

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ульяновский государственный технический университет»



На правах рукописи

БУСЫГИН Сергей Валерьевич

**Математическое моделирование и численное исследование снижения  
эмиссии оксидов азота при производстве энергии**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,  
численные методы и комплексы программ

Д и с с е р т а ц и я  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
доцент Ковальногов  
Владислав Николаевич

Ульяновск 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 4  |
| Глава 1. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ<br>ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ<br>ЭНЕРГИИ В ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ .....  | 14 |
| 1.1. Оценка текущего состояния экологически чистого производства<br>энергии на тепловых электростанциях .....  | 14 |
| 1.2. Особенности, преимущества и недостатки существующих технологий<br>по снижению эмиссии оксидов азота .....   | 22 |
| 1.3. Современные методы математического моделирования, их средства<br>и возможности по исследованию процессов горения и эмиссии вредных<br>веществ с уходящими газами и в топке паровых котлов при производстве<br>энергии ..... | 36 |
| Основные результаты и выводы по главе 1 .....  | 46 |
| Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ<br>ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ<br>В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА<br>ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА<br>ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭНЕРГИИ ..... | 49 |
| 2.1. Моделирование в камере сгорания топочного устройства<br>газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной<br>турбулентной метано-воздушной смеси .....  | 52 |
| 2.2. Аналитическое вычисление радиационных характеристик<br>предварительно перемешанной турбулентной смеси при сжигании<br>природного газа.....  | 57 |
| 2.3. Численный метод моделирования тепловых и газодинамических<br>процессов при горении для прогнозирования эмиссии оксидов азота .....  | 62 |
| Основные результаты и выводы по главе 2 .....  | 68 |
| Глава 3. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ<br>МОДЕЛИРОВАНИЮ ГАЗОМАЗУТНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ<br>ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО<br>ТОПЛИВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭНЕРГИИ.....                                | 69 |
| 3.1. Описание объединенного состава, организационной схемы<br>и алгоритма.....   | 69 |

|  |            |
|--|------------|
| 3.2. Представление функциональности реализованного программного комплекса.....   | 78         |
| Основные результаты и выводы по главе 3 .....  | 85         |
| <b>Глава 4. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ .....</b>                   | <b>86</b>  |
| 4.1. Условия проведения вычислительного эксперимента.....  | 86         |
| 4.2. Анализ горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси в горелочном устройстве ГМУ-45 с использованием функциональности реализованного программного комплекса ..... | 92         |
| 4.3. Исследование процессов горения парового котла ТГМЕ-464 с оценкой взаимного влияния струй смеси при многоярусной компоновке в камере сгорания .....  | 100        |
| 4.4. Практическое применение результатов численного исследования образования эмиссии оксидов азота с разработкой и обоснованием эффективных технических решений.....                             | 103        |
| Основные результаты и выводы по главе 4 .....  | 113        |
| <b>ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>116</b> |
| <b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>  | <b>118</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>  | <b>120</b> |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А. Сертификаты участника .....  | 139        |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Свидетельства о государственной регистрации.....   | 141        |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт внедрения результатов работы.....  | 145        |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** От уровня развития энергетики зависят экономический потенциал страны, ее конкурентоспособность на внешнем рынке и благополучие населения. Среди предприятий энергетического сектора нашей страны более 60 % электрической энергии вырабатывается тепловыми электростанциями, и по 17–18 % электрической энергии вырабатывается на гидроэлектростанциях и атомных электростанциях [5]. При работе на природном газе в паровых котлах тепловых электростанций, основной составной частью эмиссии вредных веществ с продуктами сгорания органического топлива, выбрасываемых в окружающую среду, являются термические оксиды азота. Наиболее важным индикатором интенсивности формирования термических оксидов азота является температура в зоне активного горения. Эмиссия оксидов азота оказывает токсичное воздействие, на здоровье человека и животных, а также и растений [7, 8].

Мероприятия по снижению эмиссии оксидов азота по своей типологии подразделяются на две основные группы: режимные и технологические мероприятия. Но технологии по снижению эмиссии оксидов азота при производстве энергии снижают коэффициент полезного действия (КПД) паровых котлов тепловых электростанций, а затраты при внедрении таких технологий зачастую значительно выше платы за выбросы. В этой связи наиболее востребованы именно малозатратные и быстрореализуемые мероприятия [20]. Так, одним из наиболее перспективных методов, подпадающих под это условие, с потенциалом сокращения выбросов до 60 % является рециркуляция дымовых газов [25–29].

Из вышеизложенного следует, что в настоящее время требуется разработка технологий и технических решений, направленных на обеспечение экологически чистого сжигания топлива на объектах генерирующих мощностей энергетической отрасли при одновременном достижении наивысшего КПД паровых котлов тепловых электростанций.

Для изучения закономерностей процессов тепломассообмена и гидрогазодинамики и последующей оптимизации процесса горения метано-воздушной смеси в паровых котлах тепловых электростанций и котельных наиболее эффективным является такой инструмент, как математическое моделирование [30, 34]. Начиная с 90-х гг. XX в. методы математического моделирования успешно применяются для исследования и совершенствования процессов сжигания топлива в энергоустановках.

Математическому моделированию процессов сжигания топлив посвящены работы отечественных и зарубежных авторов, таких как В. А. Виноградов, В. А. Верещетин [72, 103], В. К. Любов [57, 58, 69, 71], С. С. Кутателадзе, В. Е. Козлов [61, 62], П. В. Росляков [15, 17, 23, 45, 65] Н. С. Титова [61, 62], А. А. Юн [98, 99], Xu Bin [75], F. Dupoirieux [78–80], J. M. Fafara [60], M. A. Habib [76, 81] и других с моделированием в прикладных специализированных программных пакетах для моделирования течения жидкостей и газов, межфазных взаимодействий, течений с химическими реакциями и теплообменом методами вычислительной гидрогазодинамики: Ansys (Fluid/CFX) [60–62, 65, 71, 72, 74, 76, 86], STAR-CCM+ [63], Flow Vision [30], SigmaFlame [69, 85], Fire 3D [73].

Во всех представленных разработках сам процесс моделирования горения метано-воздушной смеси в котлах зачастую требует значительных затрат машинного времени из-за вычислительных сложностей сопряженного расчета газодинамики, теплопереноса и детальной химической кинетики. Актуальной является задача по усовершенствованию вычислительного процесса при решении задач моделирования горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси путем снижения затрат машинного времени, повышения точности и достоверности расчетов, разработкой эргономичного комплекса программ при работе с интерфейсом и инструментами вычислительного модуля пакета трехмерного проектирования и прикладных программ по моделированию для совершенствования технологий снижения эмиссии оксидов азота.

Диссертационное исследование непосредственно связано с исполнением п. 26 «Перечня критических технологий Российской Федерации» от 07.07.2011, а также п. 8 «Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации», утвержденных Указом Президента РФ № 899 от 07.07.2011.

**Цель диссертации** – увеличение точности и достоверности математического моделирования с помощью модификации метода математического моделирования, разработки методики численного решения, вычислительного эксперимента для совершенствования технологий снижения эмиссии оксидов азота в энергоустановках с учетом инициируемых технологических воздействий по рециркуляции дымовых газов.

Для реализации цели диссертационного исследования сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Выполнить модификацию метода математического моделирования в сопряженной постановке тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топочного устройства, состоящую в применении уточненного значения массовой диффузии компонентов метано-воздушной смеси для повышения точности и достоверности прогнозирования эмиссии оксидов азота при производстве энергии.

2. Разработать методику численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности (применяемых для моделирования в камере сгорания топочного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси), реализованную комплексом алгоритмов для сокращения вычислительных затрат на процесс расчета горения турбулентной метано-воздушной смеси и обеспечения требуемой точности и достоверности прогнозирования эмиссии оксидов азота.

3. Разработать алгоритм численного исследования закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси, являющийся основой взаимодействия автономных модулей комплекса программ, состоящего в

применении автоматического параметрического моделирования газомазутной горелки.

4. На основе предложенных алгоритмов выполнить разработку и апробирование комплекса программ для проведения посредством вычислительного эксперимента комплексных исследований и отработки технических решений для устойчивого низкоэмиссионного горения перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с учетом инициируемых воздействий.

5. Дать практические рекомендации по снижению эмиссии оксидов азота при производстве энергии на основе математического моделирования горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с установлением закономерностей взаимного влияния струй смеси при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства.

**Объектом исследования** являются закономерности и средства математического моделирования в сопряженной постановке процессов газовой динамики, процессов тепломассопереноса и химической кинетики рабочего тела в камере сгорания с использованием рециркуляции дымовых газов.

**Предметом исследования** является повышение точности и достоверности математического моделирования на основе модификации метода математического моделирования и разработки методики при решении задач в области моделирования тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топочного устройства с учетом массовой диффузии компонентов рециркуляции дымовых газов.

**Методы исследования.** Для исполнения цели и решения поставленных задач в работе использовались методы математического моделирования физических процессов в камере сгорания топочного устройства, численный метод конечных элементов, методы интеллектуального анализа, теория тепломассообмена и гидрогазодинамики, теория дифференциальных уравнений, моделирование в программных средах Компас-3D, STAR-CCM+.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

1. Предложена модификация метода математического моделирования в сопряженной постановке тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топочного устройства, отличающаяся уточнением значения массовой диффузии компонентов метано-воздушной смеси, позволяющая учитывать влияние рециркуляции дымовых газов, что дает возможность с повышенной точностью и достоверностью прогнозировать эмиссию оксидов азота при производстве энергии.

2. Предложена методика для численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности (применяемых для моделирования в камере сгорания топочного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси), реализованная в виде комплекса алгоритмов, отличающаяся применением уточнения радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси и автоматическим заданием густоты расчетной сетки в исследуемых областях, что позволяет сократить вычислительные затраты на процесс расчета горения турбулентной метано-воздушной смеси и обеспечить требуемую точность и достоверность прогнозирования эмиссии оксидов азота.

3. Разработан алгоритм численного исследования закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси, являющийся основой взаимодействия автономных модулей комплекса программ, отличающийся автоматическим параметрическим моделированием газомазутной горелки, что позволяет упростить работу с интерфейсом прикладных программ трехмерного проектирования и прикладных программ для моделирования.

4. Получены в результате математического моделирования и вычислительного эксперимента с применением разработанного комплекса программ закономерности в виде профилей температуры и концентрации оксидов азота по длине факела при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства с рециркуляцией дымовых газов, отличающиеся тем, что



они учитывают взаимное влияние струй смеси, а это позволяет дать практические рекомендации для снижения эмиссии оксидов азота при производстве энергии.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Модифицированный метод математического моделирования горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси позволяет учесть влияние технологических воздействий по рециркуляции дымовых газов, что дает возможность с повышенной точностью и достоверностью прогнозировать эмиссию оксидов азота при производстве энергии. Разработанные для реализации модифицированного метода методика и алгоритмы для численного решения задачи позволяют за счет применения уточненных радиационных характеристик метано-воздушной смеси и автоматического задания густоты расчетной сетки в исследуемых областях уменьшить потребные затраты вычислительных ресурсов. Полученные результаты апробированы и могут быть также распространены на подобные задачи по снижению эмиссии других загрязняющих веществ при производстве энергии.

2. Практическая значимость работы заключается в создании проблемно-ориентированного комплекса программ для моделирования и проведения поисковых исследований эффективности технических решений, направленных на снижение выбросов при горении в камере сгорания топочного устройства предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с учетом иницируемых воздействий. С применением созданного проблемно-ориентированного комплекса программ разработаны и обоснованы эффективные технические решения по оптимизации процесса горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси (пат. РФ на полезные модели № 2021122765 и 2022126426), которые могут применяться в энергетической отрасли, в частности на ТЭС и котельных.

**Соответствие пунктам паспорта специальности.** Исследование, представленное в диссертационной работе, соответствует паспорту

специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: п. 1 – разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; п. 2 – разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; п. 3 – реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; п. 8 – комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модифицированный метод математического моделирования в сопряженной постановке тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топочного устройства с уточнением значения массовой диффузии компонентов метано-воздушной смеси для повышения точности и достоверности прогнозирования эмиссии оксидов азота при производстве энергии.

2. Методика для численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности (применяемых для моделирования в камере сгорания топочного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси), реализованная в виде комплекса алгоритмов, с уточнением радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси и автоматическим заданием густоты расчетной сетки в исследуемых областях для сокращения вычислительных затрат на процесс расчета горения турбулентной метано-воздушной смеси и обеспечения требуемой точности и достоверности прогнозирования эмиссии оксидов азота.

3. Алгоритм численного исследования закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси, являющийся основой

взаимодействия автономных модулей комплекса программ, с применением автоматического параметрического моделирования газомазутной горелки.

4. Построенный на основе предложенных алгоритмов комплекс программ для проведения исследований, вычислительного эксперимента, отработки технических решений для устойчивого низкоэмиссионного горения перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с учетом инициируемых воздействий.

5. Установленные на основе выполненного математического моделирования и вычислительного эксперимента закономерности взаимного влияния струй смеси при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства с рециркуляцией дымовых газов и запатентованные практические рекомендации по снижению эмиссии оксидов азота при производстве энергии.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** обеспечена соотнесением результатов численных исследований с результатами натуральных экспериментов, данными других исследователей, а также тестированием комплекса программ. Применение выбора сетки, обеспечивающей заданную точность вычислений, а также адекватного (подтвержденного экспериментальными результатами) математического моделирования процессов эмиссии оксидов азота при производстве энергии в камере сгорания топочного устройства с использованием разработанного комплекса программ обеспечивает достоверность результатов численных исследований.

