

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ВСЕРОССИЙСКИЙ ДВАЖДЫ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО
ЗНАМЕНИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»
(ОАО «ВТИ»)

На правах рукописи



Верещетин Владимир Артурович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НИЗКОЭМИССИОННЫХ
ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ КОТЛОВ ТЭС**

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

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук
Тугов Андрей Николаевич

Москва – 2018

Содержание

Введение	4
Глава 1 Обзор технологических методов снижения NO_x при сжигании газообразного топлива и основные направления дальнейших исследований	9
1.1 Источники и механизмы образования NO_x	9
1.2 Основные пути и методы снижения NO_x.....	17
1.3 Низкоэмиссионные горелочные устройства.....	26
1.4 Результаты обзора. Постановка задач исследования	45
Глава 2 Стендовые исследования влияния режима горения природного газа на образование NO_x.....	47
2.1 Описание экспериментальной установки	47
2.2 Результаты исследований влияния коэффициента избытка воздуха на образование NO_x при диффузионном и кинетическом режимах горения.....	51
2.3 Исследование метода снижения образования NO_x за счет организации ступенчатого сжигания газа перераспределением воздуха в горелке.....	55
2.4 Оценка эффективности снижения NO_x путем перераспределения топлива между каналами горелки	57
2.5 Оценка влияния рециркуляции продуктов сгорания, организованной непосредственно в горелке, на образование NO_x	59
2.7 Выводы по главе 2.....	62
Глава 3 Результаты численного моделирования горения газообразного топлива при различных конструктивных исполнениях горелки.....	64
3.1 Описание математической модели	64
3.2 Исследование влияния конфигурации амбразуры горелки на образование NO_x	70

3.3 Определение оптимального угла установки лопаток аксиального завихрителя воздуха	80
3.4 Исследование влияния места ввода топлива в воздушные потоки горелки на образование NO_x	85
3.5 Оценка влияния внешней рециркуляции дымовых газов на образование NO_x	90
3.6 Выводы по главе 3.....	95
Глава 4 Результаты промышленных испытаний низкоэмиссионных горелок.....	97
4.1 Конструктивные и режимные мероприятия по снижению образования NO_x для газогорелочных устройств.....	97
4.2 Описание горелок с внедренными мероприятиями по снижению образования NO_x и условия проведения промышленных испытаний..	99
4.3 Результаты испытаний на котле ТГМП-314 ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго».....	104
4.4 Испытание горелочных устройств на котле КВГМ-50 Шатурской ГРЭС.....	111
4.5 Испытание топочно-горелочных устройств на котле Е-160-3,9-440 ГМ ГЭС-1 ОАО «Мосэнерго».....	113
4.6 Выводы по главе 4.....	116
Заключение.....	117
Список литературы	119

Введение

Актуальность темы. В России доля электрической энергии, вырабатываемой за счет сжигания природного газа, от общего количества составляет около 50 %, а его доля, потребляемая на тепловых электростанциях (ТЭС), составляет 75 %. [1, 2] и по прогнозу топливно-энергетического баланса России, представленного в Энергетической стратегии России на период до 2030 года, природный газ по-прежнему будет занимать существенную долю [3]. 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.

Одной из проблем, возникающей в результате присутствия в воздухе загрязняющих веществ, в частности NO_x , является их токсическое действие на здоровье людей [4, 5]. Длительное воздействие даже небольших концентраций NO_x повышает число острых и хронических заболеваний. Повышение концентрации NO_x в воздухе действует и на растительный мир.

Другая проблема, связанная с присутствием в атмосфере NO_x , состоит в том, что, соединяясь с влагой, они образуют слабые растворы азотной и азотистой кислоты. Это приводит к выпадению так называемых «кислотных дождей» [6]. Их появлению способствуют выбросы не только NO_x , но и оксидов серы. Под воздействием «кислотных дождей» происходит окисление почв и обеднение их питательными элементами, а также «кислотные дожди» усиливают коррозию и разрушение строительных материалов, зданий, сооружений, исторических памятников архитектуры и др.

Таким образом, то, что загрязнение воздушного бассейна непосредственно приводит к серьезным разрушительным воздействиям не вызывает никаких сомнений. Поэтому предупреждение негативного влияния ТЭС на атмосферу является чрезвычайно важной задачей для всех промышленно развитых стран.

Для снижения вредного воздействия NO_x на окружающую среду, их концентрацию в продуктах сгорания на ТЭС ограничивают в соответствии с требованиями нормативных документов.

В настоящее время в РФ действуют нормативы удельных выбросов загрязняющих веществ для котельных установок, регламентированные ГОСТ Р 50831-95 [7], согласно которому концентрации NO_x в дымовых газах при сжигании природного газа не должны превышать 125 мг/нм^{3*} . Европейские нормы еще жестче. Так, в соответствии с Директивой ЕС 2010/75/EU [8] концентрации NO_x должны быть менее 83 мг/нм^3 .

По мере ужесточения требований к вредным выбросам ТЭС различными организациями разработано и внедрено достаточно большое количество мероприятий, направленных на уменьшение концентрации NO_x в уходящих газах котлов. Их можно разделить на две основные группы: первая – подавление образования NO_x в процессе горения топлива, это так называемые внутритопочные или технологические методы; и вторая – восстановление NO_x до N_2 в системе газоочистки с помощью аммиака или карбамида. Последние обладают высокой эффективностью (до 90 %), однако сложность конструкции очистного оборудования, высокие капитальные и эксплуатационные затраты, а также большие площади, требуемые для размещения очистного оборудования, ограничивают применение этих методов. В основном они используются в тех случаях, когда фоновый уровень NO_x очень высокий.

* 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.

К технологическим методам, с помощью которых зачастую удается достичь нормативных значений NO_x , значительно более дешевых, чем газоочистка, относят ступенчатое и так называемое нестехиометрическое сжигание топлива, впрыск воды в топку, ввод газов рециркуляции, сжигание с низкими избытками воздуха и др.

Одним из наиболее перспективных внутритопочных мероприятий, снижающих выбросы NO_x , является применение низкоэмиссионных горелок. Конструкция горелочного устройства и режимы его работы во многом определяют интенсивность воспламенения факела, условия и скорость смешения топлива с окислителем и максимальный уровень температуры в ядре горения. Изменяя конструкцию горелки, можно влиять на эти параметры и, тем самым, снизить образование NO_x от 30 до 60 % без ухудшения процесса горения при уменьшенных капитальных и эксплуатационных затратах.

В настоящее время накоплен некоторый опыт использования горелок, в которых реализованы те или иные конструктивные решения, позволяющие снизить образование NO_x . Однако комплексный подход к проектированию низкоэмиссионных горелок отсутствует. В связи с этим изучение способов подавления образования NO_x в факеле, их систематизация, разработка и обоснование рекомендаций по созданию горелок с низким выходом оксидов азота являются актуальной проблемой.

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

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 ОАО «Мосэнерго», Е-160-3,9-440 ГМ ГЭС-1 ОАО «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 Ново-Стерлитамакской 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; удовлетворительным 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.

Глава 1 Обзор технологических методов снижения NO_x при сжигании газообразного топлива и основные направления дальнейших исследований

1.1 Источники и механизмы образования NO_x

Преобразование энергopotенциала органического топлива в тепловую и электрическую энергии осуществляется путем сжигания топлива в котлах ТЭС. Однако образующиеся газообразные продукты сгорания топлив содержат вредные загрязняющие вещества, обладающие различной токсичностью [9]. Из всех выбросов в атмосферу ТЭС наиболее токсичны оксиды серы, оксиды азота и канцерогенные вещества. Среди газообразных вредных примесей в продуктах сгорания любых энергетических топлив значительную долю по их количеству составляют NO_x . При сжигании органических топлив азот, содержащийся в воздухе и топливе, становится реакционно-способным и, соединяясь с кислородом, образует оксиды: $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2 + \text{N}_2\text{O}$ [10]. Экспериментальные и промышленные исследования показали, что основная доля образовавшихся NO_x , а именно от 95 до 100 %, приходится на монооксид (оксид) азота NO . Диоксид NO_2 и гемиоксид N_2O азота образуются в значительно меньших количествах. Но в шлейфе дымовых газов в атмосфере происходит неконтролируемое доокисление NO до более токсичного диоксида азота NO_2 в результате взаимодействия с озоном воздуха [11, 12, 13]. Образовавшиеся NO_x крайне отрицательно влияют на окружающую природную среду, промышленные и сельскохозяйственные объекты, человеческий организм.

Существуют два принципиально различных источника образования оксида азота NO при горении органических топлив. Это – окисление атмосферного (молекулярного) азота N_2 воздуха, используемого в качестве

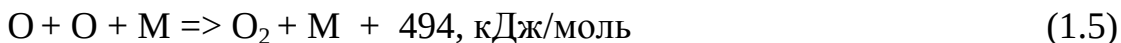
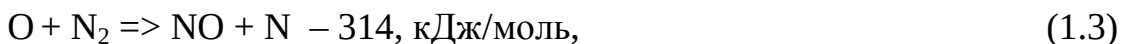
окислителя при горении, и окисление азотсодержащих составляющих топлива. В первом случае образуются термические и «быстрые» оксиды азота, а во втором – топливные NO.

Термические оксиды азота образуются при горении любых топлив в области высоких температур, если в качестве окислителя используется воздух [14].

Условия протекания цепной реакции окисления атмосферного азота свободным кислородом при горении описывается уравнением:



Была разработана цепная схема окисления азота, в которой активную роль играют свободные атомы кислорода и азота [14]:



При этом концентрация атомарного кислорода остается неизменной, а скорость процесса определяется реакцией 2 схемы.

Энергетический барьер этой реакции складывается из двух составляющих:

- энергии, требующейся на образование одного атома кислорода (E1);
- энергии активации реакции атома кислорода с молекулой азота (E2).

Таким образом, $E = E1 + E2 = 494/2 + 314 = 516 \text{ кДж/моль}$.

Так как энергия активации этой реакции очень высока, то она предопределяет исключительно сильную зависимость скорости образования оксида азота от температуры.

Данная схема получила название механизма Я. Б. Зельдовича [15], расчет которой основан на ряде экспериментальных лабораторных данных П. Я. Садовникова и Л. А. Франк-Каменецкого, а также других авторов. Позднее он был дополнен реакцией атомарного азота с гидроксидом, предложенной в [16]:



Были изучены реакции окисления азота с помощью взрывных бомб, в которых сжигались смеси водорода, оксида углерода, метана или других горючих с кислородом и азотом. В ряде опытов в смеси добавлялся оксид азота. Опыты показали, что количество образующегося оксида азота не зависит от кинетики горения. Реакция образования NO происходит после завершения процесса горения, когда повышение температуры приводит к диссоциации молекулярного кислорода: $\text{O}_2 \leftrightarrow \text{O} + \text{O}$. Также было получено формально-кинетическое уравнение скорости окисления азота кислородом:

$$\frac{d\text{NO}}{d\tau} = \frac{5 \cdot 10^{11}}{\sqrt{O_2}} e^{-\frac{86000}{RT}} \left(\frac{64}{3} O_2 \cdot N_2 \cdot e^{-\frac{43000}{RT}} - \text{NO}^2 \right), \quad (1.7)$$

где O_2 , N_2 и NO – мгновенные концентрации избыточного кислорода, азота и оксида азота, моль/л; τ – время, с; T – температура в зоне реакции, К; R – газовая постоянная, Дж/(К·моль).

В связи с высокой энергией активации реакций, образования NO происходит при высоких температурах, превышающих 1800 К. При этом концентрация термических NO интенсивно возрастает от начала зоны горения, достигая наибольшего значения непосредственно за зоной максимальных температур (рисунок 1.1). Далее по длине факела концентрация оксидов азота практически не меняется [17].

Образование термических NO определяется следующими основными факторами: температура в зоне горения, коэффициент избытка воздуха и время пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур.

Температура в зоне горения оказывает наибольшее влияние на выход термических NO. Расчетные и экспериментальные исследования показали, что с ростом температуры в зоне горения происходит экспоненциальный рост концентраций оксидов азота в продуктах сгорания [18].

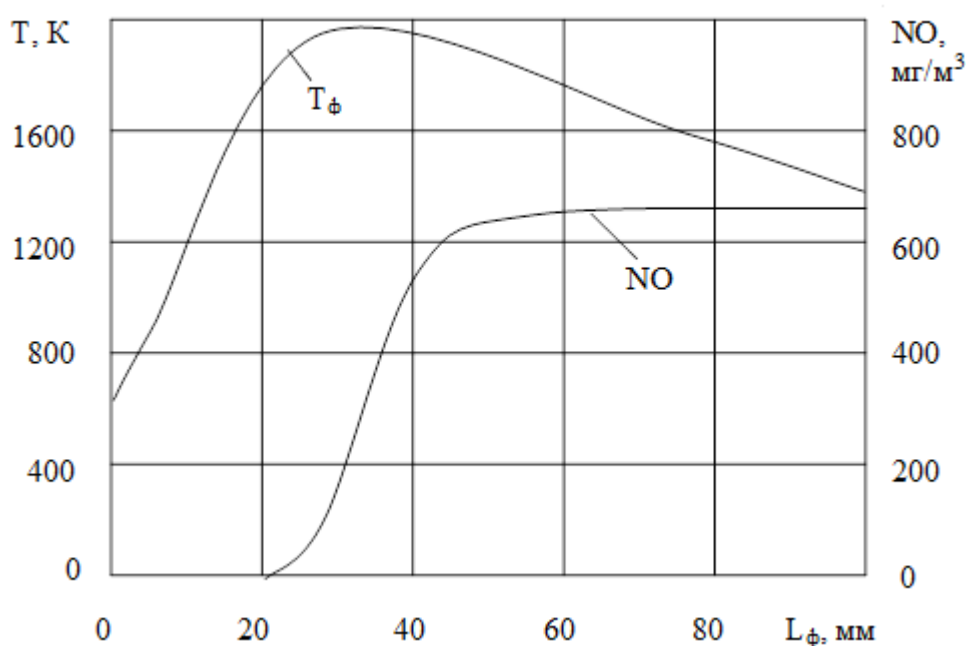


Рисунок 1.1 – Динамика образования термических NO по длине факела [19]

Время достижения равновесной концентрации оксида азота в диапазоне температур от 1800 до 1900 К составляет примерно от 23 до 4 с [11]. В топках котельных установках время пребывания продуктов сгорания значительно меньше [20], и следовательно, равновесные концентрации там не достигаются. Поэтому увеличение времени пребывания в зоне горения $\tau_{пр}$ приводит почти к прямо пропорциональному возрастанию количества образовавшихся NO [17].

Влияние избытков воздуха на образование оксидов азота, исследованное в работах [21, 22], имеет экстремальный вид с максимумом при сжигании природного газа и мазута в области значений коэффициента избытка воздуха $\alpha_{кр}$ в диапазоне от 1,1 до 1,25. Рост концентрации оксидов азота до $\alpha_{кр}$ объясняется тем, что при малых избытках воздуха увеличение концентрации свободного кислорода приводит к более активному протеканию реакции окисления азота воздухом, а в области $\alpha > \alpha_{кр}$ повышение α вызывает уменьшение выхода NO за счет снижения температуры в зоне горения, которая в большей степени влияет на образование оксидов азота, чем рост концентрации кислорода.

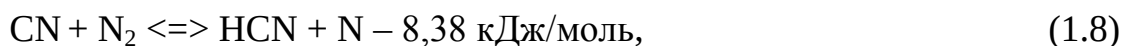
На основе имеющихся научных исследований были сформулированы методы подавления образования термических оксидов азота путем снижения скорости реакции их образования:

- снижение общего уровня температур в топке рециркуляцией продуктов сгорания с $T < 400$ °С, подачей пара и воды в зону горения и в дутьевой воздух;
- снижение максимальных локальных температур в топке путём усиленной подачи газов рециркуляции, пара и воды в зоны максимальных температур (впрыск воды, пара в отдельные зоны факела, подача газов рециркуляции по оси, усиленная подача газов рециркуляции в центральные горелки);
- уменьшение максимальной температуры и содержания кислорода в зоне максимальных температур путем организации ступенчатого горения;
- уменьшение общего избытка окислителя в пределах, допустимых по условиям начала быстрого увеличения выхода продуктов неполного горения C, CO, бенз(а)пирена ($C_{20}H_{12}$).

«Быстрые» оксиды азота. Для получения равновесных концентраций NO при горении стехиометрической метановоздушной смеси требуется период времени приблизительно от 10^{-2} до 10^{-3} с, однако время горения

составляет 10^{-4} с. Вместе с тем при горении углеводородов в отличие от H_2 и CO непосредственно в зоне горения обнаруживаются достаточно высокие концентрации NO . В [23] на основании ряда реакций было сделано предположение, что быстрое образование NO объясняется связыванием молекул азота радикалами в реакциях с очень малыми энергетическими затратами.

Такое ускоренное образование NO в корневой части факела было названо «быстрым» и объясняется реагированием молекулярного азота с углеводородными радикалами, которое происходит достаточно энергично уже при температурах от 1200 до 1600 К, когда образование термических оксидов азота практически не происходит, по следующим промежуточным реакциям горения:



Цианистые соединения (HCN , CN) далее реагируют с образованием аминов (NH , NH_2 , NH_3). Последние, в свою очередь, взаимодействуют с промежуточными радикалами, образуя как оксид азота, так и молекулярный азот.

Также многие учёные проводили опыты и соответствующие измерения по данному вопросу и благодаря им можно отметить, что быстрое образование оксида азота во фронте пламени – явление, органически связанное с горением и присуще углеводородам и углесодержащим топливам. С точки зрения минимизации выхода NO_x , перспективным топливом является водород, в факеле которого оксидов азота образуется на порядок меньше по сравнению с факелами при горении метана.

Анализ работ, проведенных Н.А. Гуревичем, В.Г. Ляскоронским, И.Я. Сигалом, позволяют сделать следующие выводы [24].

Быстрое окисление азота во фронте пламени является достоверным и надежно установленным фактом. Явление хорошо воспроизводится в лабораторных условиях независимо от разнообразия используемых для его наблюдения горелочных устройств и типов пламени.

Наиболее характерными признаками быстрого окисления азота в пламени служат:

- кратковременность процесса, в результате чего зона образования NO локализована на сравнительно небольшом участке фронта ламинарного пламени;

- слабая зависимость выхода NO от температуры горения;

- сильная зависимость выхода NO от соотношения топливо-воздух.

«Быстрые» оксиды азота образуются непосредственно во фронте ламинарного пламени, на участке, составляющем около 10 % ширины фронта пламени. Причем процесс образования начинается уже у передней границы фронта пламени в области температур около 1000 К.

Доля «быстрых» оксидов азота в суммарном выбросе NO_x , образующихся в энергетических паровых котлах, как правило, не превышает 10–15 %. Тем не менее, в котлах малой мощности с суммарным выбросом NO_x от 150 до 200 ppm доля «быстрых» оксидов азота может возрасти на 30–50 % [10].

Топливные оксиды азота. Работы различных ученых показали, что азотсодержащие соединения, входящие в состав топлив, также являются источником образования оксидов азота, поступающих в атмосферу с продуктами сгорания.

Ввиду того, что энергия диссоциации связей N-N от 2-х до 4-х раз превосходит энергию диссоциации связей C-N и N-H, азотсодержащие соединения, входящие в состав топлива, легче превращаются в NO, чем

молекулярный азот воздуха. Превращение азота топлива в оксиды азота происходит при наличии в зоне реакции достаточного количества кислорода уже при температурах от 950 до 1300 К [11, 25].

Если бы всё количество содержащегося в топливе азота окислялось до NO, то только за счёт топливного азота могло бы образоваться NO в количестве от 2 до 4 г/м³ при горении углей и от 0,5 до 1,0 г/м³ при сжигании мазута. В реальных процессах лишь некоторая часть топливного азота переходит в оксиды азота. Азотосодержащие соединения в углях состоят из аминов, пептидов, аминокислот и др. При нагреве угля в конусе факела в зоне выхода летучих обнаруживаются пиридины, хинолины и другие смолистые вещества, аммиак. Значительная часть азотосодержащих соединений, однако, переходит не в эти соединения, а в более прочные – нитриды и др. Однако, поскольку для превращения топливного азота, входящего в такие соединения, как пиридины, хинолины, нитробензол, нитроамины, аммиак и некоторые другие, а также на образование NO, требуется меньшая энергия, чем энергия расщепления молекулы N₂, образование существенных количеств NO даже при сравнительно невысоких температурах (до 1300 К) вполне возможно.

Параллельно описанной выше одной из теорий проводились и другие исследования, на основании которых были сделаны следующие выводы:

- Азотосодержащие соединения топлива при горении частично окисляются до NO, и влияние этого процесса на общее содержание оксида азота в продуктах сгорания должно быть учтено.
- Влияние топливных NO_x на общий выброс оксида азота более существенно при низких температурах процесса горения ($T_{\max} < 1800$ К), например, при сжигании низкокачественных углей, особенно при сжигании топлива в кипящем слое. При горении мазута, антрацитов и других высокореакционных топлив в крупных топливосжигающих установках влияние топливных NO_x меньше.

- Образование топливных оксидов азота происходит на начальном участке факела, в области образования быстрых NO и до образования термических NO [26, 27].
- Степень перехода азотосодержащих соединений топлива в NO уменьшается с увеличением концентрации азота в топливе. Однако абсолютный выход NO при большем содержании азота топлива будет выше.
- На выход топливных оксидов азота заметное влияние оказывает состав сжигаемого топлива [28].
- Степень перехода азотосодержащих соединений топлива в NO быстро нарастает с увеличением коэффициента избытка.
- Выход топливных NO_x сравнительно слабо (особенно по сравнению с термическими NO_x) зависит от температуры процесса [26].

Из способов снижения образования топливных NO_x наиболее подробно испытаны методы ступенчатого сжигания топлива.

При сжигании природного газа топливные оксиды азота естественно отсутствуют. Однако в горючих технических газах концентрация примесей, содержащих связанный азот, может достигать 0,1 %. Сжигание таких газов приведет к образованию топливных NO.

Содержание азота в мазуте зависит как от марки нефти, из которой получен мазут, так и от особенностей технологического процесса получения мазута. В большинстве мазутов, сжигаемых на электростанциях России, доля азота составляет от 0,25 до 0,3 % массы топлива [11].

1.2 Основные пути и методы снижения NO_x

В настоящее время известно достаточно большое количество мероприятий, направленных на уменьшение концентрации NO_x в уходящих газах котлов [29, 30, 31]. Их можно разделить на две основные группы:

первая – подавление образования оксидов азота в процессе горения топлива, это так называемые внутритопочные или технологические методы и вторая – разложение NO_x в системе газоочистки в основном аммиаком или карбамидом. Последние обладают высокой эффективностью (до 90 %), однако сложность конструкции очистного оборудования, высокие капитальные и эксплуатационные затраты, а также большие площади, требуемые для размещения очистного оборудования, ограничивают применение этих методов. В основном они используются, если фоновый уровень NO_x уже очень высокий.

К технологическим методам, с помощью которых зачастую удается достичь нормативных значений NO_x , значительно более дешевых, чем газоочистка, относят ступенчатое и нестехиометрическое сжигание, впрыск воды в топку, ввод газов рециркуляции, сжигание с низкими избытками воздуха и др.

Сжигание с малыми избытками воздуха. Этот метод снижения выбросов оксидов азота является самым простым и одним из наиболее рациональных, так как наряду с экологическим эффектом (снижение NO_x на 10–20 % [32, 33]) позволяет повысить экономичность котельного агрегата, а при сжигании серосодержащих топлив, также и уменьшить скорость коррозии и загрязнения конвективной поверхности нагрева. Однако это мероприятие обычно не снижает выход NO_x до нормативных уровней и поэтому, как правило, применяется в комплексе с другими внутритопочными мероприятиями [34, 35, 36, 37].

Как развитие метода сжигания топлив с малыми избытками воздуха широкое применение нашел **способ сжигания с контролируемым химическим недожогом** [38]. Суть данного малозатратного мероприятия состоит в снижении содержания кислорода в зоне активного горения за счёт уменьшения количества организованно подаваемого в топку котла воздуха до появления умеренного недожога. В результате в зоне горения происходит

подавление образования как термических, так и топливных NO_x на 20–40 % при одновременном контролируемом увеличении содержания CO в уходящих газах до значений от 50 до 150 мг/м³. При этом суммарная токсичность продуктов сгорания, включая выбросы NO_x , CO и бенз(а)перена (Б(а)П), согласно проведенным исследованиям [39, 40] снижается в 1,5–2 раза

Минимально допустимый уровень избытка воздуха должен определяться индивидуально для каждого котла в зависимости от совершенства установленных на нем топочно-горелочных устройств, плотности топочной камеры, оснащенности контрольно-измерительной аппаратурой и т. п.

Рециркуляция продуктов сгорания. Данное мероприятия является одним из наиболее эффективных, с точки зрения снижения выбросов оксидов азота [41, 42, 30]. Данный метод обеспечивает снижение сразу двух факторов, определяющих выход термических оксидов азота – температуры и времени пребывания продуктов сгорания в зоне реакции. Особенно эффективно использование рециркуляции при сжигании природного газа, так как в этом случае отсутствует образование топливных NO.

Обычно дымовые газы рециркуляции забираются из газохода за водяным экономайзером, где их температура составляет от 300 до 350 °С, и с помощью дымососов рециркуляции подают в топочную камеру. Доля и место ввода газов рециркуляции играет очень большую роль с точки зрения снижения выбросов оксидов азота (рисунок 1.2).

Наибольший эффект достигается при вводе газов рециркуляции через дополнительные щели в горелках или непосредственно в горячий воздух [43]. При этом наблюдается снижение NO_x до 50 %. При сжигании природного газа еще большее снижение выхода NO_x наблюдается при вводе газов рециркуляции непосредственно в топливо [19]. Основным недостатком способа ввода газов рециркуляции через щели, является необходимость

создания в горелке дополнительного канала, что несколько усложняет конструкцию горелки.

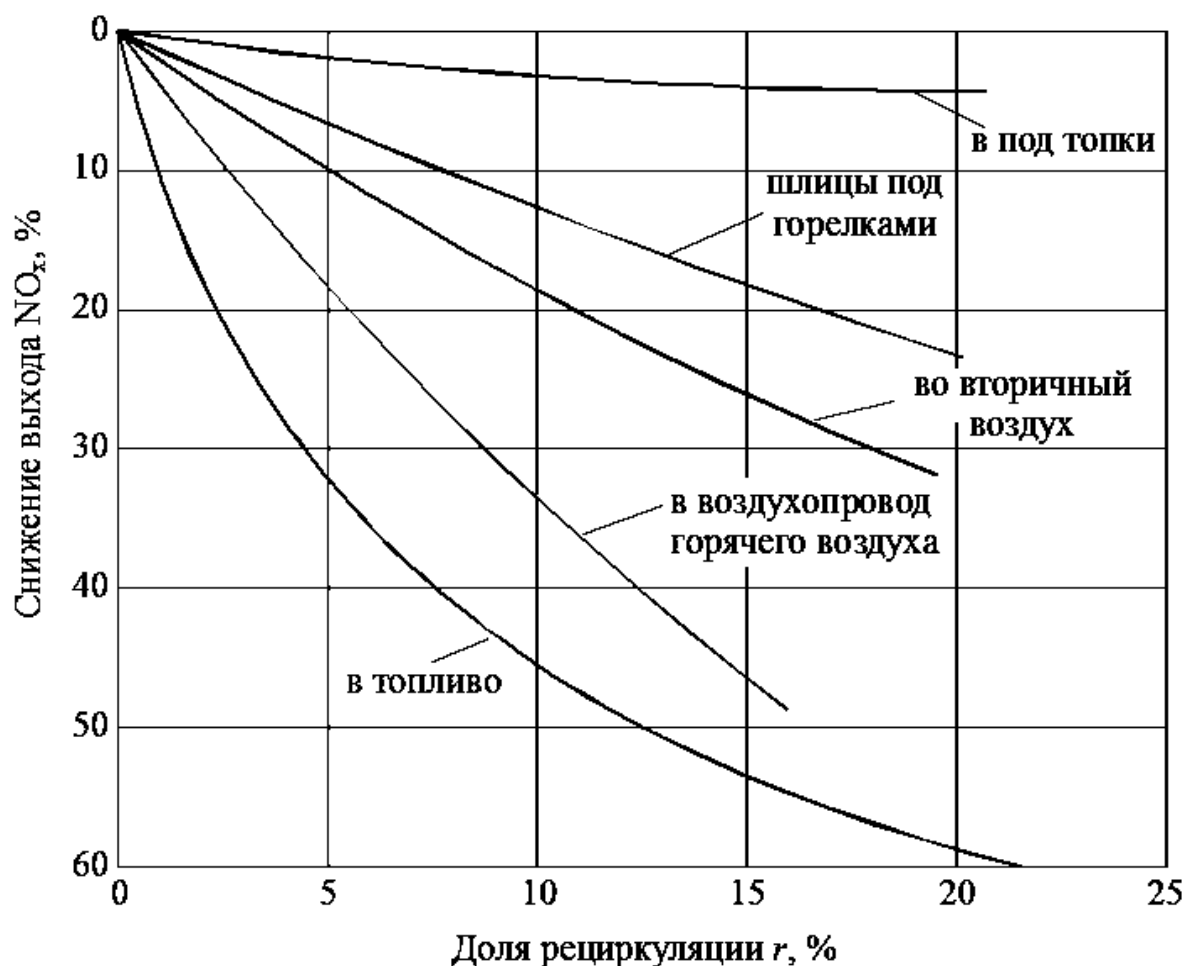


Рисунок 1.2 – Снижение образования NO_x в зависимости от способа ввода газов рециркуляции

В случае подачи дымовых газов рециркуляции в дутьевой воздух перед горелками, надо применять специальные мероприятия для создания равномерной смеси, например, путем подачи газов рециркуляции через устройство специального аэродинамического смесителя, который целесообразно размещать в воздуховоде сразу же за регенеративным воздухоподогревателем (РВП). При плохом смешении газов рециркуляции с воздушным потоком уменьшается эффект по подавлению NO_x . Недостатком этой схемы ввода газов рециркуляции является необходимость в

поддержании высокой плотности воздушного тракта от смесителя до горелок, так как утечка смеси дымовых газов с воздухом могут приводить к увеличению загазованности помещения котельного цеха.

Таким образом, эффективность рециркуляции продуктов сгорания в зону активного горения с точки зрения снижения выхода NO_x существенно возрастает при обеспечении качественного предварительного перемешивания горячего воздуха с газами рециркуляции, а также при неравномерной раздаче газов рециркуляции по ширине фронта котла и по ярусам горелок [44].

Подачу газов рециркуляции в топку организуют либо с помощью специально установленных дымососов рециркуляции газов (ДРГ), либо с помощью перемычки между газоходом и всасывающим патрубком дутьевого вентилятора. Достоинством первой схемы является возможность регулирования количества рециркулирующих газов в зависимости от нагрузки котла. Основным же недостатком – дополнительные капитальные и эксплуатационные затраты. Вторая схема применима, прежде всего, на малых котлах, где стоимость установки ДРГ весьма высока относительно стоимости самого котла [45, 46], а также на больших котлах, где установка ДРГ невозможна по причине загромождения площадей или отсутствия у станции необходимых материальных средств.

Подача влаги в зону горения. Под влагой понимается вода или пар. Их ввод в зону горения снижает температурный уровень процесса горения и изменяет содержание активных промежуточных соединений, что создает условия для снижения образования в основном термических оксидов азота.

Анализ и обобщение литературных данных [47, 48, 49, 50] показывает, что ввод влаги в топочную камеру позволяет снизить выбросы оксидов азота на величину от 10 до 25 %. Количество вводимой влаги не должно превышать 10 % от расхода топлива. Дальнейшее ее увеличение слабо сказывается на снижении эмиссии оксидов азота, но приводит к сильному снижению КПД котла.

Эффективность ввода влаги зависит от места подачи. Наиболее эффективно влагу впрыскивать в зону максимальных температур. Это можно осуществить либо через специально установленные форсунки, рядом с основными, либо через паровые каналы паромеханических форсунок в смеси с паром (схема МЭИ) [51].

С точки зрения уменьшения выхода оксидов азота, лучше вводить влагу в виде воды, так как из-за скрытой теплоты парообразования температура уменьшается больше. В качестве воды может быть использована техническая, продувочная или замасленные воды. В качестве пара – пар отбора из турбин или часть насыщенного пара.

При вводе влаги КПД котла снижается приблизительно на 0,6 %, а также увеличивается скорость коррозии поверхностей. К достоинствам этого метода можно отнести низкие капитальные затраты.

Снижение температуры горячего воздуха. Уменьшение температуры горячего воздуха снижает, прежде всего, температуру в зоне горения. Следовательно, это мероприятие направлено на снижение термических оксидов азота. Причем снижение температуры горячего воздуха значительно сильнее сказывается на выход NO_x при высокой температуре факела, так как зависимость выхода термических оксидов азота от температуры факела имеет экспоненциальный характер. В этом случае снижение температуры факела на 50 °C может привести к снижению концентрации оксидов азота от 1,5 до 2-х раз.

Температура подогрева воздуха на большинстве газомазутных котлов составляет от 280 до 290 °C (а в некоторых случаях и выше). Для достижения же высокоэкономичного сжигания газа и мазута достаточно иметь температуру на уровне от 230 до 250 °C. Таким образом, снижение температуры горячего воздуха можно применять на любых котлах, имеющих высоко теплонапряженные топки, с целью снижения термических оксидов азота.

Нестехиометрическое сжигание. Нестехиометрическим, называется такой нетрадиционный способ факельного сжигания топлива, когда в топочной камере организовывается от одной до нескольких окислительных ($\alpha > 1$) и восстановительных ($\alpha < 1$) зон, а также общая зона дожигания в верхней части топочной камеры, с обычными для данного вида топлива избытками воздуха. В этом случае в восстановительной зоне происходит подавление образования термических и топливных оксидов азота из-за недостатка кислорода, а в окислительной зоне образование термических NO сдерживается в результате снижения температуры горения за счет больших избыточных объемов воздуха (рисунок 1.3).

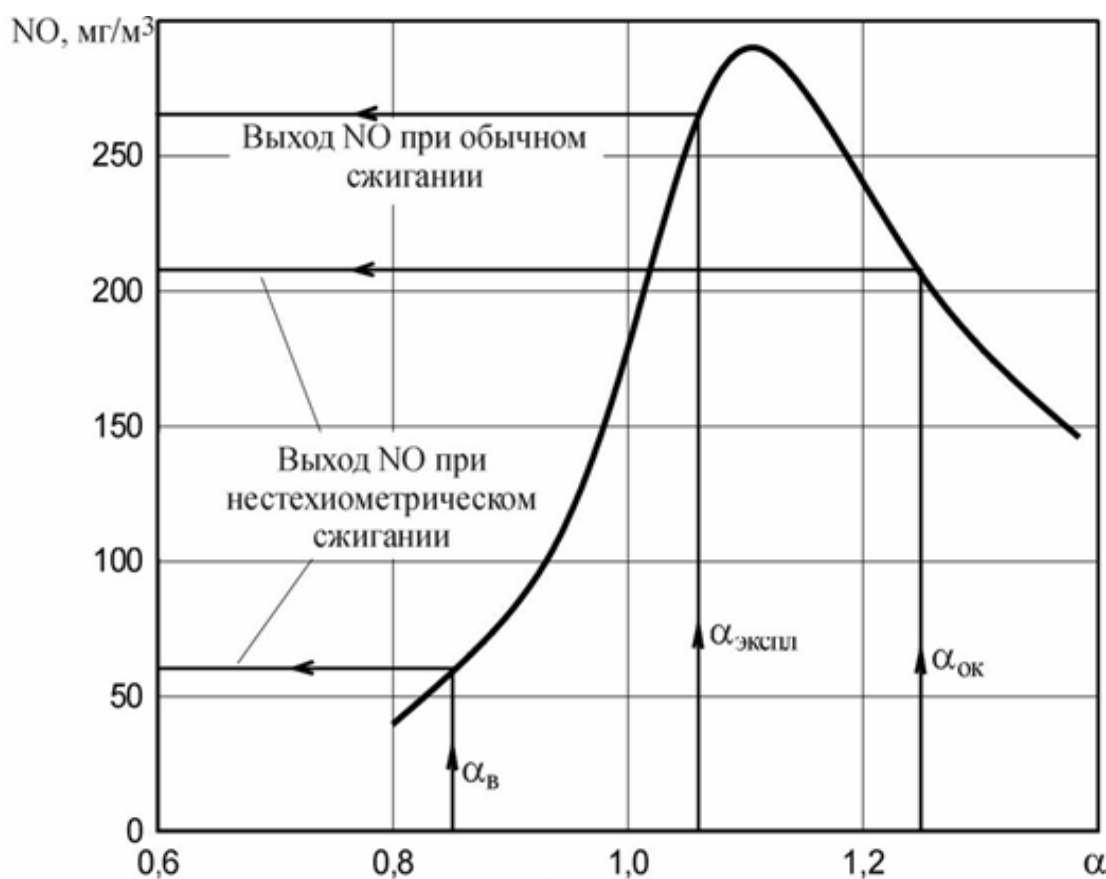


Рисунок 1.3 – Кривая зависимости выхода NO от избытка воздуха при сжигании природного газа

На самом деле термин «нестехиометрическое сжигание» не является достаточно корректным, так как на практике сжигание топлив в котлах

происходит при нестехиометрических условиях, т.е. избытки воздуха не равны единице. Однако этот термин получил широкое распространение для описания данного метода снижения NO_x и поэтому используется в настоящей работе.

Способы реализации нестехиометрического сжигания в топке котла могут быть разными [52, 53]. Чередование окислительных и восстановительных зон может быть выполнено как по высоте топочной камеры, так и в пределах одного яруса. При этом, выбросы оксидов азота снижаются на 20–50 % [54, 55, 56, 57].

Большим преимуществом данного способа является отсутствие капитальных и эксплуатационных затрат, поскольку он может быть реализован на любом котле путем рассогласования топливовоздушного отношения как по ярусам, так и в одном ярусе горелок.

Двухступенчатое сжигание топлива предполагает такую организацию, при которой вместе с топливом через основные горелки подается только часть воздуха ($\alpha < 1$), а остальной необходимый для полного выгорания воздух подается далее по факелу, через специально для этого предусмотренные сопла, шлицы или щели при более низких температурах. При этом в первой ступени образование оксидов азота затруднено из-за отсутствия свободного кислорода, а во второй ступени вследствие более низкого уровня температур в факеле.

