, $r = 0\%$; 2 – топливо–газ, $r = 6-8\%$; 3 – топливо–мазут, $r = 0\%$.

Рисунок 20 – Зависимость приведенной концентрации NO_x от доли воздуха (β), поступающего в сопла вторичного дутья ($D = 0,9D_{\text{ном}}$)

При работе без применения дополнительных средств подавления NO_x на мазуте эти горелочные устройства также генерируют в 2,5–3 раза меньше оксидов азота, чем горелки других конструкций, установленные на аналогичных котлах, без ухудшения других экологических показателей, например, увеличения образования бенз(а)пирена или сажи.

Обобщение результатов работы (стендовых и промышленных испытаний и расчетно-аналитических исследований) позволило разработать рекомендации по созданию низкоэмиссионных газогорелочных устройств, которые использованы при составлении отраслевых стандартов.

Рекомендации содержат: конструктивные (количество потоков по газу и воздуху, взаимная крутка потоков, создание зон стабилизации и горения топлива, распределение ввода газообразного топлива и газов рециркуляции в горелку) и режимные мероприятия, обеспечивающие требования, предъявляемые к современным горелочным устройствам при сжигании газообразных топлив, в первую очередь по выбросам NO_x .

Даже частичная реализация этих рекомендаций позволяет сбалансировать такие характеристики горелок, как надежность воспламенения и устойчивость

горения, полнота выгорания топлива и удовлетворение экологических нормативов. Многолетний опыт эксплуатации разработанных с их учетом горелок на котлах ТГМП-314, Е-160-3,9-440 ГМ и КВГМ-50 показал, что добиться снижения выбросов NO_x до требуемых нормативов удалось с сохранением основных технико-экономических и надежности показателей горелки и котла в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Использование газогорелочных устройств, конструктивное исполнение которых позволяет снизить образование NO_x , является одним из наиболее эффективных и наименее затратных способов уменьшения выбросов NO_x в газомазутных котлах;

2. В результате исследований на экспериментальном стенде установлено, что организация ступенчатого сжигания природного газа путем варьирования условиями смесеобразования в горелке позволяет снизить образование NO_x до 30 %; показана возможность использования внутренней рециркуляции дымовых газов в горелке для снижения образования NO_x (до 20 %);

3. В результате численного моделирования выявлены особенности протекания процессов в факеле и уровни генерации NO_x в зависимости от конструктивного оформления амбразуры, условий смесеобразования в горелке и способов балластирования окислителя; установлено, что применение амбразуры горелки диффузорного типа по сравнению с конфузорным позволяет снизить выход NO_x на 30–35 %, вариация условиями смесеобразования в горелке дает снижение NO_x до 40–50 %, а балластирование окислителя дымовыми газами в объемной доле до 20 % ведет к снижению NO_x до 2,5 раз;

4. Разработаны пилотные образцы низкоэмиссионных газомазутных горелок, апробация которых в промышленных условиях (на котлах ТГМП-314, Е-160-3,9-440 ГМ и КВГМ-50) доказала эффективность технических и технологических решений, направленных на снижение вредных выбросов: концентрация NO_x в уходящих газах снизилась в 2–2,5 раза, до значений не выше 100 мг/м^3 , что удовлетворяет требованиям;

5. На основе обобщения экспериментальных и расчетных исследований разработаны рекомендации по созданию низкоэмиссионных горелочных устройств для сжигания газообразных топлив. Рекомендации использованы в проектах реконструкции ряда котлов, а также при составлении СО 153-34.02.304–2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций» и ИТС 38–2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии».

Основные материалы диссертации опубликованы в следующих работах.

Ведущие рецензируемые научные журналы из перечня ВАК

1. **Енякин, Ю.П.** Опыт ВТИ по созданию малотоксичных горелок для сжигания газа и мазута [Текст] / Ю.П. Енякин, Ю.М. Усман, В.А. Верещетин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2000. – № 4. – С. 42–54.
2. **Енякин, Ю.П.** Результаты комплексных испытаний котла ТГМП-314 ст. № 7 ТЭЦ-23 ПАО «Мосэнерго» после реконструкции [Текст] / Ю.П. Енякин, Н.А. Зройчиков, В.А. Верещетин [и др.] // Электрические станции. – 2002. – № 2. – С. 10–15.
3. **Зройчиков, Н.А.** Модернизация котлов ТГМП-314, оборудованных циклонными предтопками для снижения вредных выбросов и повышения надежности работы горелочных устройств и поверхностей нагрева [Текст] / Н.А. Зройчиков, Ю.П. Енякин, В.А. Верещетин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2002. – № 12. – С. 17–21.
4. **Котлер, В.Р.** Использование газа на тепловых электростанциях США и проблемы экологии [Текст] / В.Р. Котлер, С.Е. Беликов, В.А. Верещетин // Электрические станции. – 2004. – № 4. – С. 67–68.
5. **Верещетин, В.А.** Опыт исследования и наладки бесшлаковочного режима эксплуатации газогорелочных устройств, расположенных в зоне кипящего слоя сжигательно-го устройства твердых бытовых отходов [Текст] / В.А. Верещетин, С.Г. Штальман, Ю.П. Енякин // Электрические станции. – 2006. – Спец. вып. – С. 34–37.
6. **Енякин, Ю.П.** Разработка и внедрение автоматизированных горелочных устройств для сжигания нестандартных видов жидкого и газообразного топлива и крупномасштабной распределенной системы управления котлами [Текст] / Ю.П. Енякин, Н.Б. Шехтман, В.А. Верещетин [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2006. – № 4. – С. 35–37.
7. **Торхунов, С.Ф.** Освоение и эксплуатация блока № 3 Каширской ГРЭС [Текст] / С.Ф. Торхунов, А.Л. Шварц, В.А. Верещетин [и др.] // Электрические станции. – 2012. – № 6. – С. 13–22.
8. **Верещетин, В.А.** Внедрение малотоксичных горелочных устройств на водогрейных и энергетических котлах [Текст] / В.А. Верещетин // Энергетик. – 2014. – № 2. – С. 65–67.
9. **Тугов, А.Н.** Оценка возможности перевода котлов ТП-108 на сжигание природного газа и мазута [Текст] / А.Н. Тугов, В.М. Супранов, М.А. Изюмов, В.А. Верещетин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 3. – С. 68–76.
10. **Тугов, А.Н.** Внедрение внутритопочных методов снижения NO_x на котлах Е-320-13,8-560ГМ: проблемы и пути их решения [Текст] / А.Н. Тугов, В.М. Супранов, М.А. Изюмов, В.А. Верещетин [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 12. – С. 27–34.