**Апробация работы.** Результаты диссертационного исследования были представлены на XXXVIII Сибирском теплофизическом семинаре (Россия, Новосибирск, Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 29–31 августа 2022 г.); XII Международной молодежной научной конференции (Россия, Ульяновск, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, 15–16 октября 2020 года); Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (Россия, Москва, Национальный исследовательский университет «МЭИ», 17–22 октября 2022 г.);

54-й научно-технической конференции (Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет, 27 января – 1 февраля 2020 г.); 18-й Международной конференции по численному анализу и прикладной математике – International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (Греция, Родос, 17–23 сентября 2020 г.); XIII и XIV Международных молодежных научных конференциях по естественно-научным и техническим дисциплинам (Россия, Йошкар-Ола, Поволжский государственный технологический университет, 20–21 апреля 2018 г., 19–20 апреля 2019 г.); 16-й Международной конференции по вычислительным методам в науке и технологиях – International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (Греция, 29 апреля – 3 мая 2020 г.); I и II Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием (Россия, Ульяновск, Ульяновский государственный технический университет, 6–7 октября 2021 года, 5–7 октября 2022 г.); Первой Международной конференции «Искусственный интеллект в технике и науке» – Artificial Intelligence in Engineering and Science (Россия, Ульяновск, 15–18 ноября 2022 г.).

**Реализация результатов работы.** Ряд результатов получены в рамках реализации проектов при поддержке грантами Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-2493.2020.8, 2020–2021 гг. и проект НШ-28.2022.4, 2022–2023 гг.), мегагрантом Правительства Российской Федерации (проект 075-15-2021-584, 2021–2023 гг.), а также грантом Фонда содействия инновациям (заявка СтС-226190).

Разработанный комплекс программ для моделирования и исследования эффективности технических решений с целью снижения выбросов в процессе сжигания органического топлива при производстве энергии успешно используется в Лаборатории междисциплинарных проблем энергетики Ульяновского государственного технического университета и Чебоксарской ТЭЦ-2 филиала «Марий Эл и Чувашии» ПАО «Т Плюс» (имеется акт о внедрении).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 10 статей в ведущих рецензируемых изданиях (6 статей – в зарубежных журналах, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, из них 2 – в журналах, относящихся к квартилю Q1, и 4 статьи – в ведущих российских журналах из перечня ВАК РФ), 2 патента на полезные модели и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** Все работы по теме диссертации осуществлены автором лично или при его основном участии: постановка целей и задач диссертационного исследования; модификация метода математического моделирования; разработка методики и комплекса программ; проведение численных исследований; обработка и обобщение полученных результатов, выводов и заключения диссертационного исследования; патентование результатов интеллектуальной деятельности.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка из 140 источников и приложений. Общий объем – 138 страниц текста, включая 53 рисунка и 4 таблицы.

## Глава 1

# РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭНЕРГИИ В ТОПОЧНЫХ УСТРОЙСТВАХ

### 1.1. Оценка текущего состояния экологически чистого производства энергии на тепловых электростанциях

В настоящий момент согласно Стратегии экологической безопасности РФ до 2025 г. [1] состояние природы на территории России, где сконцентрировано проживает подавляющее большинство жителей страны и расположено большинство производственных и агропроизводственных мощностей, оценивается по экологическим параметрам как неблагоприятное. По оценкам экспертов [1], ежегодные экономические потери, связанные с ухудшением качества окружающей среды, составляют от 4 до 6 % от валового внутреннего продукта страны. Природа на внутригородских и околгородских территориях (с более 70 % численностью жителей страны) испытывает негативное воздействие со стороны таких сфер жизнедеятельности человека, как промышленность, энергетика, транспорт, сельское хозяйство [2].

При анализе мирового объема эмиссии вредных веществ после подписания Киотского протокола, ратифицированного 192 странами мира, можно отметить особую инерционность снижения выбросов именно в энергетической отрасли. Так, в общемировой энергетической отрасли к максимальному эффекту по снижению объемов эмиссии вредных веществ относят: повышение коэффициента полезного действия тепловых электростанций (ТЭС) [3], увеличение доли производства электроэнергии без сжигания органического топлива на атомных (АЭС) и гидроэлектростанциях (ГЭС), замещение сжигаемого угля газом и мазутным топливом [4].

Среди предприятий энергетического сектора нашей страны более 60 % электрической энергии вырабатывается именно ТЭС, и по 17–18 %

электрической энергии вырабатывается на гидроэлектростанциях и атомных электростанциях. В соответствии с [5] до 2026 г. ожидается ежегодный рост выработки электрической энергии на величину от 0,3 до 2,9 % от объема выработки 2020 г., при этом отмечается устойчивый рост относительного процента ТЭС в структуре производства электроэнергии по Единой энергетической системе (ЕЭС) России – до более чем 66,2 % (рисунок 1.1).

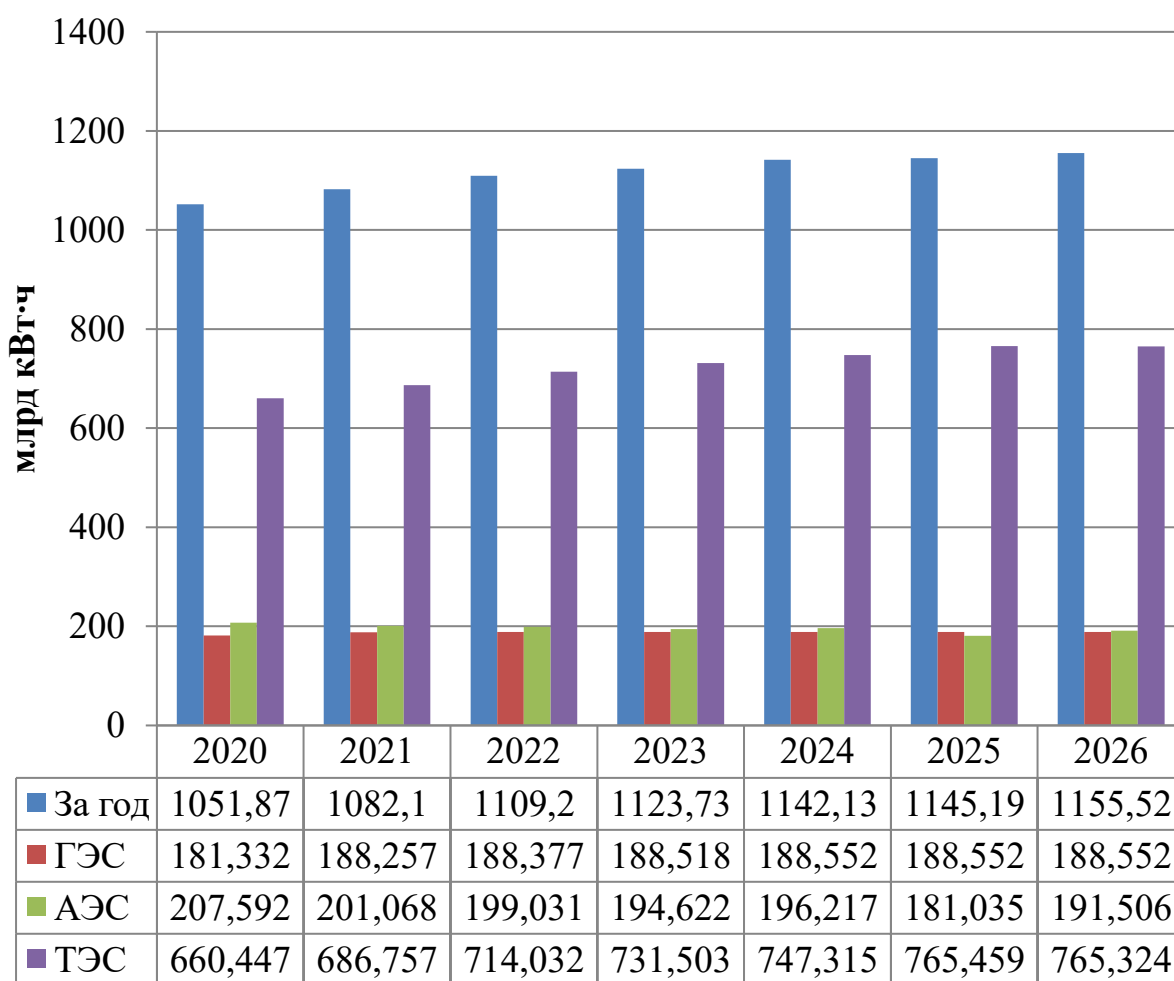


Рисунок 1.1 – Производство электроэнергии по ЕЭС России [5]

Электрическая энергия на ТЭС вырабатывается сжиганием ископаемого органического топлива: газа, угля, нефтетоплива и прочего топлива. В соответствии с [5] потребность газа в структуре потребности ТЭС ЕЭС России в органическом топливе до 2026 г. остается на уровне 72 % (от 71,7 до 72,5 %) при доле угля в 23 % (от 22,7 до 23,4 %) и 5 % прочего и нефтетоплива

(рисунок 1.2). Такое распределение соответствует политике низкоуглеродного развития, к которой осуществляет переход большая часть стран [6].

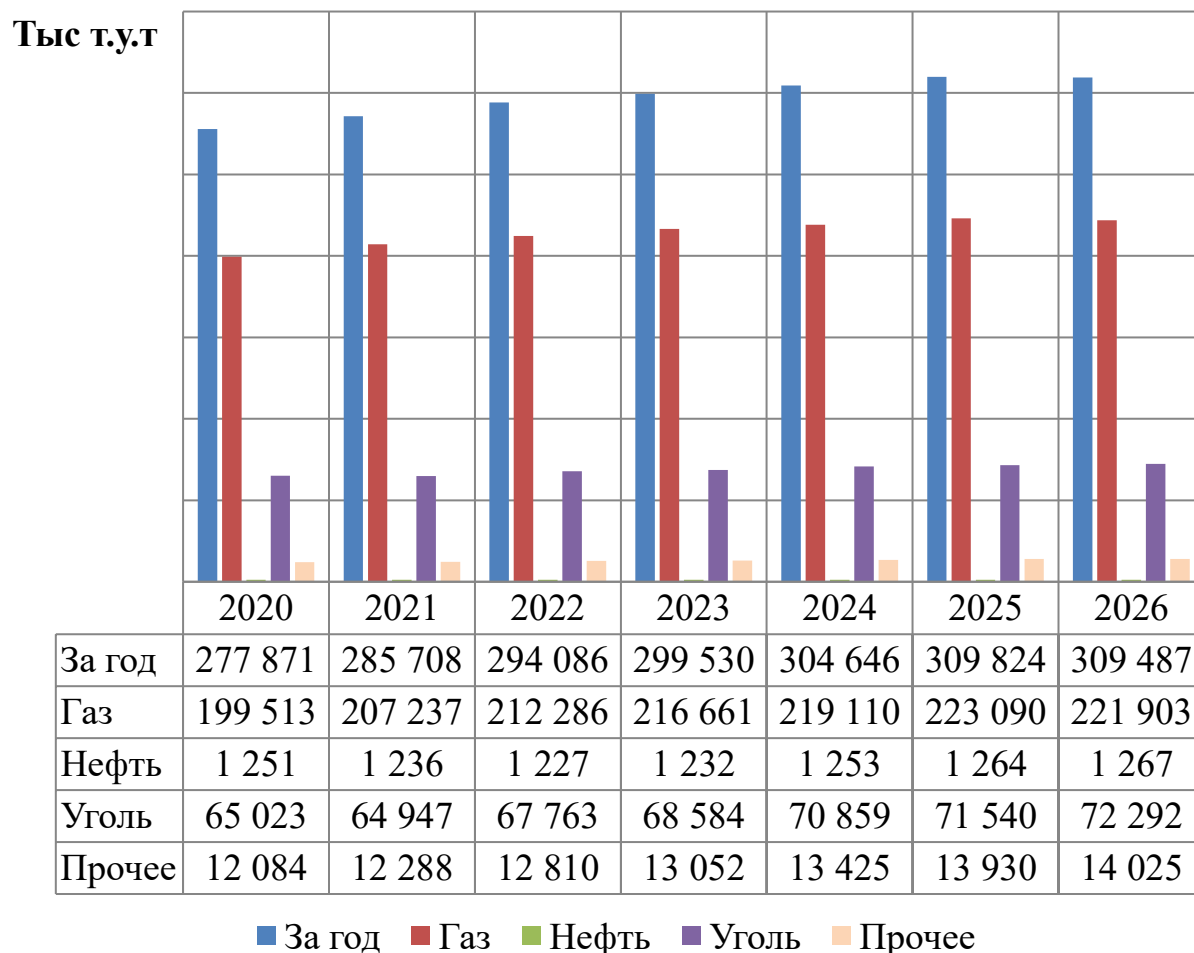


Рисунок 1.2 – Потребность ТЭС в органическом топливе  
в период с 2020 по 2026 г. по ЕЭС России

Представленные на рисунках 1.1, 1.2 данные демонстрируют, что при ежегодном увеличении производства электроэнергии в период с 2020 по 2026 г. по ЕЭС России до 2,9 % от величины производства электроэнергии в 2020 г., имеет место устойчивое увеличение объема сжигания природного газа, до 3,9 % от величины сожженного газа в 2020 г. Важно отметить, что преимущественно производство электроэнергии по ЕЭС России осуществляется на тепловых электростанциях – от 62 до 67 % в период с 2020 по 2026 г.



При работе на природном газе в паровых котлах ТЭС основной составной частью эмиссии вредных веществ с продуктами сгорания органического топлива, выбрасываемыми в окружающую среду, являются термические оксиды азота. Превышение концентраций оксидов азота во вдыхаемом воздухе оказывает токсичное воздействие как на здоровье человека и животных, так и растений [7, 8]. Так, в работе [87] при моделировании процесса горения органического топлива на ТЭС без «термического» механизма отмечена несходимость результатов вычислительного эксперимента и натурных замеров.