Способы реализации двухступенчатого сжигания могут быть различны [19]. Вторичный воздух может подаваться навстречу факелу, над основными горелками, под основными горелками и через часть горелок верхних ярусов (которые при этом отключаются по топливу). Также возможна организация двухступенчатого сжигания в одной горелке.

При реализации данного метода на действующем котле, температура продуктов сгорания на выходе из топки, как правило, возрастает от 20 до 50 градусов. Это приводит к увеличению впрысков, снижению КПД котла из-за

возрастания температуры уходящих газов [58, 59, 60]. При сжигании мазута, для организации полного сжигания топлива, возможно увеличение избытка воздуха, что в свою очередь вызывает появление трудноудаляемых отложений на трубах конвективных пароперегревателей в горизонтальных газоходах, что может служить причиной их перегрева. Поэтому расстояние между основными горелками и вторичного дутья выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить минимальное увеличение температуры газов на выходе из топki, а с другой – максимально снизить выход оксидов азота. При реализации двухступенчатого сжигания возможно увеличение химического и механического недожога, так как зона дожигания перемещается в область пониженных температур и ближе к выходу из топki. Однако этот недостаток может быть устранен в ходе наладочных испытаний котла.

На основании сказанного выше, схемы двухступенчатого сжигания могут быть рекомендованы, прежде всего, для котлов, сжигающих газообразное бессернистое топливо. При использовании сернистых мазутов и сероводородных газов схема двухступенчатого сжигания может использоваться на барабанных и водогрейных котлах. Применение двухступенчатого сжигания на котлах СКД весьма проблематично из-за возможности возникновения в районе нижней радиационной части сероводородной коррозии экранных труб. Кроме того, эксперименты показывают, что двухступенчатое сжигание мазута приводит к повышению выброса коксовых и сажистых частиц, которые также относятся к числу наиболее опасных загрязнителей атмосферы.

Организация на котле двухступенчатого сжигания позволяет в большинстве случаев снизить выбросы оксидов азота на 30–60 % [19, 35]. В [61] показано, что при реализации оптимальных условий и качественного перемешивания продуктов сгорания, образовавшихся в первой ступени с воздухом, максимальное снижение выбросов NO_x для газомазутных котлов

может достигать 80%, при несущественном увеличении химического недожога.

1.3 Низкоэмиссионные горелочные устройства

Низкоэмиссионные горелки являются одним из наиболее перспективных мероприятий, снижающих выбросы оксидов азота. Конструкция горелочного устройства во многом определяет интенсивность воспламенения факела, скорость смешения топлива с воздухом и максимальный уровень температур в ядре горения. Следовательно, изменяя конструкцию горелки можно уменьшить образование оксидов азота без больших затрат [62, 63, 64, 65].

Выбор конструктивной схемы и организации рабочего процесса горелок производится в зависимости от конкретных условий их применения и требований, предъявляемых нормативными документами как к собственно горелкам, так и к показателям топочного процесса котла в целом [66].

Однако необходимо помнить, что, несмотря на низкий уровень выбросов оксидов азота, все современные горелочные устройства должны соответствовать предъявляемым к ним основным требованиям. Их конструкция должна обеспечивать [67]:

- эффективное сжигание топлива (практически полное отсутствие химического и механического недожога при минимально возможном коэффициенте избытка воздуха в топке);
- устойчивость горения (при всех режимах работы фронт пламени должен оставаться стабильным, исключая срыв и проскок пламени для горелок предварительного смешения);
- удобство розжига и регулирования (современные горелки должны менять производительность в широких пределах);

- отсутствие сильного шума и вибрации (эти факторы не только оказывают негативное воздействие на обслуживающий персонал, но и могут стать причиной разрушения элементов котла в случае, если колебания потока горячих продуктов сгорания попадают в резонанс с собственной частотой колебания горелки);
- простоту не только изготовления, но также монтажа и ремонта (также должно быть обеспечено герметичное соединение горелки с топкой);
- безопасность и долговечность в работе. Средний ресурс горелок до капитального ремонта (для ремонтируемых горелок) и до списания (для неремонтируемых горелок) должен быть по жаростойкости не менее 18000 ч. (Указанный ресурс не распространяется на быстроизнашиваемые элементы, автоматику горелки, а также на детали из огнеупорной керамики);
- требуемые экологические показатели топочного процесса.

Основные трудности заключаются в достижении сбалансированности характеристик работы горелки по обеспечению низких выбросов NO_x , устойчивости факела, полноты выгорания топлива с низким избытком воздуха, диапазона регулирования и т. д.

Известно, что расход металла на горелки составляет примерно 1 % от массы всего котла, а трудозатраты на их изготовление – около 2 % от суммарных трудозатрат при изготовлении котла в заводских условиях. Из этого следует, что даже значительное (например, двукратное) увеличение массы и повышение сложности горелок увеличит массу и стоимость всего котла всего лишь на 1–2 % [65, 68]. При этом, применение низкоэмиссионных горелок снижает выход оксидов азота от 30 до 60 %, без ухудшения процесса горения, и не приводит к росту эксплуатационных расходов.

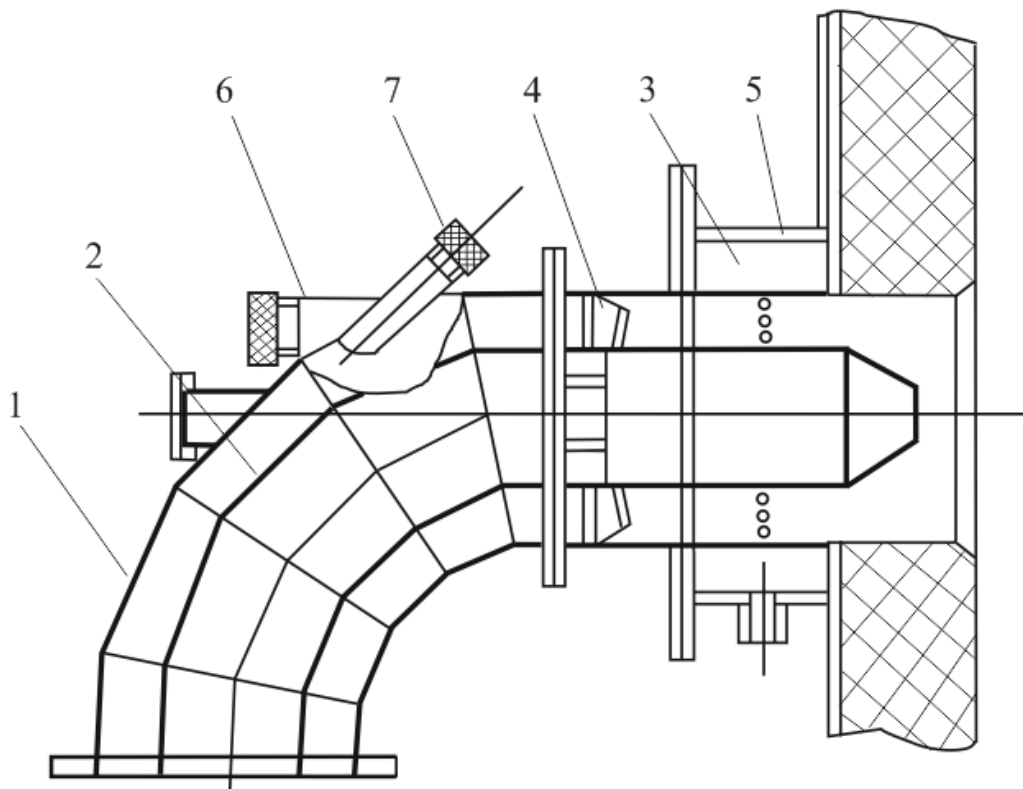
Существует несколько способов управления образованием NO_x через конструкцию горелки. Они включают: организацию стадийного сжигания в факеле; работу с низким избытком воздуха; внутреннюю или внешнюю рециркуляцию продуктов сгорания (дымовых газов) в ядро горения или в дутьевой воздух; балластирование зоны реакции инертным газом, в том числе, водой или водяным паром; контроль взаимных течений масс, скоростей и мест ввода природного газа, воздуха и газов рециркуляции в многоканальной горелке и контроль формы пламени. Эти методы уменьшают эмиссию NO_x путем воздействия на пиковую температуру пламени, или в результате ограничения подвода кислорода в области пиковой температуры пламени.

В различных горелках применяются разные сочетания вышеперечисленных конструктивных решений для снижения оксидов азота, или их совокупность [69].

Горелки ступенчатого (стадийного) сжигания. Стадийность достигается обычно делением поступающего в зону горения воздуха на два или большее число потоков. Объем воздуха ниже стехиометрического вводится в первичную зону, чтобы сформировать обогащенную топливом зону горения, в которой сгорает только часть топлива. Большая часть связанного азота при этом разлагается и образует амины и цианиды, которые переходят в молекулярный азот. Таким образом уменьшается формирование «топливных» NO_x . Работа с избытком воздуха ниже стехиометрического, также понижает пиковую температуру пламени, уменьшая, таким образом, генерацию «термических» NO_x . Последнее обстоятельство позволяет эффективно использовать этот метод и при сжигании топлив, не содержащих азот. Остальная часть воздуха вводится в поток обогащенной топливом первичной зоны горения, формируя вторичную зону, в которой происходит догорание. Формирование NO_x в этой вторичной зоне горения ограничено,

потому что продукты сгорания первичной зоны уменьшают и температуру пламени, и концентрацию кислорода.

Горелка двухстадийного сжигания, которая была впервые опробована в промышленных условиях на котле ПТВМ-50 [70] (рисунок 1.4), состоит из колена воздуховода *1*, внутри которого соосно с ним расположена труба *2* для подачи вторичного воздуха.



1 - колено воздуховода; 2 - труба для подачи вторичного воздуха; 3 - газовая камера; 4 - аксиальный лопаточный закручивающий аппарат; 5 - газовый коллектор; 6 - гляделка; 7- патрубок для охлаждения ЗУ.

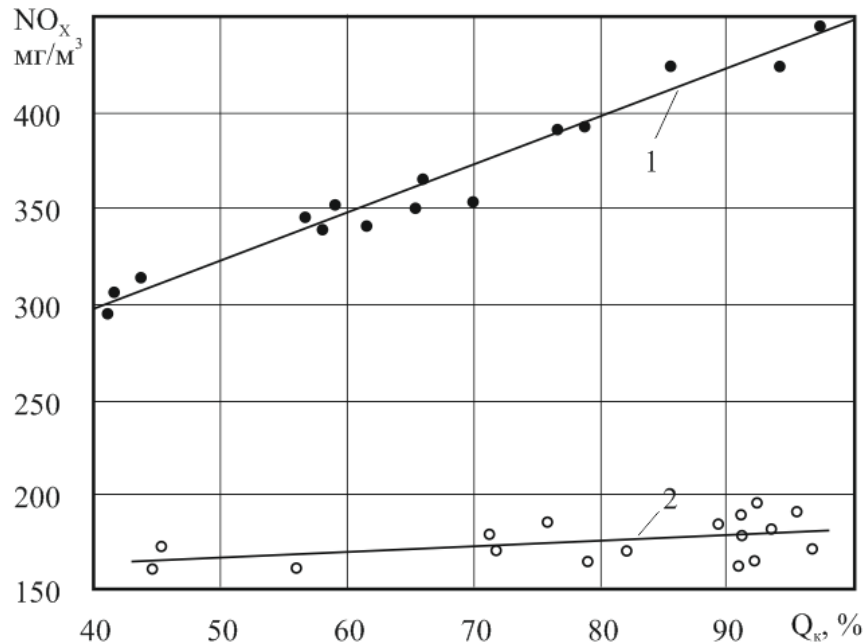
Рисунок 1.4 – Схема горелки двухстадийного сжигания для котлов ПТВМ

Кольцевой канал, заключенный между внешней и внутренней трубами, предназначен для подачи первичного воздуха. Входное отверстие трубы *1* фланцем соединено с воздухопроводом горелки, а выходное – с периферийной газовой камерой *3*. В прямолинейном участке кольцевого канала, примыкающем к колену воздуховода, установлен аксиальный лопаточный

закручивающий аппарат 4. Дутьевой воздух в плоскости входного сечения осевой трубы разделяется на два потока – первичный (периферийный) и вторичный (осевой). Соотношение определяющих размеров горелки рассчитано таким образом, чтобы обеспечить подачу первичного воздуха в количестве, необходимом для формирования газозвушной смеси, поступающей на первую стадию горения с коэффициентом избытка воздуха α , равным от 0,85 до 0,90, что соответствует оптимальным условиям проведения процесса двухстадийного сжигания. Далее первичный воздух поступает в закручивающий аппарат, после чего смешивается с газообразным топливом, подаваемым струями из периферийной газовой камеры. Готовая газозвушная смесь поступает в топку, где сгорает в раскрывающемся факеле. Вторичный воздух поступает в топку компактной прямоочной струей, инжестирующей продукты сгорания первой стадии, смешивается с ними, образуя вторую зону горения.

Промышленное внедрение горелок двухстадийного сжигания (ГДС) показало, что выход оксидов азота практически не зависит от нагрузки котла и остается на уровне 160–180 мг/м³ во всем диапазоне исследованных нагрузок [71] (рисунок 1.5).

Дальнейшее снижение NO_x, по мнению авторов работы [70], лимитируется образованием «быстрых» оксидов азота, концентрация которых в продуктах сгорания горелок данного вида оценивается в диапазоне от 130 до 150 мг/м³. В связи с этим наибольшая степень снижения выброса NO_x достигается при номинальной тепловой мощности агрегата. Внедрение горелок ГДС на котлах ПТВМ позволило снизить выброс оксидов азота приблизительно в 2 раза по сравнению с работой аналогичных котлов, оснащенных обычными вихревыми горелками [71].



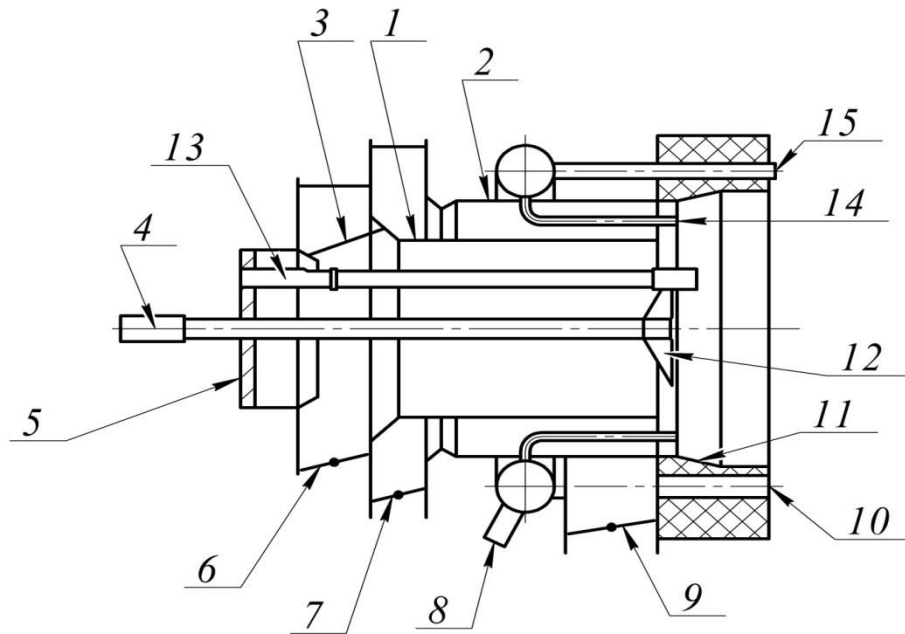
1 – вихревые горелки; 2 – горелки двухстадийного сжигания.

Рисунок 1.5 – Зависимость выхода NO_x от нагрузки котла

Ступенчатое сжигание можно организовать также и подачей топлива. На рисунке 1.6 изображен поперечный вид горелки, получившей название AVC (Корректируемое Управление Вихря). Горелка со ступенчатой подачей топлива и воздуха разработана фирмой John Zink Company [72]. Проект AVC-горелки позволяет работать с уровнями избытка воздуха, обеспечивающими менее чем 0,5 % избыточного кислорода. Конструкция AVC позволяет регулировать крутку воздуха во всем диапазоне: от осевого потока до потока с максимальной круткой.

Основной воздух разделен на два потока, обозначенные как первичный и вторичный воздух, причем каждый из потоков имеет собственный управляемый шибер. Часть воздуха, который называется третичным, подается по отдельному каналу. На этом потоке установлены свои воздушные шиберы, что позволяет контролировать расход третичного воздуха, идущего во вторичную зону горения.

В этой горелке используются различные механизмы подавления NO_x при работе на мазуте и газе. При сжигании мазута используется ступенчатая подача воздуха.



1 - канал первичного воздуха; 2 - канал вторичного воздуха; 3 - перегородка параллельного потока; 4 - мазутная форсунка; 5 - съемная центральная заслонка; 6 - шибер первичного воздуха; 7 - шибер вторичного воздуха; 8 - ввод газа; 9 - шибер третичного воздуха; 10 - сопло третичного воздуха; 11 - огнеупорная горловина; 12 - конус стабилизации пламени; 13 - растопочный газ; 14 - ввод первичного газа; 15 - ввод стадийного газа.

Рисунок 1.6 – Горелка ступенчатого (стадийного) сжигания, разработанная фирмой John Zink Company

Это позволяет снизить выход не только термических, но и топливных оксидов азота. На природном газе используется ступенчатая подача топлива. Стадийный ввод газообразного топлива выполнен с использованием первичных и вторичных топливных сопел.

Результаты испытаний этой горелки, проведенные на газе, представлены на рисунке 1.7. Из приведенного графика (рисунок 1.7) видно, что горелка со ступенчатой подачей топлива уменьшает эмиссию NO_x на 50 % по сравнению с традиционной горелкой, работающей на холодном

воздухе и почти на 70 % по сравнению с обычной горелкой на горячем воздухе (315 °C).

Хотя большая часть опытов была проведена при сжигании природного газа, ограниченная проверка была выполнена и для мазута, со стандартной паровой струйной форсункой с шестью соплами.

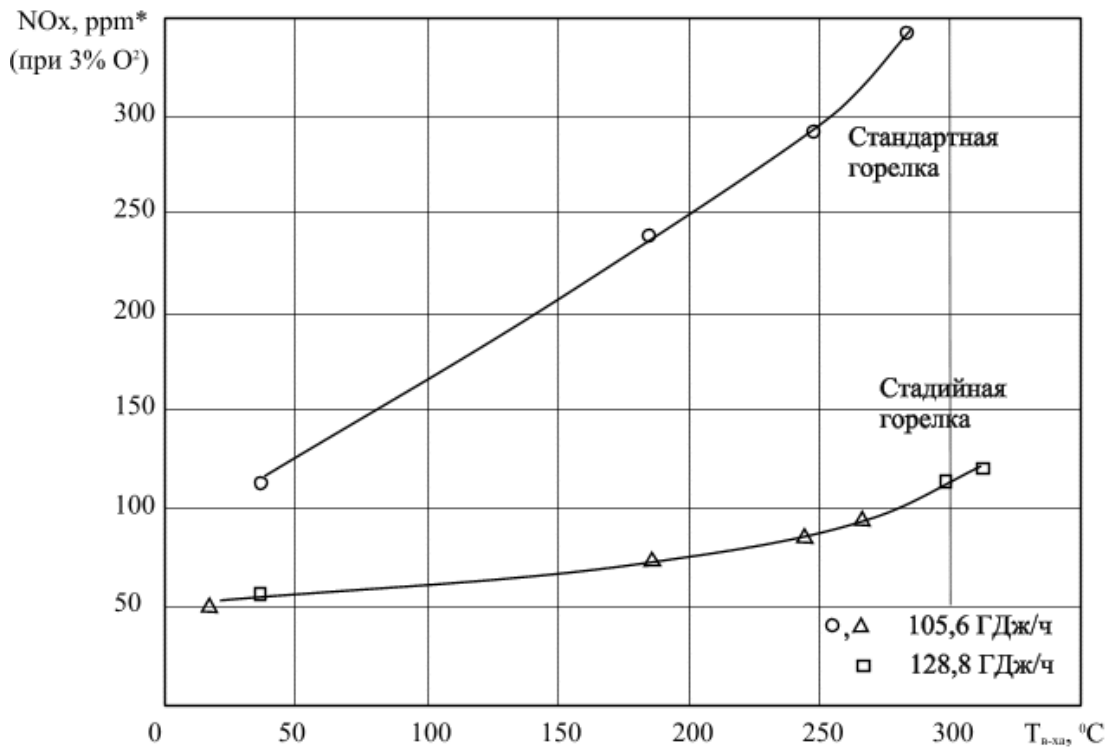


Рисунок 1.7 – Зависимость выхода NO_x от температуры воздуха и типа горелки

Используемое топливо – тяжелый мазут с содержанием азота 0,3 %. Эмиссия CO была низкой при всех условиях. В большинстве опытов концентрации CO составляли от 0 до 63 мг/м³. При нагрузках близких к номинальной, концентрации NO_x изменялись от 480 до 515 мг/м³ [73].

Дальнейшее развитие вылилось в создании горелки FREE-JET разработанной фирмой Zeeco. Основной принцип, способствующий снижению NO_x для низкоэмиссионных горелок FREE-JET (рисунок 1.8), является обеспечение смешения природного газа с инертными продуктами

горения, которое происходит внутри топки в районе амбразуры специальной конструкции, путем подачи газа через специальные сопла по внешнему периметру амбразуры. При этом происходит снижение пиков температур пламени при горении топлива. Стабильность горения обеспечивается раскалённой амбразурой.

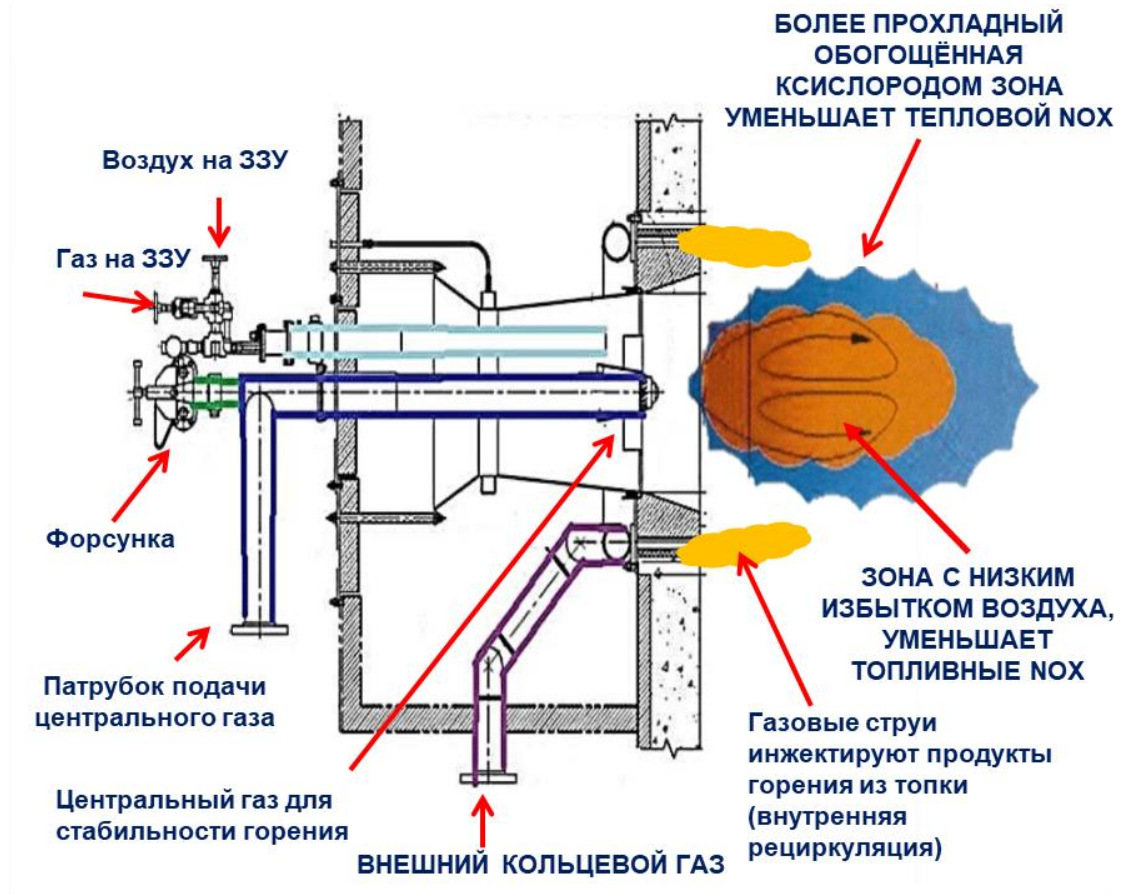


Рисунок 1.8 – Принцип снижения NO_x в горелке FREE-JET

Газомазутная горелка FREE-JET (рисунок 1.9), разработанная фирмой Зеесо, имеет типоразмерный ряд мощностей от 10 до 70 МВт. Горелка выполнена двухканальной по воздуху, и трёхканальной по топливу. В центральном канале размещен аксиальный завихритель. В основном канале горелки равномерно размещены газоподводящие трубки с раздающим наконечником специальной конструкции. По периметру амбразуры специальной конструкции из термостойкого материала по двум окружностям размещены газораздающие сопла. Центральный канал горелки выполнен в

виде трубы Вентури с аксиальным завихрителем. По оси горелки установлена паромеханическая мазутная форсунка.

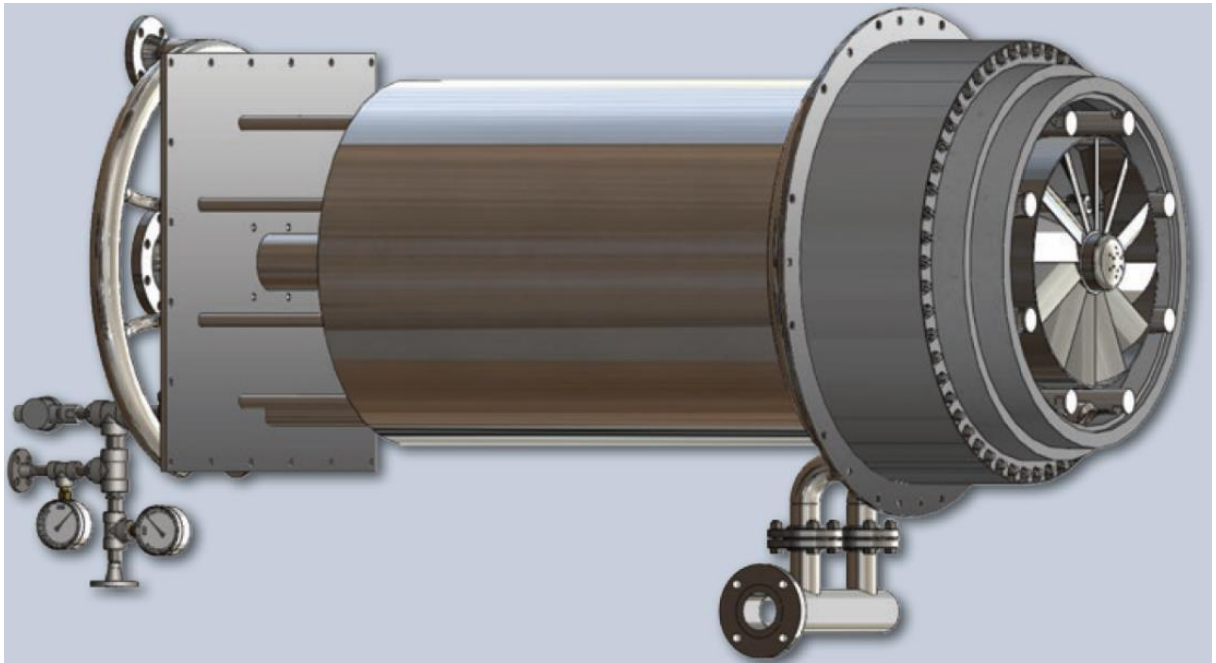


Рисунок 1.9 – Газомазутная горелка FREE-JET

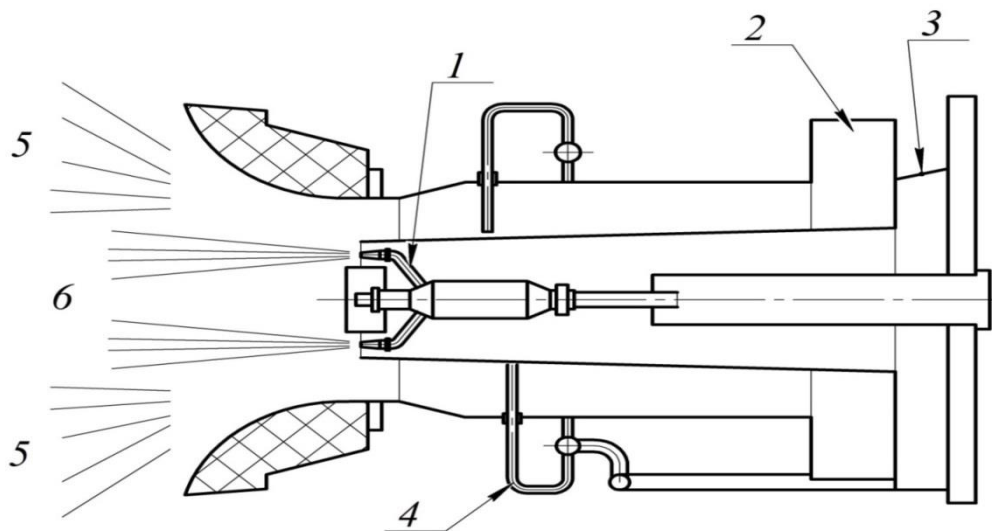
Результаты испытаний котла паропроизводительностью 40 кг/с (145 т/ч), на котором установлено 6 горелок ZEECO FreeJet мощностью 20 МВт каждая показали, что концентрации NO_x составляют 82 мг/м^3 , без применения других методов подавления NO_x [74].

Горелки нестехиометрического сжигания. В горелках нестехиометрического сжигания окислительная и восстановительные зоны горения организуются внутри факела одной горелки, при этом общее количество воздуха, подаваемое через горелки остается таким же как при обычном сжигании. Разбаланс топлива и воздуха в горелке может быть реализован перераспределением, как топлива, так и воздуха по каналам.

Пример такой вихревой РМ-горелки для сжигания природного газа, разработанной сотрудниками Исследовательской лаборатории горения и теплообмена Технического института г. Нагасаки (Япония) [11, 75], показан

на рисунке 1.10. Воздух на горение подается по двум каналам, в каждом из которых установлены газовые сопла. Расходы газа и воздуха, поддерживаются таким образом, что на начальном участке факел имеет зону, обогащенную и обедненную топливом. То есть, нестехиометрическое сжигание реализуется в факеле горелки [11].

Такие горелки (18 штук, размещенные в три яруса по высоте на фронтальной стене) были установлены на котле блока №3 ТЭС Нои мощностью 265 МВт, оборудованному топкой с двусветным экраном. Мощность каждой горелки 46,6 МВт. Были проведены опыты с разными избытками воздуха и с разной степенью рециркуляции дымовых газов, которые смешивались с воздухом, поступающим к горелкам [75]. При $\gamma = 7\%$ и $\alpha = 1,08$ концентрация оксидов азота в дымовых газах составила 250 мг/м^3 (в пересчете на NO_2 в пробе дымовых газов с $\text{O}_2 = 5\%$). Минимальная концентрация оксидов азота (80 мг/м^3) была получена при $\gamma = 28\%$ и $\alpha = 1,05$.



1 - газовые сопла для обогащенной смеси; 2 - воздушный шибер для обедненной смеси;
3 - воздушный шибер для обогащенной смеси; 4 - газовые сопла для обедненной смеси; 5 -
зона факела, обедненная топливом; 6 - зона факела, обогащенная топливом.

Рисунок 1.10 – Вихревая РМ-горелка для природного газа

Комбинированные горелки. В данных горелках одновременно используется эффект, создаваемый газами рециркуляции, и эффект ступенчатости горения, т. к. кольцевой поток дымовых газов отделяет на начальном участке факела наружный поток воздуха от внутреннего, который интенсивно смешивается с топливом и газами рециркуляции.

На рисунке 1.11 представлена горелка с пониженным выходом оксидов азота, разработанная фирмой TODD Combustion [72].

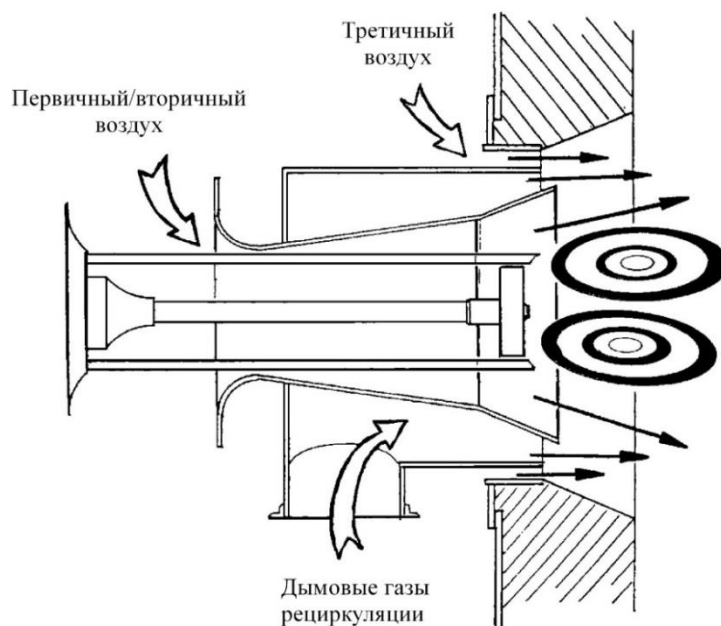


Рисунок 1.11 – Горелка ступенчатого сжигания с вводом газов рециркуляции между воздушными каналами фирмы TODD Combustion

В конструкцию этой горелки добавлена камера для ввода газов рециркуляции. Эффект снижения выбросов NO_x достигается путем подачи дымовых газов рециркуляции по кольцевому каналу между воздушными каналами, так как при этом поток третичного воздуха отделяется от зоны основного горения и создает в горелке ступенчатое сжигание топлива. Дополнительный эффект достигается за счет газов рециркуляции, которые минимизируют пик температуры пламени и значительно уменьшают образование термических NO_x [76].

В центральном канале установлен завихритель, который в первичной зоне сгорания создает вихрь, необходимый для стабилизации пламени. Обратный поток в форме самогенерирующегося кольцевого вихря также обеспечивает циркуляцию горячих газов в пределах пламени. Это создает однородный тепловой поток и минимизирует горячие участки внутри топки.

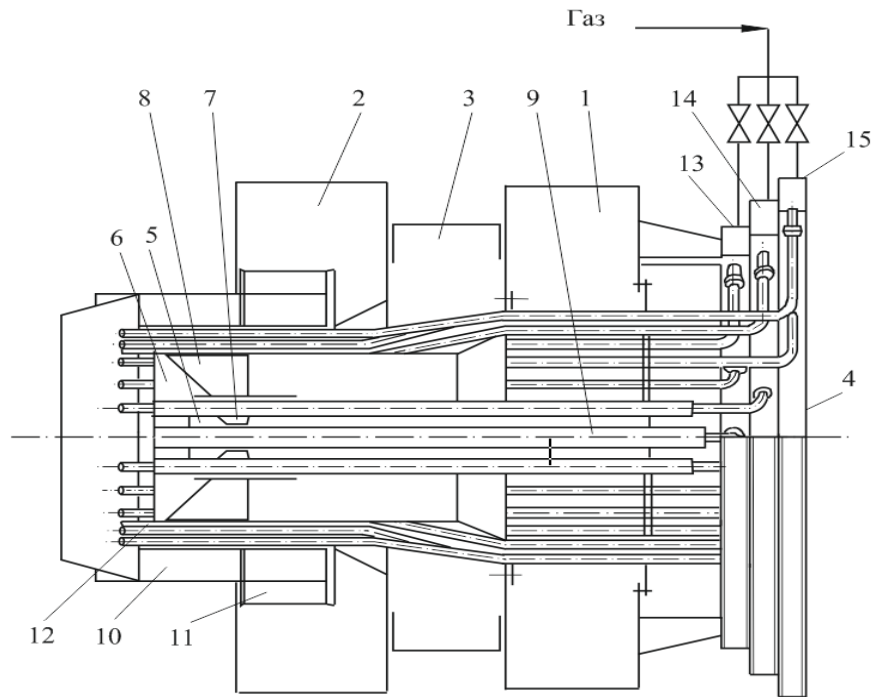
Таким образом, данная горелка обеспечивает стабильность пламени при ступенчатом подводе воздуха, создает расход дымовых газов рециркуляции до 50 % с низкой эмиссией СО, что позволяет снизить выбросы оксидов азота до 90 %.

Более сложной явилась конструкция разработанной в ВТИ многопоточной, мощной, высокоманевренной, с диапазоном регулирования от 20 до 100 %, низкоэмиссионной горелки (рисунок 1.12), примененная при реконструкции котла ТГМП-114 Среднеуральской ГРЭС [77].

В данной конструкции горелки газы рециркуляции вводятся в кольцевой канал, расположенный между центральным и периферийным каналами воздуха, и значительная часть топлива подается в прямоточный поток газов рециркуляции.

Оптимальное распределение газовых струй в потоке на выходе из горелки достигается путем соответствующей ориентации газовыпускных насадков.

При сжигании мазута распыленное топливо поступает в зону выхода центрального воздушного потока, составляющего приблизительно от 30 до 40 % от всего расхода воздуха. На начальном участке факела мазут сжигается с недостатком окислителя, что обеспечивает снижение образования оксидов азота. Ступенчатый подвод периферийного воздуха обеспечивается за счет подачи от 15 до 20 % рециркулирующих дымовых газов между воздушными потоками.



1 и 2 - воздушные аппараты; 3 - устройство подачи рециркулирующих дымовых газов; 4 - газораздающее устройство; 5 - осевой воздушный канал; 6 - центральный воздушный канал; 7 и 8 - аксиальные завихрители; 9 - труба для установки мазутной паромеханической форсунки; 10 - периферийный воздушный канал; 11 - тангенциальный лопаточный завихритель; 12 - канал для подачи рециркуляции дымовых газов; 13 - камера газовая 1-ой ступени; 14 - камера газовая 2-ой ступени; 15 - камера газовая 3 ступени.