Статьи в трудах, материалах международных и всероссийских конференций, в научных изданиях

11. **Верещетин, В.А.** Опыт создания малотоксичных горелок [Текст] / В.А. Верещетин // Энергетика за рубежом. – 2001. – № 3. – С. 35–42.
12. **Верещетин, В.А.** Газомазутная горелка с пониженным выходом оксидов азота [Текст]: тез. докладов: в 3 т. / В.А. Верещетин, Ю.П. Енякин // Девятая Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Москва, 4–5 марта 2003 г.) «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – Т. 3. – С. 93–94.
13. **Верещетин, В.А.** Разработка и внедрение малотоксичных топочно-горелочных устройств для сжигания жидких и газообразных топлив [Текст] / В.А. Верещетин // Сборник докладов молодых специалистов: материалы 2-го конкурса молодых специалистов ОАО «ВТИ». – М.: ОАО «ВТИ», 2003. – С. 4–15.

14. **Верещетин, В.А.** Исследование, математическое моделирование и наладка бесшлаковочного режима работы газогорелочных устройств, расположенных в зоне кипящего слоя сжигательного устройства спецзавода № 4 «Руднево» [Текст] / В.А. Верещетин // Всерос. конф. по итогам конкурса молодых специалистов организаций НПК ОАО РАО «ЕЭС России», с. Дивноморское, Краснодарский край, сентябрь, 2005 : сб. докладов. – М.: ОАО «ВТИ», 2005. – С. 69–76.

15. **Верещетин, В.А.** Опыт ВТИ по созданию и освоению малотоксичных газомазутных горелочных устройств [Текст] / В.А. Верещетин // Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: материалы XIII Международной конференции, Ялта, пгт. Кореиз, 3–7 июня 2013. – Ялта, пгт. Кореиз, 2013.

16. **Верещетин, В.А.** Энергетическая утилизация газообразных отходов нефтепереработки [Текст] / В.А. Верещетин // Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: сб. материалов IX Международной научно-практической конференции, Москва, 30 октября 2013. – М.: ФГУП «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ», 2013. – С. 24–25.

17. **Верещетин, В.А.** Исследование процессов горения в горелочном устройстве [Текст] / В.А. Верещетин, Л.Е. Егорова, К.А. Трифонов, И.В. Морозов // Информационные средства и технологии: сб. материалов XXI Международной научно-технической конференции, Москва, 19–21 ноября 2013. – М.: МЭИ, – Т. 1. – С. 103–109.

18. **Верещетин, В.А.** Современные малотоксичные горелочные устройства для сжигания жидких и газообразных топлив [Текст] / В.А. Верещетин, А.Н. Тугов, В.Т. Сидоркин // Реконструкция энергетики – 2015: сб. докладов VII Всероссийской конференции, Москва, 9–10 июня 2015. – М.: ОАО «ИНТЕХЭКО», 2015. – С. 19–22.

19. **Верещетин, В.А.** Разработка и внедрение малотоксичных горелочных устройств для сжигания стандартных и нестандартных видов жидких и газообразных топлив [Текст] / В.А. Верещетин, А.Н. Тугов, Ю.М. Усман, В.Т. Сидоркин // Химическая техника. – 2015. – № 7. – С. 29–32.

20. **Верещетин, В.А.** Разработка и внедрение экологических мероприятий на газомазутном котле БКЗ-420-140 НГМ НСтТЭЦ [Текст] / А.С. Натальин, В.А. Верещетин // Современные технологии в энергетике: сб. докладов Всероссийской специализированной научно-практической конференцией молодых специалистов с международным участием, Москва, 30–31 марта 2017. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – С. 103–111.

21. **Верещетин, В.А.** Опыт ВТИ по внедрению НДТ на газовых ТЭС [Текст] / В.А. Верещетин, Ю.М. Усман, А.Н. Тугов // Перспективы развития новых технологий в энергетике России: сб. докладов научно-технической конференции, Москва, 26–27 октября 2017. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – С. 263–270.

Стандарты

22. **СО 153-34.02.304–2003.** Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций [Текст] / В.Р. Котлер, Ю.П. Енякин, Ю.М. Усман, В.А. Верещетин, П.В. Росляков, Л.Е. Егорова, И.Л. Ионкин. – Введ. 2003 – 07 – 01. – М.: ОАО «ВТИ», 2005. – 44 с.



ПМБ ВТИ. РФ, 115280, Москва, Автозаводская ул., д. 14.
Тираж 100 экз. Заказ № 49.