К наиболее распространенным загрязняющим атмосферу веществам, по данным Росприроднадзора, которые поступают из дымовой трубы с продуктами сгорания от стационарных источников, относятся: оксид углерода, твердые вещества, углеводороды, диоксид серы, летучие органические соединения, оксиды азота. При этом величина эмиссии оксидов азота за период с 2019 по 2020 г. составила более 5,4 млн т, а это более 1/10 части всех выбросов в атмосферу.

Для поэтапного сокращения негативного воздействия ТЭС на атмосферу европейское законодательство и законодательство РФ устанавливают нормативы удельных выбросов от энергетических установок – до и более 300 МВт. Во всех странах устанавливаются низкие значения предельно допустимых концентраций (ПДК), которые периодически пересматриваются в сторону уменьшения. Различают среднемесячную, среднесуточную, часовую и максимально разовую (отобранную в течение последних 20 мин) концентрацию оксидов азота.

Для более эффективной борьбы с увеличением выбросов оксидов азота и проведения более точной и ясной оценки вклада каждого источника в эмиссию вредных веществ в окружающую среду с 70–80-х гг. XX в. было принято понятие предельно допустимых выбросов (ПДВ). Нормы ПДВ дифференцируются по видам топлива, а иногда и по мощности котельных установок. Необходимым и достаточным условием выполнения ПДВ является неперевышение ПДК.

В Российской Федерации в текущий момент нормативы удельных выбросов от стационарных источников закреплены в межгосударственных стандартах [9, 10]. Стандарты регулируют нормативы эмиссии вредных веществ для установок мощностью до и более 300 МВт, введенных в работу на ТЭС в XX в. и в начале XXI в. На рисунке 1.3 представлены действующие нормативы удельных выбросов установок в РФ, введенных в работу до 31 декабря 2000 г.

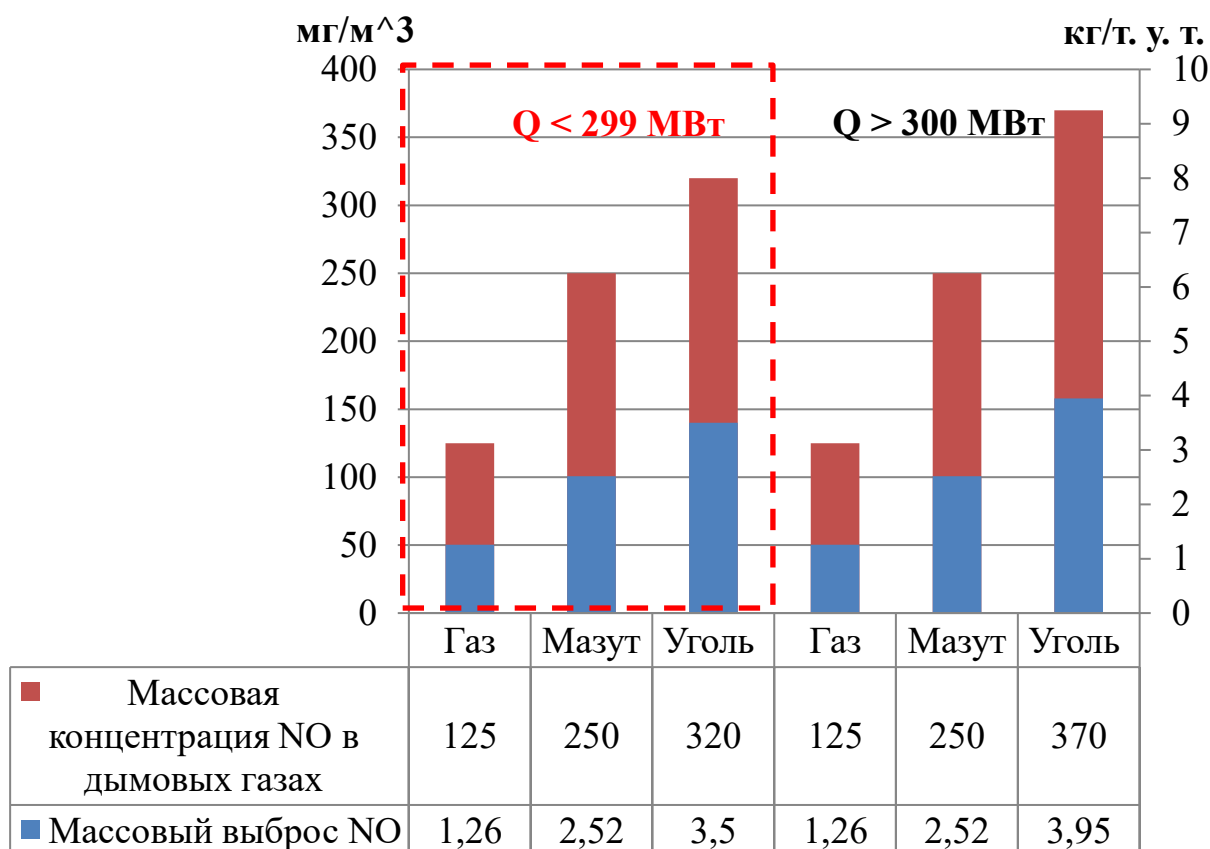


Рисунок 1.3 – Действующие нормативы удельных выбросов в РФ [9, 10]

Расчет и процесс взыскания платы за негативное воздействие на окружающую среду при эмиссии выше принятых в межгосударственных стандартах регулируется Постановлением Правительства РФ № 255 от 3 апреля 2017 г.

При реализации Федерального закона «Об охране окружающей среды» Росстандартом [11] разработан и утвержден 51 информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (НДТ), порядок установления которых закреплен правилами определения технологии в качестве наилучшей [12] с периодичностью их актуализации не реже одного раз за 10 лет. К производству электроэнергии тепловыми электростанциями (ОКПД2 35.11.10.111, 35.11.10.112, 35.11.10.113) непосредственно относится один из справочников ИТС 38–2017 [13].

Согласно п. 6. один из рекомендуемых критериев отнесения процесса к НТД – это «...наименьший уровень негативного воздействия на окружающую среду в расчете на единицу времени или объем производимой продукции (товара), выполняемой работы, оказываемой услуги либо соответствие другим показателям воздействия на окружающую среду, предусмотренным международными договорами Российской Федерации» [14]. При этом величина негативного воздействия и возможность снижения удельных значений эмиссий для выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух оцениваются на основании таких показателей, как объем (масса) выбросов загрязняющих веществ до очистки (после очистки) в расчете на тонну продукции.

Согласно справочнику [13] для снижения выбросов загрязняющих веществ рекомендуется внедрение как одной, так и нескольких закрепленных справочником технологий, внедрение которых обуславливается такими факторами, как вид сжигаемого топлива, мощность агрегата, требуемая величина содержания вредного вещества в образовавшихся продуктах сгорания [15].

В Российской Федерации в настоящий момент предусмотрены меры материальной мотивации снижения негативного воздействия на окружающую среду в том числе внедрением НДТ. Так, при расчете платы за негативное воздействие на окружающую среду в порядке исчисления платы предусмотрены коэффициенты: «0» – за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ в пределах технологических нормативов после внедрения наилучших доступных технологий на объекте, оказывающем

негативное воздействие на окружающую среду, «25» – в пределах временно разрешенных выбросов, «100» – при превышении закрепленных декларацией [16].

Молекулярный азот воздуха и азотосодержащие элементы органических топлив служат в качестве источника оксидов азота в продуктах сгорания топлива. Механизмы образования оксидов азота в продуктах сгорания топлива подразделяют на 3 основных подтипа:

- топливные окислы азота;
- быстрые оксиды азота;
- термические оксиды азота.

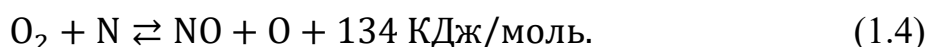
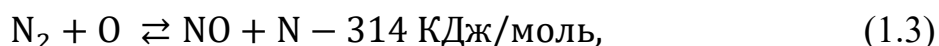
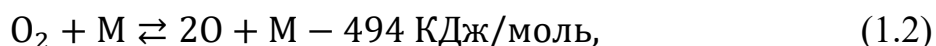
В топках энергетических и водогрейных котлов образование всех видов оксидов азота наблюдается в зоне, в которой температура выше 1800 К, называемой зоной активного горения. Конечный выход NO полностью зависит от основных характеристик зоны активного горения: максимальной действительной температуры горения и времени пребывания в данной зоне; отношения объема воздуха в топливовоздушной смеси к теоретически необходимому объему – избытка воздуха. Известно, что при сжигании такого органического топлива, как природный газ и топочный мазут, именно величина максимальной действительной температуры оказывает преимущественное влияние на эмиссию NO.

Так, при температуре от 1170 до 1350 К начинается формирование быстрых NO, а прекращается в полном объеме при температуре от 50 до 100 К. Оксиды азота, формирующиеся по «термическому механизму», появляются при температуре более 1800 К, а оксиды азота, формирующиеся по «топливному механизму» – при температуре от 1100 до 1400 К [17]. Исходя из вышеизложенного и учитывая уровень среднеинтегральной температуры (>1400 °С) при окислении метана видно, что на эмиссию вредных веществ с продуктами сгорания энергетических и водогрейных котлов ТЭС и котельных оказывают влияние именно термические оксиды азота (далее – NO<sub>x</sub>).

NO<sub>x</sub> образуются в результате окисления молекулярного азота атомарным кислородом, а формальная кинетика объясняется следующей реакцией:



Наиболее важным индикатором интенсивности формирования  $\text{NO}_x$  является температура в зоне активного горения. В цепной реакции окисления азота и воздуха, разработанной советскими учеными Зельдовичем Я. Б., Садовниковым П. Н., решающая роль отведена свободным атомам кислорода и азота, механизм состоит из следующих эндотермических и экзотермических взаимодействий:



Суммарная энергия активации  $E$  взаимодействия складывается из энергии, необходимой для образования атома кислорода по реакции (1.1)  $E_1 = 247 \text{ КДж/моль}$  и энергии активации по реакции (1.3)  $E_2 = 314 \text{ КДж/моль}$ .

Так как очень высока энергия активации ( $E_2$ ) по реакции (1.3), то это свидетельствует о зависимости данной реакции от температуры скорости реакции образования  $\text{NO}_x$ . В большинстве топочных камер время сгорания топливовоздушной смеси находится в диапазоне от 1 до 5 с, и до 24 с затрачивается для формирования равновесной концентрации ( $T = 1600 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Следовательно  $\text{NO}_x$  можно уменьшить, понизив температуру в реакционной зоне и ограничив поставку кислорода за счет поддержания низкого коэффициента избытка воздуха [18]. Уменьшения  $\text{NO}_x$  можно добиться за счет впрыска влаги в зону горения, секционирования топки двухсветными экранами, снижения температуры горячего воздуха, двух- и трехступенчатого сжигания, рециркуляции дымовых газов и т.п.

Изменение концентрации  $\text{NO}_x$  во времени по реакции (1.1) может быть описано взаимодействием [19]:

$$\frac{dC_{\text{NO}}}{d\tau} = K_1 \cdot C_{\text{N}_2} \cdot C_{\text{O}_2} - K_2 \cdot (C_{\text{NO}})^2,$$

где  $C_{N_2}$ ,  $C_{O_2}$  – концентрации азота и кислорода в воздухе, г/м<sup>3</sup>;  $C_{NO}$  – равновесная концентрация NO, г/м<sup>3</sup>;  $K_1 = 6 \cdot 10^6 \cdot [\exp - E_1/RT]$  и  $K_2 = 3 \cdot 10^6 \cdot [\exp - E_2/RT]$  – константа скорости прямых и обратных реакций.

В условиях равновесия реакции (1.1)  $\frac{dC_{NO}}{d\tau} = 0$  и при известных значениях констант равновесия концентрация NO определяется выражением [19]:

$$C_{NO} = 4,6 \cdot \sqrt{C_{O_2} \cdot C_{N_2}} \cdot \exp\left(-\frac{90 \cdot 10^3}{RT}\right).$$

## 1.2. Особенности, преимущества и недостатки существующих технологий по снижению эмиссии оксидов азота

Мероприятия по снижению выбросов NO<sub>x</sub> по своей типологии подразделяются на две основные группы: режимные и технологические мероприятия. Все технологические мероприятия направлены на снижение температуры в зоне активного горения и уменьшение концентрации кислорода в этой зоне.

Для снижения величины массовой концентрации NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания при сжигании в паровых котлах ТЭС и котельных природного газа и топочного мазута за технологические способы подавления NO<sub>x</sub> принимаются:

- технологии по понижению температуры в реакционной зоне – впрыск влаги в реакционную зону топочного пространства, рециркуляция продуктов сгорания, снижение температуры горячего воздуха топливовоздушной смеси, разделение топочной камеры двухсветными экранами, рассредоточение факела горелочного устройства по высоте топочного пространства, и комбинации данных технологий;
- технологии по ограничению поставки кислорода в реакционной зоне – режим нестехиометрического и двух- и трехступенчатого сжигания, горелочные устройства с задерживающим смесеобразованием или регулируемым коэффициентом  $\alpha$  в первичном воздухе и комбинации данных технологий;

– совместное сжигание разных типов топлив, специальные конструкции горелочных устройств и формы их амбразур и комбинации данных технологий.