Рисунок 2.12 – Многоканальная горелка с пониженной генерацией NO_x

Результаты измерений концентрации оксидов азота в дымовых газах показали, что на номинальной нагрузке при сжигании природного газа с эксплуатационным коэффициентом избытка воздуха без подачи газов рециркуляции ($r = 0 \%$) горелки обеспечивают содержание оксидов азота (приведенные к $\alpha = 1,4$) на уровне от 310 до 330 мг/м^3 . Концентрация оксидов азота при тех же условиях на нереконструированных котлах составляла около 950 мг/м^3 .

Ввод рециркулирующих дымовых газов в рассечку воздушного потока горелок в количестве $r = 7 \div 8 \%$, привел к снижению концентрации NO_x на 60 % по сравнению с исходной концентрацией при $r = 0 \%$. Концентрация

оксидов азота снизилась с 330 до 140 мг/м³. При сжигании газа в горелках обычной конструкции содержание NO_x составило 540 мг/м³.

Сжигание мазута в этих горелках с подачей рециркуляции газов в количестве $r = 7\%$ приводит к уменьшению приведенной концентрации оксидов азота до 200 мг/м³. В аналогичном случае на котлах с нереконструированными горелками концентрация NO_x составляет 600 мг/м³. Таким образом, за счет установки горелок данной конструкции удалось снизить образование оксидов азота в топочной камере котла ТГМП–114 от 2,5 до 3 раз.

Горелка с полным предварительным перемешиванием.

Преыдушие горелки для снижения выхода оксидов азота использовали ступенчатую подачу газа или воздуха, при которых создавалась зона с $\alpha < 1$. Это достигалось разделением потоков на начальном участке пламени за счет аэродинамики факела, вводом газов рециркуляции или созданием специальной конструкции горелки. Фирма «Radian Corporation» для создания низкоэмиссионных горелок пошла по другому пути [72].

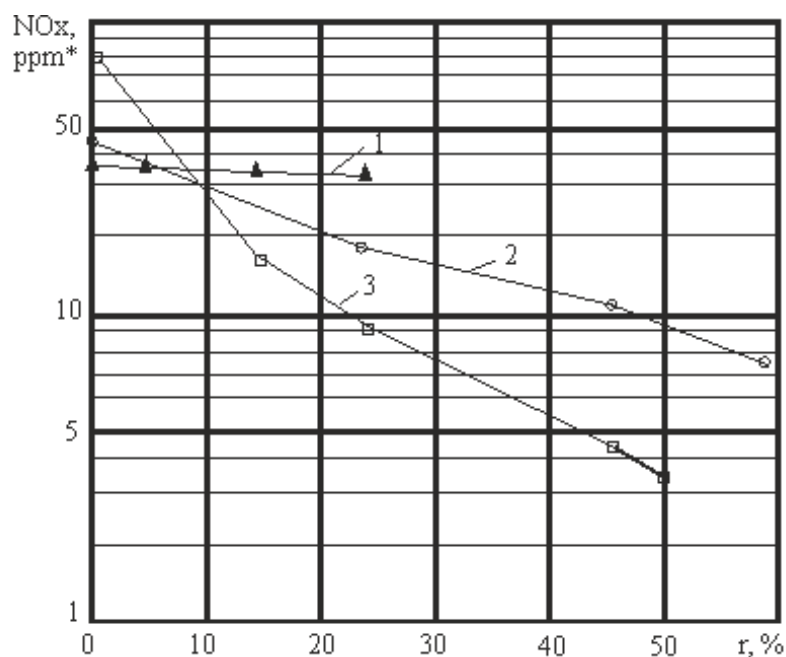
Эта фирма разработала и совместно с купившей лицензию котлостроительной фирмой «Todd Combustion» испытала в промышленных условиях новую газомазутную горелку, получившую название Radian Rapid Mix Burner (R–RMBTM).

Для уменьшения концентрации термических NO_x было решено снизить максимальную температуру в ядре горения за счет ввода газов рециркуляции, а для уменьшения образования быстрых NO_x – добиться быстрого смешения топлива с воздухом и газами рециркуляции, чтобы к моменту воспламенения во фронте иметь α много больше 1.

Такому условию соответствует горелка с полным предварительным перемешиванием. В опытах на огневом стенде было обнаружено, что скорость перемешивания играет весьма существенную роль. На первой стадии исследований было показано, что без рециркуляции ($r = 0$) быстрое

перемешивание топлива с воздухом приводит к повышенной (более 80 ppm) концентрации NO_x в продуктах сгорания (рисунок 1.13). Однако при наличии газов рециркуляции картина оказывается обратной: именно быстрое смешение топлива воздуха и газов рециркуляции позволяет получить концентрацию NO_x меньше 10 ppm, в то время как при медленном смешении с увеличением r от 0 до 26 % концентрация оксидов азота уменьшается с 40 только до 32 ppm (см. рисунок 1.13).

Принципиальная схема горелки R-RMBTM приведена на рисунке 1.14, из которого видно, что смесь воздуха и газов рециркуляции проходит через аксиальный закручивающий аппарат, и в эту смесь, в пространство между лопатками, инжектируется природный газ.

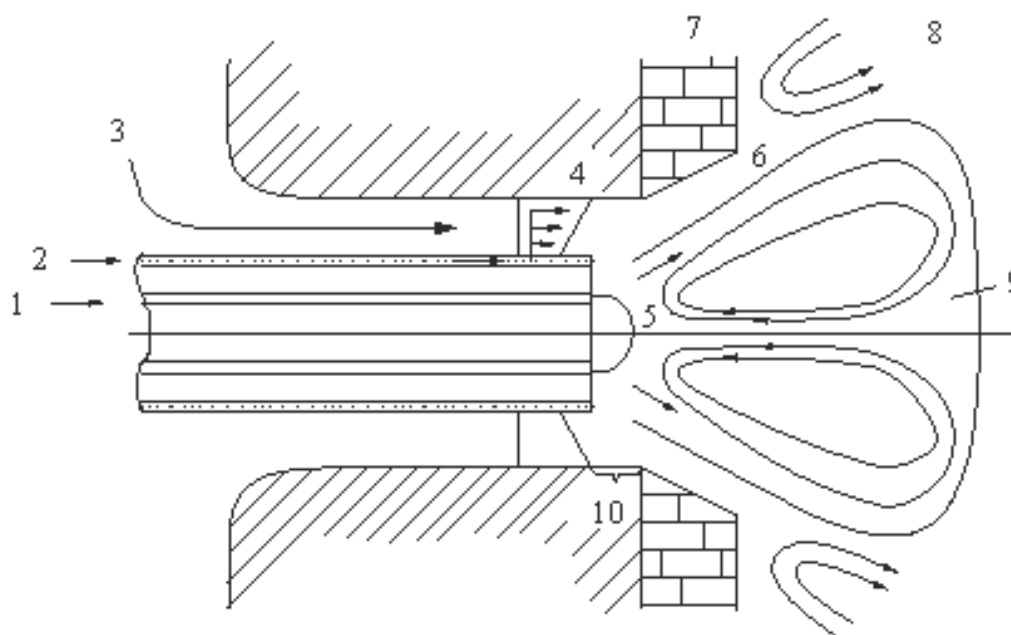


1 – медленное перемешивание; 2 – средняя скорость перемешивания; 3 – быстрое перемешивание; * - 1 мг/м^3 (при 6 % O_2) = 1 ppm (при 3 % O_2) $\times 1,17$.

Рисунок 1.13 – Зависимость концентрации NO_x в продуктах сгорания при $\text{O}_2 = 3 \%$ от скорости перемешивания топлива, воздуха и газов рециркуляции в горелке R-RMBTM и степени рециркуляции

Конструкция газовых наконечников и скоростной режим обеспечивают полное смешение топлива с газовойздушной смесью за очень короткий срок (до достижения потоком конической части амбразуры).

При этом стабильность воспламенения факела достигается даже при сниженной максимальной температуре в ядре горения (что необходимо для подавления «термических» NO_x).



1 – мазут; 2 – природный газ; 3 – воздух и газы рециркуляции; 4 – закручивающие лопатки и газовые наконечники; 5 – распыленный мазут; 6 – смесь природного газа, воздуха и газов рециркуляции; 7 – стенка топочной камеры; 8 – наружная зона рециркуляции; 9 – внутренняя зона рециркуляции; 10 – участок быстрого перемешивания.

Рисунок 1.14 – Принципиальная схема горелок R-RMBTM

Проведенные на двух жаротрубных котлах тепловой мощностью по 1,48 МВт, на одном водотрубном котле мощностью 7,6 МВт и на крупном промышленном водотрубном котле мощностью 38 МВт испытания при сжигании природного газа показали [78], что горелка обеспечивает концентрацию NO_x не более 17 мг/м^3 . При этом CO в продуктах сгорания остается на допустимом уровне (не превышает нескольких ppm). Указанные

NO_x удалось получить даже при умеренной рециркуляции дымовых газов, подогреве воздуха и высоких тепловых напряжениях камер сгорания.

В конструкции горелки типа R-RMBTM не были использованы особенности низкоэмиссионных горелок со ступенчатой подачей топлива или воздуха, что позволило избежать побочных отрицательных явлений. В частности, в продуктах сгорания этой горелки практически отсутствуют СО и углеводороды, а факел остается компактным и стабильным даже при повышенной доле газов рециркуляции.

Горелка с форсированной внутренней рециркуляцией. Конструкция, которая показана на рисунке 1.15, – это горелка с форсированной внутренней рециркуляцией (FIR) [79, 80, 81], которая объединяет несколько технических решений для сильного снижения эмиссии NO_x и СО при сжигании природного газа без ухудшения эффективности работы котла.

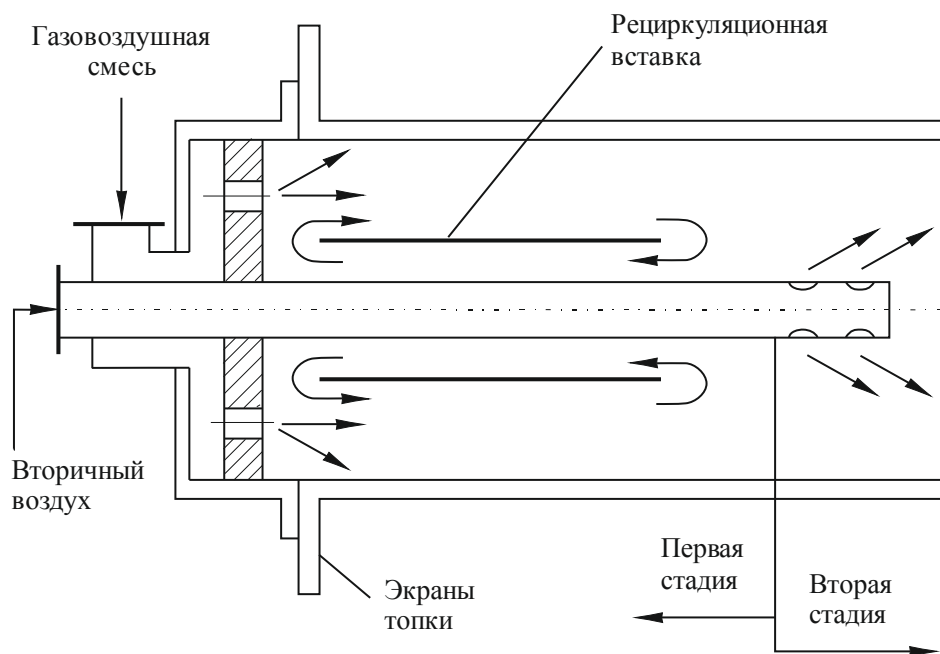


Рисунок 1.15 – Низкоэмиссионная горелка с форсированной внутренней рециркуляцией

Эти технические решения базируются на двухступенчатом сжигании природного газа с рециркуляцией богатых продуктов горения:

- на первой стадии происходит сжигание предварительно перемешанной смеси воздуха и топлива (при $\alpha < 1$) со значительной внутренней рециркуляцией продуктов неполного горения (благодаря кинетической энергии струи). Это необходимо для достижения стабильного и однообразного сжигания, которое минимизирует пик температуры пламени и увеличения теплопередачи из пламени в первой зоне;

- во второй стадии осуществляется контролируемая подача оставшегося воздуха, для дальнейшей минимизации пика температур пламени. Как результат – снижение образования NO_x в обеих стадиях.

Горелка FIR была испытана Институтом Газовых Технологий (IGT) на модели котла мощностью 1,8 МВт и Компанией Детройт Стокер (DSC) на водотрубном котле мощностью 5,9 МВт [82]. В дополнение к эксплуатационным параметрам (мощность и коэффициент избытка воздуха в начальной зоне), были также оценены ключевые геометрические параметры горелки. Результаты без внешней рециркуляции дымовых газов и впрысков воды или пара показали, что:

- на первой стадии образуется менее $2 \text{ мг/м}^3 \text{ NO}_x$ для большинства опытов;

- природный газ эффективно конвертирует на первой стадии, что подтверждается наличием менее 0,5 % всех углеводородов в продуктах сгорания первой стадии;

- при определенных режимах конечные концентрации NO_x не превышали 15 мг/м^3 , причем большая часть этих NO_x образовалась на второй стадии.

1.4 Результаты обзора. Постановка задач исследования

Обзор литературы показал следующее:

1. Образование оксидов азота при горении газообразного топлива происходит за счет окисления молекулярного азота воздуха непосредственно в зоне горения (термические оксиды азота);

2. Уменьшение выбросов термических оксидов азота на котлах, в которых сжигают жидкое и газообразное топливо, в основном, обеспечивается режимными мероприятиями, направленными на уменьшение температуры и концентрации окислителя в зоне горения: двухступенчатое и нестехиометрическое сжигание, рециркуляция дымовых газов в зону горения, низкоэмиссионные горелки;

3. Анализ отечественного и зарубежного опыта использования низкоэмиссионных газогорелочных устройств показал, что основные решения по усовершенствованию их конструкции с целью снижения образования оксидов азота связаны с организацией ступенчатого или нестехиометрического сжигания в факеле горелки и рециркуляцией дымовых газов в горелки.

В данной работе была поставлена цель – разработать и обосновать рекомендации по совершенствованию газогорелочных устройств с низким выходом NO_x .

Для достижения указанной цели были намечены направления дальнейших исследований.

Так, оценка влияния таких конструктивных и режимных факторов как организация в самой горелке ступенчатого сжигания за счет перераспределения воздуха и топлива, рециркуляция продуктов сгорания может быть исследована экспериментально в стендовых условиях.

Влияние внешней рециркуляции дымовых газов и некоторых других параметров, исследование которых на стенде достаточно трудоемко, следует проводить путем математического моделирования.

Для разработки и обоснования рекомендаций по совершенствованию газогорелочных устройств с низким выходом NO_x необходимо выполнить:

- в стендовых условиях:
 - оценку влияния коэффициента избытка воздуха на образование NO_x при диффузионном и кинетическом режимах горения;
 - исследование метода снижения образования NO_x за счет организации ступенчатого сжигания газа перераспределением воздуха в горелке;
 - оценку эффективности снижения NO_x путем перераспределения топлива между каналами горелки;
 - оценку влияния внутренней рециркуляции продуктов сгорания непосредственно в горелке на образование NO_x ;
- с помощью математического моделирования:
 - исследование влияния конфигурации амбразуры горелки на образование NO_x ;
 - определение оптимального угла установки лопаток аксиального завихрителя воздуха;
 - определение оптимального места ввода топлива в воздушные потоки горелки;
 - оценку влияния внешней рециркуляции дымовых газов на образование NO_x ;
- промышленные испытания на действующих котлах горелок с внедренными конструктивными решениями по снижению NO_x .

Глава 2 Стендовые исследования влияния режима горения природного газа на образование NO_x

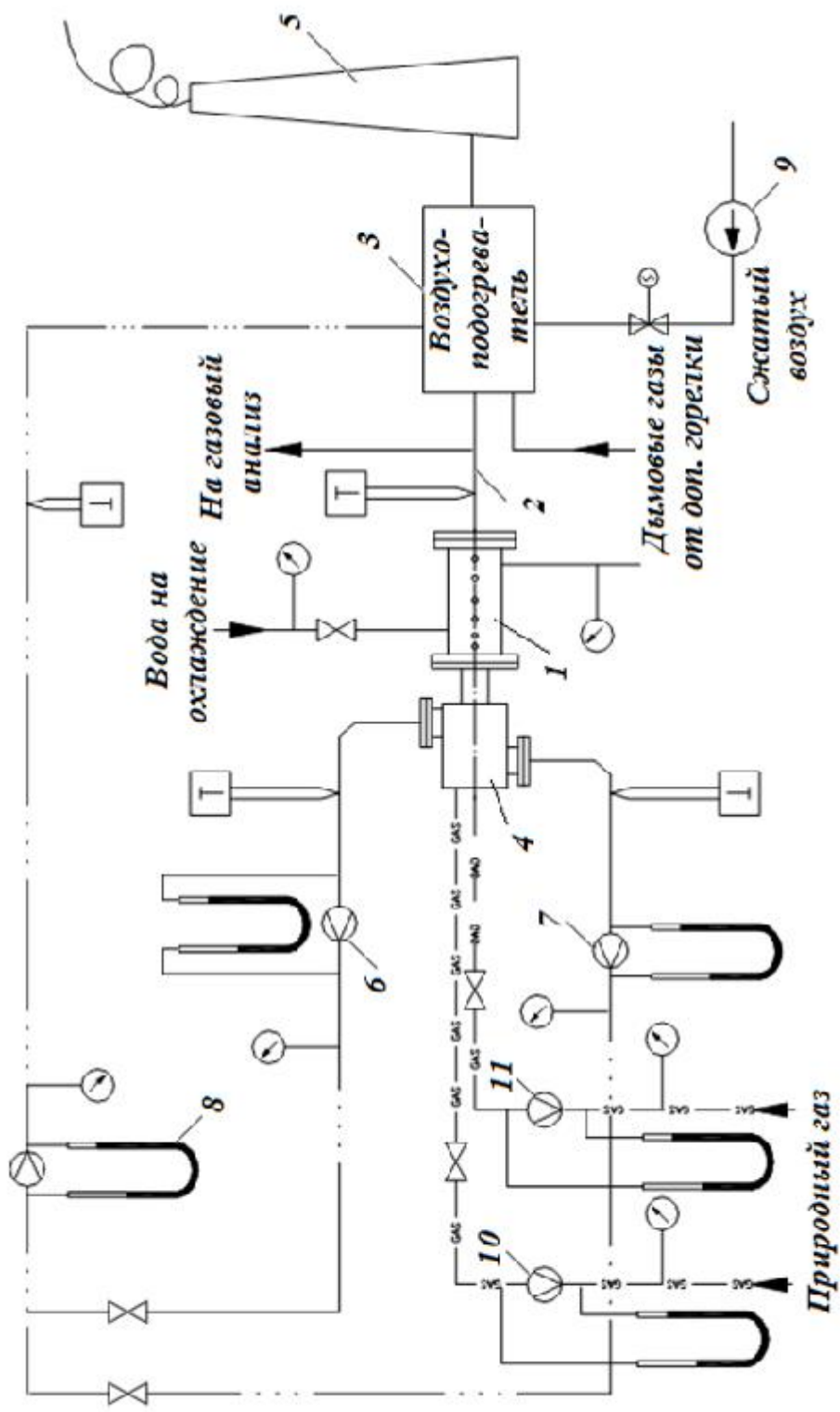
2.1 Описание экспериментальной установки

Для оценки влияния конструктивных и режимных параметров горелок на образование NO_x была создана экспериментальная установка, позволяющая в стендовых условиях:

- исследовать работу горелок в кинетическом и диффузионном режимах горения;
- моделировать работу прямоточных и вихревых горелок с разной степенью крутки;
- организовать стадийное (ступенчатое) сжигание и внутреннюю рециркуляцию продуктов сгорания в различных моделях горелок.

Принципиальная схема стендовой экспериментальной установки приведена на рисунке 2.1.

Одним из основных элементов стенда является камера сгорания 1, которая представляет собой горизонтальную трубу диаметром 200 мм и длиной 600 мм из нержавеющей стали. Снаружи имеется кожух из трубы большего диаметра, расположенный соосно с внутренней трубой. Между ними предусмотрена подача охлаждающей воды для предотвращения перегорания внутренней трубы, которая непосредственно контактирует с высокотемпературными продуктами сгорания, поступающими от горелки. Давление охлаждающей воды контролируется при помощи манометров установленных на входе и на выходе воды в кожух камеры сгорания. По длине камеры сгорания расположены шесть лючков диаметром 14 мм, закрываемых металлическими болтами, служащих для отбора проб газов и измерения температур, и снабжена окнами для визуального наблюдения за факелом горелки.



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

Рисунок 2.1 – Схема экспериментальной установки для стендовых исследований влияния конструктивных и режимных параметров горелок на образование NO_x

Камера выполнена газоплотной и в процессе опытов находилась под давлением, что исключало возникновение присосов воздуха.

Камера сгорания фланцевым соединением крепится к газоходу 2, также охлаждаемому водой, на котором предусмотрен штуцер для отбора проб продуктов сгорания на газовый анализ.

На газоходе установлена термopapa для определения температуры газов, выходящих из камеры сгорания. После газохода газы попадают в теплообменник 3 (воздухоподогреватель), служащий для нагрева воздуха, идущего на горение. Теплообменник снабжен заслонкой с приводом (на рисунке 2.1 не показана), который позволяет менять поверхность, омываемую дымовыми газами, изменяя тем самым температуру воздуха. Для поддержания температуры горячего воздуха на постоянном уровне, а также для нагрева его до высоких температур, предусмотрена дополнительная горелка, при включении которой температура воздуха на горения может достигать 400 °C.

Охлажденные газы, после воздухоподогревателя, поступают в газоход и далее через дымовую трубу 5 выбрасываются в атмосферу.

С другой стороны камера сгорания имеет фланцевое соединение, к которому подсоединяются различные модели горелочных устройств 4. Основной частью каждой модели является камера, к которой подводятся две линии подачи воздуха. Каждая линия снабжена своим мерным участком (поз. 6 и 7) и индивидуальным регулирующим органом (на рисунке 2.1 не показаны). Это дает возможность независимого регулирования расхода воздуха на каждый канал модели горелки и точного его определения. Измеряется также и общий расход воздуха (поз. 8).

Сжатый воздух к экспериментальной установке подводится от воздуходувки 9. Для очистки воздуха от масла и влаги на входе установлен специальный фильтр.

Природный газ к модели горелочного устройства подается также двумя независимыми линиями, которые имеют свои регулирующие органы и измерительные участки (поз. 10 и 11), что позволяет регулировать расходы газа.

Давление природного газа и воздуха на стенд поддерживается постоянным.

Расходы газа и воздуха определяются по перепаду давления на протарированных специальных сужающих устройствах U-образными манометрами.

Давление газа и воздуха перед сужающим устройством при измерении расходов газа и воздуха, перед испытываемой моделью горелки и в камере горения измеряется образцовыми манометрами. Давление окружающей среды – барометром.

Для определения температуры газообразного топлива, уходящих газов и воздуха, идущего на горение, используются термопары с автоматическим регистрирующим прибором.

Состав уходящих продуктов сгорания, включая содержание в них оксидов азота, определялся по пробам, отбираемым в газоходе, расположенным за камерой сгорания переносным электрохимическим газоанализатором QUINTOX 9106. Точность прибора по измеряемым компонентам (O_2 , CO, NO_x , NO) $\pm 5\%$ от измеренного значения.

2.2 Результаты исследований влияния коэффициента избытка воздуха на образование NO_x при диффузионном и кинетическом режимах горения

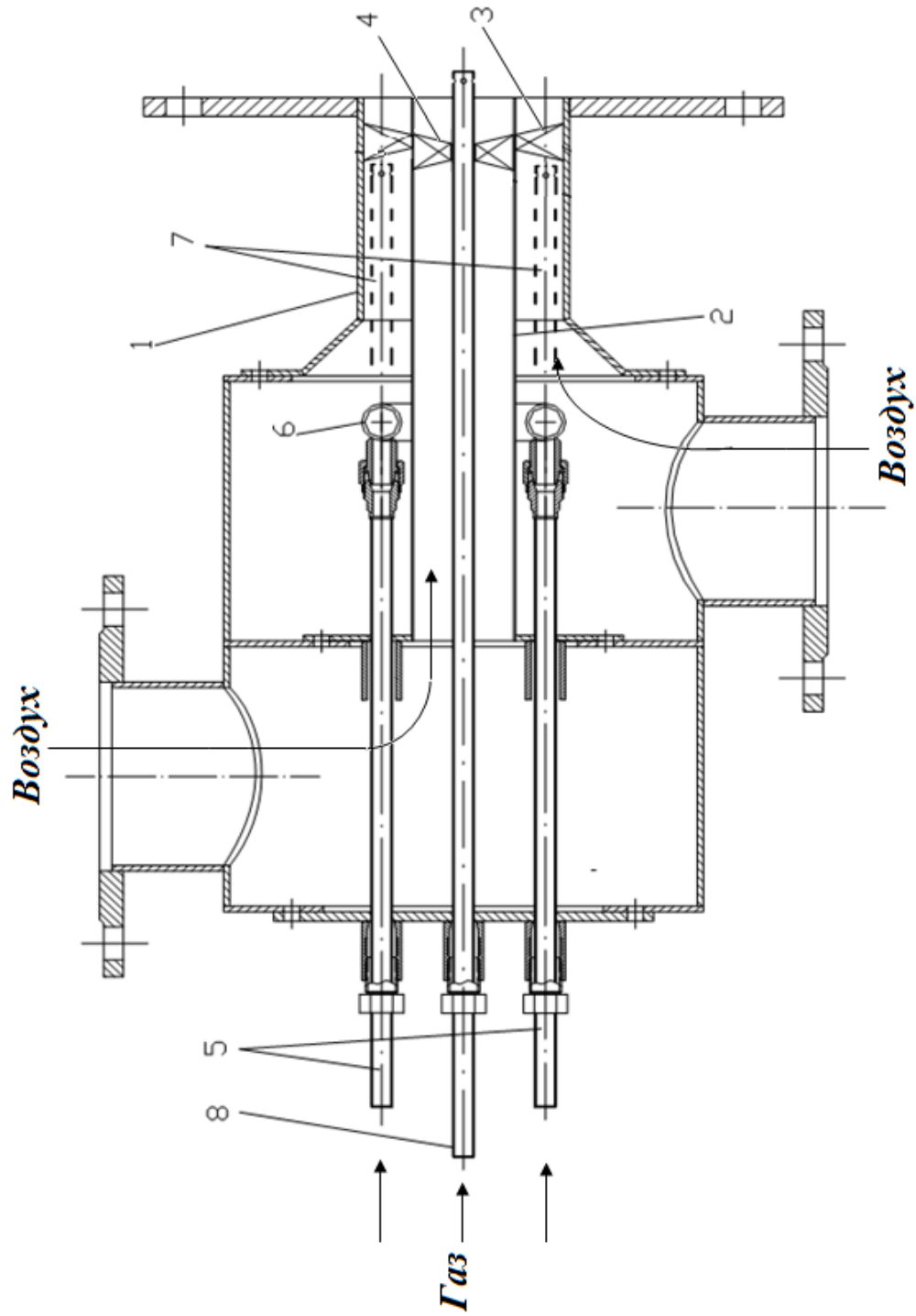
На рисунке 2.2 показана одна из прошедших испытание моделей горелочного устройства, представляющая собой двухканальную горелку.

Наружный канал 1 горелки выполнен диаметром 100 мм, а внутренний канал 2 – диаметром 45 мм.

Таким образом, бóльшая часть воздуха подается по наружному каналу, а оставшийся – направляется в центральный. Это было учтено при расчете мерных шайб на измерительных участках. На выходе из каждого канала были установлены аксиальные лопаточные завихрители (поз. 3 и 4), которые были сделаны съемными. Таким образом, можно было вводить в камеру сгорания потоки воздуха по разным каналам с различной степенью крутки или прямотоком.

К каждому каналу был обеспечен индивидуальный подвод газа. Для этого сзади горелки во фланце было сделано несколько штуцеров для ввода газораздающих трубок. В кольцевом канале было установлено четыре таких трубки 5, каждая из которых внутри горелки заканчивалась насадком с резьбовым соединением. К этим насадкам можно было прикреплять кольцевой газовый коллектор 6 средним диаметром кольца 80 мм.

Для выхода газа с другой стороны в коллекторе было просверлено по окружности 24 отверстия диаметром 2 мм, под углом 45° . Установка этого коллектора внутри воздушного канала горелки позволила обеспечить равномерную подачу газа по сечению горелки и его предварительное смешение с воздухом. Таким образом, подача газа и воздуха только в этот канал дает возможность исследовать кинетический режим горения.



1 - наружный канал горелки; 2 - внутренний канал горелки; 3, 4 - аксиальные лопаточные завихрители; 5 - газораздающие трубки; 6 - кольцевой газовый коллектор; 7 - насадки; 8 - газораздающая трубка.

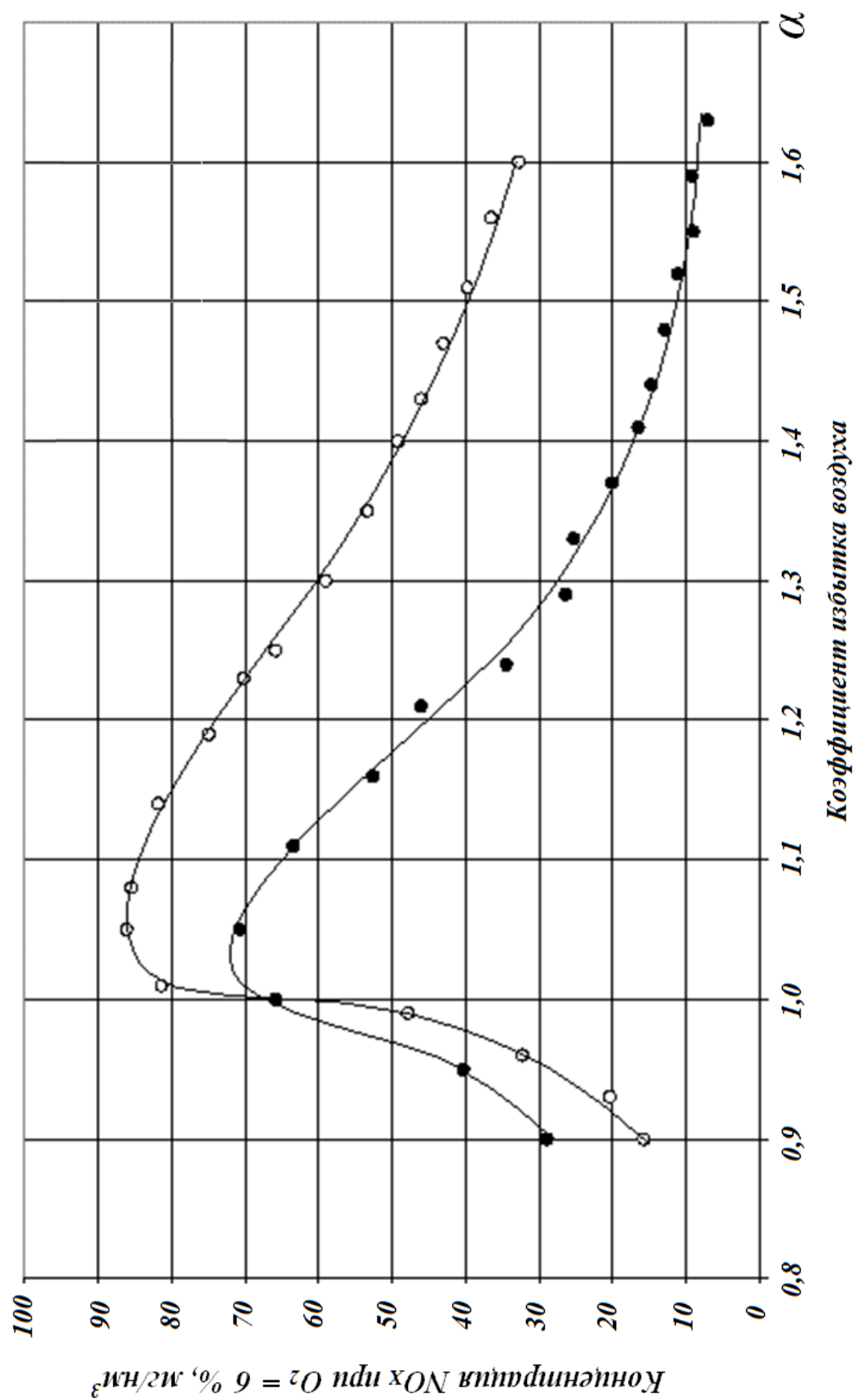
Рисунок 2.2 – Модель горелочного устройства

Для организации сжигания с отдельной подачей газа и воздуха в камеру, то есть диффузионное горение, были изготовлены насадки 7, которые крепились к газовым трубкам, проходящим через горелку, которые на своем конце имели систему отверстий.

В центральном канале горелочного устройства была установлена газораздающая трубка 8, на конце которой также был расположен ряд отверстий, раздающих газ перпендикулярно воздушному потоку. Диффузионное горение было организовано ее размещением на срезе горелки. Перемещение трубки внутрь горелки дало возможность организации сжигания предварительно перемешанной смеси топлива с воздухом.

На рисунке 2.3 показаны зависимости выхода NO_x от коэффициента избытка воздуха (α) при двух крайних случаях горения природного газа – диффузионном и кинетическом. Зависимость имеет экстремальный характер, с максимумом в районе $\alpha = 1,05$. Как видно, при сжигании предварительно перемешанной смеси топлива и воздуха выход оксидов азота уменьшается. Этот эффект увеличивается с ростом коэффициента избытка воздуха. Снижение обусловлено тем, что при больших α горение гомогенной смеси происходит именно при общем избытке воздуха, что снижает температуру пламени, так как часть теплоты, выделившейся при сгорании топлива, идет на нагрев воздуха. При горении топлива, не перемешанного заранее с воздухом, горение топлива происходит при локальных избытках воздуха близких к стехиометрическому. Поэтому температура горения выше, чем при горении гомогенной смеси.

Тем не менее, часть тепла также тратится на нагрев избыточного воздуха, уменьшая тем самым температуру горения. Это снижает выход «термических» оксидов азота, которые в большинстве своем и образуются при сжигании природного газа.



○ - диффузионное горение; ● - кинетическое горение.

Рисунок 2.3 – Концентрация NO_x при диффузионном и кинетическом горении в зависимости от коэффициента избытка воздуха

При приближении общего избытка воздуха к единице, разница в эмиссии оксидов азота при горении гомогенной смеси и отдельной подаче воздуха и топлива в камеру горения, снижается. Это вызвано тем, что локальные избытки воздуха и в том и в другом случае становятся приблизительно одинаковыми, и максимальные локальные температуры горения сближаются.

Тем не менее, при диффузионном горении максимальное значение NO_x все же выше, чем при кинетическом. По-видимому, это связано с тем, что при горении гомогенной смеси поле температур более ровное, а при диффузионном горении имеются высокие пиковые значения, что и обуславливает больший выход оксидов азота.

Между тем, на практике, диффузионный режим горения является более предпочтительным, так как он более устойчив по сравнению с кинетическим, не нужно предусматривать мер по предотвращению проскока, при диффузионном горении больший диапазон регулирования.

2.3 Исследование метода снижения образования NO_x за счет организации ступенчатого сжигания газа перераспределением воздуха в горелке

Зависимость выхода оксидов азота от избытка воздуха имеет экстремальный характер, с максимумом в районе единицы (рисунок 2.3). Из этого рисунка следует, что одним из путей снижения оксидов азота может быть сжигание топлива с $\alpha < 1$ и последующим вводом необходимого для дожигания несгоревшего топлива воздуха далее по факелу.

Такой режим сжигания природного газа был реализован на стенде, приведенном на рисунке 2.1, с использованием модели горелочного устройства, приведенной на рисунке 2.2. Все топливо подавалось в наружный

канал 1, имеющий лопаточный завихритель 4 с углом установки лопаток 45° . В этот же канал подавался воздух. Затем, часть воздуха подавалась в центральный канал 2, в котором был снят лопаточный аппарат, поэтому воздух поступал прямооток. Это было сделано, для того чтобы разделить эти потоки на начальном участке и организовать две ступени сжигания. Таким образом, с увеличением количества воздуха в центральном канале, в периферийном происходило его уменьшение, и сжигание газа на начальном участке происходило при избытке воздуха меньшем единицы. При этом общий избыток воздуха сохранялся постоянным, в районе от 1,08 до 1,09.

Зависимость образования оксидов азота, приведенных к $\alpha = 1,4$, от доли вторичного воздуха, подаваемого в центральный канал, представлена на рисунке 2.4.