На настоящий момент в России затраты на внедрение технологий для уменьшения эмиссии  $\text{NO}_x$  зачастую значительно выше платы за выбросы, в этой связи наиболее востребованы именно малозатратные и быстрореализуемые мероприятия [20]. Так, из анализа [13] следует, что из наиболее эффективных и принятых к рассмотрению технологий с учетом потенциального сокращения выбросов по эксплуатационному опыту, времени и экономических затрат на реализацию технологии относят: рециркуляцию дымовых газов, двухступенчатое сжигание, малотоксичные горелки (рисунок 1.4).

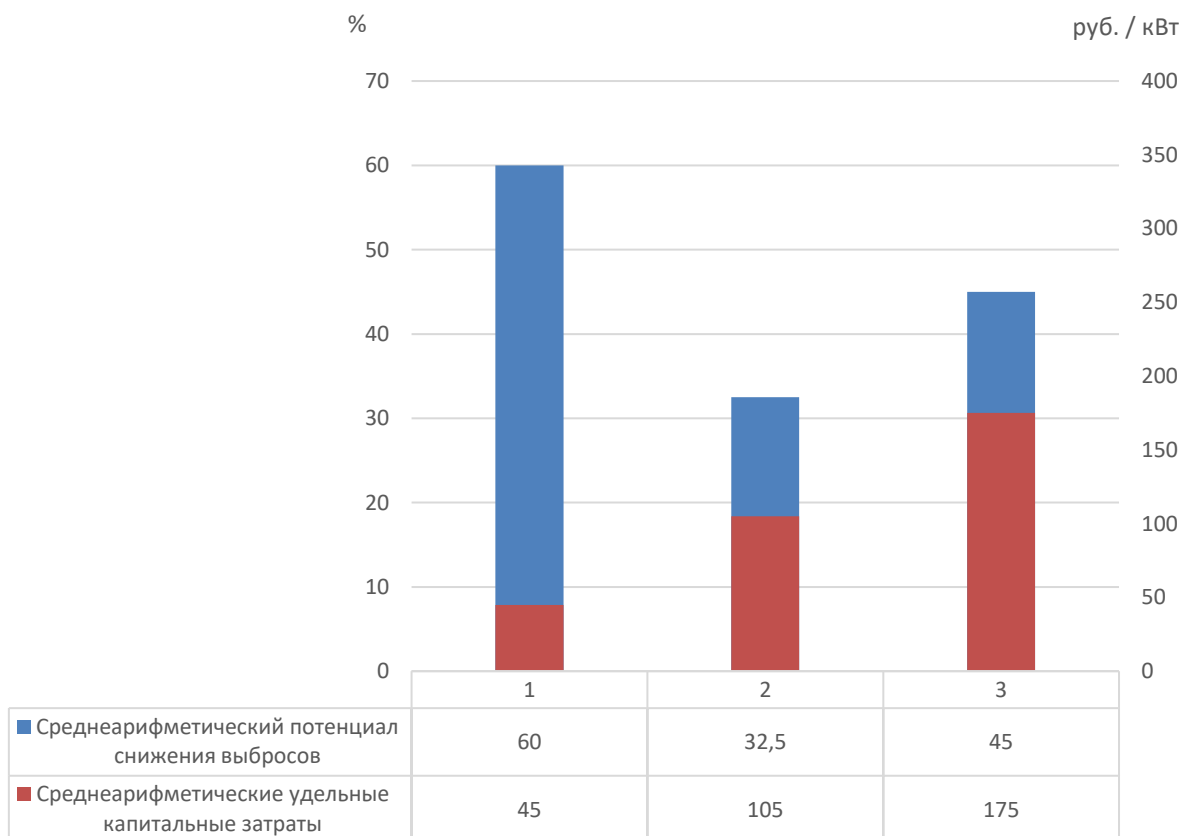


Рисунок 1.4 – Сравнение технологий, направленных на подавление  $\text{NO}_x$ , при сжигании природного газа: 1 – рециркуляция дымовых газов, 2 – двухступенчатое сжигание; 3 – малотоксичные горелки [13]

Помимо данных методов, в схемах ТЭС применяется очистка дымовых газов. В работе [47] предложено применение в технологической схеме очистки продуктов сгорания селективно каталитическое или некаталитическое восстановление  $\text{NO}_x$  аммиаком или другими аминсодержащими восстановителями. Натурные испытания проводились на энергетическом котле, работающем на природном газе ГЭС-1 «Буккау» суммарной производительностью 100 т/ч при давлении пара 90 кгс/см<sup>2</sup> и температуре 490 °С. Результаты показали, что содержание непрореагировавшего аммиака в очищенных газах составляло 5–15 ppm со степенью восстановления  $\text{NO}_x$  до 48 %. Один из основных результатов приведенного исследования – представлена возможность снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  от энергетических котлов на 80 % и более с одновременной минимизацией выбросов вторичного загрязнителя – аммиака. В работе [49] представлено описание ряда каталитических технологий удаления оксидов азота при температуре уходящих газов от автотранспорта и промышленных предприятий ниже 300 °С. В последнее время активно ведутся работы по созданию каталитических систем, обеспечивающих высокую эффективность удаления  $\text{NO}_x$ , с рабочим интервалом температур уходящих газов 140–350 °С. В качестве восстановителя в работе [50] предложено применить активированные угли, произведенные из различных биомасс (из-за их распространенности, низкой стоимости), а щелочные и переходные металлы использовались в качестве каталитически активных фаз для получения ряда металлов, нанесенных на активированный уголь, для каталитического восстановления  $\text{NO}_x$ . Также в технологической схеме очистки продуктов сгорания применяется селективно некаталитическое восстановление  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания органических топлив [48].

При достаточно высокой степени подавления эмиссии  $\text{NO}_x$  себестоимость реализации данных технологий на действующих энергоустановках требует капитальных затрат (900–1500 руб./кВт) [13] – более чем в 20 раз выше, чем для реализации рециркуляции дымовых газов, в 10 раз выше, чем для



двухступенчатого сжигания, в 6 раз выше, чем для установок малотоксичных горелок.

**Нестехиометрическое и ступенчатое сжигание.** При ограничении поставки кислорода в реакционной зоне естественным путем снижается образование оксидов азота. Уменьшение коэффициента  $\alpha$  возможно лишь до тех пор, пока это не приводит к резкому росту потерь с химическим недожогом. Например, в опытах на газовом котле ТГМ-94 снижение коэффициента воздуха с 1,07 до 1,025 привело к уменьшению выбросов оксидов азота более чем на 40 %, потери тепла с химическим недожогом увеличились до 0,2 %. При этом снижается расход электроэнергии на собственные нужды. Последовательное сжигание топлива с пониженным содержанием кислорода во второй зоне горения, помимо паровых котлов ТЭС, реализовано и на некоторых энергетических газотурбинных установках [21].

При многоярусном расположении горелок эффективным средством сокращения величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания может оказаться нестехиометрическое сжигание с организацией в топочном пространстве отдельных восстановительных (первая зона) и окислительных зон (вторая зона). Важной особенностью данного метода является сохранение общей величины коэффициента  $\alpha$ . В первой зоне горения сокращение величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  осуществляется за счет недостатка  $\text{O}_2$ , а во второй зоне – из-за уменьшения температуры горения. На практике это происходит за счет разбаланса коэффициента избытка воздуха.

Внедрение нестехиометрического сжигания позволяет снизить эмиссию  $\text{NO}_x$  до 35–50 % без ухудшения его основных технико-экономических показателей.

Специалистами фирмы Mitsui Babcock Energy Limited (Великобритания) предложен способ усиленного двухступенчатого сжигания, основным отличием которого является наличие дополнительного дутьевого вентилятора для создания высоконапорных струй третичного воздуха. Реализация данного метода на пылеугольном котле в Португалии позволила достигнуть снижения

концентрации  $\text{NO}_x$  с  $780 \text{ мг/м}^3$  при умеренной подаче третичного воздуха до концентрации до  $640 \text{ мг/м}^3$ , при максимально-возможной подаче третичного воздуха – до  $480 \text{ мг/м}^3$  [22].

Двухступенчатое сжигание также является одним из эффективных и универсальных способов подавления образования  $\text{NO}_x$ . Двухступенчатое сжигание осуществляется следующим образом: через основные горелочные устройства в топочное пространство подается топливовоздушная смесь при коэффициенте  $\alpha < 1$ , а необходимая для полного сгорания топлива часть воздуха поступает в топочное пространство через горелочные устройства верхних ярусов (без подачи топлива) или специальные сопла/шлицы над верхним уровнем горелочных устройств по углам/задней стене топочного пространства. В этом случае снижение выхода термических и топливных  $\text{NO}$  на начальном участке факела обеспечивается за счет недостатка кислорода, а во второй ступени благодаря уменьшению температуры горения. При работе на природном газе и/или мазутном топливе в паровых котлах ТЭС снижение величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания паровых котлов может достигать до 60–75 %, соответствуя величинам в действующих нормативах. На таких котлах возможно использование трехступенчатого сжигания. При его реализации 75–90 % топлива сжигается в первой зоне с пониженным избытком воздуха; 10–25 % топлива подается во вторую зону с пониженным избытком воздуха. В первой и второй зоне общий суммарный коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 0,9–0,95$ . На третьей ступени подается воздух для полного сгорания топлива.

Работы по уменьшению величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  на паровом агрегате ТГМЕ-464 с использованием малотоксичной горелки и нестехиометрического сжигания природного газа проведены в работе [23]. Методом компьютерного моделирования процессов горения в топке и образования  $\text{NO}_x$  с помощью программных продуктов Ansys исследовались условия работы малотоксичной горелки, а затем натурные исследования по наладке малотоксичных режимов сжигания и составлению режимной карты. Показано, что на максимальных нагрузках содержание оксидов азота в дымовых

газах составляет 200–210 мг/м<sup>3</sup>, а на минимальной нагрузке ( $D = 240$  т/ч) – 115 мг/м<sup>3</sup>. Установлено, что на котле ТГМЕ-464 трудно осуществить нестехиометрическое сжигание из-за сложности организации окислительно-восстановительных зон горения в теплонапряженной топочной камере и неравномерности температуры горячего воздуха (по ширине топочного пространства) подаваемого перед регенеративным воздухоподогревателем.

В работе [24], напротив, показана возможность организации нестехиометрического сжигания специалистами Всероссийского теплотехнического института на котлах ТГМЕ-464 за счет перераспределения топлива или воздуха между ярусами горелок. Впервые этот метод был осуществлен в 1994 г. на ТЭЦ-11 Мосэнерго за счет изменения конструкции газораздающих частей горелок, что позволило снизить эмиссию  $\text{NO}_x$  до 40 %. Затем данный метод был опробован на котле ТГМЕ-464 Смоленской ТЭЦ-2, где было получено (с учетом индивидуальных особенностей работы котла) оптимальное соотношение расходов природного газа по ярусам горелок – 39/61 (верх/низ), что позволило снизить эмиссию  $\text{NO}_x$  на 40 % при нагрузке котла, близкой к номинальной. Показано, что переход на нестехиометрическое сжигание не влияет на температуру уходящих газов и КПД котла, которые зависят от нагрузки котла и температуры холодного воздуха.

**Рециркуляция продуктов сгорания в реакционную зону топочного пространства.** Рециркуляция дымовых газов – одна из самых простых технологий снижения в реакционной зоне температурного уровня и концентрации кислорода в зоне горения, которая успешно реализуется на предприятиях и тепловых электростанциях как России, так Европы [25]. Из анализа рисунка 1.4 видно, что рециркуляция дымовых газов с потенциалом снижения выбросов до 60 % имеет удельные капитальные затраты в 2 раза ниже двухступенчатого сжигания и в 7 раз ниже установки малотоксичных горелок. Конечно, данные показатели для каждого типа котлов определяются исходя из типа агрегата и имеют оценочный характер. Рециркуляция продуктов сгорания в топочную камеру ведет к снижению температуры факела и выравниванию

температурных полей в топке, что приводит к интенсивному подавлению образования  $\text{NO}_x$ .

Наибольший эффект при реализации данной технологии достигается при сжигании природного газа. Величина эффекта в части снижения величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания в паровых котлах зависит от таких показателей, как:

- доля подачи рециркуляции дымовых газов, %;
- место отбора дымовых газов;
- место ввода дымовых газов в топочную камеру/горелочное устройство;
- распределение дымовых газов по объему топочной камеры.

При сжигании метано-воздушной смеси наибольший эффект достигается при подаче дымовых газов непосредственно в топливо (до 3,5–4,5 % на каждый процент рециркуляции). Наибольшее распространение нашли схемы, где газы рециркуляции вводятся в первичный воздух с уменьшением выхода величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания в паровых котлах до 60 %, а оптимальная доля подачи рециркуляции дымовых газов находится в диапазоне до  $r \leq (15\text{--}22 \%)$ . Последующий рост доли подачи рециркуляции дымовых газов приводит к снижению КПД парового котла за счет снижения температуры горения и химического недожога.

Существует три способа подачи рециркулирующего газа в воздухопроводы. Первый способ: отбор дымовых газов перед воздухоподогревателем при температуре свыше 300 °С и ввод их в тракт подачи воздуха в топочное пространство; характеризуется минимальным снижением КПД котла. В этом случае рециркулирующие газы транспортируются специальным дымососом, который позволяет регулировать долю подачи рециркуляции дымовых газов в диапазоне  $r \leq (0\text{--}22 \%)$ . Второй способ: отбор дымовых газов с температурой 130–160 °С после воздухоподогревателя; характеризуется меньшими, по сравнению с первым способом, затратами на обслуживание дымососа рециркулирующих газов и общей стоимостью на реализацию способа. Второй способ имеет существенные недостатки – длинные газоходы и дополнительную

нагрузку на дымосос. Третий способ применяется при стесненной компоновке и осуществляется установкой перемычки между газоходом за дымососом и воздухопроводом перед дутьевым вентилятором. Данный способ рециркуляции самый дешевый, но степень рециркуляции, как правило, не превышает  $r < (12-15 \%)$  из-за дополнительной нагрузки на дутьевой вентилятор и дымосос.