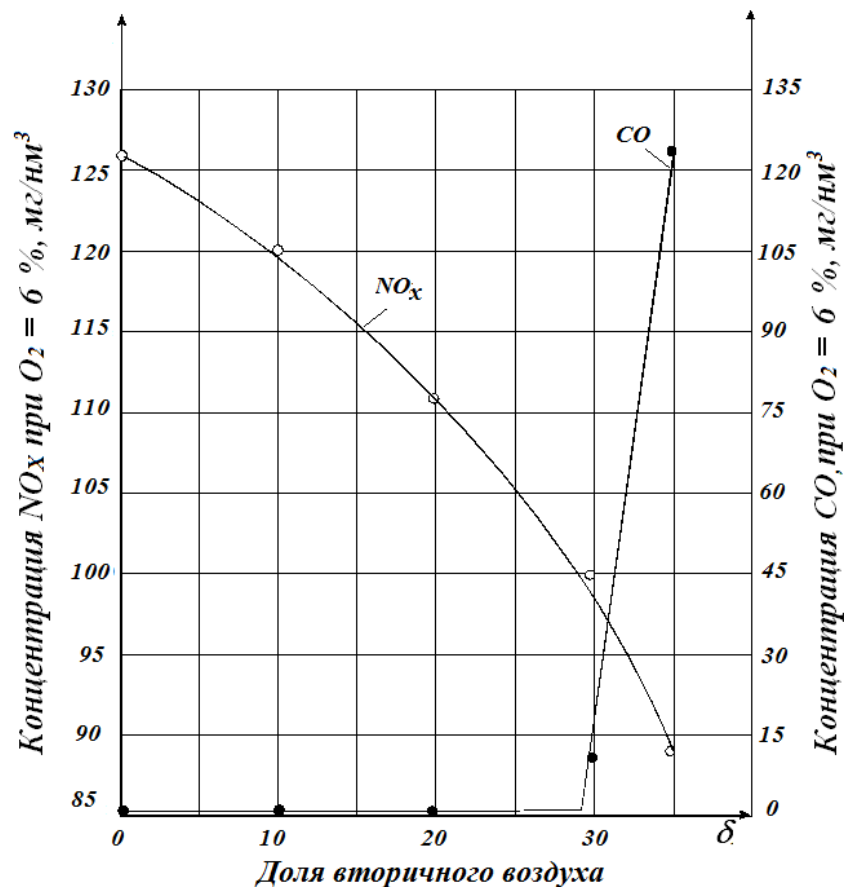


Рисунок 2.4 – Зависимость содержания оксидов азота и оксидов углерода от доли вторичного воздуха, подаваемого в центральный канал

Как видно из рисунка 2.4, с увеличением доли воздуха, подаваемого в центральный канал, снижается выход оксидов азота. Тем не менее, увеличение доли вторичного воздуха больше 30 % нежелательно, из-за резкого роста химического недожога. Он происходит потому, что при сильном снижении α в первичной зоне происходит снижение температуры горения, ввод вторичного воздуха также снижает температуру. При этом увеличение его доли ухудшает перемешивание с продуктами сгорания, образовавшимися на первой стадии и, таким образом, затрудняет дожигание продуктов неполного горения.

2.4 Оценка эффективности снижения NO_x путем перераспределения топлива между каналами горелки

Схема ступенчатого сжигания может быть создана путем организации центральной зоны, обогащенной топливом и подачей воздуха на дожигание в периферийный канал. Это несколько решает проблему стабилизации процесса горения за счет создания зоны обратных токов в центральной части, но при этом остаются трудности с дожиганием продуктов неполного горения при большом перераспределении топлива и воздуха.

Поэтому была предпринята попытка сжигания газа в горелке (см. рисунок 2.2) в несколько стадий, но при $\alpha > 1$. Для этого весь воздух направлялся в периферийный канал 1, который на выходе имел аксиальный лопаточный закручивающий аппарат. Сюда же подавалась большая часть природного газа. Остальной газ подавался прямотоком в камеру сгорания, через трубку, установленную в центральном канале 8.

Снижение выхода оксидов азота при такой схеме сжигания ожидалось за счет того, что на первой стадии газ на выходе из периферийного канала сжигается с избытком воздуха много большим единицы и, следовательно, как

видно из рисунка 2.3, в этой зоне будет понижена генерация NO_x . Остальное количество дожигается при среднем избытке воздуха в горелке. При этом среднее количество образовавшихся оксидов азота должно быть меньше.

На рисунке 2.5 представлена зависимость выхода оксидов азота от доли природного газа, подаваемого в центральный канал.

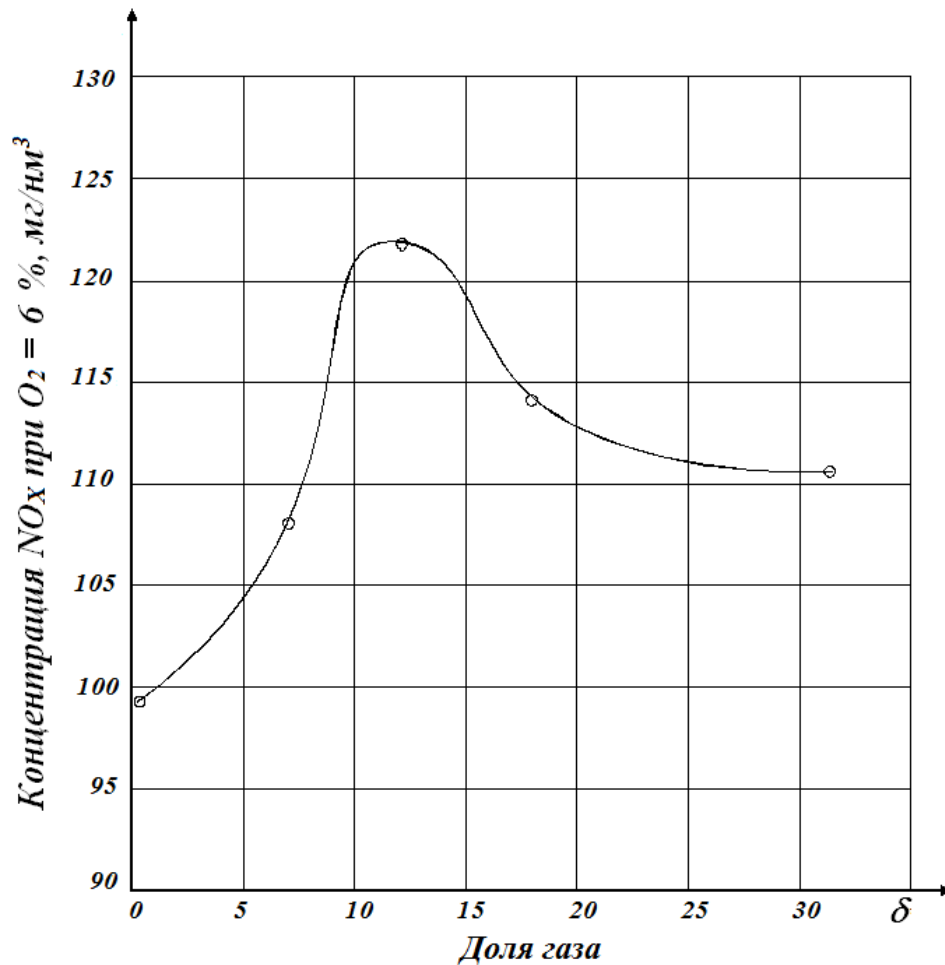


Рисунок 2.5 – Зависимость содержания NO_x от доли газа, подаваемого в центральный канал

Как видно из рисунка 2.5 на начальном участке наблюдается рост концентрации оксидов азота, а затем с увеличением доли природного газа, подаваемого в центр, небольшое снижение. По-видимому, это связано с тем, что снижение выхода NO_x на первой стадии сжигания с избытком компенсируется увеличением образования NO_x во второй ступени. Повышенный выход NO_x на второй стадии горения связан с тем, что

природный газ смешивается с продуктами сгорания при $\alpha > 1$. Причем температурный уровень в зоне смешения очень высок, так как продукты сгорания от первой зоны не успели охладиться.

Небольшое снижение, при увеличении доли газа во вторую зону, связано с тем, что увеличивается проникающая способность струи, и природный газ попадает в зону, где температура несколько ниже.

2.5 Оценка влияния рециркуляции продуктов сгорания, организованной непосредственно в горелке, на образование NO_x

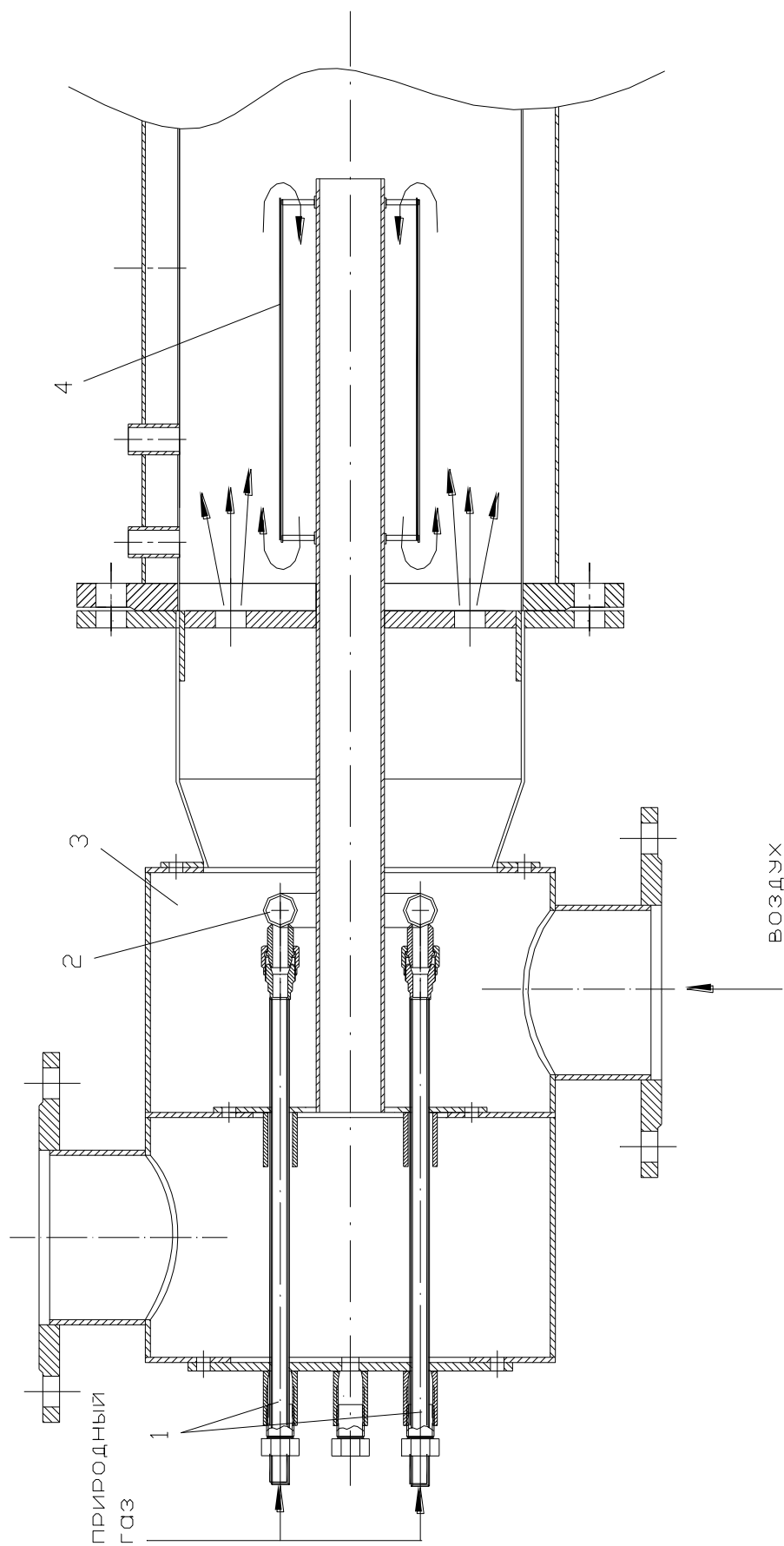
Исследование возможности снижения выхода NO_x с помощью рециркуляции продуктов сгорания, организованной непосредственно в горелке (внутренняя рециркуляция), выполнялось на модели горелочного устройства, которая показана на рисунке 2.6.

Газ по трубкам 1 поступает в коллектор 2, откуда выходит равномерно по окружности в камеру 3, куда подается воздух.

До выхода в камеру сгорания природный газ перемешивается с воздухом, а затем попадает в камеру сгорания прямыми струями, через ряд отверстий расположенных по окружности. В камере установлена цилиндрическая вставка 4, для создания внутренней рециркуляции продуктов сгорания к корню факела, за счет их эжекции вытекающими струями.

Снижение концентрации NO_x ожидалось за счет:

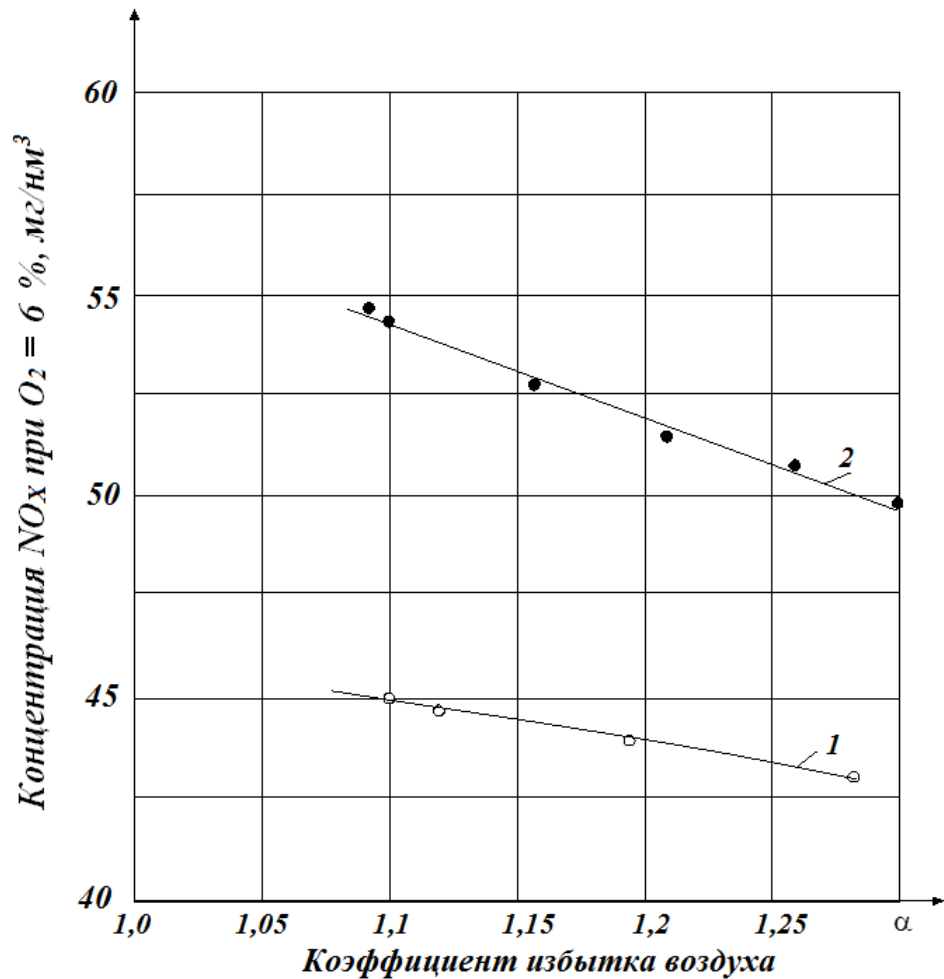
- предварительного перемешивания до стехиометрии газа и воздуха;
- сжигания со значительной внутренней рециркуляцией продуктов горения (благодаря кинетической энергии струи);
- достижения стабильного и однообразного сжигания, которое минимизирует пик температуры пламени;
- увеличения теплопередачи из пламени для уменьшения пиковых температур за счет увеличения поверхности факела.



1 - трубы; 2 – коллектор; 3 – камера сгорания; 4 – вставка для рециркуляции продуктов сгорания.

Рисунок 2.6 – Модель горелочного устройства с внутренней рециркуляцией

Результаты испытаний этой горелки представлены на рисунке 2.7 в виде зависимостей выхода NO_x от коэффициента избытка воздуха с рециркуляционной вставкой (кривая 1) и без нее (кривая 2). Кривая 2 отражает режим горения, когда кольцевая вставка была снята и горение проходило без нее.



1 – с рециркуляцией; 2 – без рециркуляции.

Рисунок 2.7 – Влияние внутренней рециркуляции на выход NO_x от избытка воздуха

Как можно видеть, в этом режиме наблюдается некоторый рост NO_x (приблизительно на 18 %) по сравнению с вариантом, когда вставка была установлена. Это говорит о возможном применении подхода с

использованием внутренней рециркуляции охлажденных продуктов сгорания к корню факела.

К недостаткам данной схемы можно отнести проблемы, связанные с проскоком пламени, увеличением сопротивления горелки из-за необходимости держать повышенные скорости в отверстиях и трудности в подборе материалов для кольцевой вставки, обеспечивающей внутреннюю рециркуляцию продуктов сгорания, которая работает в зоне высоких температур.

2.7 Выводы по главе 2

1. В результате стендовых исследований на экспериментальной установке получена зависимость концентрации NO_x при различных режимах горения от коэффициента избытка воздуха, а также на различных моделях газогорелочных устройств установлено влияние конструктивных решений на выход NO_x .

2. Зависимости содержания NO_x в дымовых газах от коэффициента избытка воздуха, как при диффузионном, так и при кинетическом режиме горения имеют экстремальный характер с максимумом при $\alpha = 1,05$. При сжигании предварительно перемешанной смеси газа и воздуха, выход NO_x ниже, нежели при их раздельной подачи в камеру сгорания: при $\alpha = 1,05$ в 1,2 раза. При увеличении α эта разница возрастает от 2 до 2,5 раз.

3. При организации ступенчатого сжигания непосредственно в горелке с увеличением доли воздуха, подаваемого во вторую ступень горения, происходит снижение образования NO_x : при предельной 30 %-ной доли воздуха подаваемого во вторую ступень концентрация NO_x в дымовых газах снижается более, чем на 30 %. Дальнейшее увеличение доли вторичного воздуха ограничено недопустимым ростом химического

недожога топлива. Организация ступенчатого сжигания за счет перераспределения топлива не столь эффективна для снижения образования NO_x .

4. Организация рециркуляции продуктов сгорания внутри горелочного устройства снижает выход NO_x приблизительно на 20 %.

Глава 3 Результаты численного моделирования горения газообразного топлива при различных конструктивных исполнениях горелки

Оценка влияния на образование NO_x конструкции амбразуры, конструкции аксиального завихрителя воздуха, места ввода газа, а также внешней рециркуляции дымовых газов выполнялась с помощью разработанной математической модели. Исследования на стенде этих параметров является трудноразрешимой задачей.

3.1 Описание математической модели

Проведение численного эксперимента проводилось с использованием методов вычислительной гидрогазодинамики или CFD (Computational Fluid Dynamics) [83, 84].

Основу модели составляют следующие основные уравнения гидрогазодинамики потоков:

- уравнения неразрывности;
- уравнения сохранения импульса;
- уравнение сохранения энергии;
- уравнение состояния (для газов).

Для численного моделирования горения углеводородного топлива был выбран программный комплекс ANSYS CFX 14.5, который обладает наиболее удобным и понятным интерфейсом и позволяет проводить численный расчёт турбулентных реагирующих течений в условиях сложной геометрии. Следует также отметить, что программный пакет ANSYS CFX широко используется во всем мире и во многих отраслях, включая теплоэнергетику [85, 86, 87, 88].

Процесс моделирования условно был разбит на несколько этапов:

- подготовка исходных данных;
- создание геометрии и построение расчетной сетки;
- задание граничных условий;
- задание расчетной модели;
- расчет;
- получение и анализ результатов.

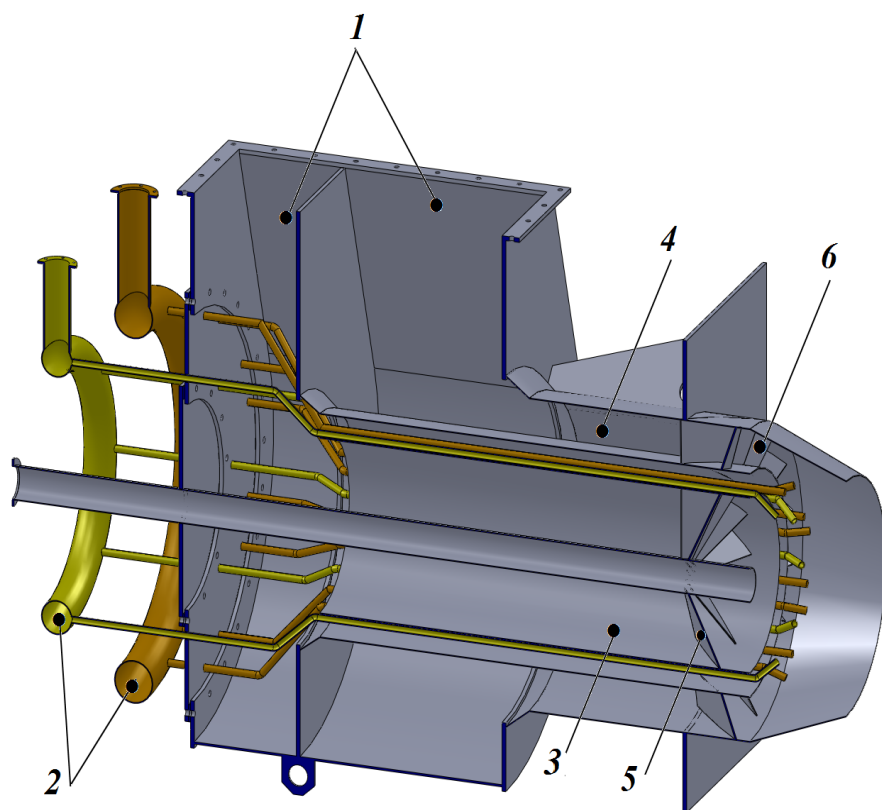
При моделировании процессов горения в горелочном устройстве были приняты следующие допущения:

- В качестве топлива принимался 100 % метан, так как на объектах, выбранных для исследования, сжигается природный газ, основным (до 98 %) компонентом которого является как раз метан.
- Не учитывается образование загрязнений на стенках и прочих поверхностях горелки;
- Неравномерность раздачи воздуха по сечению канала горелки не учитывается;
- В данной задаче течение среды считается установившимся, поэтому решение происходит в стационарной постановке.

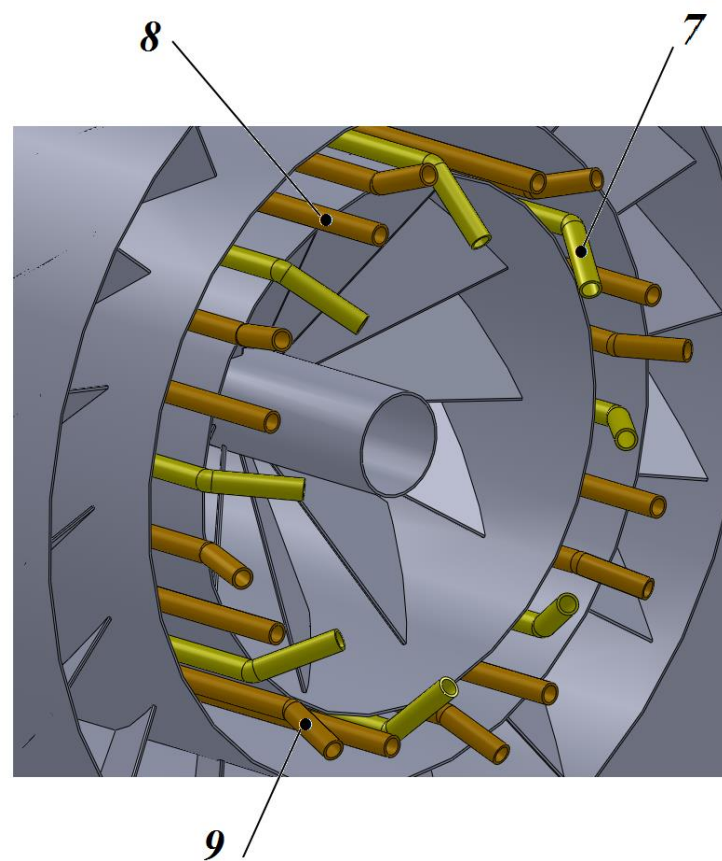
В качестве базовой для моделирования была взята вихревая двухпоточная по воздуху горелка с двумя независимыми вводами природного газа. Организация стадийного сжигания топлива на этой горелке обеспечивалась за счет различных углов установки газовых насадок по отношению к воздушному потоку (рисунок 3.1).

Геометрия расчетной области создана в программном комплексе твердотельного моделирования SolidWorks, а расчетная сетка – в программе Meshing.

Под геометрической моделью при проведении математического моделирования понимается домен (или группа доменов) – расчетная область. Таким образом, создаются не стенки каналов, лопаток и газораздающих трубок, а то пространство, в котором движется среда.



а;



б).

а - Трёхмерная модель горелочного устройства: 1 - воздухоподводящие короба; 2 – газовые коллектора; 3 – внутренний воздушный канал; 4 – наружный воздушный канал; 5 - внутренний аксиальный завихритель; 6 - наружный аксиальный завихритель; *б* - Газовые насадки: 7 – центральные газовые насадки; 8 - прямые газовые насадки; 9 - периферийные газовые насадки.

Рисунок 3.1 – Базовая модель горелочного устройства

Трехмерная геометрическая модель для математического моделирования процесса горения, которая представляет собой цилиндрический объем диаметром 4 м и длиной 9 м, была выполнена при помощи программы SolidWorks 2013. Геометрическая модель представлена на рисунке 3.2.

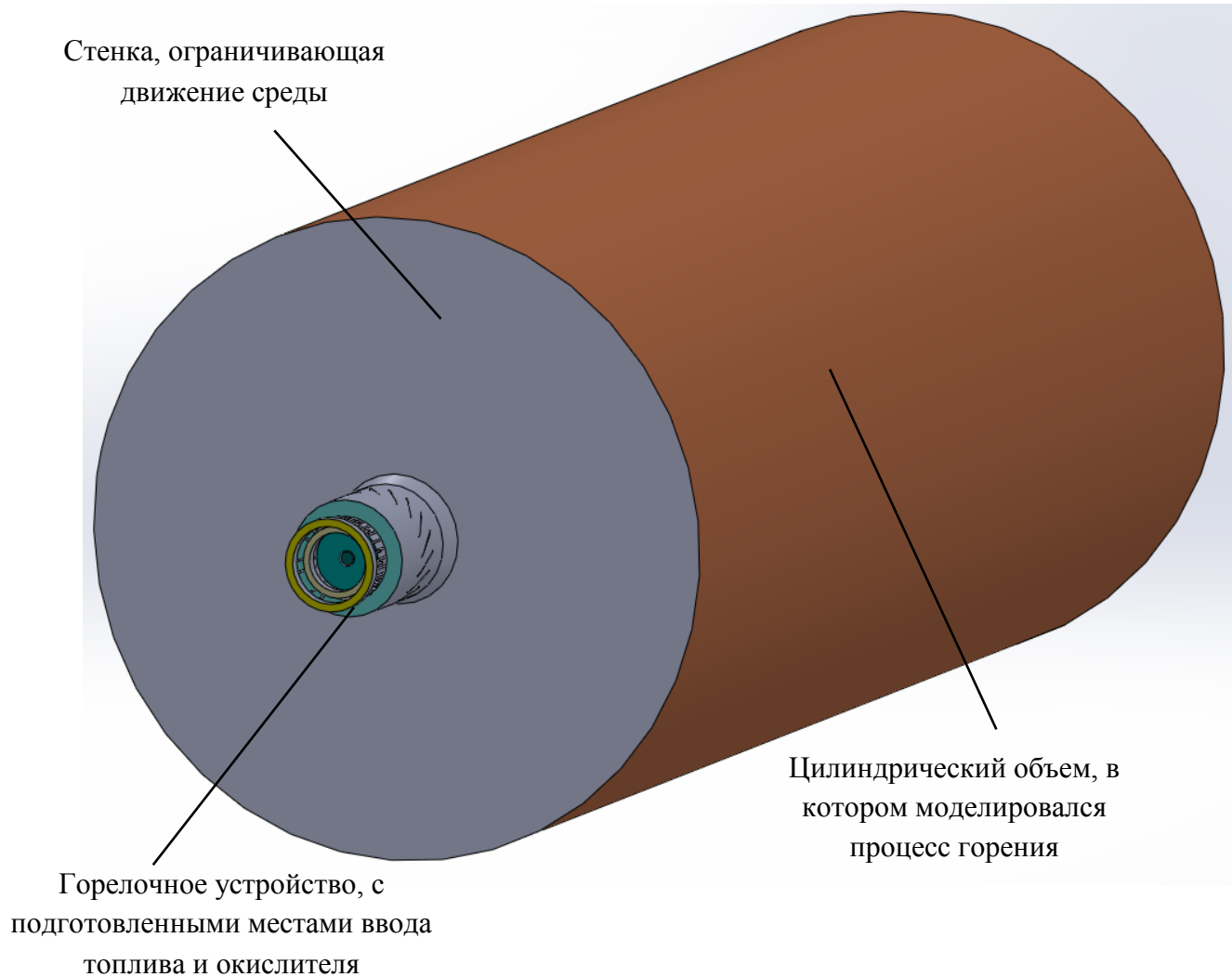
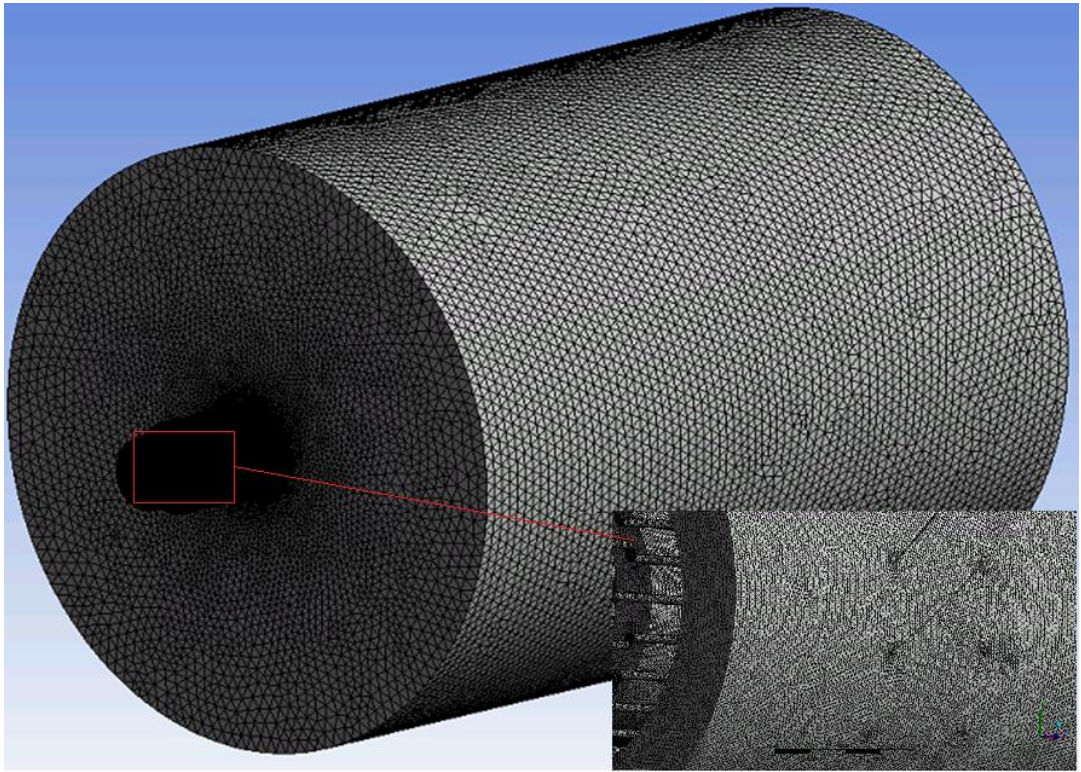


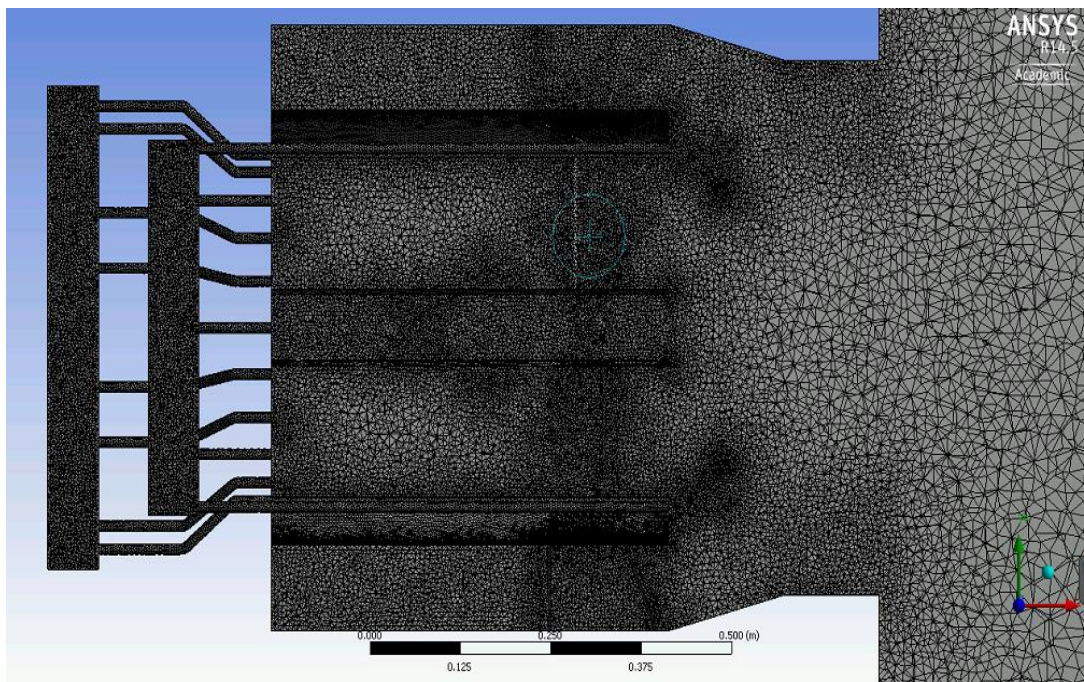
Рисунок 3.2 – Трехмерная модель расчетной области

При построении сетки размер минимального элемента был задан 0,001 м, а максимального – 0,1 м, коэффициент роста составил 1,15. Данные параметры, а также ряд других, позволили получить сетку требуемого качества и приемлемого размера. Из рисунка 3.3. видно, что в узких местах (каналы, сужения), в местах со сложной геометрией (лопатки) сетка была

автоматически адаптирована, измельчена, что положительно отразилось на качестве результатов.



а) общий вид;



б) сетка в разрезе в области горелочного устройства.

Рисунок 3.3 – Расчётная сетка

При создании математической модели горения газообразного топлива в горелочном устройстве, использовались:

- модель распада турбулентного вихря – Eddy Dissipation Model (EDM), предназначенная для использования в широком спектре турбулентных течений с учетом реакций, относящихся к пламени с предварительным смешиванием и диффузионному пламени. Из-за своей простоты и ясности в использовании для турбулентных течений с предварительным смешиванием с учетом реакции эта модель широко применяется в прогнозировании пламени в промышленности [87, 86];

- модель турбулентности $k - \varepsilon$, использующая уравнения переноса кинетической энергии турбулентности (k) и скорости ее диссипации (ε);

- лучистого теплообмена – модель P1, или метод сферических гармоник в первом приближении;

- термический механизм (Thermal NO) и быстрый механизм (Prompt NO) в качестве механизмов образования NO_x .

Сходимость счёта определялась по величине невязок решаемых уравнений и стабилизации основных параметров. Также выполнялся контроль по массовому балансу веществ и максимальной температуре горения в расчётной области.

Для сравнения и анализа, полученных в ходе численного моделирования данных, использовались графические зависимости по длине расчетной зоны таких параметров как температуры, концентрации NO_x и оксида углерода и поля распределения величин в заданных плоскостях. Такой способ предоставления результатов позволяет наиболее наглядно оценить влияние различных факторов на ход процесса.

3.2 Исследование влияния конфигурации амбразуры горелки на образование NO_x

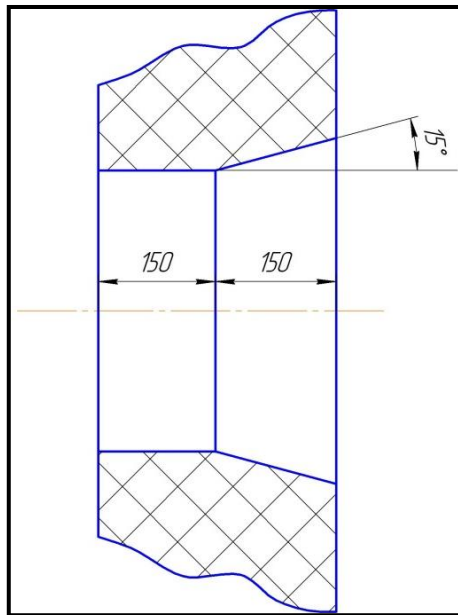
Амбразуры горелок представляет собой конструкцию для размещения горелочного устройства и являются конструктивной составляющей стен топок котлов. От типа и размеров амбразуры зависят скорости истечения среды из устья горелочного устройства, раскрытие факела горелки, степень перемешивания топлива и окислителя [89, 90].

Исследования влияния конструкции амбразуры горелки на характер горения и образования NO_x выполнялись для четырех типов амбразур диффузорной, биконической, цилиндрической и конфузорной (рисунок 3.4) [91].

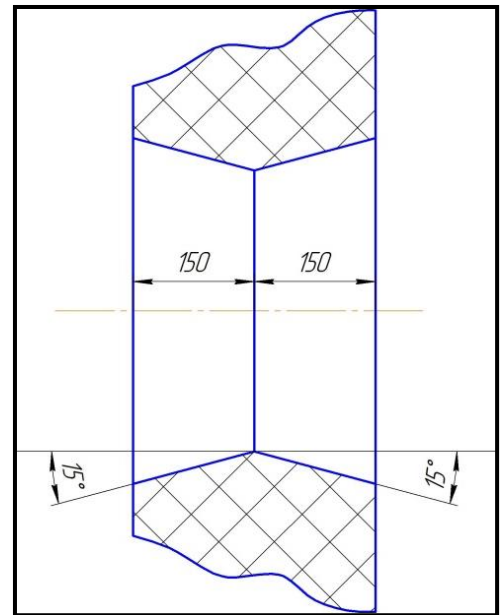
На рисунке 3.5 представлены поля распределения температуры для всех четырех типов исследуемых амбразур.

Результаты численного моделирования показали, что по сравнению с диффузорной амбразурой, конфузорная и биконическая амбразуры заметно улучшают смешение топлива с воздухом, делает менее выраженным разделение на зоны горения с недостатком и избытком воздуха. За счет этого выросли уровни температур (см. рисунок 3.5), что сказалось на увеличении выбросов NO_x .

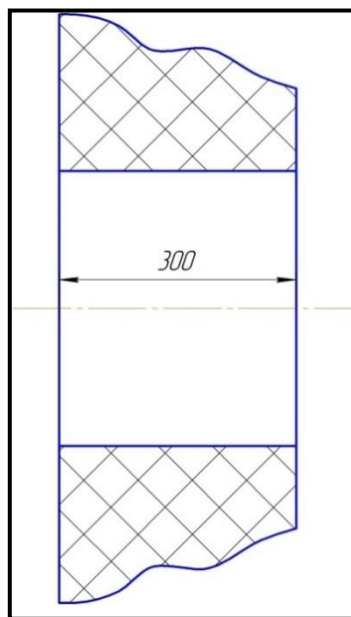
По приведенным на рисунке 3.5 полям распределения температуры видно, что для разных вариантов наблюдается различная структура факела. Для варианта с конфузорной амбразурой (рисунок 3.5,з) наблюдается самые высокие уровни максимальных температур, а также протяженность и объем этих зон, что обуславливает наибольшее образование термических NO_x . Это связано с наименьшей площадью для прохода среды в устье горелки, что ведет к повышению скоростей и более интенсивному перемешиванию топлива и окислителя.



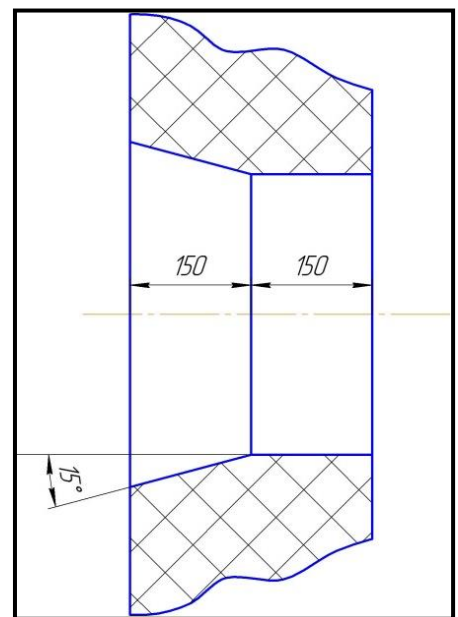
а)



б)



в)



г)

а) диффузорная; б) биконическая; в) цилиндрическая; г) конфузорная.

Рисунок 3.4 – Типы амбразур

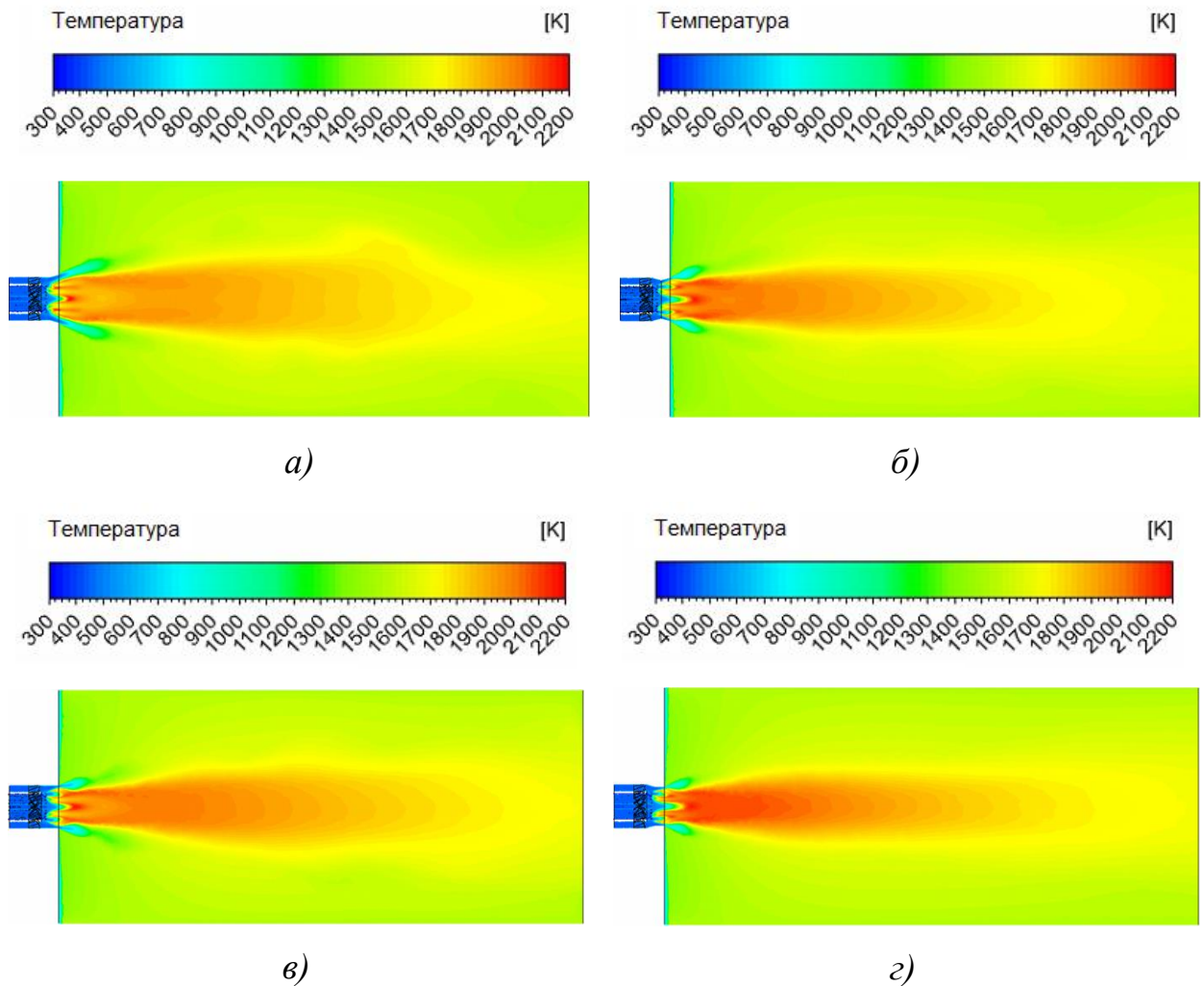


Рисунок 3.5 – Поля температур при использовании диффузорной (а), биконической (б), цилиндрической (в) и конфузорной (г) амбразур

Также видно, что варианты, представленные на рисунках 3.5,в и 3.5,г, имеют самую высокую дальнобойность факела. Поэтому можно сказать, что цилиндрическая и конфузорная амбразуры не подходят для топок с малой глубиной, так как будет происходить динамическое воздействие факела на противоположную стену. Использование цилиндрической амбразуры позволяет снизить максимальные значения температуры, при этом зона максимальной температуры удаляется от среза горелки.

В случае с биконической амбразурой область с максимальным уровнем температур схожа с вариантом, где применяется амбраура диффузорного

типа, однако она имеет значительно большую протяженность. Легко заметить, что на рисунках 3.5,б – 3.5,г область температур порядка от 1800 до 1900 К замкнута и имеет лишь разный размер, а на рисунке 3.5,а эта зона разорвана и имеет средние значения температуры несколько ниже. Из-за самой большой площади проходного сечения развитие факела происходит иначе, чем в других вариантах, где факел более плотный и сжатый.

Распределение по расчетной области других параметров, таких как скорость сред, оксида углерода и оксидов азота представлены на рисунке 3.6.

На рисунке 3.6 хорошо видна тенденция изменения приведенных параметров. Так видно, что у конфузорной амбразуры самые высокие скорости на выходе из горелки и в целом по факелу, самая короткая зона образования оксида углерода и, как следствие, самые высокие уровни эмиссии NO_x . Таким образом, отчетливо наблюдается зависимость образования NO_x и оксида углерода от скорости истечения среды (интенсивности перемешивания).

Помимо полей распределения различных величин, были построены графические зависимости образования оксида азота (рисунок 3.7) и оксида углерода (рисунок 3.8) по длине расчетной зоны.

Из графика, представленного на рисунке 3.7 видно, что максимальные значения оксидов азота имеют место при использовании конфузорного типа амбразуры. Это обусловлены более интенсивным перемешиванием, вследствие снижения проходного сечения и возросших скоростей. Также сужение проходного сечения ведет к росту аэродинамического сопротивления горелочного устройства, что отрицательно скажется на экономичности установки. Анализируя существующие конструкции котлов, можно сказать, что широкого распространения цилиндрическая амбразура не имеет, однако в данной серии этот вариант помогает заметить тенденцию изменения температур и других параметров.

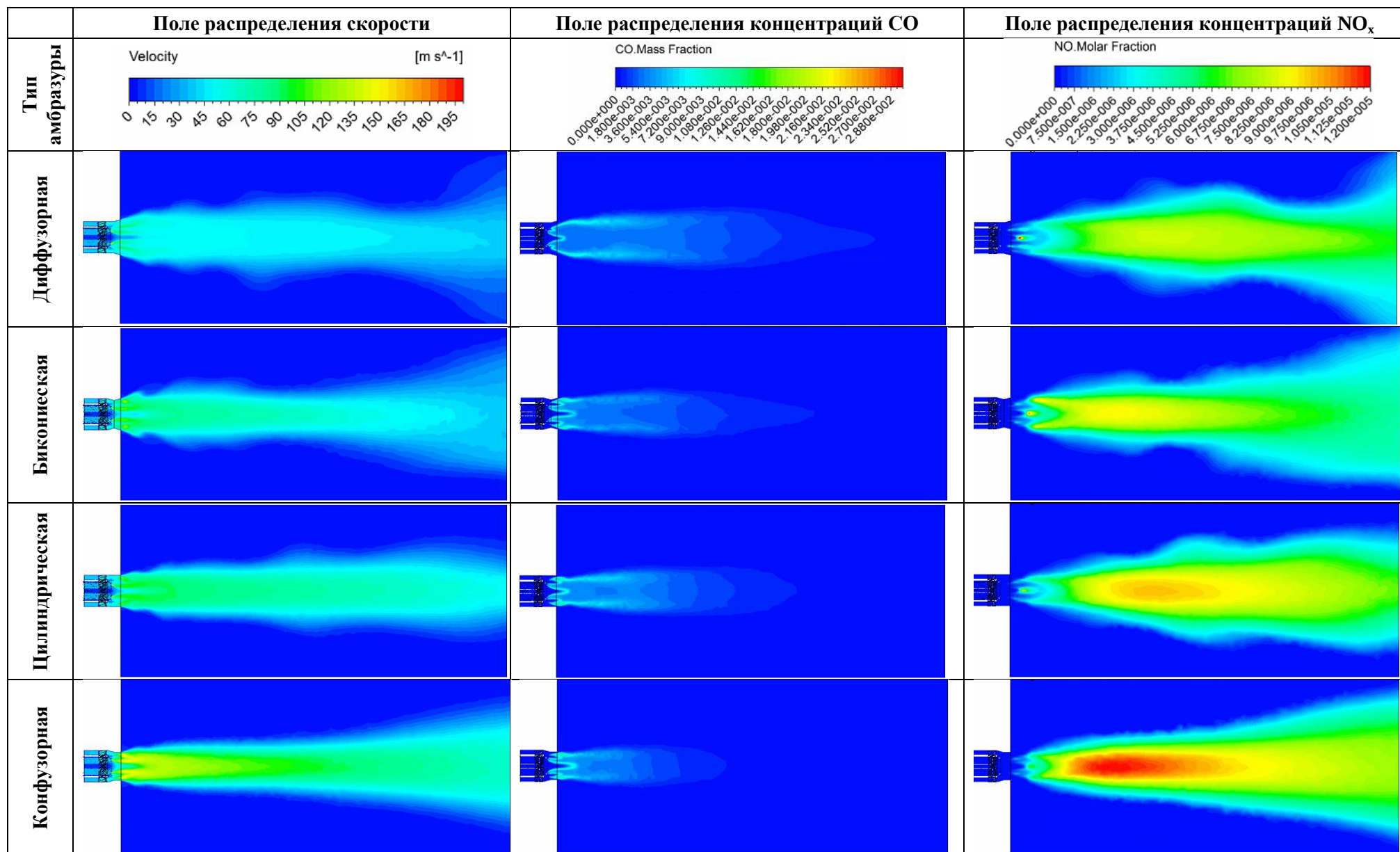


Рисунок 3.6 – Поля распределения скорости, концентраций оксида углерода и оксидов азота по факелу горелки для различных типов амбразур

Применение биконической и диффузорной амбразуры более оправдано с целью минимизации вредных выбросов, причем первый тип при моделировании показал результат несколько хуже.

Важным критерием при выборе типа амбразуры также является степень недожога топлива. Разумеется, при увеличении площади проходного сечения среды скорости значительно снижается, что ведет к ухудшению выгорания газообразного топлива.

Всё это хорошо подтверждается графической зависимостью (рисунок 3.8). Видно, что наиболее экономичное сжигание топлива обеспечивает амбразура конфузорного типа. Также из рисунка 3.8 видно насколько затягивается выгорание оксида углерода. Однако даже в случае с диффузорной амбразурой на выходе не наблюдается значительных концентраций продуктов неполного сгорания. Если же необходимо максимально повысить качество процесса сжигания топлива, но без сильного роста эмиссии NO_x , то в данной ситуации оптимальным вариантом будет использование биконического типа амбразур.

Для построения графиков с учетом температуры были сняты данные с центральной (рисунок 3.9) и периферийной (рисунок 3.10) зон, где наблюдаются наибольшие градиенты расчетных величин.

Графики, построенные по точкам, которые были сняты с линий, подтверждают уже озвученные выводы. Данные зависимости показательны тем, что позволяют соотнести пики образования оксидов азота с областями, где наблюдаются максимальные уровни температур.

Учитывая всё вышесказанное, при создании низкоэмиссионных горелок наиболее предпочтительной является амбразура диффузорного типа и дальнейшие расчеты, будут проводиться с использованием амбразуры этого типа.

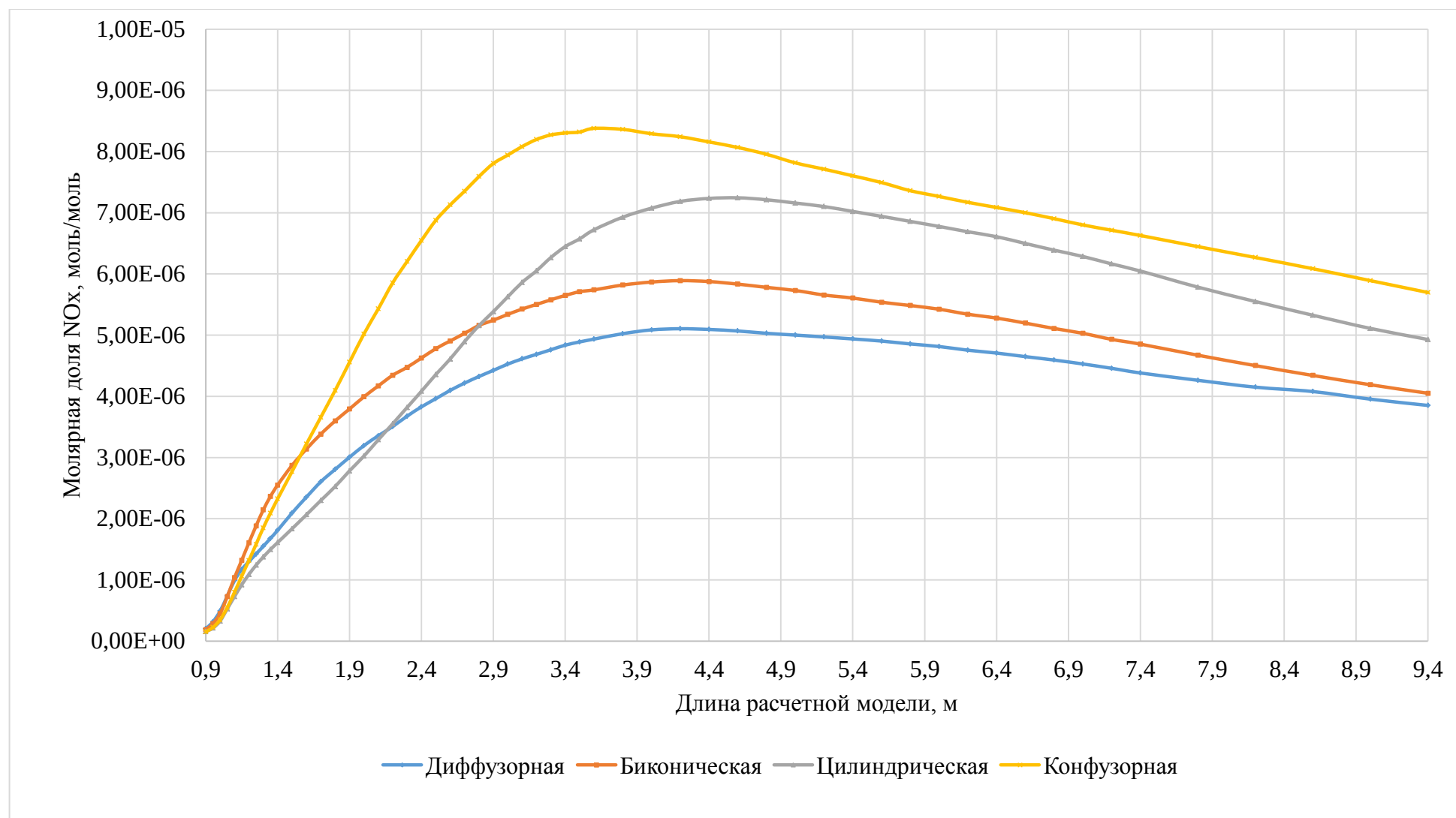


Рисунок 3.7 – Образование NO_x по длине факела для различных типов амбразур

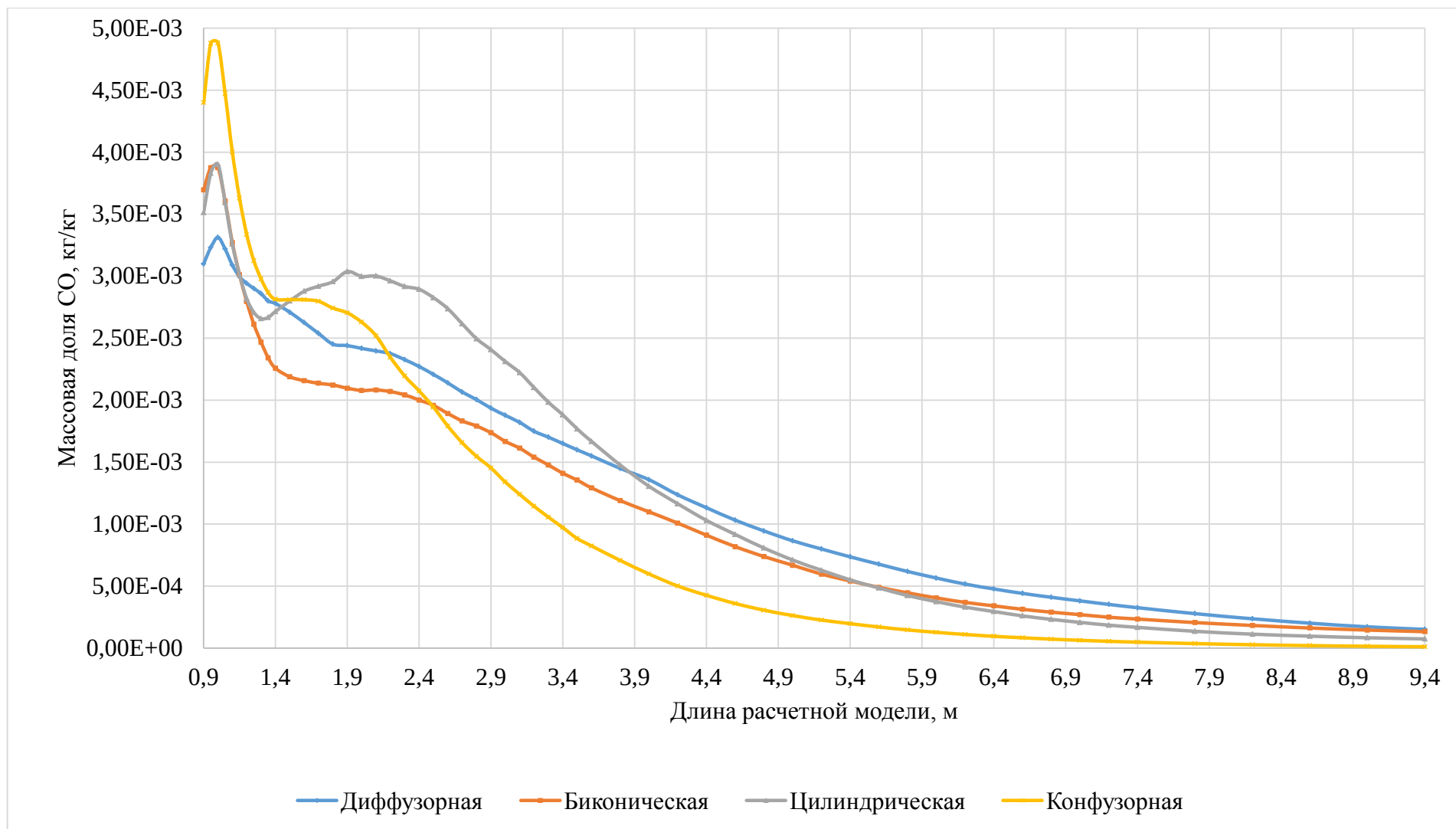


Рисунок 3.8 – Образование CO по длине факела для различных типов амбразур

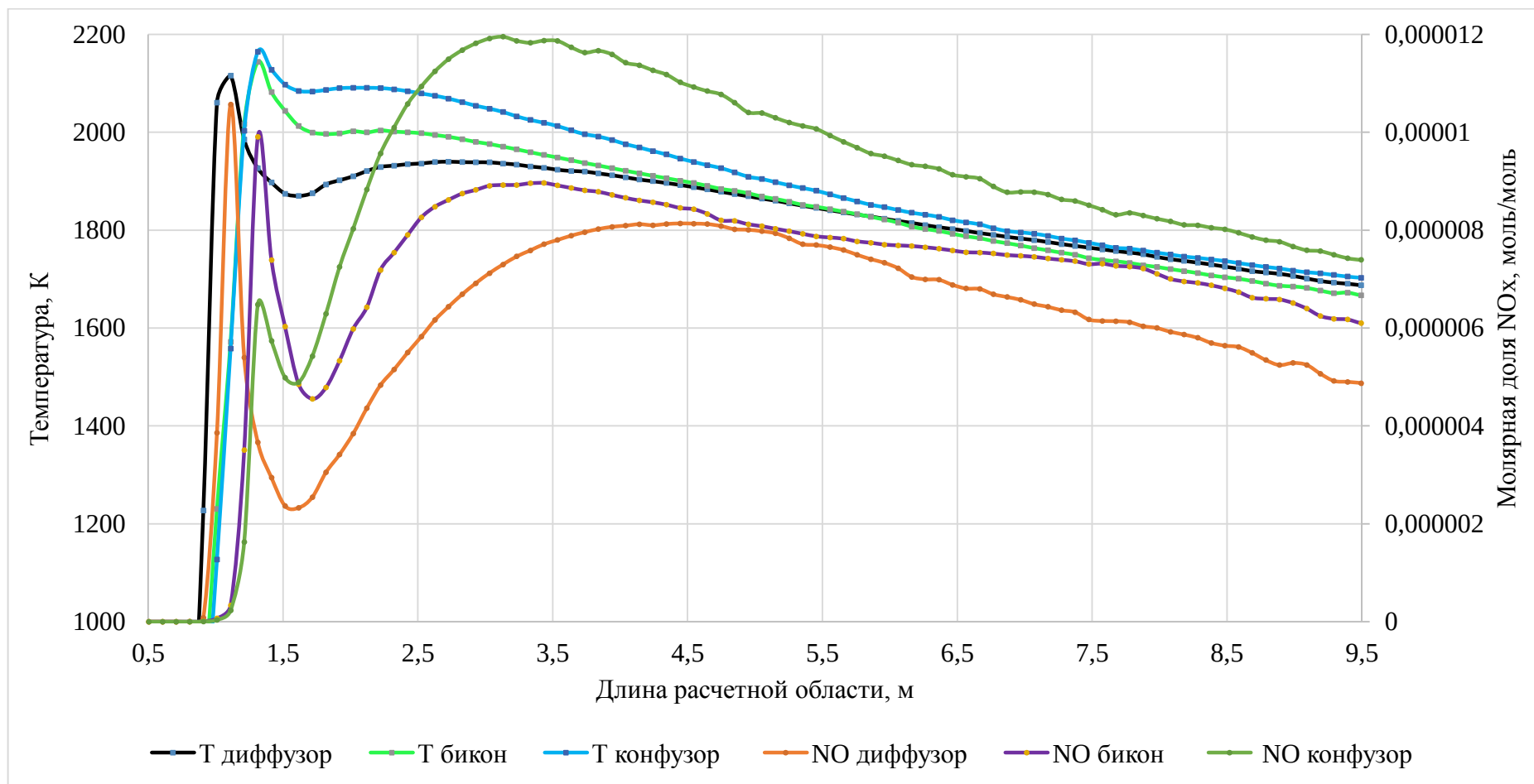


Рисунок 3.9 – Распределение температуры и образования оксидов азота вдоль центральной зоны для различных углов наклона лопаток воздушного завихрителя

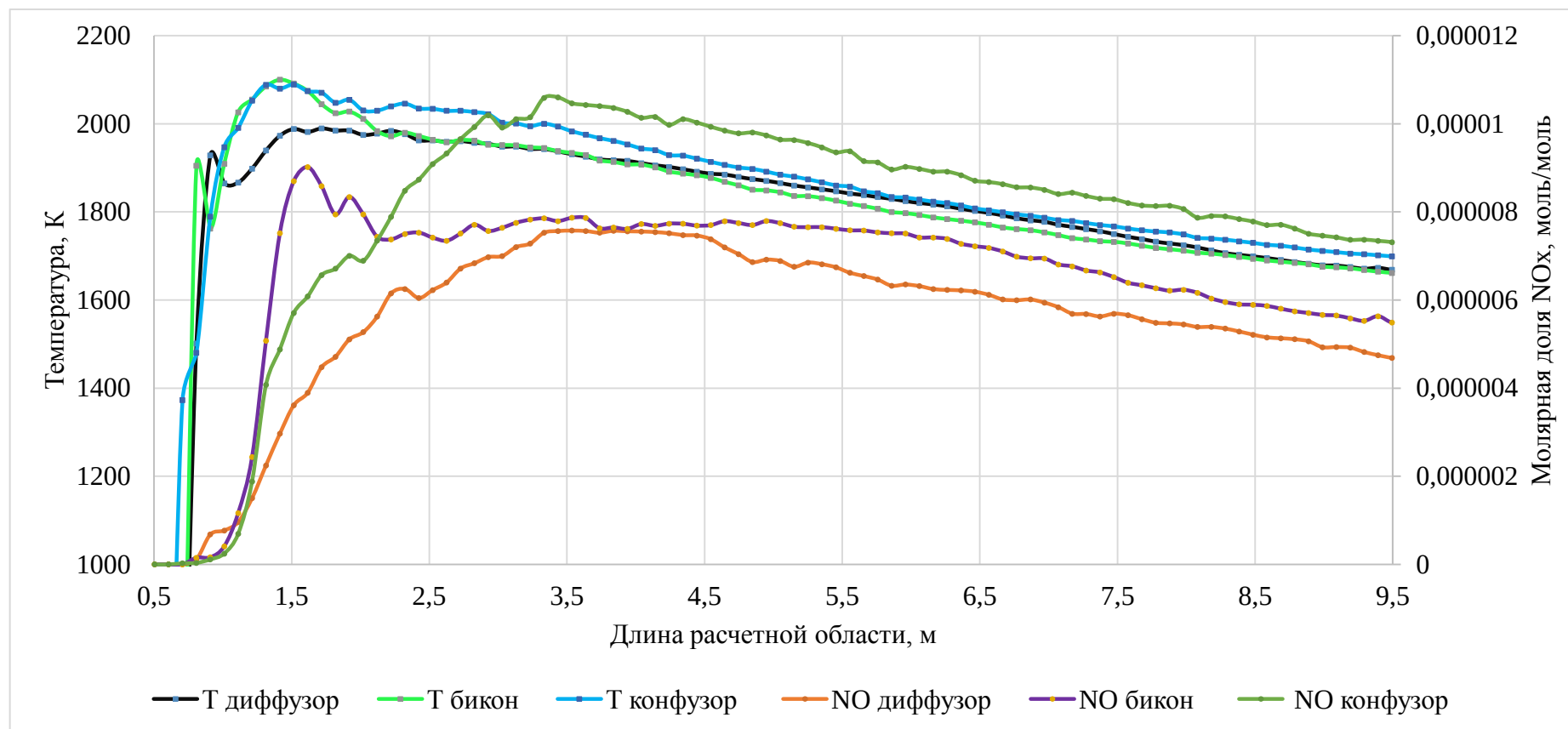


Рисунок 3.10 – Распределение температуры и образования оксидов азота вдоль периферийной зоны для различных углов наклона лопаток воздушного завихрителя

3.3 Определение оптимального угла установки лопаток аксиального завихрителя воздуха

Исследования по определению влияния угла установки лопаток аксиального завихрителя, расположенного в периферийном канале воздуха, на длину факела, его структуру, а также на образование вредных веществ, проводились путем численного моделирования для шести вариантов угла установки лопаток: от 25 до 50° с шагом 5°.

Исследование влияния угла установки лопаток в периферийном канале показало, что при увеличении угла снижается длина факела, а также падают максимальные температуры и концентрации оксидов азота из-за большего раскрытия факела (рисунок 3.11).

По результатам расчетов также были построены графические зависимости образования оксидов азота и оксида углерода по длине факела, которые представлены на рисунках 3.12 и 3.13.

По мере увеличения угла установки лопаток растет угол раскрытия струи, что ведет к ослаблению давления внешнего кольцевого потока воздуха на центральную зону. Так видно, что при верхнем значении угла в 50° скорости в центре значительно ниже, чем в предыдущих вариантах. В результате чего падают и температуры, и значения концентраций NO_x .

Известно, что при увеличении угла установки лопаток растет интенсивность перемешивания компонентов в данной области.

Та часть топлива из газовых насадков, направленных в периферию что попадает во внешний воздушный поток, выгорает более интенсивно при более высоких углах установки лопаток. Это хорошо видно по полям температуры и образованию NO_x в периферийной зоне. Но эта часть топлива крайне невелика, поэтому степень изменения параметров тоже незначительна.

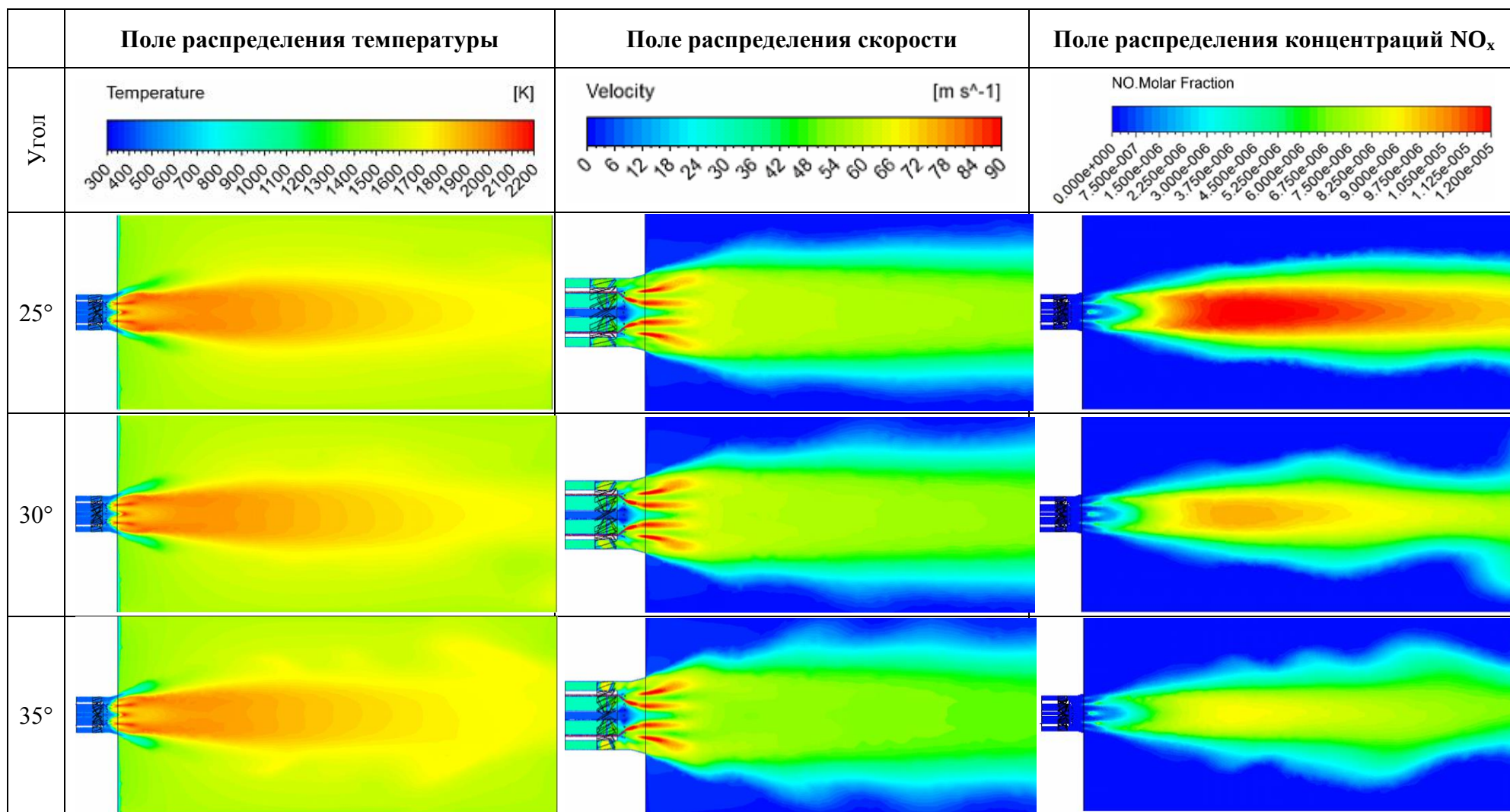


Рисунок 3.11 – Поля распределения температуры, скорости и оксидов азота по факелу горелки для различных углов наклона лопаток воздушного завихрителя

Продолжение рис. 3.11

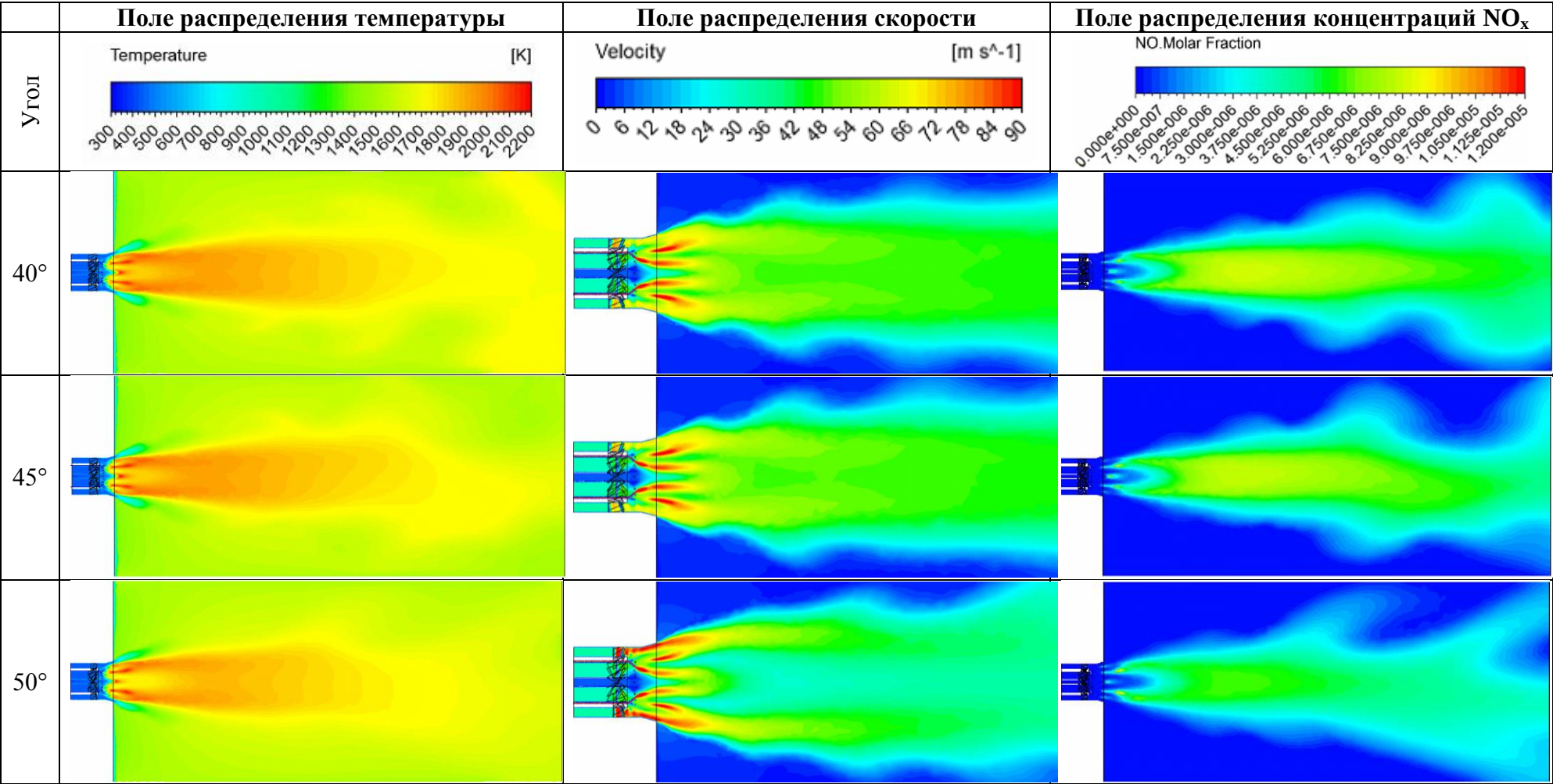


Рисунок 3.11 – Поля распределения температуры, скорости и оксидов азота по факелу горелки для различных углов наклона лопаток воздушного завихрителя