Ограниченность применения рециркуляции дымовых газов связана со снижением экономических показателей котла. КПД котла снижается на 0,01–0,03 % на каждый 1 % степени рециркуляции за счет повышения температуры уходящих газов.

В работе [26] проведено сравнение экологических и экономических параметров мероприятий, направленных на подавление эмиссии  $\text{NO}_x$ . Работа была выполнена в основном для изучения наилучших доступных технологий в рамках Директивы IPPC. Согласно представленным материалам рециркуляция дымовых газов при максимальной доступности и эффективности подавления до 75 % (для газообразного топлива) имеет стоимость установки в 2,5 раза меньше организации ступенчатого сжигания и установки горелок специальной конструкции. На эффективность снижения  $\text{NO}_x$  от подачи газов рециркуляции непосредственно в горелочное устройство влияет место их ввода и конфигурация амбразуры горелки, воздействующих на интенсивность процессов перемешивания сред, истекающих из каналов горелки. На это в работе [27] указывает вид полей составной струи на срезе амбразуры горелки. Наименьшая концентрация оксидов азота, в данном случае для вихревых горелок, наблюдается в горелке с отдельно выделенной трубой для подачи газов рециркуляции. Биконические амбразуры позволяют добиться более интенсивного подавления  $\text{NO}_x$ , наименьшего – конфузорного типа.

В работе [28] проведено исследование изменения экологических характеристик котла ДКВр-4/13 при рециркуляции продуктов сгорания, оснащенного двумя газомазутными горелками типа ГМГ-2,0. Исследование проводилось в пакете прикладных программ Phoenix 2008 с применением  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности, которая дает наилучшие результаты при расчете течений с закруткой. В ходе исследования подтверждено, что основной вклад

в образование оксидов азота вносит термический механизм. Анализ полученных в ходе расчетов результатов показал, что для различных способов рециркуляции гидродинамика существенно не изменяется, а снижение пика локальной температуры больше при равномерной подаче газов рециркуляции, в данном случае рост рециркуляции на 10 % ведет к 50-градусному снижению максимальной температуры. При этом обеспечивается снижение эмиссии оксидов азота на 50–70 % при доле рециркуляции до 20 %.

В 2000-х гг. опыты были продолжены на Липецкой ТЭЦ-2 [29], где также проводилась модернизация штатных горелок ГМУ-45 за счет рассверливания отверстий в горелках нижнего яруса и уменьшения числа отверстий для подачи газа в горелках нижнего яруса и рециркуляции дымовых газов. Влияние степени рециркуляции дымовых газов на выход  $\text{NO}_x$  при различных нагрузках котла представлено на рисунке 1.5.

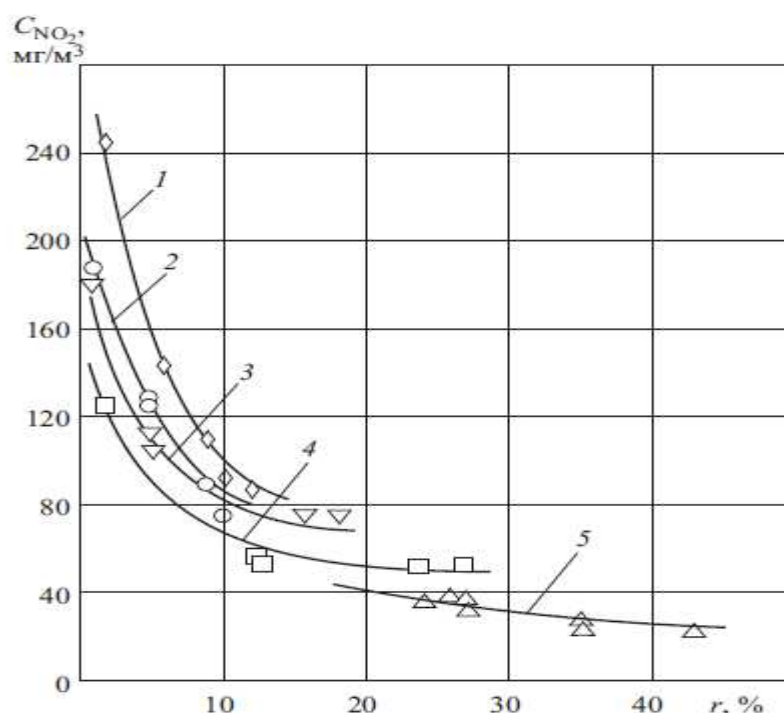


Рисунок 1.5 – Соотношение степени рециркуляции к массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в диапазоне тепловых нагрузок энергетического котла Липецкой ТЭЦ-2 типа ТГМЕ-464 [113] (прямая 1: 470–480 т/ч; прямая 2: 450–460 т/ч; прямая 3: 400–450 т/ч; прямая 4: 300–355 т/ч; прямая 5: 250–255 т/ч)

Из рисунка 1.5 видно, что при  $r = 7\%$  обеспечивается выполнение ГОСТ Р 50831–95 на максимальной нагрузке котла по выбросам  $\text{NO}_x$ , равное  $125 \text{ мг/м}^3$ . Таким образом, внедрение нестехиометрического сжигания в сочетании с рециркуляцией дымовых газов в работе [29] обеспечило снижение  $\text{NO}_x$  до допустимой концентрации так же, как и для новых котельных установок [9, 10].

В работе [34] описано экспериментальное исследование лабораторной установкой с применением средств математического моделирования влияния рециркуляции дымовых газов (рециркулирующий газ смешивается с окислителем перед подачей в горелку) при сжигании природного газа. Установлено, что по мере увеличения степени подачи газов рециркуляции до  $20\%$  эмиссия  $\text{NO}$  уменьшилась примерно на  $85\%$ , при этом нестабильность горения может быть связана с уровнем выбросов  $\text{NO}_x$  в горелках с предварительным смешением. В исследовании [32] проведено моделирование работы диффузионного газового котла с рециркуляцией дымовых газов. В ходе моделирования определено, что рециркуляция дымовых газов позволяет эффективно снизить температуру топки и выбросы оксидов азота. Величина снижения при  $r = 20\%$  может достигать до  $70\%$  при общем среднем снижении максимальной температуры до  $130\text{ }^\circ\text{C}$ . Помимо наибольшей эффективности снижения  $\text{NO}_x$ , рециркуляция дымовых газов в пристенных областях оказывает минимальное уменьшение температуры факела, что снижает возможность возникновения зон с химической неполнотой сгорания топлива. В работе [38] проведено исследование влияния варианта ввода газов рециркуляции на снижение  $\text{NO}_x$  при сжигании метано-воздушной смеси в паровом котле ТГМ-84Б, в котором установлено, что подвод рециркуляции в дутьевой воздух является самым эффективным способом: при  $r = 5\%$  он позволяет снизить эмиссию  $\text{NO}_x$  на  $20,4\%$ , а при  $r = 20\%$  – на  $56,6\%$ . Самым неэффективным способом подачи газов рециркуляции является рециркуляция в подтопки энергетического котла: ввод  $1\%$  газов рециркуляции способствует снижению выбросов  $\text{NO}_x$  на  $1\%$ .

Помимо газомазутных котлов, рециркуляция дымовых газов оправдывает свою реализацию:

– *на пылеугольных паровых котлах*: в работе [31] проведено исследование влияния внутренней рециркуляции (0–30 %) дымовых газов на пылеугольном котле 55 МВт при совместном сжигании угля и/или биомассы. Согласно полученным в исследовании результатам за счет организации внутренней рециркуляции на данном котле удалось достигнуть общего снижения количества  $\text{NO}_x$  на 18 %;

– *при сжигании керосина*: описано экспериментальное исследование [33] с лабораторной установкой (рециркулирующий газ смешивается с окислителем перед подачей в горелку). В ходе эксперимента определили, что пламя сохраняет свою стабильность до уровня рециркуляции 30–40 % и окрашивается в синий цвет при более высоких коэффициентах рециркуляции. За счет реализации рециркуляции дымовых газов значительное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  (более чем 90 %), судя по всему, реализовано при более низкой температуре (снижение оценивается до 25 %) и лучшем перемешивании с окислителем;

– *в двигателях внутреннего сгорания*: специальный метод рециркуляции отработавших газов предполагает рециркуляцию выхлопных газов одного или нескольких цилиндров двигателя обратно во впускной коллектор двигателя при любых условиях эксплуатации [35];

– *при сжигании биотоплива*: в работе [36] экспериментальное исследование по реализации первичных мер по снижению выбросов вредных веществ в дымовых газах проводилось на макетном стенде котла на биотопливе мощностью 20 кВт. Рециркуляция дымовых газов в эксперименте была организована путем смешивания первичного воздуха с дымовыми газами, отобранными за котлом. Коэффициент рециркуляции дымовых газов в ходе эксперимента увеличивался с 0 до 52 %. Согласно проведенному исследованию сделано заключение, что измеренные температуры горения оказываются



недостаточными для образования термических  $\text{NO}_x$ , что позволяет считать, что рециркуляция дымовых газов снижает в основном термические  $\text{NO}_x$ ;

– *при сжигании разного типа топливных смесей:* в работе [37] экспериментально проведена оценка характеристик горения при саморециркуляционном сжигании выхлопных газов и влияние параметров сопла воздуха для горения, используя горелку с рециркуляционным потоком. Подтверждена возможность сжигания водорода с низким содержанием  $\text{NO}_x$  за счет рециркуляции отработавших газов.

Обеспечение равномерной раздачи газов рециркуляции по горелкам не является простой задачей; так, известны ситуации нарушения нормальной работы котла, которые ведут к эксплуатации водогрейных котлов в 1990-х гг. без рециркуляции дымовых газов; неравномерность распространения газов рециркуляции на малотоксичных горелках котла ТГМ-96А ст. № 3 привела к выводу из эксплуатации одного из горелочных устройств. В таких случаях помогает физическое моделирование [30].

**Специальные конструкции горелок.** Газовая горелка в первую очередь должна обеспечить снижение температуры и замедленное смешение воздуха с топливом, не допуская, в свою очередь, химической неполноты сгорания топлива ( $q_3$ ). Реконструкция и техническое перевооружение горелочных устройств, находящихся в эксплуатации паровых котлов ТЭС, позволяют не только достигнуть снижения эмиссии  $\text{NO}_x$ , но и одновременно улучшить технико-экономические показатели парового котла, а также повысить безопасность его работы [39]. Также немаловажным условием является обеспечение высокой турбулизации процессов сжигания [40].

На ТЭЦ-23 ПАО «Мосэнерго» [41] проводилась замена циклонных предтопов на малотоксичные горелки ГМВИг(III)-50. Горелка относится к комбинированному типу ввиду нескольких подходов к снижению концентрации  $\text{NO}_x$ , а именно: создание окислительных и восстановительных зон, ступенчатое сжигание, рециркуляция дымовых газов. На котлах типа ТГМП-314Ц с настенной и подовой компоновкой горелочных устройств только за счет

внедрения усовершенствованных горелок удалось снизить  $\text{NO}_x$  до  $307 \text{ мг/м}^3$  при сжигании природного газа и до  $407 \text{ мг/м}^3$  при сжигании мазута. В сочетании с рециркуляцией дымовых газов величина массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания в паровом котле остановилась на уровне  $90 \text{ мг/м}^3$ , что значительно ниже нормируемой величины. Эмиссию  $\text{NO}_x$  можно значительно уменьшить за счет использования коаксиальной горелки [42].

Для достижения предельно низких выбросов на котле ТГМП-314 введены в эксплуатацию горелки типа ГМПВб ЗАО «Экотоп». Выполненная реконструкция с учетом подачи газов рециркуляции позволила снизить эмиссию  $\text{NO}_x$  более чем в 3 раза с 220 до  $75 \text{ мг/м}^3$ . Помимо этого важным результатом проведенной реконструкции явилось обеспечение надежной работы экранных труб котла ТГМП-314 [43].

В работе [44] приведено сравнение технических и экологических параметров комбинированной и периферийной трубчатой и центральной подачи газа в горелках котла ТГМ-84А. Установлено, что применение на данном типе котлов горелок с комбинированной периферийной трубчатой и центральной газораздачей позволяет получить более высокие значения КПД энергетического котла, но с ухудшением экологических показателей эмиссии  $\text{NO}_x$  с 130 до  $179 \text{ мг/м}^3$  из-за увеличения интенсивности излучения факела с тепловым потоком до  $200 \text{ кВт/м}^2$ .