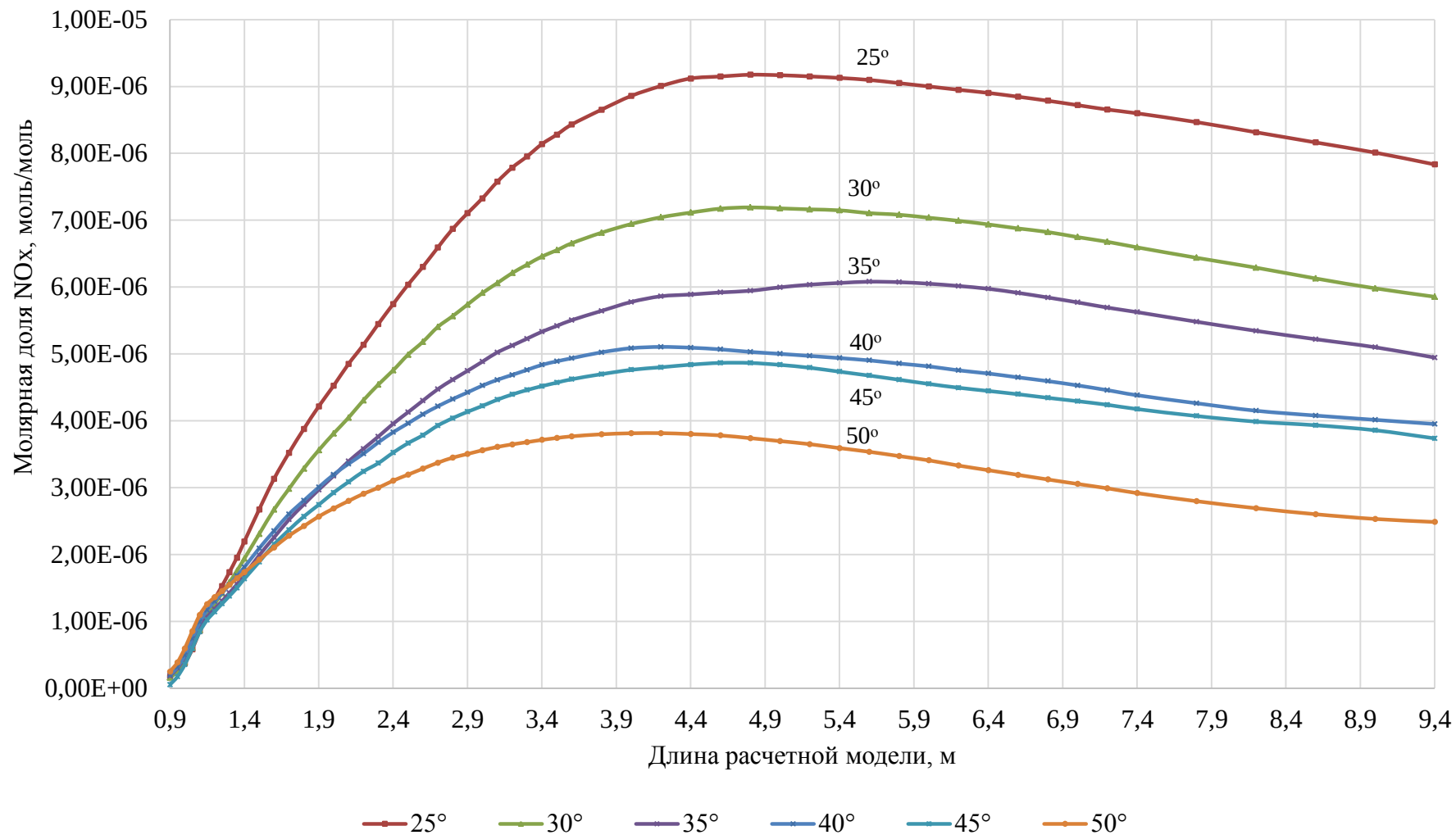


Рисунок 3.12 – Влияние угла установки лопаток завихрителя в наружном воздушном канале горелки на образование NO_x

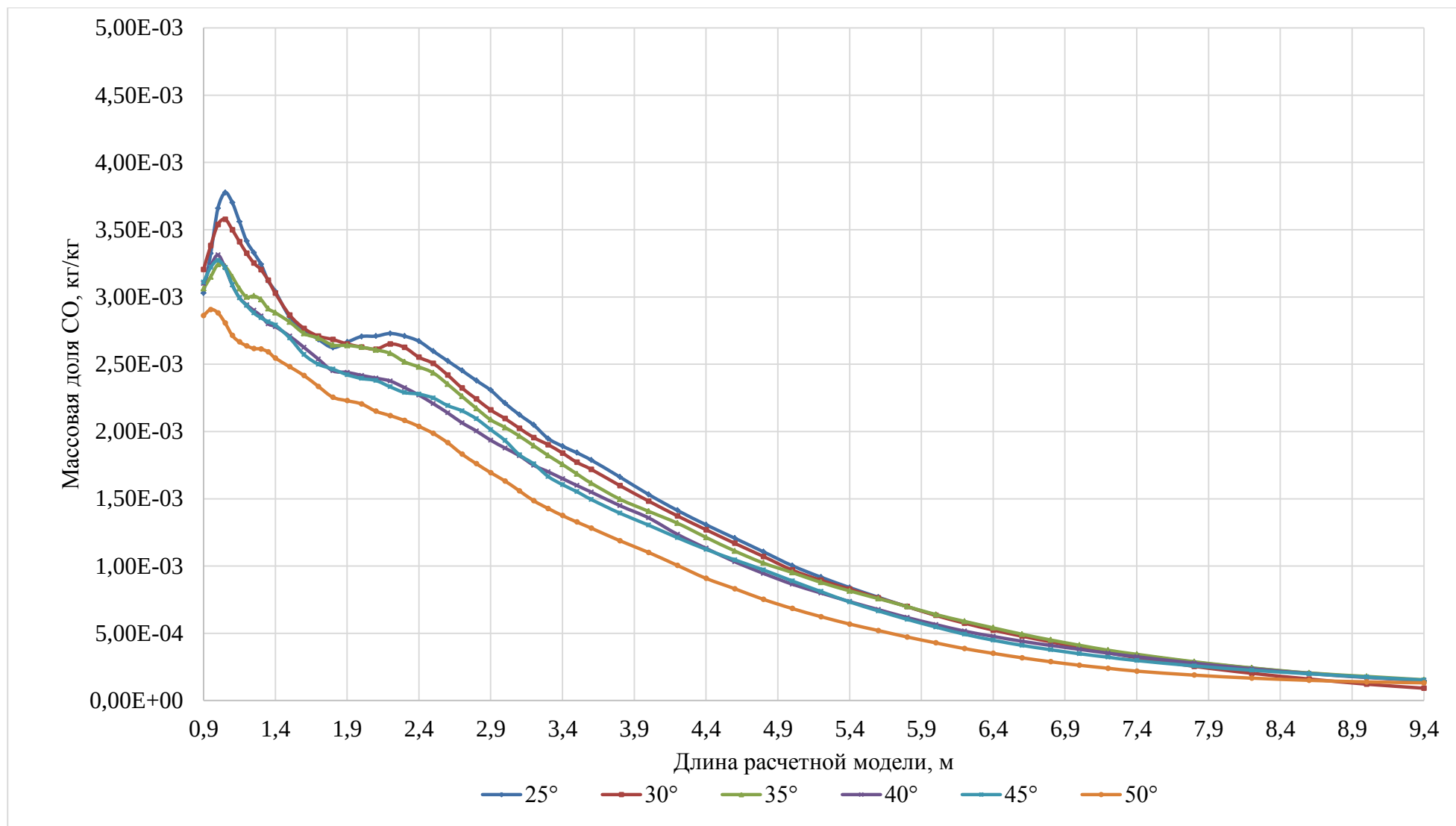


Рисунок 3.13 – Влияние угла установки лопаток завихрителя в наружном воздушном канале горелки на образование CO

Таким образом, анализируя полученные данные, можно сказать, что самым предпочтительным вариантом является угол 50° . Он обеспечивает минимальные выбросы NO_x . Однако, большие углы установки лопаток ведут к значительному повышению аэродинамического сопротивления горелки, что повышает затраты на собственные нужды. Кроме того, с увеличением угла установки лопаток ухудшаются шумовые характеристики горелочных устройств.

По рисунку 3.12 видно, что наиболее предпочтительными являются варианты с углами 40° и 45° , которые занимают промежуточное положение, и при этом имеют минимальные отличия друг от друга.

3.4 Исследование влияния места ввода топлива в воздушные потоки горелки на образование NO_x

Влияние места ввода топлива в воздушные потоки горелки на образование NO_x исследовалось на модели горелочного устройства, в которой топливо вводится через газоподводящие трубки с загнутыми под разными углами к оси горелки концами. Такой подход к раздаче топлива позволяет провести исследования без существенных изменений в исходной конструкции горелки (то есть, диаметры всех каналов останутся без изменений).

Из рисунка 3.1 видно, что газ подается по двадцати четырем газораздающим трубкам, восемь из которых направлены в центральную зону под углом 40° , восемь – прямо и остальные восемь в периферию под углом 20° . Это позволяет достичь эффекта нестехиометрического сжигания.

Было исследовано влияние количества и места ввода газа, подаваемого в различные зоны, на уровень температур факела и образование NO_x . Углы

установки газовых насадков в испытываемых вариантах приведены в таблица 3.1. Для возможности сравнения эффективности вносимых изменений добавлен исходный вариант (вариант 1) с первоначальным распределением газовых насадков.

Таблица 3.1 – Углы установки газовых насадков горелочного устройства в испытанных вариантах

№ варианта	Углы установки газовых насадков		
	в центр	прямо (α)	на периферию (β)
1 (исходный)	40°	0°	20°
2	40°	0°	40°
3	40°	30°(в центр)	20°
4	40°	50°(в центр)	20°

В расчетах для всех вариантов использовалась амбразура диффузорного типа и углы установки аксиальных лопаточных завихрителей во внутреннем и внешнем воздушных каналах 35° и 40° соответственно.

Результаты расчетов в виде полей и графиков распределения температур, оксида углерода и оксидов азота по длине расчетной зоны представлены на рисунках 3.14 – 3.16.

Из полученных данных отчетливо видно, что при увеличении подачи газа в периферийный воздушный поток сильно вырастают уровни температур на начальном участке в периферийной зоне. Это объясняется тем, что из-за образовавшейся высокой степени содержания топлива во внешней зоне и достаточного количества в ней окислителя происходит интенсивное выгорание метана.

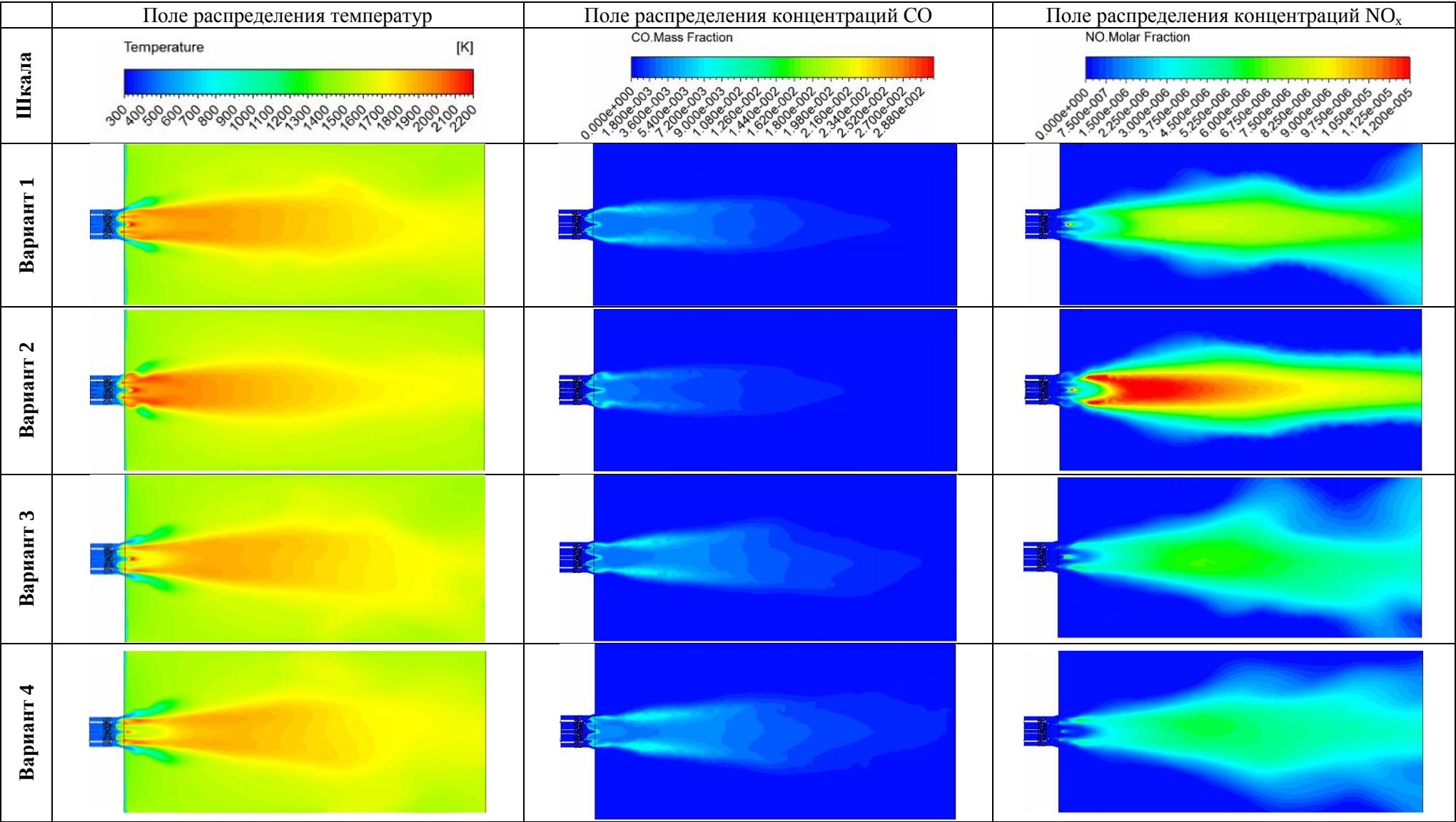


Рисунок 3.14 – Поля распределения температур, оксида углерода и оксидов азота по длине расчетной зоны при различных вариантах установки газовых насадков (см. табл. 3.1)

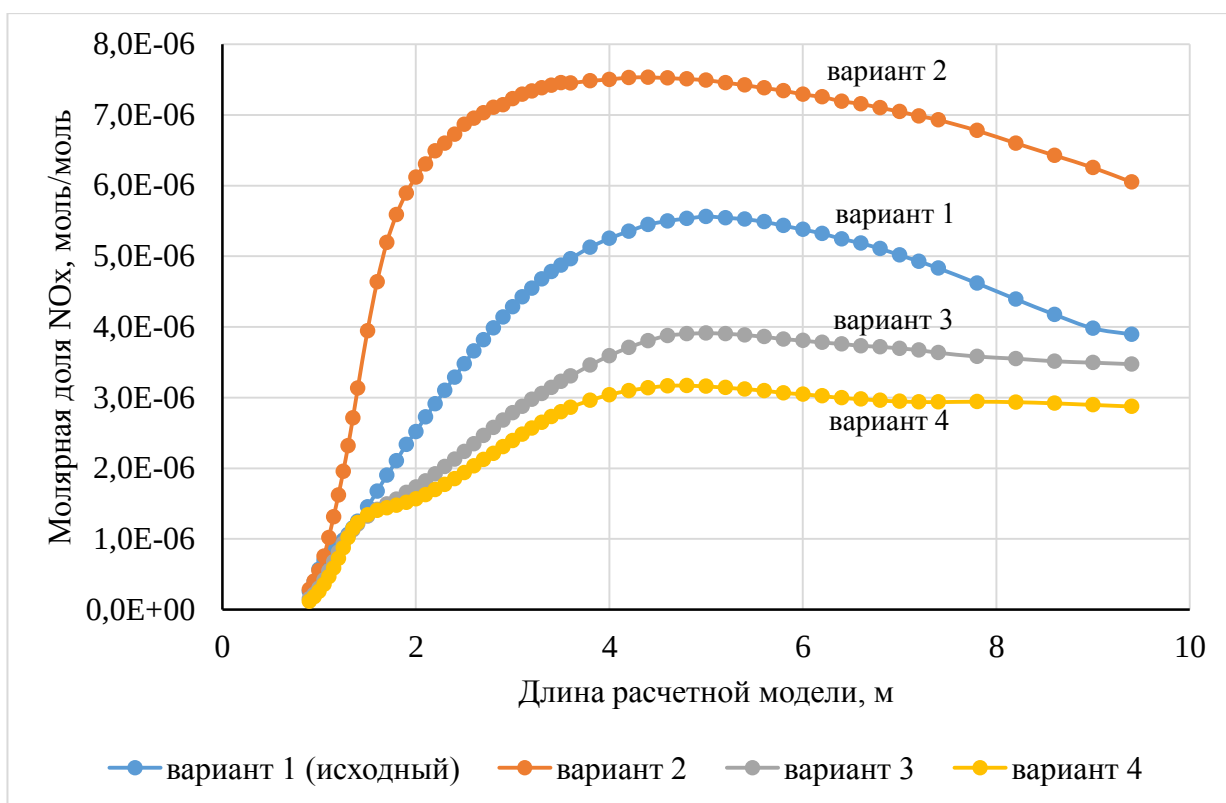


Рисунок 3.15 – Влияние угла установки газовых насадков горелки на образование NO_x по вариантам (см. табл. 3.1)

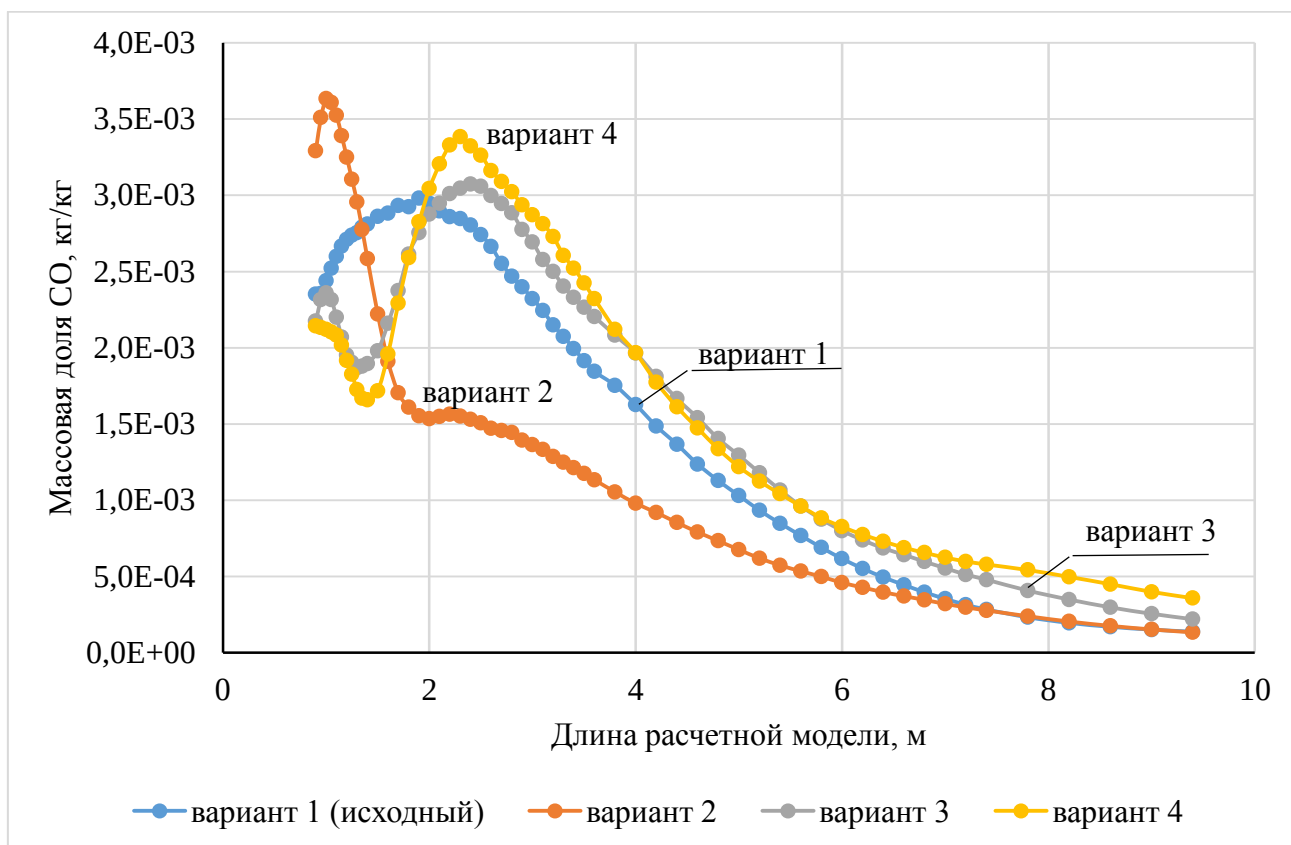


Рисунок 3.16 – Влияние угла установки газовых насадков горелки на образование CO по вариантам (см. табл. 3.1)

Аналогичная ситуация наблюдается и в центральной зоне, где количество топлива уменьшилось, а воздуха осталось таким же. Описанные процессы приводят к образованию зон высоких температур, которые хорошо видны на рисунке 3.14. Метан, быстро выгорая на начальном участке факела, образует продукты неполного сгорания. В результате данного явления образуется обширная зона дожигания с высокими уровнями температур. Всё это ведет к неизбежному росту эмиссии NO_x , в первую очередь, термических.

Таким образом, при перераспределении подачи газообразного топлива в сторону увеличения его концентрации в периферийной зоне, происходит существенный рост эмиссии NO_x , но при этом происходит улучшение выгорания газового топлива. И, наоборот, при подаче бóльшей части топлива в центральную зону образуется смесь, обеднённая окислителем, в результате чего происходит максимальное снижение образования NO_x (рисунок 3.15), но при этом также заметно ухудшается процесс выгорания топлива (рисунок 3.16). Например, в варианте № 4, где две трети топлива подается в центр под самым большим углом, происходит сильное снижение NO_x , но наблюдаются самые высокие уровни СО на выходе из расчетной области.

Результаты исследования перераспределения потоков газа за счет изменения угла газовых насадок, направленных в периферию и в центр, т.е. во внешний и внутренний потоки воздуха, показали возможность воздействовать на выбросы NO_x . Наилучшие результаты достигаются при подаче бóльшей части топлива в центральную зону, где происходит его горение с недостатком окислителя; оставшееся топливо догорает в периферийной зоне, переобогащенной кислородом. Далее по факелу происходит смешение зон и догорание топлива, несгоревшего в центральной зоне. Установлено, что чем сильнее разнесены зоны и позже происходит перемешивание, тем меньше выход NO_x .

3.5 Оценка влияния внешней рециркуляции дымовых газов на образование NO_x

Рециркуляция дымовых газов в горелку является одним из наиболее эффективных способов снижения выбросов NO_x . Влияние места подачи внешней рециркуляции продуктов сгорания исследовалось для двух вариантов: газы рециркуляции подаются отдельным каналом между воздушными каналами и в смеси с дутьевым воздухом (рисунок 3.17).

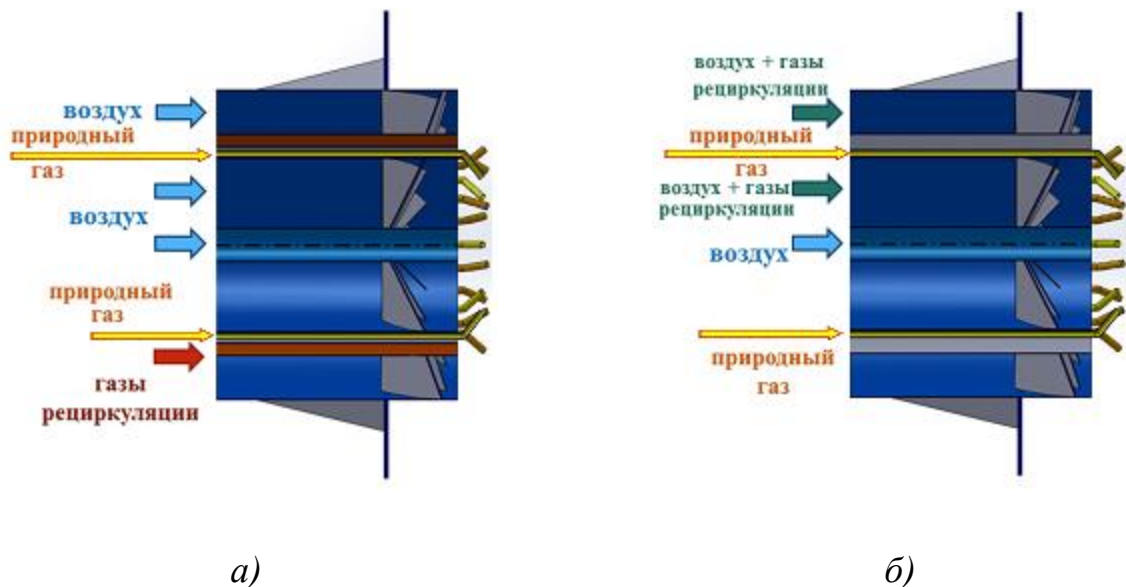


Рисунок 3.17 – Горелка с подачей газов рециркуляции отдельным каналом (а) и горелка с подачей газов рециркуляции совместно с воздухом (б)

Расчеты проводились с долей рециркуляции 0; 10; 15; 20 %. В ходе проведенных численных экспериментов были получены результаты, представленные в виде полей распределения температур (рисунок 3.18) и полей образования оксидов азота (рисунок 3.19).

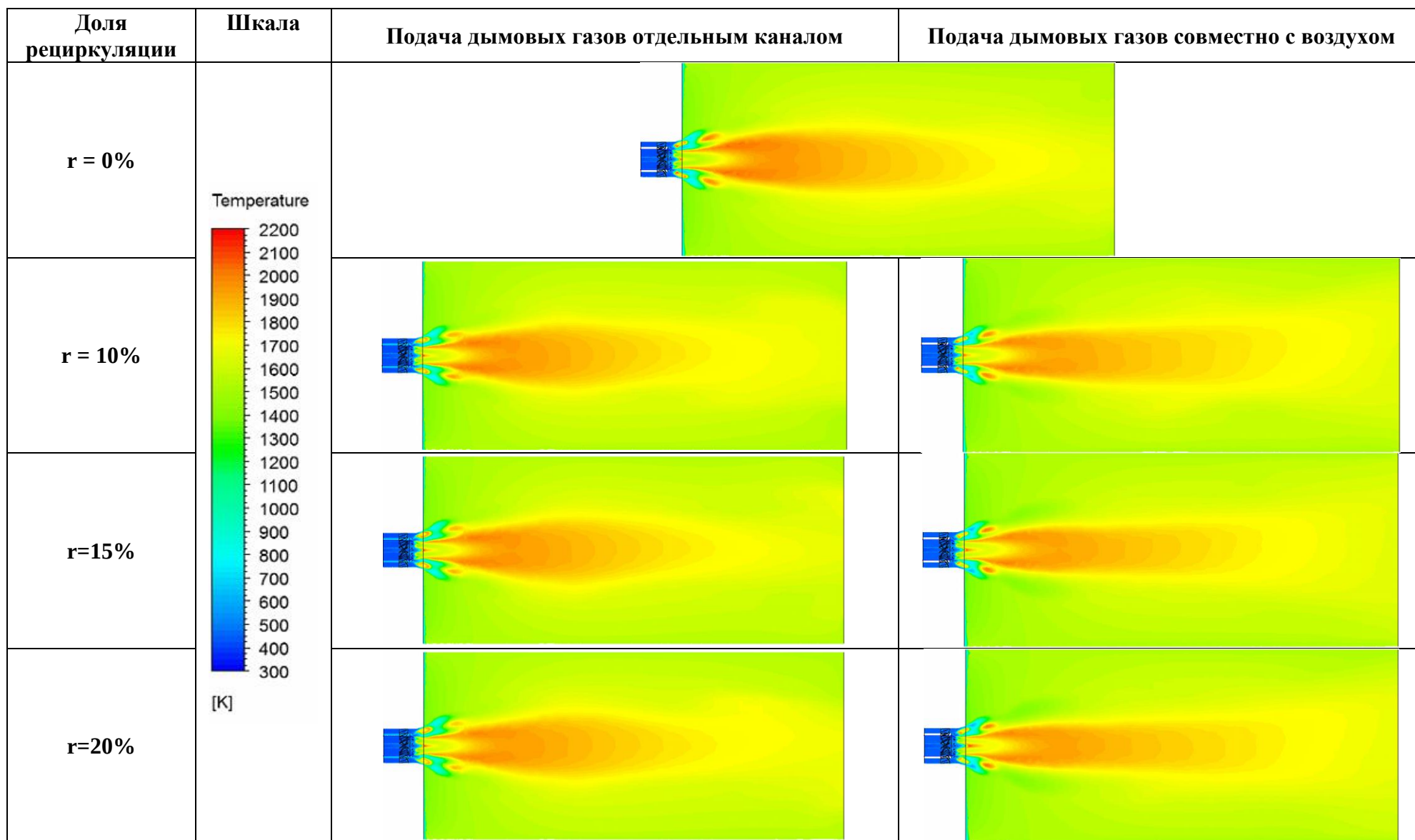


Рисунок 3.18 – Поля распределения температур при разной степени рециркуляции

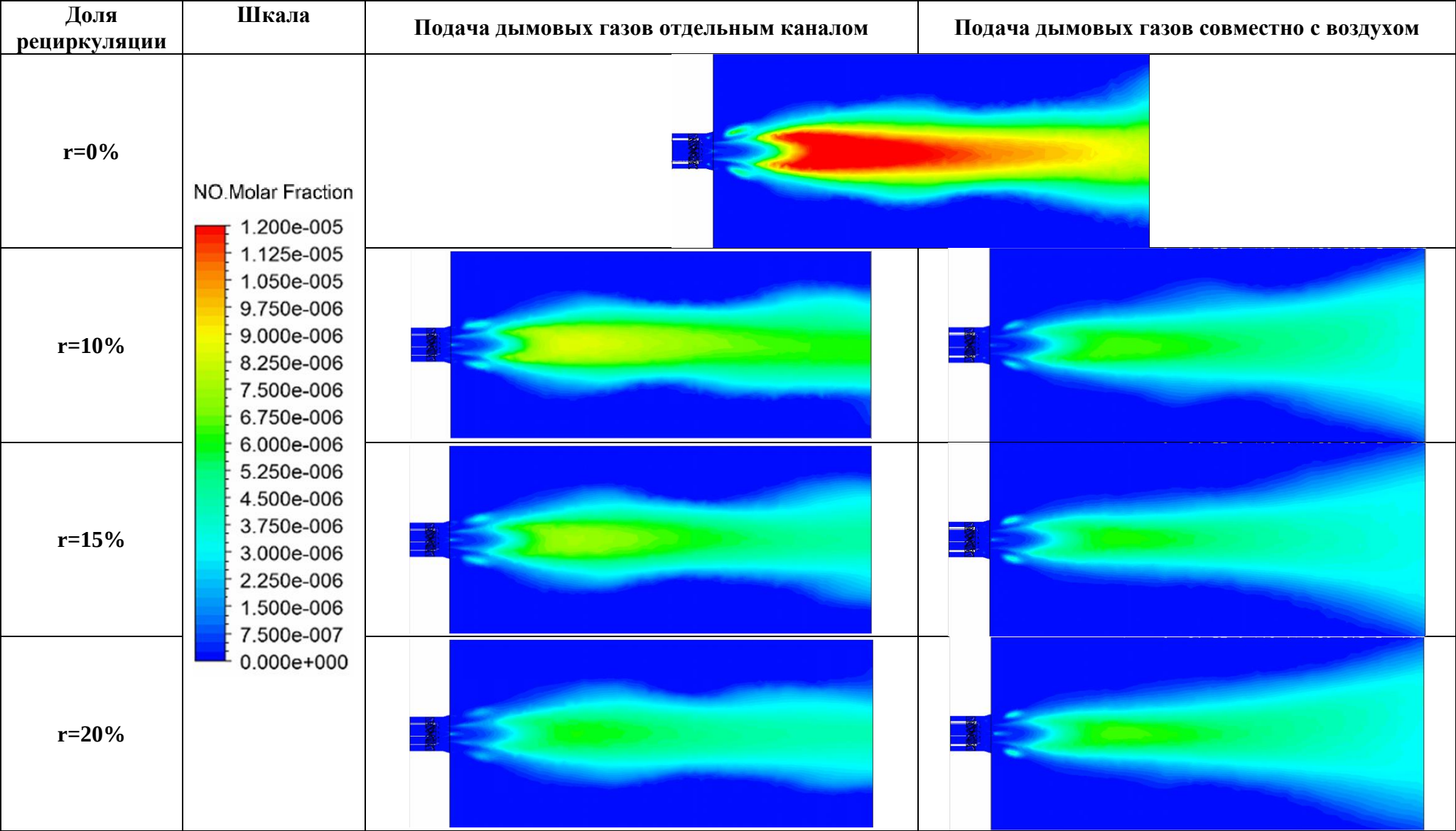


Рисунок 3.19 – Поля распределения концентраций оксидов азота при разной степени рециркуляции

Из рисунков 3.18 и 3.19 видно, что без рециркуляции (доля рециркуляции 0 %) температуры в периферийной зоне и зоне дожигания выше, следовательно, значительно выше эмиссия термических NO_x .

По полям образования NO_x (рисунок 3.19) хорошо видно, что при доле рециркуляции 10 и 15 % ввод продуктов сгорания в воздух показывает лучшие результаты по снижению эмиссии NO_x . Однако при 20 % рециркуляции можно говорить примерно об одинаковой эффективности методов. Данное явление объясняется тем, что при увеличении количества подаваемых газов рециркуляции по отдельному каналу растут их скорости, в результате чего на выходе повышается степень перемешивания с топливом и воздухом, что, в конечном счете, ведет к большему снижению NO_x .

Для качественной оценки результатов исследуемых вариантов были построены графические зависимости концентрации NO_x по длине факела при разных долях рециркуляции дымовых газов (см. рисунки 3.20 и 3.21).

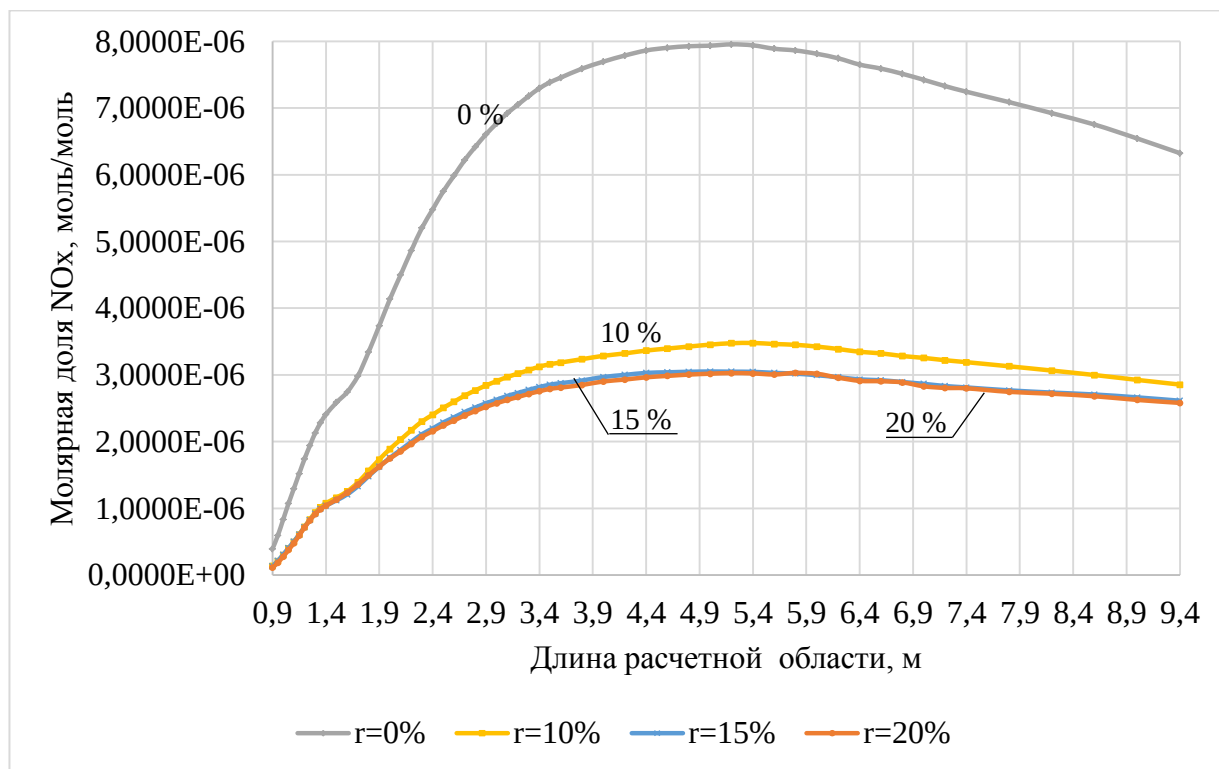


Рисунок 3.20 – График образования NO_x по длине расчетной зоны при подаче газов рециркуляции вместе с воздухом

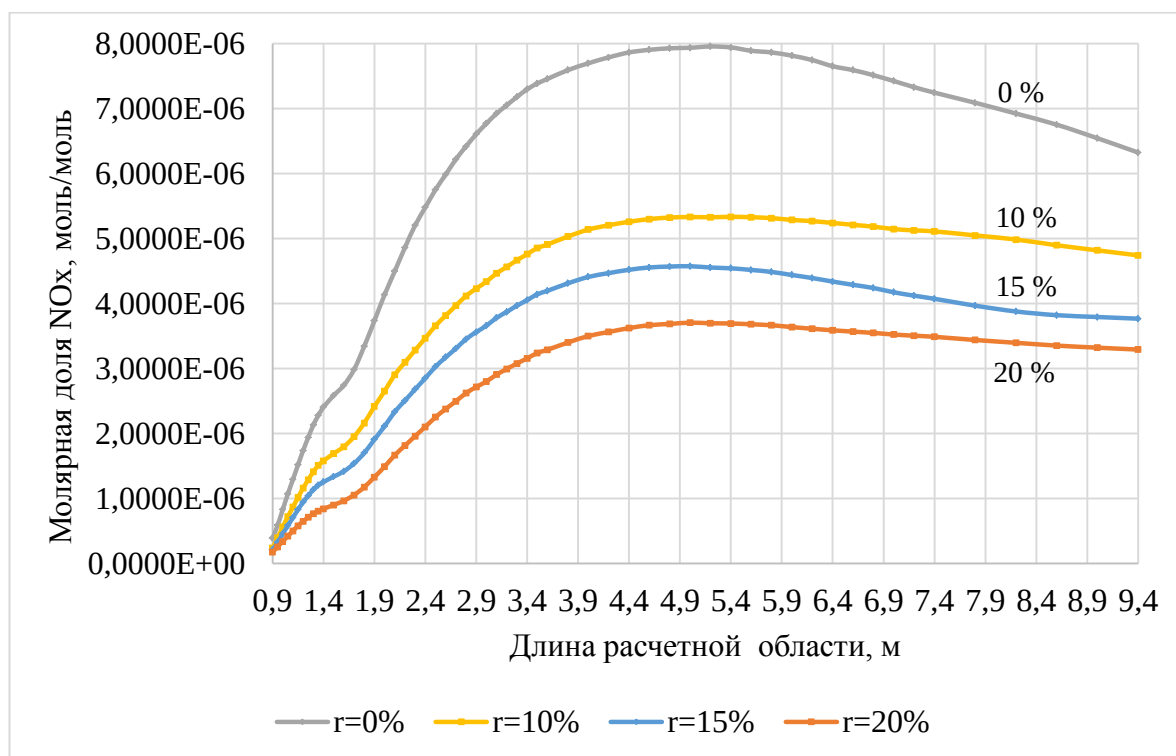


Рисунок 3.21 – График образования NO_x по длине расчетной зоны при подаче газов рециркуляции отдельным каналом

Из рисунка 3.20 видно, что в случае подачи продуктов сгорания совместно с воздухом при достижении доли рециркуляции 15 % снижение эмиссии NO_x существенно замедляется, а при подаче продуктов сгорания по отдельному каналу картина получается совершенно другая (рисунок 3.21): с увеличением доли газов рециркуляции эффективность ее растет. В любом случае, при дальнейшем повышении доли рециркуляции (более 20 %) эффективность метода снижается, что подтверждается практическими данными [43, 29].