Зачастую при техническом перевооружении находящихся в эксплуатации горелочных устройств паровых котлов ТЭС переход на малоэмиссионное устройство осуществляют совместно с другими методами. Согласно работе [45] установлено, что для достижения требуемого уровня эмиссии на котле ТГМЕ-464 ст. № 2 электростанции IRU (г. Таллинн, Эстония) необходимо сочетание различных мероприятий конструктивного и режимного характера. На первом этапе реконструкции энергетического котла ТГМЕ-464 ст. № 2 проведено моделирование расчетной камеры сгорания с горелочным устройством (за которую был принят цилиндр диаметром 5 м и длиной 7 м) с помощью программного комплекса Ansys. Результаты компьютерного моделирования

показали возможность обеспечения выбросов  $\text{NO}_x$  на уровне  $180 \text{ мг/м}^3$ , однако при натурных испытаниях уровень составил  $200 \text{ мг/м}^3$ . Различие вычислительного и натурального экспериментов объясняется наличием взаимодействия факела разных ярусов данного типа энергетического котла. В этой связи на втором этапе было проведено натурное исследование на котле ТГМЕ-464 с организацией режима горения. Таким образом, установленные на котле низкоэмиссионные горелки и организованный на втором этапе режим сжигания обеспечил содержание  $\text{NO}_x$  на энергетическом котле ТГМЕ-464 в диапазоне  $200\text{--}210 \text{ мг/м}^3$  при паровой нагрузке  $480 \text{ т/ч}$ . В работе [46] представлены результаты снижения эмиссии  $\text{NO}_x$  на энергетическом котле Е-500-13.8-560 КДТ (ТПЕ-430). До реализации мероприятий, при работе на газе, выбросы  $\text{NO}_x$  были на уровне  $650 \text{ мг/м}^3$  при  $6 \%$   $\text{O}_2$ . На первом этапе реконструкции над горелками были установлены сопла третичного дутья из расчета подачи  $30 \%$  воздуха, позволившие снизить выбросы  $\text{NO}_x$  до  $157 \text{ мг/м}^3$ . На втором этапе произведена установка малоэмиссионных горелок Zeeco Free Jet, позволившая обеспечить снижение величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания до  $92 \text{ мг/м}^3$  при  $6 \%$   $\text{O}_2$  без применения рециркуляции дымовых газов.

В работе [68] проведено исследование влияния организации сжигания твердого топлива на топочные процессы при минимальной возможной модернизации действующего пылеугольного парового котла Т-образной компоновки с использованием низкоэмиссионных горелочных устройств. Математическое моделирование в работе проводилось в пакете программ Ansys (Fluent) с применением модели турбулентности  $k\text{--}\epsilon$ . В работе представлены: распределение полей скоростей и температуры, массовые концентрации  $\text{NO}_x$  и  $\text{O}_2$ , сравнение результатов численного моделирования и натурных измерений температуры по высоте топочной камеры. В целом замена горелочных устройств на низкоэмиссионные позволяет добиться сокращения эмиссии  $\text{NO}_x$ , составляющие в данном исследовании  $14 \%$ .

### **1.3. Современные методы математического моделирования, их средства и возможности по исследованию процессов горения и эмиссии вредных веществ с уходящими газами и в топке паровых котлов при производстве энергии**

Начиная с 90-х гг. XX в. [51] методы математического моделирования (вычислительный эксперимент) успешно применяются как для исследования процессов горения природного газа [32, 45], углей [34, 70], жидкого топлива [28], керосина [33], так и для применения газа в бытовых нуждах [52], для исследования процессов газовых турбин [53, 78], моделирования процессов в системах центрального теплоснабжения [54]. Одно из направлений применения математического моделирования – моделирование совместного сжигания биомассы и угля [55], метано-водородных смесей [56], древесных гранул [57, 58].

Значительный объем работ по численному моделированию является усредненным по Рейнольдсу моделированием. При таком моделировании сложно добиться детальных структур потока и пламени. С момента проведения первого вычислительного эксперимента появился широкий выбор прикладных программ для моделирования течения жидкостей и газов, межфазных взаимодействий, течений с химическими реакциями и теплообменом методами CFD: Ansys (Fluid/CFX) [60–62, 65, 71, 72, 74, 76, 86], STAR-CCM+ [63], Flow Vision [30], EBSILON [59], SigmaFlame [69, 85], CEDRE [78, 80], Fire 3D [73].

Вычислительный эксперимент имеет ряд признанных преимуществ над натурным экспериментом:

1. Возможность исследования объекта без его модификации или доработки. Зачастую предложенный вариант технического перевооружения котельной установки дорогостоящ и требует уточнения до момента его ввода в эксплуатацию, особенно для объектов, снабжающих теплом и электроэнергией промышленные предприятия и города.

В работе [59] представлено изменение показателей однопочного башенного котла мощностью 1000 МВт при изменении рециркуляции дымовых

газов на базе комплекса программ EBSILON. Вычислительный эксперимент был проведен с помощью программного комплекса Flow Vision, позволившего исключить описанные в предыдущей главе проблемы с неравномерностью распределения газов рециркуляции и получить новые эффективные решения с наименьшими затратами [30].

Численное исследование процесса сжигания газообразного топлива [64] в водотрубном котле типа ДЕ-10/14 позволило выработать технические решения, направленные на минимизацию образования оксидов азота. В качестве оптимального решения предложена рециркуляция топочных газов путем размещения тупикового трубчатого вторичного излучателя, диаметр которого равен двум диаметрам выходного патрубка установленного горелочного устройства.

В работе [67] для водогрейного газомазутного котла КВ-ГМ-100 Волжской ТЭЦ проведено численное исследование зависимости безразмерной температуры в зоне активного горения данного типа котлов с последующим установлением зависимостей содержания бенз(а)пирена и оксидов азота от теплопроизводительности данных котлов. Установленные в работе зависимости были в последующем применены для проведения пуско-наладочных мероприятий и оптимизации низкоэмиссионных режимов. С целью определения возможности низкоэмиссионного вихревого сжигания на энергетическом пылеугольном котле Е-220/100 (ПК-10) Северодвинской ТЭЦ-1 проведено моделирование топочного процесса в программном пакете Ansys (Fluent). Исследование дало возможность получить распределение полей температур, концентраций  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$  и траектории движения частиц в объеме топочной камеры. При сравнении результатов натурального и вычислительного экспериментов отклонения составили не более 10 % [71].

В работе [72] проведено исследование технических и организационных мероприятий, снижающих эмиссию  $NO_x$ , с применением пакета программ Ansys (CFX). Рассмотрены варианты ступенчатого сжигания газа перераспределением воздуха и топлива между каналами горелки, внутренней и внешней

рециркуляции дымовых газов, конфигурации амбразур, применения низкоэмиссионных горелочных устройств. Отмечено, что применение средств математического моделирования особенно актуально в тех случаях, когда отсутствует возможность проведения натурных испытаний ряда технических и организационных предложений на находящихся в эксплуатации паровых котлах ТЭЦ.

В работе [73] приведены результаты численных исследований в пакете прикладных программ FIRE3D котла БКЗ-320-140ПТ, а в [74] – на базе мультидисциплинарной системы Ansys (CFX) с применением модели турбулентности  $k-\varepsilon$ . Исследование проводилось с целью совершенствования характеристик топочного процесса при переводе данного типа котлов с сжигания угля на природный газ. При использовании разного типа горелочных устройств исследование позволило получить: давление скорости, поле распределения температур, концентрации компонентов и распределение воспринимаемых экранами топок тепловых потоков. Установлено, что изменение интенсивности перемешивания и параметра крутки в вихревой и прямоточно-вихревой горелке приводит к увеличению максимальной температуры и соответствующей концентрации оксидов азота.

Авторы работы [83] представили систему трехмерного мониторинга горения энергетического котла и моделирование для изучения динамики типичных измеряемых параметров и характеристик распределения некоторых термодинамических параметров испарительной системы парового котла ТЭС мощностью 300 МВт. Результаты моделирования показывают, что переходные характеристики общего расхода тепла испарительной системы, давления и уровня в барабане, а также массового расхода пара на выходе из барабана соответствовали измеренным данным или справочным результатам, что указывает на соответствие представленной модели для анализа динамики системы испарения парового котла.

2. Возможность при проведении вычислительного эксперимента исследования каждого фактора в отдельности: организация процесса

рециркуляции дымовых газов, исследование полей температур, концентраций содержания  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , векторов движения частиц и т.п.

На базе программного комплекса Ansys (Fluent) в работе [60] описывается численное исследование влияния внутренней рециркуляции отработавших газов в камере газовой микротурбины мощностью 40 кВт. Роль рециркуляции отработавших газов в данном случае заключается в уменьшении пиков температуры и ее градиентов, оказывающих прямое воздействие на снижение  $\text{NO}_x$ . Численное моделирование позволило оценить возможность осуществления автономной рециркуляции выхлопных газов внутри камеры сгорания газовой микротурбины и оценить влияние системы рециркуляции на процессы сгорания без существенного изменения параметров работы камеры сгорания.

В работе [61] представлено двумерное моделирование турбулентного горения метано-воздушной смеси в программном пакете Ansys Fluent с применением  $k$ - $\varepsilon$ -модели турбулентности. Согласно результатам исследования перепад температур во фронте составил 1522 К: от температуры набегающего потока  $T = 298$  К до максимальной температуры за фронтом горения  $T = 1820$  К. Проведено качественное сравнение соответствия интенсивности турбулентных пульсаций скорости при турбулентной скорости горения данных вычислительного и натурного экспериментов.

Авторами работы [62] приведено численное исследование влияния неполноты смешения на содержание  $\text{NO}$  и  $\text{CO}$  в продуктах сгорания смеси. В рамках исследования камера сгорания представляла собой канал прямоугольного сечения с температурой стенок 550 К и скоростью подачи смеси 48 м/с. Исследование проведено в мультидисциплинарной системе Ansys (Fluent), в качестве модели турбулентности используется  $k$ - $\varepsilon$ -модель. Сравнение результатов численного исследования с экспериментальными данными показало удовлетворительную сходимость как по профилю температуры, так и по данным  $\text{CO}$  и  $\text{NO}$ . Расчеты показали, что в случае горения бедной смеси неполнота смешения топлива с воздухом приводит не только к увеличению эмиссии окиси

азота, что наблюдалось в экспериментах ранее, но и к увеличению эмиссии окиси углерода.

Для котельного агрегата Е-220/100 Северодвинской ТЭЦ-1, предназначенного для сжигания каменных углей интинского месторождения, моделирование производилось с помощью пакета программ SigmaFlame с применением стандартной  $k$ - $\epsilon$ -модели турбулентности. Максимальная температура газа в смоделированной топочной камере составила 1584 °С. Отклонение решения модели от натуральных испытаний составило 10 % [69]. В работе представлены: векторное поле скорости (м/с), поле концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_x$  и  $T$  в продольном сечении топочного пространства.

В работе [76] проведено исследование выбросов  $\text{NO}_x$  от водотрубного котла мощностью 160 МВт, работающего на природном газе и имеющего две вертикально расположенные горелки. Компьютерное моделирование образования  $\text{NO}_x$  проведено на базе пакета Ansys (Fluent). В работе представлены векторы скоростей поля течения и распределение температуры в горизонтальной плоскости, проходящей как через оба горелочных устройства, так и только через верхнюю горелку; представлено распределение концентрации  $\text{NO}_x$  в вертикальной плоскости. Компьютерное моделирование котла мощностью 160 МВт дало представление о корреляции между максимальной температурой топки, средней температурой топки, температурой воздуха на входе и средней температурой уходящих дымовых газов на эмиссию  $\text{NO}_x$ . Результаты этого моделирования направлены на улучшение прогнозирующих методов мониторинга выбросов и разработку более эффективных с точки зрения эмиссии  $\text{NO}_x$  режимов управления котлами.

В работе [80] представлены примеры численных стратегий и связанных с ними проверочных экспериментов для численного прогнозирования образования загрязняющих веществ в камерах сгорания газовых турбин. Была также предложена стратегия прогнозирования  $\text{NO}_x$ , которая требует правильного прогноза локального температурного поля. Численное и экспериментальное исследования проводились с горелкой, снабженной двойной вихревой



форсункой для центрального и кольцевого потоков воздуха, и камерой сгорания, которая имеет квадратное сечение размером  $68 \times 68$  мм и длиной 120 мм в программном обеспечении CEDRE.

Авторы работы [79] провели численное исследование камеры сгорания газотурбинной экспериментальной установки. При этом камера сгорания после форсунки моделируется равной площади реальной камеры. CFD-моделирование в данном случае необходимо для оптимизации этих камер сгорания. В работе представлены соответствующие численные инструменты, которые позволяют вывести поле массовой доли NO в камере сгорания; проведены некоторые осесимметричные расчеты для изучения влияния геометрического параметра на индекс эмиссии NO. Полученные результаты применяются в рамках французской национальной программы TOSCA.

Трехмерное численное моделирование тепловых характеристик пылеугольного котла 600 МВт с тангенциальным нагревом проведено в работе [84]. Модель направлена на прогнозирование эмиссии NO<sub>x</sub>. Проверка численных результатов демонстрирует вполне реалистичную сходимость с фактическими значениями, измеренными на установке как для расчетов результатов химических реакций, так и для эмиссии NO<sub>x</sub>.

В работе [75] тематическое исследование заключалось в построении цифровой модели угольной теплоэлектростанции с использованием цифрового двойника и использовании цифрового двойника для анализа эксплуатационных характеристик станции и поиска решений по оптимизации для повышения экономичности эксплуатации станции мощностью 320 МВт. Двойник блока электростанции может быть эффективным инструментом, помогающим операторам станции эксплуатировать свои блоки экономичным способом в соответствии с колебаниями цен на тепло и электроэнергию на рынке.

3. Возможность исследования нереализуемых, сложно реализуемых или мало изученных на практике процессов.

В работе [77] предложен механизм для моделирования CFD лабораторного котла Wiinikka, представляющего собой цилиндрический котел высотой 1,7 м и

диаметром 0,2 м на биомассе, для изучения применения метода селективного некаталитического восстановления. Разработанная методика позволяет успешно провести оценку применения впрыска аммиака в месте его впрыска и расхода реагента на восстановление NO.