3.6 Выводы по главе 3

1. С использованием программного комплекса ANSYS CFX 14.5 разработана и протестирована математическая модель горения газообразного топлива в горелочном устройстве. По результатам численного эксперимента выполнена оценка влияния конфигурации амбразуры, некоторых конструктивных элементов горелки и внешней рециркуляции дымовых газов на образование NO_x в пламени горелки.

2. Установлено, что с точки зрения снижения NO_x наиболее предпочтительной является амбразура диффузорного типа. Конфузорная и биконическая амбразуры заметно улучшают смешение топлива с воздухом, что делает менее выраженным разделение на зоны горения с недостатком и избытком воздуха. За счет этого факел горелок с такими амбразами имеет высокую температуру, что сказывается на увеличении выбросов NO_x . Горелка с цилиндрической амбразурой по выбросам NO_x занимает промежуточное положение.

3. Исследование влияния угла установки лопаток завихрителя в наружном канале показало, что при увеличении угла из-за большего раскрытия факела снижается его длина, уменьшается температура и, тем самым, минимизируется образование термических NO_x . Наиболее предпочтительным вариантом по таким критериям как: выбросы NO_x , аэродинамическое сопротивление горелки, ее шумовые характеристики – будет конструкция завихрителя с углом установки лопаток от 40° до 45° .

4. Результаты исследования перераспределения потоков горючего газа во внешний и внутренний потоки воздуха, показали, что наилучшие результаты, с точки зрения уменьшения образования NO_x , достигаются при подаче большей части топлива в центральную зону горелки, где происходит

его горение с недостатком окислителя; оставшееся топливо догорает в периферийной зоне, переобогащенной кислородом.

5. Подача газов рециркуляции в горелку существенно снижает образование NO_x : примерно в 2,5 раза при доле рециркуляции 20 %. Дальнейшее увеличение доли рециркуляции не столь эффективно. Для исследуемого типа горелки при доле рециркуляции менее 15 % ввод продуктов сгорания в горелку в смеси с дутьевым воздухом показывает лучшие результаты по снижению эмиссии NO_x , по сравнению с вариантом, где газы рециркуляции подаются в горелку отдельным каналом между воздушными каналами. Однако при доле рециркуляции 20 % можно говорить примерно об одинаковой эффективности этих способов подачи рециркулирующих газов.

Глава 4 Результаты промышленных испытаний низкоэмиссионных горелок

4.1 Конструктивные и режимные мероприятия по снижению образования NO_x для газогорелочных устройств

Рекомендации по созданию низкоэмиссионных газогорелочных устройств разработаны на основании аналитического обобщения результатов, проведенных стендовых испытаний и расчетно-аналитических исследований [64, 77, 89, 92, 93, 94]. Рекомендации определяют конструктивные и режимные мероприятия, направленные на обеспечение требований, предъявляемых к современным горелочным устройствам, в первую очередь, по выбросам NO_x .

При создании газогорелочных устройств необходимо руководствоваться следующим:

- При организации ступенчатого сжигания непосредственно в горелке с увеличением доли воздуха, подаваемого во вторую ступень горения, происходит снижение образования NO_x .
- Организация ступенчатого сжигания за счет перераспределения топлива не столь эффективна для снижения образования NO_x , особенно если газ попадает в зону с неостывшими продуктами сгорания из первой зоны.
- При организации нестехиометрического сжигания наилучшие результаты, с точки зрения уменьшения образования NO_x , достигаются при подаче большей части топлива в центральную зону горелки.
- Организация внутренней рециркуляции охлажденных продуктов сгорания обеспечивает снижение выбросов NO_x , но связана с трудностями конструктивного исполнения горелки.

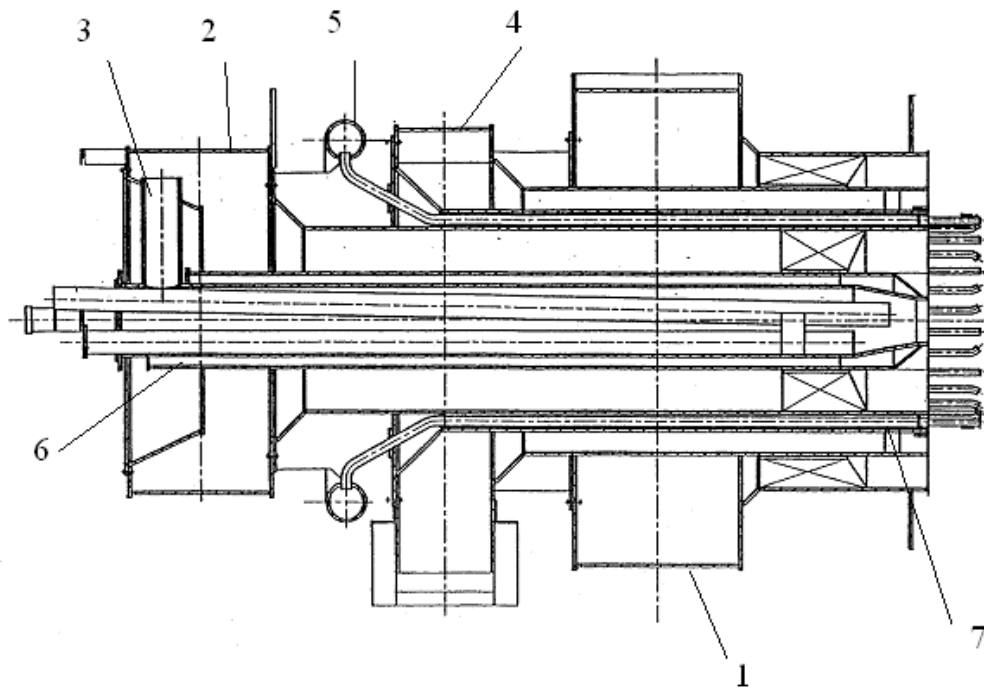
- С точки зрения снижения NO_x , наиболее предпочтительной является амбразура диффузорного типа.
- Наиболее предпочтительным вариантом для двухпоточной по воздуху горелки по таким критериям как: выбросы NO_x , аэродинамическое сопротивление горелки, ее шумовые характеристики – будет конструкция аксиального завихрителя с углом установки лопаток во внешнем воздушном канале от 40° до 45° .
- Подача внешних газов рециркуляции в горелку существенно снижает образования NO_x : примерно в 2,5 раза при доле рециркуляции 20 %. Дальнейшее увеличение доли рециркуляции не столь эффективно.
- При подаче газов рециркуляции в смеси с воздухом при хорошем перемешивании эффективность подавления NO_x повышается. При подаче дымовых газов отдельным каналом, для увеличения эффективности снижения оксидов азота необходимо подавать в него часть сжигаемого газа.
- Максимальный эффект достигается, как правило, в том случае, если на котлах одновременно внедряются сразу несколько технологических методов снижения NO_x , а горелки проектируются с учетом их применения.
- Повышение эффективности внутритопочных мероприятий возможно также при совершенствовании самого котла (уплотнении топки, улучшения автоматики и т. д.) и культуры обслуживания.

Даже частичная реализация указанных выше рекомендаций позволяет улучшить сбалансированность таких характеристик горелки, как надежность воспламенения и устойчивость горения, полноту выгорания топлива и удовлетворение экологических нормативов. С учетом предложенных рекомендаций были разработаны горелки для реконструируемых котлов ТГМП-314, Е-160-3,9-440 ГМ и КВГМ-50. Результаты промышленных испытаний этих горелок представлены далее.

4.2 Описание горелок с внедренными мероприятиями по снижению образования NO_x и условия проведения промышленных испытаний

Эффективность разработанных в работе технических решений, исследовалась на низкоэмиссионных горелочных устройствах двух типов, на которых эти решения были реализованы.

Горелка, изображенная на рисунке 4.1, испытывалась на котлах ТГМП-314 ст. № 7 и 8 ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго».



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

Рисунок 4.1 – Комбинированная газомазутная горелка

Конструкция горелки выполнена с индивидуальным подводом воздуха и газов рециркуляции.

Подвод природного газа в горелку осуществляется по двойной схеме:

- В центральную часть – по кольцевому каналу через конический насадок с отверстиями.

- В среднюю часть – через входной коллектор с раздачей по газовым трубам, размещенным в канале, расположенном между внутренним воздушным каналом и каналом газов рециркуляции.

Воздух в горелке движется по трем каналам: центральному, внутреннему, периферийному. По центральному каналу воздух поступает прямоходом. Внутренний и периферийный потоки закручиваются аксиальными лопаточными аппаратами.

Канал газов рециркуляции расположен между каналом газораздающих трубок и периферийным воздушным каналом.

В центральной трубе установлены запальник, мазутная паромеханическая форсунка и гляделка визуального наблюдения.

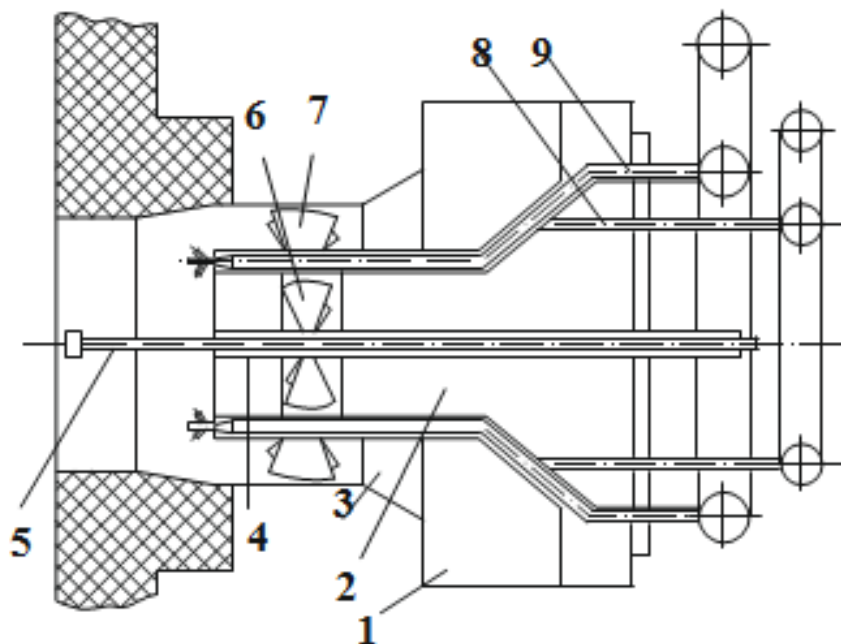
Горелка снабжена датчиком селективного контроля факела.

Испытания горелки, конструкция которой представлена на рисунке 4.2, проводились на котле КВГМ-50 ст. №9 Шатурской ГРЭС и котлах Е-160-3,9-440 ГМ ст. №1 и №2 ГЭС-1 ОАО «Мосэнерго».

Горелка выполнена двухканальной по воздуху и для усиления эффекта снижения образования оксидов азота газы рециркуляции подаются в топку в смеси с воздухом [95]. В центральном и периферийном каналах размещены аксиальные завихрители с углом установки лопаток относительно оси потока 45 и 40° соответственно. По центральному каналу горелки подается 37 % воздуха, по периферийному – 63 %.

В промежутке между каналами равномерно размещено 30 газоподводящих трубок с выходным диаметром отверстий диаметром 14,5 мм.

В горелке применена двухкамерная раздача природного газа (малая газовая камера – центральный коллектор, 33 % газа, и большая газовая камера – периферийный коллектор, 67 % газа) с возможностью управления каждым потоком задвижками, установленными на подводящих газопроводах.



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 4.2 – Газомазутная горелка ВТИ-ЗИО

Из центрального коллектора в зону горения газ поступает по 10-ти прямым трубкам, а из периферийного коллектора – по 20-ти трубкам. Концы газораздающих трубок центрального коллектора загнуты под углом 60° к оси горелки в сторону центра. Половина газораздающих трубок (10 шт.) периферийного коллектора имеет выход газа параллельный оси горелки, а другая половина трубок – под углом 30° к оси горелки в поток воздуха периферийного канала (от центра).

По оси горелки установлена паромеханическая мазутная. Давления пара и мазута на номинальной нагрузке составляют 0,6 и 3,0 МПа, соответственно.

Розжиг горелки осуществляется с помощью запально-защитного устройства типа ЗСУ-4М, размещенного в специальном кожухе.

В период проведения испытаний природный газ являлся основным топливом. Испытания на мазуте, который может использоваться в качестве резервного и аварийного топлива, проводились с целью показать работоспособность горелки и котла в целом и на этом виде топлива.

Процесса горения контролировался по концентрации кислорода O_2 , монооксида углерода CO и температуре продуктов сгорания в поворотной камере для паровых котлов и за конвективными поверхностями нагрева для котлов КВГМ-50, а также по температуре уходящих газов.

Кроме этого, на всех режимах проводилось визуальное наблюдение процесса горения через лючки и гляделки в топке, во время которого контролировались следующие характеристики:

- качество смешения топлива и воздуха на начальном участке факела;
- аэродинамическая организация процесса сжигания топлива (длина и траектория факела, отсутствие наброса факела на стены топочной камеры и т.п.);
- степень выгорания топлива по высоте топочной камеры и отсутствие затягивания процесса горения в горизонтальный газоход (паровые котлы) или конвективные поверхности нагрева (водогрейные котлы).

При проведении испытаний определялось содержание в продуктах сгорания NO_x , продукта недожога топлива – CO и O_2 . Инструментальные измерения производились поверенными прошедшими аттестацию переносными газоанализаторами типа ДАГ-16 и Testo-33 с электрохимическими детекторами непрерывного действия. Сажевое число Бахараха измерялось прибором ДАГ-16. Кроме этого, по показаниям щитовых приборов, фиксировались основные показатели работы котлов (производительность, параметры пара и воды, воздуха и топлива, температуры по газовому тракту и т.д.), позволяющие однозначно идентифицировать исследуемые режимы. Газоанализаторы и щитовые

приборы подвергались поверке непосредственно перед началом испытаний и повторной поверке после испытаний.

Испытания котла были организованы и проведены в соответствии с методиками и рекомендациями по теплотехническим испытаниям котельных установок [96, 97, 98]. Пробы дымовых газов на газовый анализ отбирались согласно [67, 99] в контрольном сечении конвективной шахты и в балансовом сечении газохода за дымососами. Отбор проб дымовых газов для определения содержания в них бенз(а)пирена проводился в соответствии с [100]. Количественное определение содержания Б(а)П проводилось сертифицированной организацией НПО «Тайфун» Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Результаты измерений NO_x и CO в дымовых газах при фактическом коэффициенте избытка воздуха приводились к стандартному $\alpha = 1,4$, в соответствии с требованиями НТД [101]:

$$C_{\text{NO}_x}^{\alpha=1,4} = \frac{2,05 \cdot C_{\text{NO}_x}(\text{ppm}) \cdot \alpha}{1,4}, \text{ мг/нм}^3, \quad (4.1)$$

где: C_{NO_x} (ppm) – измеренные концентрации оксидов азота; α – избыток воздуха в месте отбора проб дымовых газов на анализ.

$$C_{\text{CO}}^{\alpha=1,4} = \frac{1,25 \cdot C_{\text{CO}}(\text{ppm}) \cdot \alpha}{1,4}, \text{ мг/нм}^3, \quad (4.2)$$

где: C_{CO} (ppm) – измеренные концентрации оксида углерода; α – избыток воздуха в месте отбора проб дымовых газов на анализ.

4.3 Результаты испытаний на котле ТГМП-314 ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго»

Котел ТГМП-314Ц производства ТКЗ предназначен для сжигания природного газа и мазута. Котел однокорпусный, прямоточный, на сверхкритические параметры пара, с промперегревом, номинальной паропроизводительностью 272 кг/с (980 т/ч). Выполнен по П-образной компоновке, не газоплотный, под разрежением. Топочная камера призматическая, открытого типа, на выходе из которой расположен вертикальный ширмовый пароперегреватель. В конвективном (опускном) газоходе последовательно размещены пароперегреватель высокого давления, пароперегреватель низкого давления, водяной экономайзер.

На ТЭЦ-23 АО «Мосэнерго» были установлены четыре котла типа ТГМП-314Ц с циклонными предтопками, эксплуатация которых выявила ряд серьезных недостатков, по сравнению с котлами, оборудованными традиционными горелочными устройствами. Поэтому все котлы были реконструированы с ликвидацией циклонных предтопок, установкой низкоэмиссионных газомазутных горелочных устройств конструкции ВТИ (рисунок 4.1) и организацией ступенчатого сжигания.

Горелки были установлены на фронтальной и задней стенах топки встречно, в два яруса по 8 горелок в ярусе. Расстояние между ярусами горелок – примерно 3 м.

Ступенчатое сжигание газа для снижения выбросов NO_x осуществляется за счет подачи от 30 до 35 % воздуха через 16 сопел вторичного дутья, смонтированных встречно на фронтальной и задней стенах топки. Расстояние между соплами и верхним ярусом горелок приблизительно 4 м.

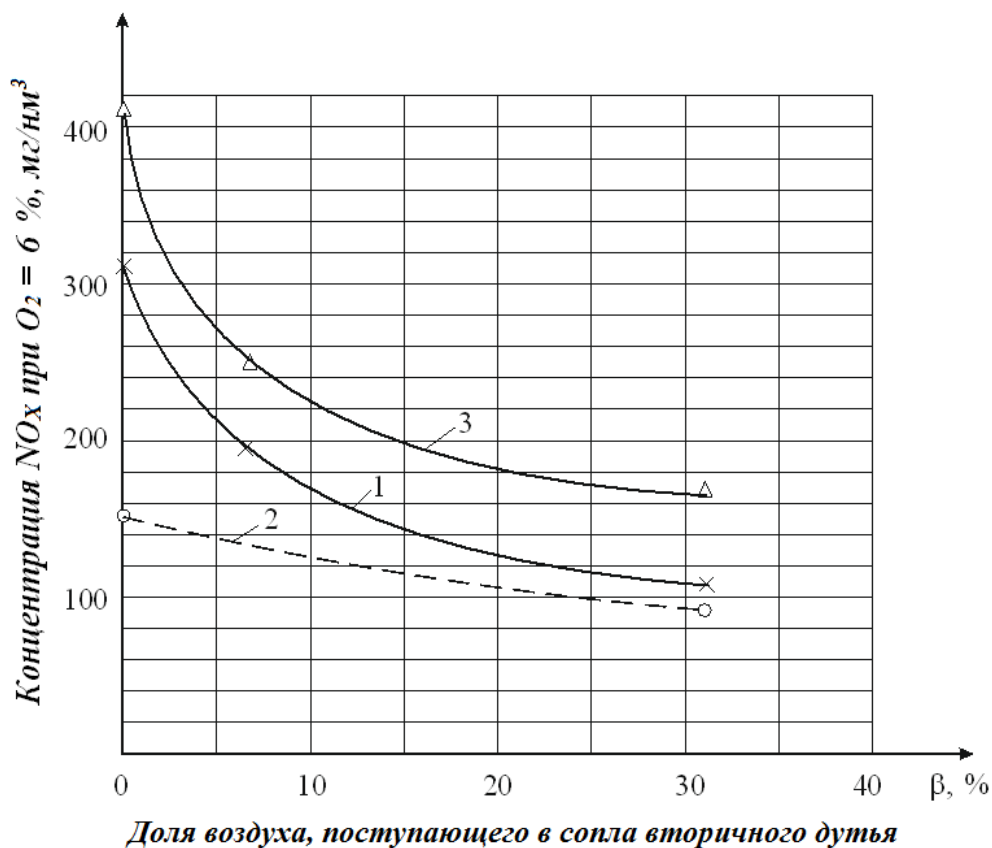
Испытания горелки, при сжигании природного газа, проводились в диапазоне нагрузок котла от 600 до 930 т/ч (от 61 до 95 % от $D_{\text{ном}}$).

Нижний предел обусловлен поддержанием давления газа за регулирующими клапанами при всех работающих горелках не менее 13,7 кПа, принятого в эксплуатации, хотя по «срывным» характеристикам горелок давление газа может быть снижено. Максимальная нагрузка ограничивалась мощностью дымососов.

На рисунке 4.3 представлены величины приведенной концентрации оксидов азота ($C_{\text{NO}_x}^{\text{прив}}$) на нагрузке примерно 0,9 номинальной при использовании горелок ВТИ, которые показывают, что даже без двухступенчатого сжигания и ввода дымовых газов рециркуляции, только за счет разработанных и внедренных в эту горелку мероприятий, приведенная концентрация NO_x составляет всего 307 мг/нм³ (кривая 1). Ожидаемая $C_{\text{NO}_x}^{\text{прив}}$ в пересчете на номинальную нагрузку 272 кг/с (980 т/ч) будет близка к 360 мг/нм³. Коэффициент избытка воздуха в рассечке водяного экономайзера ($\alpha_{\text{эк}}$) находился в пределах от 1,08 до 1,10.

Для сравнения, на однотипных котлах модели ТГМП-314, оборудованных горелками ТКЗ с такой же настенной компоновкой или горелками ТКЗ-ХФ ЦКБ-ВТИ с подовой компоновкой $C_{\text{NO}_x}^{\text{прив}}$ в дымовых газах примерно в 2,5–3 раза выше.

За счет дополнительного использования средств подавления образования оксидов азота (рециркуляция дымовых газов в количестве от 6 до 8 % и двухступенчатое сжигание с долей вторичного воздуха 32 %) удалось добиться приведенной концентрации NO_x в уходящих газах котла ниже 100 мг/нм³ (см. рисунок 4.3, кривая 2).



1 - Топливо - газ, $r = 0\%$; 2 - Топливо - газ, $r = \text{от } 6 \text{ до } 8\%$; 3 - Топливо - мазут, $r = 0\%$.

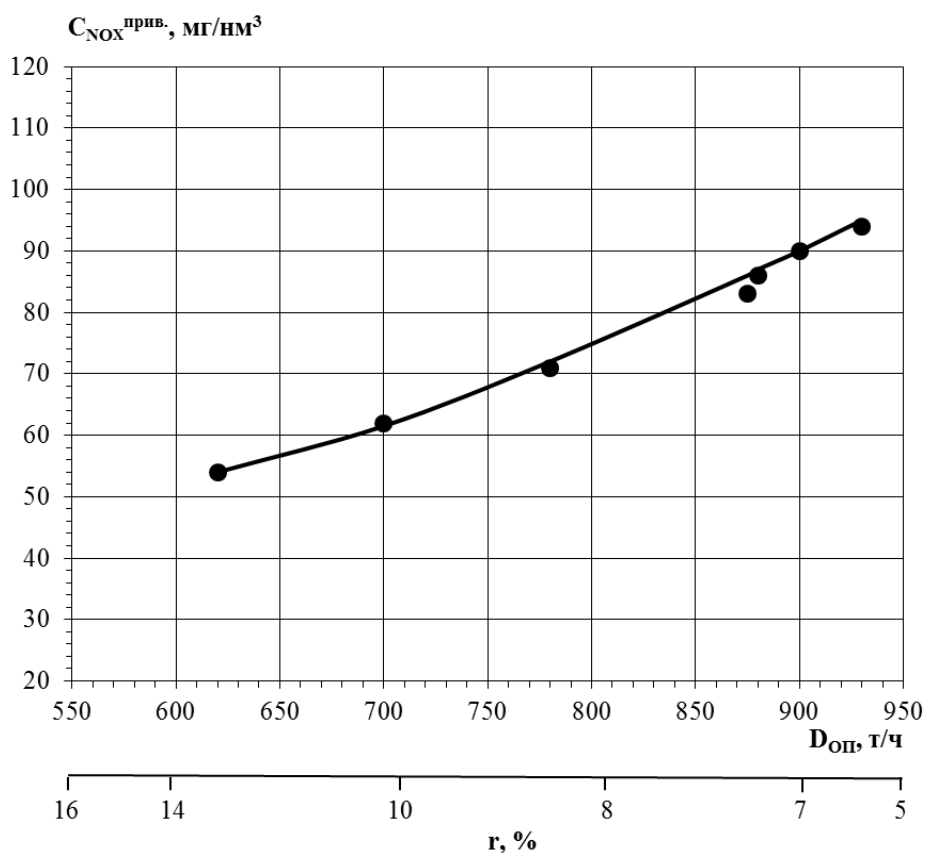
Рисунок 4.3 – Зависимость приведенной концентрации NO_x от доли воздуха, поступающего в сопла вторичного дутья. $D = 0,9D_{\text{ном}}$

На рисунке 4.4 представлена зависимость приведенной концентрации NO_x в уходящих газах котла от нагрузки, построенная по результатам балансовых опытов при оптимальных коэффициентах избытка воздуха.

Из рисунка 4.4 видно, что при паровой нагрузке котла $D = 930 \text{ т/ч}$ в режиме ступенчатого сжигания ($\beta = 32\%$), с подачей газов рециркуляции в количестве от 6 до 8 % и $\alpha_{\text{эк}}^{\text{опт}} = 1,08$ приведенная концентрация NO_x в уходящих газах котла составляет 95 мг/нм^3 . При уменьшении нагрузки $C_{\text{NO}_x}^{\text{прив}}$ снижается до 53 мг/нм^3 ($r = 14\%$, $\alpha_{\text{эк}}^{\text{опт}} = 1,12$).

Таким образом, при использовании горелки с реализованными мероприятиями по снижению NO_x приведенная концентрация NO_x при работе котла на номинальной нагрузке 272 кг/с (980 т/ч) не будет превышать

100 мг/нм³, что ниже нормативного значения (125 мг/нм³), установленного в [7].



Топливо – газ, $\beta = 32 \%$, $\alpha_{ЭК}'' = \alpha_{ЭК}^{онт}$, $q_3 = 0$.

Рисунок 4.4 – Зависимость приведенной концентрации NO_x от нагрузки котла

Дополнительно были проведены испытания по проверке работы горелки на мазуте. Испытания проводились в диапазоне нагрузок котла от 156 кг/с (560 т/ч) до 250 кг/с (900 т/ч), при изменении давления топлива за регулируемыми клапанами в диапазоне от 2,0 до 4,0 МПа. Максимальная производительность котла ограничивалась пропускной способностью форсунок и влажностью мазута, которая составляла 10 %.

Установлено, что также как и при сжигании природного газа, горелочные устройства при сжигании мазута без применения средств

подавления генерируют меньше в 2,5–3 раза NO_x , чем горелки других конструкций, установленные на аналогичных котлах.

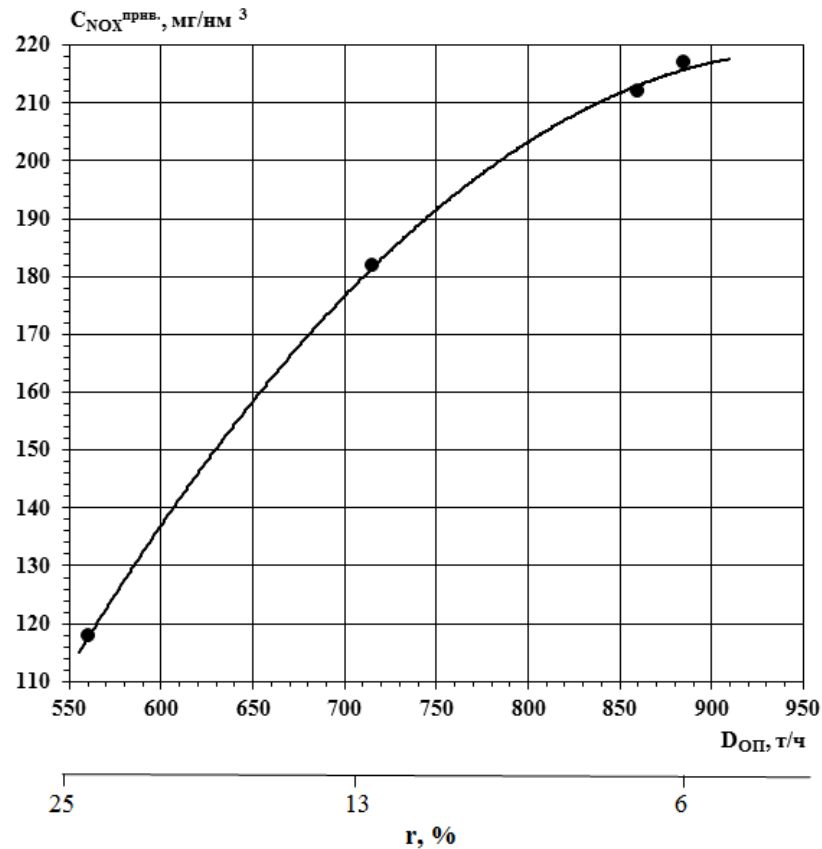
При подаче в сопла вторичного дутья воздуха в количестве от 7 до 8 %, идущего на горение, $C_{\text{NO}_x}^{\text{прив}}$ при $D = 0,9D_{\text{ном}}$ и $\alpha_{\text{эк}}'' = 1,09$ равна 408 мг/нм^3 и в пересчете на номинальную нагрузку не превышает 460 мг/нм^3 .

В выбранных режимах оптимальный коэффициент избытка воздуха в режимном сечении в диапазоне нагрузок от 251 кг/с (902 т/ч) до 208 кг/с (750 т/ч) равен 1,09, что соответствует расчетному значению на выходе из топки 1,05. При снижении нагрузки $\alpha_{\text{эк}}^{\text{онм}}$ возрастает и при $D = 156 \text{ кг/с}$ (562 т/ч) составляет 1,17.

На рисунке 4.5 представлена зависимость $C_{\text{NO}_x}^{\text{прив}}$ в уходящих газах котла от нагрузки, построенная по результатам балансовых опытов при $\alpha_{\text{эк}}^{\text{онм}}$.

Из рисунка 4.5 видно, что $C_{\text{NO}_x}^{\text{прив}}$ во всем проверенном диапазоне нагрузок меньше нормативной величины – 250 мг/нм^3 . Так на нагрузке 246 кг/с (884 т/ч) приведенная концентрация NO_x составила 216 мг/нм^3 ($\gamma = 6 \%$, β в диапазоне от 7 до 8 %, $\alpha_{\text{эк}}^{\text{онм}} = 1,09$). Пересчет на номинальную нагрузку 272 кг/с (980 т/ч) дает концентрацию оксидов азота 246 мг/нм^3 . Следует обратить внимание на то, что нормативное значение концентрации NO_x достигнуто при $\gamma = 6 \%$, то есть в 3 раза меньше проектной величины ($\gamma = 20 \%$). В балансовом опыте на нагрузке 251 кг/с (902 т/ч) с $\gamma = 9 \%$ приведенная концентрация NO_x была равна 199 мг/нм^3 . В пересчете на номинальную нагрузку это составляет 220 мг/нм^3 .

В целом можно констатировать, что за счет мероприятий, реализованных в горелке конструкции ВТИ (с отдельным каналом для дымовых газов рециркуляции, при использовании ступенчатого сжигания и рециркуляции дымовых газов) существенно снижается образование NO_x и обеспечивается нормативная концентрация NO_x .



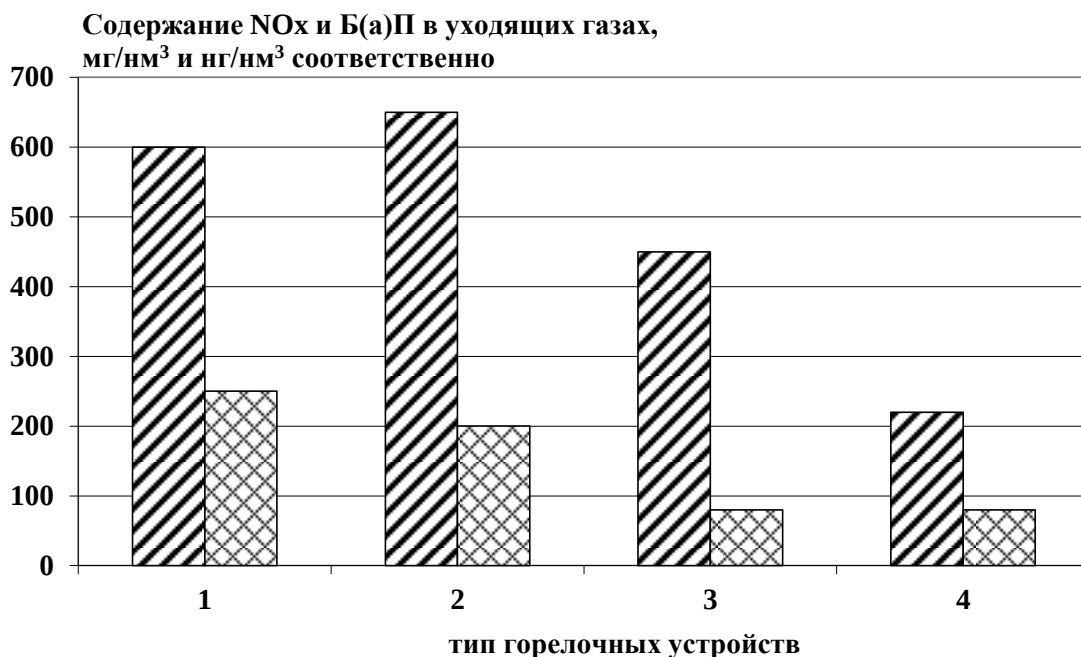
Топливо – мазут, $\beta = \text{от } 7 \text{ до } 8 \%$, $\alpha''_{эк} = \alpha_{эк}^{онм}$, $q_3 = 0$.

Рисунок 4.5 – Зависимость приведенной концентрации NO_x от нагрузки котла

КПД котла «брутто», приведенный к условиям теплового расчета на реконструкцию при сжигании мазута и газа близок к проектному. Работа промперегревателя и всех поверхностей нагрева не вызывала опасений.

Предложенные мероприятия также не ухудшили другие экологические показатели. В эксплуатационных режимах содержание Б(а)П в уходящих газах котла не превышало при сжигании газа 63 нг/нм^3 , при сжигании мазута и смеси топлив – 80 нг/нм^3 . Число Бахараха было ниже требований ГОСТ 27824-2000 [102].

На рисунке 4.6 приведены результаты обобщения полученных данных и их сравнение с имеющимися результатами аналогичных испытаний, проведенных ВТИ и другими организациями на котлах ТГМП-314, оборудованных различными типами горелочных устройств [103, 92, 104, 105].



1 - горелки ТКЗ-ХФ ЦКБ-ВТИ; 2 - подовые горелки; 3 – с циклонными предтопками; 4 - горелки ТКЗ-ВТИ котел ст.№7 ТЭЦ-23; ▨ - уровни содержания NO_x в уходящих газах котлов; ▩ - уровни содержания Б(а)П в уходящих газах котлов.

Рисунок 4.6 – Уровень выбросов NO_x и Б(а)П в атмосферу от котлов ТГМП-314 при сжигании мазута в зависимости от типа горелочных устройств

Из рисунка видно, что при сжигании мазута в топках с горелками ХФ ЦКБ-ВТИ и подовыми горелками средний уровень выбросов NO_x от 600 до 650 мг/нм³ обеспечивается при содержании Б(а)П в уходящих газах от 200 до 250 нг/нм³, а с циклонными предтопками – 450 мг/нм³ и 80 нг/нм³ соответственно.

На исследованном котле удалось достигнуть снижения содержания NO_x в уходящих газах при сжигании мазута до 220 мг/нм³, при выбросе Б(а)П = 80 нг/нм³.

На ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» такие же горелки были смонтированы вместо циклонных предтопков на котле № 8 и показали аналогичные результаты [92].

4.4 Испытание горелочных устройств на котле КВГМ-50 Шатурской ГРЭС

Водогрейный котел КВГМ-50 предназначен для получения горячей воды температурой 150 °С в отдельно стоящих котельных, используемой в системах отопления, горячего водоснабжения промышленного и бытового назначения и на ТЭЦ. Котел может эксплуатироваться как в основном режиме, так и в пиковом (для подогрева сетевой воды) соответственно от 70 до 150 °С и от 110 до 150 °С.