Авторы работы [81] на базе созданной вычислительной модели типичного газового водотрубного котла с полной нагрузкой изучили теплоперенос от дымовых газов к водяной рубашке. В работе использовалась сетка из более чем 1000 000 конечных объемов, при этом для минимизации ошибок диффузии сетки были сосредоточены в областях больших градиентов. Показано, что при увеличении рециркуляции отработавших газов уровень температуры значительно снижается. Рассчитан теплоперенос от дымовых газов к водяной рубашке по различным поверхностям топки, приведен профиль температуры в вертикальной плоскости котла и суммарный тепловой поток для воздушно-топливного и газоокислородного сжигания в плоскости, включая боковые и заднюю стенки.

Влияние технологии ввода доли рециркуляции дымовых газов в горелочном устройстве исследовано в работе [86]. Исследование проведено в Ansys (CFX) при разных температурах (243, 1234, 1400, 1600 °C) и составах среды окружающего пространства для четырех конфигураций амбразуры. Поля давления и скорости рассчитывались с использованием  $k$ - $\epsilon$ -модели турбулентности.

Исходя из представленного в этой главе литературного обзора, хотелось бы выделить следующие особенности, которые необходимо учитывать при моделировании процессов горения и образования оксидов азота в топке паровых котлов ТЭЦ.

В работе [63] представлено численное моделирование сжигания водоугольного топлива в цилиндрической камере с применением пакета STAR-CCM+. В данном случае для расчета процесса горения водоугольного топлива применена  $k$ - $\omega$ -модель турбулентности. Сетка объекта исследования имела базовый размер  $5 \times 10^{-3}$  м и три пристеночных призматических слоя

с коэффициентом сжатия 1,5 для более точного численного решения. В общей сложности было сосчитано 10 000 итераций, при этом стабилизация температуры в процессе решения в камере сгорания произошла после 8000 итерации. В работе представлены график изменения средней расчетной температуры, массовые доли CO и скорости истечения газа в горизонтальном сечении. На базе программного комплекса Ansys в работе [65] представлен обзор и этапы CFD-моделирования, доказано, что при моделировании турбулентного потока правильнее применять  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности. Выбор в пользу данной модели турбулентности обусловлен более точными результатами при небольших требованиях к ЭВМ. В работе отмечено, что при невозможности верификации вычислительного с натурным экспериментом есть возможность проведения исследования адекватности модели по сеточной сходимости. Использование такого подхода позволяет добиться достаточно точных, с учетом некоторых особенностей, конкретного случая результатов. В исследовании [66] при моделировании теплообменного аппарата, который содержит четыре газовые горелки с предварительным частичным перемешиванием и четыре трубы, для установления лучшей точности результатов дополнительно проверена сходимость сетки путем создания сеток с разным количеством элементов (от 25 млн до 78 млн ячеек с общим временем вычисления от 10 до 56 ч). Исследование показало лучшую сходимость результатов испытаний при расчетах температуры воздуха и дымовых газов и КПД с применением именно FGM-модели, по сравнению с результатами расчетов с использованием EDM-модели, однако выделен один из недостатков FGM-модели – более длительное время проведения вычислений.

В работе [82] создана вычислительная гидродинамическая модель котла на пылеугольном топливе с тангенциальным нагревом мощностью 630 МВт. Чтобы избежать чрезмерно высоких вычислительных затрат, в качестве расчетной области была выбрана область от нижней воронки до выхода горизонтального дымохода, а не всего котла. Турбулентное течение моделировалось стандартной  $k$ - $\varepsilon$ -моделью. Для проверки модели CFD результаты моделирования

сравнивались с промышленными данными. При проведении исследования получили диаграмму скорости газа внутри топки при различных нагрузках, траектории частиц для различных нагрузок котла, температурный профиль, CO и NO<sub>x</sub> по высоте печи при различных нагрузках.

В настоящее время еще одним из направлений применения CFD моделирования для решения разного рода проблем в энергетическом секторе [88] (начиная от переработки топлива, его транспортировки и последующей подготовки, процесса производства тепловой и электрической энергии, и заканчивая доставкой энергии до конечного потребителя) является технология цифрового двойника. Технологии цифровизации актуальны и в ресурсодобывающей отрасли, особенно для автономности в условиях, где затруднено нахождение человека, например при очень низких температурах, на месторождениях Крайнего Севера России [89].

Влияние типа топлива на выходные параметры новой биотопливной горелки при сжигании четырех видов биотоплива, в том числе трех видов биомассы, исследовано в работе [132]. Одним из эффективных методов обработки свалочного фильтрата является его сжигание. Авторы работы [133] с помощью численного моделирования оценивали влияние расположения горелок на обработку фильтрата из полигона. Большое влияние на процесс сжигания концентрата фильтрата на полигоне оказывает высота расположения распыляющих форсунок. Установлено, что при симметричном расположении горелок сжигание свалочного фильтрата в мусоросжигателе происходит эффективнее.

По определению NASA, «A Digital Twin is an integrated multi-physics, multiscale, probabilistic simulation of a complex product that uses the best available physical model, real-time sensor data, historical data, etc. to mirror the of its corresponding twin» [90]. Неотъемлемой частью каждого Цифрового двойника является моделирование и симуляция, однако авторы работы [91] выделяют проблему снижения эффективности интеграции первого со вторым, вызванную

отсутствием возможности эволюционирования модели во времени. Эволюция требует периодического обновления между реальным миром и моделью.

В настоящее время с целью повышения качества жизни человека, его безопасности, промышленной экономики, комфорта и снижения энергопотребления разрабатываются цифровые двойники жилых зданий и объектов промышленности. Цифровой двойник для будущего здания в Марокко представлен в [92], результаты позволили снизить общее потребление электроэнергии в доме. В работе [93] предложен гибридный метод профилактического обслуживания станков, управляемых цифровым двойником, при таком методе модель цифрового двойника считывает реальные условия работы (параметры считываются с датчиков и используются для модели) и прогнозирует срок службы установки.

По оценке экспертов, в краткосрочной перспективе цифровая трансформация энергетики сможет увеличить доходы компании (генерация и распределение) в отрасли на 3–4 % в год [94]. За счет удаленного аудита расхода топлива энергоблока на базе турбины K-215-130 удалось в режиме с минимальными электрическими нагрузками выявить перерасходы топлива на уровне 1,5–2 % [95].

Цифровой двойник ТЭС – это виртуальная копия реальной ТЭС или отдельного технологического агрегата, позволяющая повысить эффективность управления энергообъектом: с одной стороны, за счет снижения затратной части (эмиссии вредных веществ, оптимизации расходов топлива, затрат электроэнергии и тепловой энергии на собственные нужды, расходов химических реагентов на водоподготовку, потерь конденсата и утечек теплоносителя при транспортировке), и увеличения прибыли от продажи итоговой продукции (тепловая энергия, электроэнергия, поставка мощности) – с другой. Дополнительно цифровой двойник ТЭС может позволить вести непрерывный мониторинг технического состояния, в том числе за сроками истощения паркового ресурса, каждого элемента системы для более эффективного планирования ремонтной программы.

Отчасти этот процесс реализуется современными системами автоматики с развитыми функциями контроля и управления технологическими процессами. В данном случае рекомендуется вести разработку цифрового двойника на базе действующей системы автоматизированного проектирования тепловой автоматики и измерений, которая позволит обеспечить актуализацию системы при последующей модернизации или реконструкции систем управления технологическим процессом ТЭС во время эксплуатации [96].

Однако в настоящий момент применение цифровых двойников ТЭС достаточно ограничено, что говорит о широком потенциале для исследований в этой области. Надежная архитектура цифрового двойника для ТЭС, которая в дальнейшем может быть применима и в других производственных инженерных системах, предложена в [97].

### **Основные результаты и выводы по главе 1**

На основании выполненного литературного обзора показано, что исследование по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  с уходящими газами паровых котлов ТЭС является актуальным, потому что оно направлено на решение фундаментальной научной проблемы познания закономерностей процессов тепломассообмена и гидрогазодинамики, обеспечивающих возможность выявления закономерностей эффективности и экологически чистого сжигания органического топлива в паровых котлах ТЭС и котельных, и позволяет разработать экологически чистые решения и современные технологии в энергетике. Одним из наиболее перспективных методов, попадающих под это условие, с потенциалом сокращения выбросов до 60 % является рециркуляция дымовых газов.

Для изучения закономерностей процессов тепломассообмена и гидрогазодинамики и последующей оптимизации процесса горения метано-

воздушной смеси в паровых котлах ТЭС и котельных успешно применяется такой инструмент, как математическое моделирование. При этом сам процесс высокоточного моделирования горения метано-воздушной смеси в паровых котлах ТЭС связан со сложностью описания геометрических особенностей горелочного устройства и камеры сгорания парового котла, преодолением вычислительных сложностей описания вычислительного алгоритма турбулентного горения и физико-химических процессов и проведением вычислений на ЭВМ, анализом полученных в ходе вычислительного эксперимента данных.

С учетом изложенного сформулирована цель диссертации – увеличение точности и достоверности математического моделирования с помощью модификации метода математического моделирования, разработки методики численного решения, вычислительного эксперимента для совершенствования технологий снижения эмиссии оксидов азота в энергоустановках с учетом инициируемых технологических воздействий по рециркуляции дымовых газов.

Для реализации поставленной цели диссертации сформулированы нижеперечисленные задачи:

1. Выполнить модификацию метода математического моделирования в сопряженной постановке тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топчного устройства, состоящую в применении уточненного значения массовой диффузии компонентов метано-воздушной смеси для повышения точности и достоверности прогнозирования эмиссии оксидов азота при производстве энергии.

2. Разработать методику численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности (применяемых для моделирования в камере сгорания топчного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси), реализованную комплексом алгоритмов для сокращения вычислительных затрат на процесс расчета горения

турбулентной метано-воздушной смеси и обеспечения требуемой точности и достоверности прогнозирования эмиссии оксидов азота.

3. Разработать алгоритм численного исследования закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси, являющийся основой взаимодействия автономных модулей комплекса программ, состоящего в применении автоматического параметрического моделирования газомазутной горелки.

4. На основе предложенных алгоритмов выполнить разработку и апробирование комплекса программ для проведения посредством вычислительного эксперимента комплексных исследований и отработки технических решений для устойчивого низкоэмиссионного горения перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с учетом инициируемых воздействий.

5. Дать практические рекомендации по снижению эмиссии оксидов азота при производстве энергии на основе математического моделирования горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с установлением закономерностей взаимного влияния струй смеси при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства.



## Глава 2

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭНЕРГИИ

В предыдущей главе приведены подробный литературный обзор и примеры применения методов математического моделирования успешно, применяемых для энергетики при исследовании процессов горения природного газа, углей, жидкого топлива, керосина, совместного сжигания биомассы и угля, метано-водородных смесей, древесных гранул. Показаны признанные преимущества вычислительного эксперимента над натурным, а именно: возможность исследования объекта без его модификации или доработки; возможность при проведении вычислительного эксперимента исследования каждого фактора в отдельности; возможность исследования нереализуемых, сложно реализуемых или малоизученных на практике процессов.

В настоящий момент на рынке имеется широкий выбор прикладных программ для моделирования течения жидкостей и газов, межфазных взаимодействий, течений с химическими реакциями и теплообменом методами вычислительной гидрогазодинамики: Ansys (Fluid/CFX), STAR-CCM+, Flow Vision, Open FOAM, SigmaFlame, Fire-3D. У всех программных пакетов для модели, описывающей процессы газодинамики, математической основой служат уравнения Навье – Стокса. Представленным литературным обзором предыдущей главы подтверждено, что для моделирования турбулентного потока лучше подходят модели с двумя дифференциальными уравнениями [9],  $k$ - $\varepsilon$ -модель турбулентности, так как она обеспечивает более точные результаты при небольших требованиях к ЭВМ [98, 65], в то время как  $k$ - $\omega$ -модель турбулентности больше подходит для исследования пристеночных процессов [98, 99].

Исходя из общей классификации пламени в энергетических установках тепловых электрических станций и котельных, сжигающих органическое топливо, в данном исследовании по состоянию среды мы имеем предварительно перемешанные среды, а по перемещению реакционной среды – турбулентное пламя.

Процессы, протекающие в камере сгорания топочного устройства тепловых электрических станций и котельных, обладают ограниченными геометрическими условиями, частными особенностями. На рисунке 2.1 изображена схема горелочного устройства с камерой сгорания. Важно отметить необходимость сохранения подобия геометрических характеристик натурным; так, верхняя и нижняя границы зоны активного горения для энергетических котлов с фронтальным расположением горелок определяются выражением  $4 + h_{\text{др}}$ .