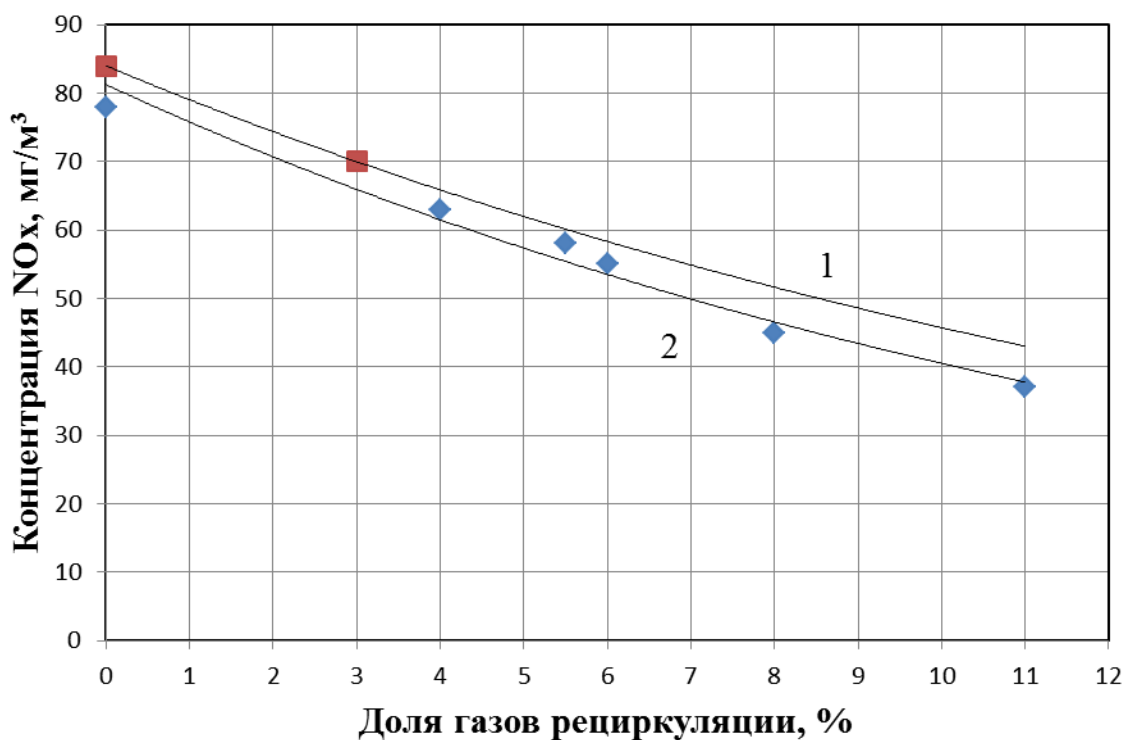
Котел имеют башенную компоновку: над вертикальной топочной камерой располагается конвективная поверхность нагрева. Топочная камера экранирована трубами диаметром 60×3 мм. Конвективная поверхность нагрева котла КВГМ-50 состоит из четырех пакетов, набирается из U-образных ширм из труб диаметром 28×3 мм. Боковые стены конвективного газохода закрыты трубами диаметром 83×3,5 мм и шагом 128 мм и являются одновременно стояками конвективных полусекций. Котел имеют облегченную обмуровку и теплоизоляцию.

На котле КВГМ-50 Шатурской ГРЭС-5 были установлены две газомазутные горелки номинальной тепловой мощностью 31 МВт, конструкция которой показана на рисунке 4.2.

Проведенные испытания показали [77, 106], что горелка обеспечивает эффективное сжигание газа и мазута с коэффициентами избытка воздуха 1,04 и 1,06 и низкий уровень образования NO_x. Концентрация NO_x на газе только за счет конструкции самой горелки сократилась приблизительно на 40 % по сравнению с установленными ранее горелками и не превосходит 90 мг/м³ в пересчете на $\alpha = 1,4$.

Подача рециркулирующих дымовых газов в горелки в смеси с общим воздухом, в количестве от 10 до 11 % дополнительно снижает концентрацию

NO_x еще в два раза. В целом установка горелок конструкции ВТИ на этом котле в сочетании с вводом в них газов рециркуляции позволяет снизить уровень концентрации NO_x до 40–45 мг/м^3 (рисунок 4.7).



1 – теплотворность 47 МВт; 2 – теплотворность 40 МВт.

Рисунок 4.7 – Зависимость содержания NO_x от доли рециркуляции дымовых газов в горелки конструкции ВТИ на котле КВГМ-50

Результаты испытаний горелок при сжигании мазута показали, что и этом случае наблюдается существенное снижение концентрации NO_x : без ввода газов рециркуляции она составляет от 230 до 240 мг/м^3 , с подачей газов рециркуляции – от 180 до 190 мг/м^3 .

4.5 Испытание топочно-горелочных устройств на котле Е-160-3,9-440 ГМ ГЭС-1 ОАО «Мосэнерго»

Котел Е-160-3,9-440 ГМ производства Подольского завода, однокорпусный, барабанный, с естественной циркуляцией, П-образной горизонтальной компоновкой поверхностей нагрева, газоплотный, с уравновешенной тягой. По условиям установленного паротурбинного оборудования котел работает с пониженными параметрами перегретого пара ($P_{\text{пп}} = 2,9$ МПа, $t = 390$ °С) в отличие от проектных данных ($P_{\text{пп}} = 4,0$ МПа, $t = 390$ °С) и ограниченной паропроизводительностью – 145 т/ч вместо 160 т/ч.

Топочная камера котла была оборудована четырьмя газомазутными горелками (рисунок 4.2), расположенными в два яруса по две на фронтальной стенке, направленными вверх под углом 12° от горизонтальной оси [107].

Принятые повышенные скорости газовой смеси и природного газа на выходе из горелки, а также возможность отключения одного из газопроводных каналов и одного из газовых коллекторов позволяют обеспечить диапазон регулирования нагрузки котла от 100 до 30 % номинальной без отключения горелок.

Вследствие жестких экологических требований, предъявляемых к расположенной в центре Москвы ГЭС-1, для снижения выбросов NO_x кроме установки низкоэмиссионных горелок, применялись рециркуляция дымовых газов, составлявшая около 20 % общего количества подаваемой среды в смеси с дутьевым воздухом через горелочные устройства и ступенчатое сжигание путем подачи вторичного воздуха через сопла, установленные на боковых стенках топки.

Результаты испытаний показали, что использование разработанных и внедренных на котле Е-160-3,9-440ГМ топочно-горелочных устройств

позволяет обеспечить надежную и экономичную работу котла в диапазоне изменения нагрузок от 30 до 100 % номинальной. Концентрация NO_x в уходящих газах при ступенчатом сжигании и доле рециркуляции дымовых газов, равной примерно 16 %, при работе котла с номинальной нагрузкой на природном газе составила 64 мг/м^3 (рисунок 4.8), что существенно ниже требований ГОСТ Р 50831-95 (125 мг/м^3) [106, 108].

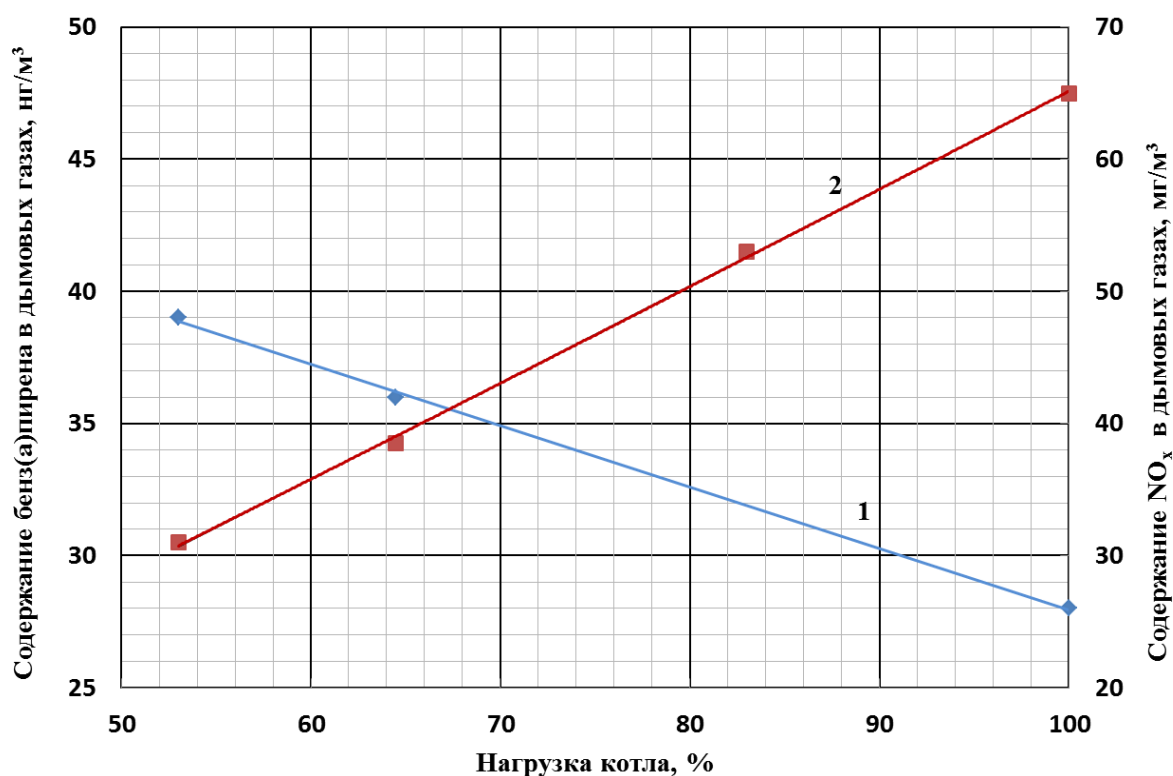


Рисунок 4.8 – Изменение концентрации Б(а)П (1) и NO_x (2) в уходящих газах котла Е-160-3.9-440ГМ ст. № 1 в зависимости от нагрузки при сжигании природного газа

Результаты испытаний котла на номинальной нагрузке при сжигании в горелках мазута марки М-100 представлены на рисунке 4.9.

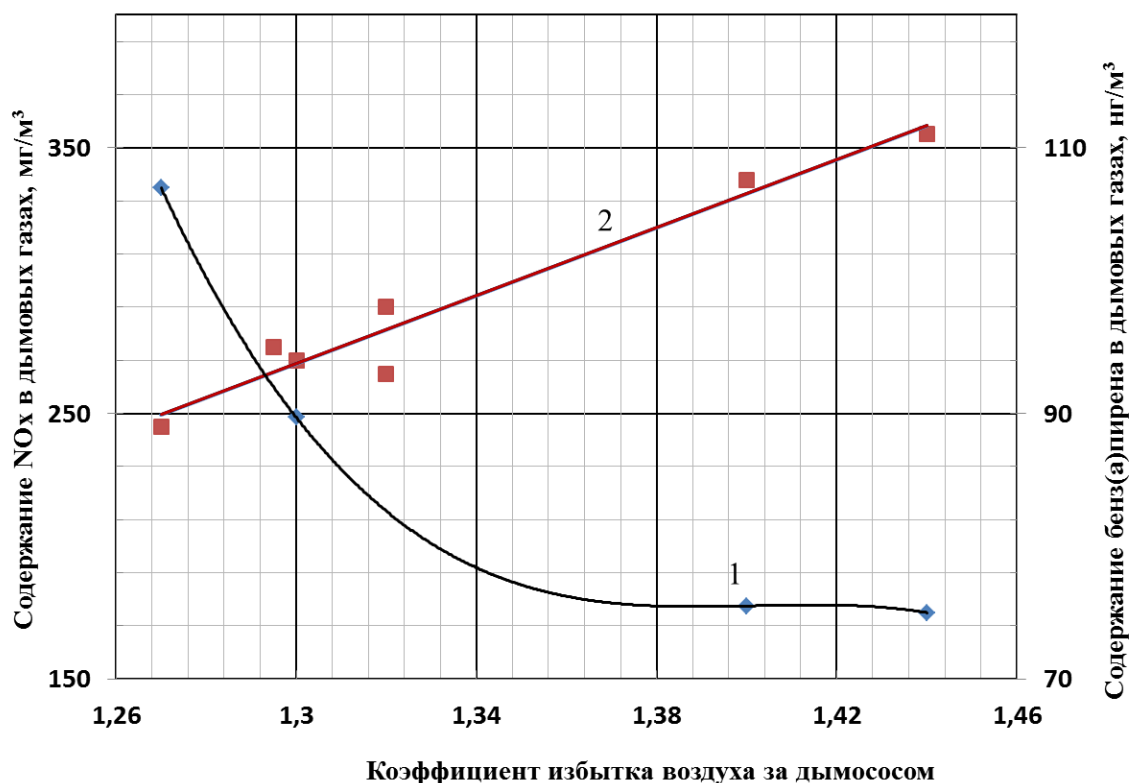


Рисунок 4.9 – Изменение концентрации Б(а)П (1) и NO_x (2) в уходящих газах на 100 %-ной нагрузке котла Е-160-3.9-440ГМ в зависимости от коэффициента избытка воздуха при сжигании мазута

При пересчете на нормальные условия выбросы NO_x составили 240 мг/м³, а сажистых частиц – не превышали 2 по шкале Бахараха, что, как и при работе котла на природном газе, ниже требований ГОСТ Р 50831-95 [7].

Примененные на котле технологические методы для подавления выбросов NO_x (рециркуляция дымовых газов, ступенчатое сжигание) не привели к заметному повышению содержания бенз(а)пирена в уходящих газах как при сжигании природного газа, так и мазута. Концентрация бенз(а)пирена в уходящих газах котла Е-160-3,9-440ГМ при сжигании природного газа находилась в пределах от 28 до 39 нг/м³ (при $\alpha = 1,4$), мазута – от 75 до 105 нг/м³.

4.6 Выводы по главе 4

1. Представлены рекомендации по созданию низкоэмиссионных газогорелочных устройств, разработанные на основании аналитического обобщения результатов, проведенных стендовых и промышленных испытаний и расчетно-аналитических исследований. Рекомендации определяют конструктивные и режимные мероприятия, направленные на обеспечение требований, предъявляемых к современным горелочным устройствам, в первую очередь, по выбросам NO_x . В частности, они определяют количество потоков по газу и воздуху, взаимную крутку потоков, создание зон стабилизации и горения топлива, распределение ввода газообразного топлива и газов рециркуляции в горелку.

2. Показано, что даже частичная реализация разработанных рекомендаций позволяет улучшить сбалансированность таких характеристик горелки как надежность воспламенения и устойчивость горения, полноту выгорания топлива и удовлетворение экологических нормативов. Многолетний опыт эксплуатации разработанных с учетом предложенных рекомендаций горелок на котлах ТГМП-314, Е-160-3,9-440 ГМ и КВГМ-50 показал, что удалось добиться снижения выбросов NO_x до требуемых нормативов 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/нм^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».

Список литературы

1. Ольховский, Г.Г. Современное состояние и перспективы развития ТЭС на природном газе [Текст] / Г.Г. Ольховский // Электрические станции. – 2018. – № 1. – С. 3–5.
2. Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы». [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://so-ops.ru>.
3. Министерство энергетики РФ. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>.
4. Григорьева, Л.М. Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2017 год. Экологические приоритеты для России [Текст] / Л.М. Григорьева ; под. ред. С.Н. Бобылева. – М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2017. – 292 с.
5. Демьянцева, Е. А. Механизм образования и негативное влияние выбросов, содержащих оксиды азота [Текст] / Е. А. Демьянцева, Е.А. Шваб, Е. О. Реховская // Издательство Молодой ученый. – 2017. – № 2 (136). – С. 231-234.
6. Сигал И.Я. Пути снижения выброса оксидов азота тепловыми станциями [Текст] / И.Я. Сигал // Теплоэнергетика. – 1989. – № 3. – С. 5-8.
7. ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования [Текст]. – Введ. 1997-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1996. – 18 с.
8. DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) [Text] / Official Journal of the European Union, 17.12.2010. – 17 p.
9. Жабо, В.В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС : учебное пособие [Текст] / В. В. Жабо. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

10. Росляков, П. В. Защита атмосферного воздуха от газообразных выбросов : Учеб. пособие по курсу «Методы защиты окружающей среды» [Текст] / П. В. Росляков, Л. Е. Егорова; под ред. М. А. Изюмова. – М. : Изд-во МЭИ, 1996. – 72 с.
11. Котлер, В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов [Текст] / В. Р. Котлер. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 114 с.
12. Кинетика окисления NO в NO₂ молекулярным кислородом [Текст] / Известия вузов. Энергетика. – 1978. – № 1. – С. 62-65.
13. Прохоров, В.Б. Исследование трансформации оксидов азота в г. Москве [Текст] : Сб. научных трудов / В.Б. Прохоров, Н.Д. Рогалев, А.А. Беккер, С.В. Сафронов. – М.: МЭИ. – 1991. – № 632. – С. 21-29.
14. Росляков, П.В. Разработка теоретических основ образования оксидов азота при сжигании органических топлив и путей снижения их выхода в котлах и энергетических установках [Текст] : дис.доктора техн. наук : 05.04.01 / Росляков Павел Васильевич. – М. : МЭИ. – 1993. – 476 с.
15. Зельдович, Я.Б. Окисление азота при горении [Текст] / Я.Б. Зельдович, П.Я. Садовников, Д.А. Франк-Каменецкий. – Л. : АН СССР, 1947. – 150 с.
16. Lavoie, G. A. [Text] / Combustion and Flame. – 1970. – 97 p.
17. Чигир. Н.А. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени. [Текст] : [пер. с англ.] / Н. А. Чигир, Р. Дж. Вейнберг, К. Т. Боумэн [и др.] под ред. Ю. Ф. Дитякина. – М.: Машиностроение, 1981. – 407 с.
18. Масленников, В.М. Разработка, анализ и реализация методов подавления выбросов оксидов азота с продуктами сгорания тепловых электростанций на природном газе. Отчет по теме «Подавление выбросов оксидов азота при высокотемпературном сжигании топлив» [Текст] : отчет о НИР / ИВТАН; рук. В.М. Масленников. – М., 1986. – ГР №01860003936.
19. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов [Текст] / П.В. Росляков. – М.: Изд-во МЭИ, 2007. – 336 с.

20. Сигал А.И. Предотвращение образования диоксида азота в отопительных котлах [Текст] : Автореферат дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Александр Исаакович Сигал. – Л. – 1985. – 25 с.

21. Эфендиев Т.Б. Исследование вопросов снижения скорости высокотемпературной сероводородной коррозии и уменьшения концентрации окислов азота в газомазутных парогенераторах [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.Б. Эфендиев. – М. – 1973. – 19 с.

22. Цикульников, Л. М. Охрана воздушного бассейна и пути уменьшения токсичности выбросов газомазутных котлов [Текст] : Научно-технический обзор. Серия Использование газа в народном хозяйстве / Л. М. Цикульников, В. Г. Конюхов, Р. А. Кадыров. – М. : ВНИИЭгазпром, 1975. – 52 с.

23. Fenimore, C.P. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flame [Text] / C.P. Fenimore // 13-th Symposium (Int.) On Combustion. – 1971. – 373 p.

24. Сигал, И.Я. Исследование минимального выхода окислов азота в пламенах метана, окиси углерода и водорода [Текст] / И.Я. Сигал, Н.А. Гуревич, В.Г. Ляскронский // Исп. газа в нар. хоз-ве. – 1980. – № 1.

25. Егорова, Л. Е. Разработка методов расчета образования оксидов азота и серы в паровых и водогрейных котлах [Текст] : дис. ... канд. техн. наук: 05.04.01 / Егорова Людмила Евгеньевна. – М. : МЭИ. – 1995. – 195 с.

26. Титов, С.П. Исследование образования NO_x из азота топлива при горении пыли каменных углей [Текст] / С.Н. Титов, В.И. Бабий, В.М. Барабаш // Теплоэнергетика. – 1980. – № 3. – С. 64-67.

27. Отс, А.А. Экспериментальное исследование образования окислов азота из азотсодержащих соединений в процессе сгорания жидкого топлива [Текст] / А.А. Отс, Д.М. Егоров, К.Ю. Саар // Теплоэнергетика. – 1979. – № 4. – С. 68-71.

28. Сигал И. Я. Развитие и задачи исследования по изучению условий образования окислов азота в топочных процессах [Текст] / И.Я. Сигал // Теплоэнергетика. – 1983. – № 9. – С. 5-10.

29. Енякин, Ю.П. Исследование и внедрение новых технологий сжигания органических топлив, разработанных ВТИ для снижения выбросов в атмосферу токсичных выбросов оксидов азота на электростанциях и котельных России [Текст] : [труды АООТ «ВТИ»] / Ю.П. Енякин, В.И. Бабий, В.Р. Котлер [и др.]. – М. : ВТИ, 1996. – 124 с.

30. Ольховский, Г.Г. Природоохранные технологии ТЭС. Сборник научных статей [Текст] / Под ред. Г.Г. Ольховского, А.Г. Тумановского, В.Н Глебова. – М. : ВТИ, 1996. – 212 с.

31. Ходаков, Ю.С. Оксиды азота и теплоэнергетика: проблемы и решения [Текст] / Ю.С. Ходаков. – М.: ООО «ЭСТ-М», – 2001. – 432 с.

32. Дьяков, А.Ф. Развитие теплоэнергетики: Сборник научных статей [Текст] / Под ред. А.Ф. Дьякова, Г.Г. Ольховского. – М.: ВТИ, 1996.

33. Енякин, Ю.П. Работы ВТИ по снижению выбросов оксидов азота технологическими методами [Текст] / Ю.П. Еняки, В.Р. Котлер, В.И. Бабий // Теплоэнергетика. – 1991. – № 6. – С. 33-38.

34. Глебов, В.П. Природоохранные мероприятия в тепловой энергетике России [Текст] / В.П. Глебов, А.Г. Тумановский, Е.В. Минаев [и др.] // Энергетик. – 1994. – № 6. – С. 7-11.

35. Грибков, А.М. Снижение выбросов оксидов азота котлами ПЭО Татэнерго [Текст] / А.М. Грибков, Ю.В. Щелоков, А.В. Чадов // Электрические станции. – 2001. – № 4. – С. 13-18.

36. Зройчиков, Н.А. Комплексная реконструкция котлов ТГМП-314Ц ТЭЦ-23 ОАО «Мосэнерго» для снижения выбросов вредных веществ в окружающую среду [Текст] / Н.А. Зройчиков, И.В. Галас, М.Г. Лысков, Е.А. Морозова // Теплоэнергетика. – 2006. – № 5. – С. 26-30.

37. Зройчиков, Н.А. Оптимизация сжигания режимов мазута в топках котлов большой мощности [Текст] / Н.А. Зройчиков, М.Г. Лысков, В.Б. Прохоров, Е.А. Морозова // Теплоэнергетика. – 2007. – № 6. – С. 23-26.

38. Росляков, П.В. Оптимальные условия для сжигания топлива с контролируемым химическим недожогом [Текст] / П.В. Росляков, К.А. Плешанов, И.Л. Ионкин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 4. – С. 17-22.

39. Росляков, П.В. Эффективное сжигание топлив с контролируемым химическим недожогом [Текст] / П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, К.А. Плешанов // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 20-23.

40. Плешанов, К.А. Разработка и исследование способа сжигания топлив с умеренным контролируемым химическим недожогом [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Плешанов Константин Александрович. – М. : МЭИ, 2010. – 20 с.

41. Глебов, В.П. Перспективные воздухоохраные технологии в энергетике [Текст] / В.П. Глебов // Теплоэнергетика. – 1996. – №7. – С.54-61.

42. Капельсон, Л.М. Выбор оптимального решения по использованию рециркуляции газов при сжигании природного газа [Текст] / Л.М. Капельсон, А.Ф. Харитонов, В.В. Голов // Электрические станции. 2001. №10. – С. 7-9.

43. Горбаненко, А.Д. Оптимизация систем рециркуляции газов в горелки с целью снижения выбросов оксидов азота [Текст] / А.Д. Горбаненко, Ю.П. Енякин, И.Э. Буйнявичус // Электрические станции. – 1989. – № 10. – С. 11-13.

44. Сигал, И.Я. Повышение эффективности методов снижения образования оксидов азота в топках котлов [Текст] / И.Я. Сигал, О.И. Косинов, А.Н. Дубомий, С.С. Нижник // Теплоэнергетика. – 1986. – № 7. – С. 6-9.

45. Котлер, В.Р. Упрощенная схема рециркуляции дымовых газов как средство сокращения выбросов оксидов азота [Текст] / В.Р. Котлер, Е.Д. Кругляк, С.Е. Беликов, Б.Н. Васильев // Энергетик. – 1995. – № 1.

46. Фаткуллин, Р.М. Оценка потерь энергии при рециркуляции с подачей дымовых газов на всас дутьевого вентилятора [Текст] / Р.М. Фаткуллин // Теплоэнергетика. – 1997. – № 2. – С. 37-40.

47. Росляков, П.В. Механизм влияния добавок воды и влагосодержания топлива на образование термических и топливных оксидов азота [Текст] / П.В. Росляков // Известия вузов. Энергетика. – 1988. – № 7. – С. 59-64.

48. Кормилицин, В.И. Экономические аспекты сжигания топлива в паровых котлах [Текст] / В. И. Кормилицын. – М. : Изд-во МЭИ, 1998. – 334 с.

49. Лукомявичюс, В.П. О факторах, влияющих на эффективность подавления образования окислов азота вводом влаги в зону горения [Текст] / В.П. Лукомявичюс, Л.М. Цирульников, П.П. Швенягян // Теплоэнергетика. – 1986. – № 7. – С. 9-12.

50. Кормилицин, В.И. Подавление оксидов азота дозированным впрыском воды в зону горения топки котла [Текст] / В.И. Кормилицын, М.Г. Лысков, В.М. Новиков [и др.] // Теплоэнергетика. – 1990. – № 10. – С. 73-78.

51. Енякин, Ю.П. Технологические методы сокращения выбросов оксидов азота [Текст] / Ю.П. Енякин, В.Р. Котлер // Теплоэнергетика. – 1994. – № 6. – С. 17-20.

52. Закиров, И. А. Исследование и внедрение способа нестехиометрического сжигания топлива в газомазутных котлах с целью снижения выбросов оксидов азота [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.04.01 / Закиров Ильгизар Алиахматович. – М : МЭИ, 1999. – 230 с.

53. Росляков, П.В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях [Текст] : [Монография] / П.В. Росляков, И.А. Закиров. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 144 с.

54. Росляков, П.В. Реализация нестехиометрического сжигания мазута с целью снижения выбросов оксидов азота [Текст] / П.В. Росляков,

А.В. Вершинин, А.Э. Зелинский // Электрические станции. – 1991. – № 3. – С. 31-35.

55. Росляков, П.В. Исследование способа нестехиометрического сжигания природного газа и мазута [Текст] / П.В. Росляков, И.А. Закиров, Л.Е. Егорова, И.Л. Ионкин // Теплоэнергетика. – 1997. – № 9. – С. 69-75.

56. Росляков, П.В. Снижение выбросов оксидов азота на котле ТГМЕ-464 электростанции IRU (Эстония) [Текст] / П.В. Росляков // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 45-52.

57. Петров, Ю.И. Снижение выбросов NO_x на котлах ТГМЕ-464 малозатратной реконструкцией горелок [Текст] / Ю.И. Петров, А.А. Меренов, Ю.М. Усман [и др.] // Электрические станции. – 2001. – № 10. – С. 2-6.

58. 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 // Теплоэнергетика. – 2017. – № 12. – С. 27-34.

59. Щеткин, В.С. Результаты испытаний головного Котла БКЗ-420-140НГМ-4, оборудованного вторичным дутьем, при работе на природном газе [Текст] / В.С. Щеткин, В.М. Анохин // Теплоэнергетика. – 1995. – № 8. – С. 13-18.

60. Щеткин, В.С. Результаты испытания котла БКЗ-420-140 НГМ, оборудованного вторичным дутьем, при работе его на мазуте [Текст] / В.С. Щеткин, В.М. Анохин // Теплоэнергетика. – 1996. – № 9. – С. 31-34.

61. Ионкин, И.Л. Пути повышения эффективности двухступенчатого сжигания природного газа и мазута в паровых и водогрейных котлах [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Ионкин Игорь Львович. – М. : МЭИ, 2002. – 20 с.

62. Бреус, В.И. Разработка новых топочно-горелочных устройств для энергетики и промышленности [Текст] / В.И. Бреус, Н.С. Шестаков,

А.Э. Лейкам [и др.] // Надежность и безопасность энергетики. – 2017. – Том 10, № 4. – С. 291–297.

63. Айзен, Б.Г. Горелочные устройства котлов ЗиО [Текст] / Б. Г. Айзен, И. Е. Ромашко, И. А. Сотников. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 144 с.

64. Разработка и исследование на стендах и энергетических котлах различных конструктивных и режимных факторов, обеспечивающих снижение выбросов оксида азота [Текст] : отчет о НИР (промежуточ.) / ОАО «ВТИ» ; рук. Ю.П. Енякин ; исполн.: Ю.М. Усман, В.А. Верещетин [и др.]. – М., 2000. – 108 с. – Арх. № 104842.

65. Винтовкин, А.А. Современные горелочные устройства [Текст] / А.А. Винтовкин, М. Г. Ладыгичев, В. Л. Гусовский, А. Б. Усачев. – М.: Машиностроение, 2001. – 496 с.

66. Вербовецкий, Э.Х. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов [Текст] / под ред. Э.Х. Вербовецкого, Н.Г. Жмерика. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1996. – 270 с.

67. ГОСТ 21204-97. Горелки газовые промышленные. Общие технические требования (с Изменениями № 1, 2) [Текст]. – Взамен ГОСТ 21204-83; введ. 1998-07-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 35 с.

68. Защита окружающей среды при производстве энергии на тепловых электростанциях [Текст] / Под ред. Г.Г. Ольховского, Л.И. Кроппа. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 156 с.

69. Росляков, П.В. Малотоксичные горелочные устройства : Учебное пособие [Текст] / П. В. Росляков М. : Изд-во МЭИ, 2002. – 64 с.

70. Найденов, Г.Ф. Двухстадийное сжигание природного газа в котлах ПТВМ-50 [Текст] : сб. науч. тр. «Окислы азота в продуктах сгорания топлив» / Г.Ф. Найденов, А.С. Куш, А.И. Бойко. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 112-118.

71. Куш, А.С. Разработка и внедрение горелочных устройств двухстадийного сжигания с пониженным выходом оксидов азота к котлам ПТВ [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.13 / Куш Александр Сергеевич. – Киев, 1987.

72. Верещетин, В.А. Опыт создания малотоксичных горелок [Текст] / В.А. Верещетин // Энергетика за рубежом. – 2001. – № 3. – С. 35-42.

73. Gerdes, J. Retrofitting Low-NO_x burners for gas and oil firing. s.l. – 1989 [Text] / J. Gerdes, L. Radak // Joint Symposium on stationary Combustion NO_x Control, 1989. – P. 9-75.

74. Гамбург, Д.Р. Горелочные устройства второго поколения ZEECO FreeJet, обеспечивающие выбросы оксидов азота соответствующие требованиям наилучших [Текст] : Сборник докладов научно-технической конференции «Перспективы развития новых технологий в энергетике России», Москва, 26-27 октября, 2017 / Д.Р. Гамбург, М.М. Григорьев. – М.: ОАО «ВТИ», 2017. – С. 67-71.

75. Takahashi, Y. Development of super-low NO_x PM-burner: technical Review [Text] / Y. Takahashi // Mitsubishi Heavy Industries, Aug. 1979. – P. 1-11.

76. TODD Combustion. Low-NO_x High Efficiency Venturi Regiaster Burner [Электронный ресурс] – режим доступа : <https://www.Johnzinkhamworthy.com/products-applications/burners/>

77. 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.

78. Christman, R. The radian rapid mix burner for ultra-low NO_x emissions. s.l. – 1995 : EPRI/EPA 1995 [Text] / R. Christman, S. Bortz // Joint Symposium NO_x Control, May, 1995.

79. Isaac Chan, Isaac Demonstration of forced internal recirculation (FIR) burner for firetube boilers [Text] / Isaac Chan, Richard Biljetina, Henry Mak, Nancy Wellhausen // Institute of gas technology, 2000. – GRI-00/0105.

80. Knight, R.A. Forced Internal Recirculation Burners for Boilers and Process Heating [Text] / R.A. Knight, D.F. Cygan, J.K. Rabovitser // Gas Technology Institute.

81. US Patent 5350293 Method for two-stage combustion utilizing forced internal recirculation [Text] / M.J. Khinkis, H.A. Abbasi, D.F. Cygan (US); Institute of Gas Technology, Chicago, 111. – Sep. 27, 1994.

82. Roberts, M. An ultra-low emissions forced internal recalculation burner for boilers and process heaters. s.l. [Text] / M. Roberts, M. Khinkis, D. Cygan // International gas research conference, 1995.

83. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости станциями [Текст] : [пер. с англ.] / С. Патанкар ; под ред. В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

84. Patankar, S.V. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three / S.V. Patankar, D.B. Spalding // Dimensional Parabolic Press, 1972.

85. Соболев, В.М. Моделирование турбулентного диффузионного факела прямоточно-вихревой горелки [Текст] : Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (4-й РНКТ) / В.М Соболев, А.Ю. Снегирёв, С.В. Лупуляк, Ю.К. Шиндер. – Москва, 23-27 октября 2006 года. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – С. 316-319.

86. Назаров, А.А. Факельные установки [Текст] : монография / А.А. Назаров, С.И. Поникаров ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Казанский гос. технологический ун-т». – Казань : КГТУ, 2010. – 118 с.

87. Соболев, В.М. Современные технологические решения при разработке топочно-горелочных устройств [Текст] / В.М. Соболев / Новости теплоснабжения. – 2012. – № 10 (146). – С. 23-25.

88. Михайлов, А.Г. Численное моделирование процессов тепломассопереноса при горении газообразного топлива в топочном объеме [Текст] / А.Г. Михайлов, П.А. Батраков, С.В. Терехилов // Естественные и технические науки. – 2011. – № 5 (55). – С. 354-358.

89. Верещетин, В.А. Опыт исследования и наладки бесшлаковочного режима эксплуатации газогорелочных устройств, расположенных в зоне кипящего слоя сжигательного устройства твердых бытовых отходов [Текст] / В.А. Верещетин, С.Г. Штальман, Ю.П. Енякин // Электрические станции. – 2006. – Спец. вып. – С. 34-37.

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

91. ОСТ 108.836.05-82. Горелки газомазутные и амбразуры стационарных паровых котлов. Типы, основные параметры и технические требования. Конструкция и размеры. Методы расчета и проектирования [Текст]. – Введ. 1983-07-01. – 1982. – 59 с.

92. 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.

93. 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.

94. Верещетин, В.А. Исследование процессов горения в горелочном устройстве [Текст] : сборник материалов XXI Международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии» МЭИ, Москва, 19–21 ноября 2013 / В.А. Верещетин, Л.Е. Егорова, К.А. Трифонов, И.В. Морозов. – М. : МЭИ, 2013.

95. Енякин, Ю.П. Малотоксичные горелки как средство снижения выбросов оксидов азота на ТЭС в Российской Федерации [Текст] / Ю.П. Енякин, В.Р. Котлер // Энергетик. – 2006. – № 12. – С. 6-7.

96. Трембовля, В.И. Теплотехнические испытания котельных установок [Текст] / В.И. Трембовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.

97. СО 34.25.514-96 (РД 34.25.514-96) Методические указания по составлению режимных карт котельных установок и оптимизации управления ими [Текст]. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998. – 60 с.

98. РД 153-34.1-26.303-98. Методические указания по проведению эксплуатационных испытаний котельных установок для оценки качества ремонта [Текст]. – М. : ОРГРЭС, 2000. – 47 с.

99. Равич, М.Б. Топливо и эффективность его использования [Текст] / М.Б. Равич. – М.: Наука, 1971. – 358 с.

100. Методика выполнения измерений массовой концентрации бенз(а)пирена в выбросах топливопотребляющих агрегатов [Текст] / Санкт-Петербург : АО ВАМИ (Свидетельство о Государственной метрологической аттестации 2440\199-95\0200 от 15.09.95).

101. РД 34.02.304-95. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций [Текст]. – Введ. 1996-07-01. – М.: АООТ «ВТИ» – АО ЦКТИ, 1996. – 20 с.

102. ГОСТ 27824-2000. Горелки промышленные на жидком топливе. Общие технические требования [Текст]. – Введ. 2003-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2006. – 15 с.

103. Енякин, Ю.П. Результаты комплексных испытаний котла ТГМП-314 ст. №7 ТЭЦ-23 АО Мосэнерго после реконструкции [Текст] / Ю.П. Енякин, Н.А. Зройчиков, В.А. Верещетин [и др.] // Электрические станции. – 2002. – № 2. – С. 10-15.

104. Галас, И.В. Влияние эмульгирования мазута на выбросы вредных веществ [Текст] / И.В. Галас, О.В. Морозов, Ю.М. Усман // Энергоснабжение и водоподготовка. – 2000. – № 3. – С. 69-75.

105. Горбаненко, А.Д. Влияние конструкций и компоновки горелок на содержание вредных веществ в дымовых газах [Текст] / А.Д. Горбаненко, С.Н. Аничков, Ю.М. Усман [и др.] // Теплоэнергетика. – 1982. – № 4. – С. 15-17.

106. Верещетин, В.А. Внедрение малотоксичных горелочных устройств на водогрейных и энергетических котлах [Текст] / В.А. Верещетин // Энергетик. – 2014. – № 2. – С. 65–67.

107. Двойнишников, В.А. Обоснование и выбор основных проектных решений по котлу Е-160-3,9-440 для ГЭС-1 АО Мосэнерго [Текст] / В.А. Двойнишников, М.А. Изюмов, В.М. Супранов // Теплоэнергетика. – 2003. – № 12. – С. 26-32.

108. Галецкий, Н.С. Результаты комплексных испытаний котла Е-160-3,9-440 ГМ ГЭС-1 АО «Мосэнерго» с горизонтальной компоновкой газоходов [Текст] / Н.С. Галецкий, Ю.П. Енякин, А.Л. Шварц [и др.] // Теплоэнергетика. – 2004. – № 9. – С. 8-13.