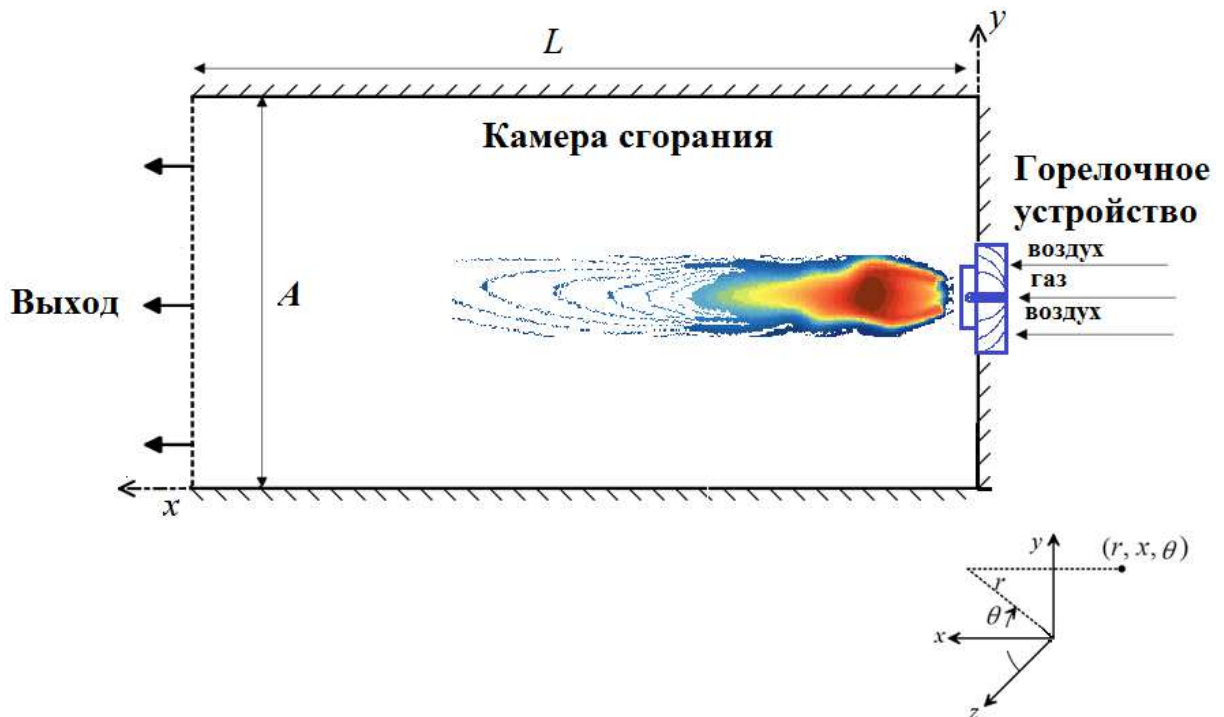


Рисунок 2.1 – Структурная схема камеры сгорания топочного устройства с одной горелкой

На рисунке 2.2 изображена структурная схема горелочного устройства со следующими геометрическими характеристиками:  $\phi_1 = 1,43$  м;  $\phi_2 = 0,95$  м;

$\Phi_3 = 0,64$  м;  $\Phi_4 = 0,325$  м. Камера сгорания имеет следующие геометрические характеристики: длина  $L = 10$  м; высота и ширина камеры сгорания  $A = 8$  м. Потоки воздуха разделены на внутренний и периферийный потоки с закручивающими аппаратами. Газ поступает в область, образованную центральной трубой  $\Phi = 219$  мм и трубой диаметром  $\Phi_4$ . Со стороны топочного пространства (зона амбразуры) газовый коллектор представляет собой укороченный конус, в котором имеются два ряда отверстий.

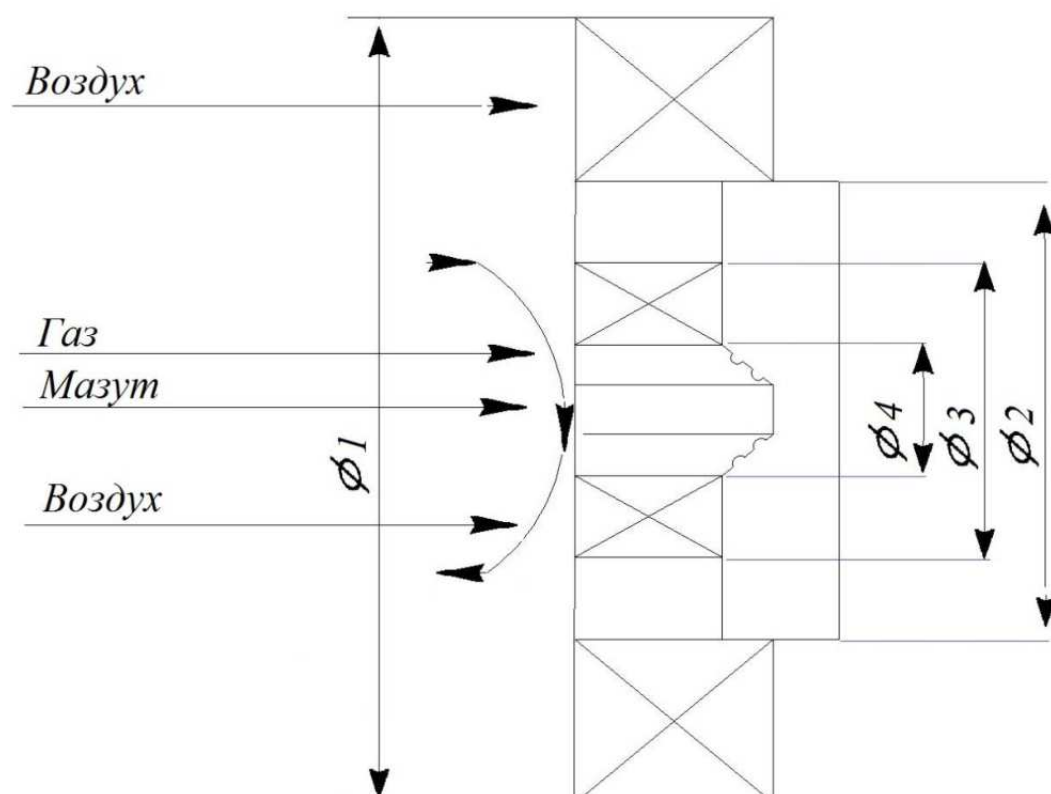


Рисунок 2.2 – Структурная схема горелочного устройства

Для нахождения единственного верного решения системы дифференциальных уравнений задаются начальные и граничные условия, описывающие движения среды. Граничные условия имеют свою классификацию: для входных границ, ограничивающих область расчета (скорость, давление, массовый расход, углы закрутки, направление потока и т.п.), выходных границ (статическое давление и т.п.), для стенки и внутренних границ (скорость, температура и т.п.) [99]. Опыт проведения вычислительного

эксперимента говорит о недопустимости противоречия задания граничных условий физическим процессам и балансовым уравнениям.

## 2.1. Моделирование в камере сгорания топочного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси

Для моделирования в камере сгорания топочного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси используются следующие уравнения.

Уравнения изменения количества движения:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}), \quad (2.1)$$

где  $(-\rho \overline{u'_i u'_j})$  – напряжения Рейнольдса;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с;  $u_i, u_j$  – компоненты скорости, м/с;  $\delta_{ij}$  – Дельта Кронекера ( $\delta_{ij} = 1$ , если  $i = j$ , и  $\delta_{ij} = 0$ , если  $i \neq j$ );  $x_i, x_j$  – координаты, м;  $t$  – время, с;  $P$  – давление потока, Па;  $\rho$  – плотность несущей среды, кг/м<sup>3</sup>.

В дифференциальной форме уравнение неразрывности или сохранения массы записывается в виде

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0, \quad (2.2)$$

где первый член описывает нестационарность потока, а второй – конвективный перенос.

Уравнение энергии:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \lambda + \frac{c_p \mu_T}{Pr_T} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} - \sum_j h_j J_j \right], \quad (2.3)$$

где  $T$  – термодинамическая температура,  $K$ ;  $h$  – энтальпия компонента смеси,  $кДж/кг$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $\mu_T$  – коэффициент турбулентного переноса количества движения,  $Па \cdot с$ ;  $c_p$  – удельная изобарная теплоемкость,  $Дж/(кг \cdot K)$ ;  $Pr_T$  – турбулентное число Прандтля;  $J_j$  – массовая диффузия вида компонента смеси;

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{P}{\rho}, \quad (2.4)$$

$$h_j = \int_{T_{ref}}^T c_{p,j} dT, \quad (2.5)$$

здесь  $Y_j$  – массовая доля вида компонента смеси;  $c_{p,j}$  – удельная теплоемкость компонента смеси,  $Дж/(кг \cdot K)$ ;  $T_{ref} = 583K$  для воздуха;  $\rho$  – плотность несущей среды,  $кг/м^3$ ;

$$J_j = - \left( \rho D_{j,m} + \frac{\mu_T}{Sc_T} \right) \frac{\partial Y_j}{\partial x_i}, \quad (2.6)$$

здесь  $Sc_T = 0,7$  – турбулентное число Шмидта;  $D_{j,m}$  – массовый коэффициент диффузии компонента смеси,  $м^2/с$ .

Основной особенностью влияния рециркуляции дымовых газов на горение предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси является изменение термохимических свойств окислителя метано-воздушной смеси, в горении участвует 3 основных потока: топливо, воздух, дымовые газы.

Модифицированный метод математического моделирования позволяет получать более точное и достоверное решение за счет уточнения значения массовой диффузии компонентов метано-воздушной смеси благодаря учету кинетики газов рециркуляции по всей длине моделируемого участка (представленного в блоке 2 рисунка 2.3).

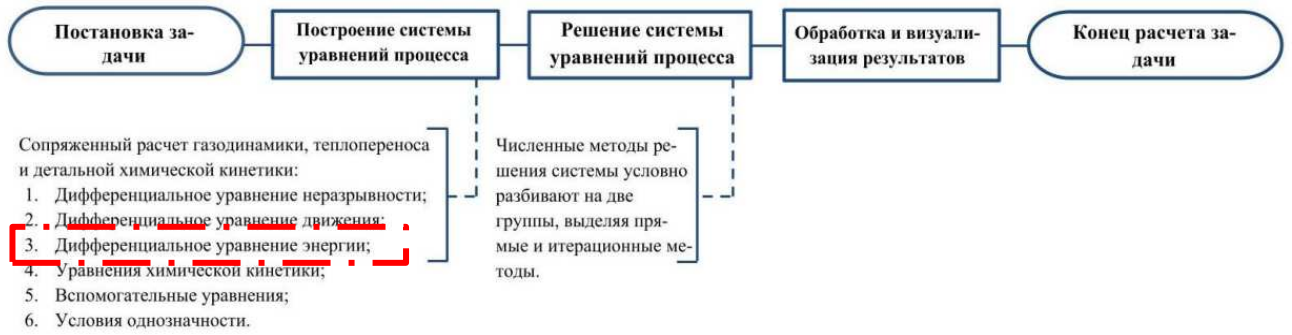


Рисунок 2.3 – Структурная схема метода математического моделирования в сопряженной постановке тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топочного устройства

Данный вывод дает модифицированное уравнение (2.7) с усредненным массовым коэффициентом диффузии компонентов смеси:

$$J_j = - \left( \rho \cdot \left( \frac{1 - W_j}{\sum_{i \neq j}^j \left( \frac{\varphi_i}{D_i} \right)} \right) + \frac{\mu_T}{S_{c_T}} \right) \frac{\partial Y_j}{\partial x_i}, \quad (2.7)$$

где  $W_j$  – массовая доля компонента смеси;  $\varphi_i$  – мольная доля компонента смеси;  $D_{j,m}$  – коэффициент диффузии смеси, м<sup>2</sup>/с.

Распределение пламени топливовоздушной смеси моделируется выражением

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i c) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_T}{S_{c_T}} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + \rho S_c, \quad (2.8)$$

где  $c$  – переменная прогресса;  $S_c$  – реакция источника прогресса, с<sup>-1</sup>;  $u_i$  – компонент скорости м/с.

Средняя скорость реакции в уравнении моделируется выражением

$$\rho S_c = \rho_u U_T \left| \frac{\partial c}{\partial x_i} \right|, \quad (2.9)$$

где  $\rho_u$  – плотность несгоревшей смеси, кг/м<sup>3</sup>.

$$c = \frac{\sum_{j=1}^n Y_j}{\sum_{j=1}^n Y_{j,eq}}, \quad (2.10)$$

здесь  $n$  – количество продуктов;  $Y_{j,eq}$  – равновесная массовая доля продукта  $j$ ;

$c = 0$ : не сгоревшая смесь;  $c = 1$ : сгоревшая смесь.

Для вычисления кинетической энергии турбулентности и скорость ее диссипации принимается модель турбулентности  $k$ - $\epsilon$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b, \end{aligned} \quad (2.11)$$

где  $\sigma_k, \sigma_\epsilon$  – турбулентные числа Прандтля; элемент  $G_b$  описывает формирование турбулентной кинетической энергии за счет плавучести; элемент  $Y_M$  описывает вклад дилатационной составляющей в общую скорость диссипации энергии турбулентности;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с; элемент  $G_k$  описывает порождение турбулентной кинетической энергии по средним градиентам скорости;  $C_1, C_2, C_{1\epsilon}, C_{3\epsilon}$  – константы модели турбулентности;  $\mu_T$  – турбулентная вязкость, Па·с.

Для достижения строгой точности при численном решении дифференциальных уравнений применяются численные методы. В работе [136] предложена новая пара Рунге – Кутты восьмого и седьмого порядков для решения нежестких линейных неоднородных задач.

Течения в камерах сгорания энергетических машин сопровождаются химическими реакциями (горением). Одной из основных проблем представляется также описание взаимосвязи турбулентных и химических процессов. Горение – быстропротекающая химическая реакция соединения горючих компонентов с кислородом, сопровождающаяся интенсивным выделением тепла и резким повышением температуры продуктов сгорания.

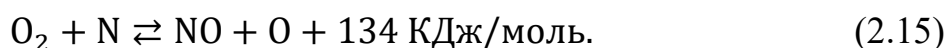
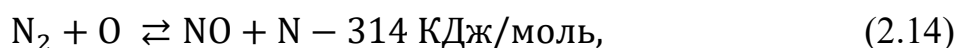
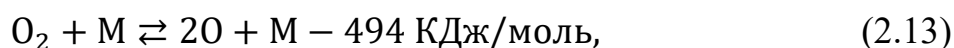
Уравнение скорости химической реакции показывает, что скорость химических реакций с увеличением температуры возрастает с ускорением, и так как у практически любых топливосжигающих устройств  $T_{max} < 2500$  К, это свидетельствует о согласовании данного условия.

Реакция горения углеводородов в общем виде представлена уравнением:



где  $m, n$  – число атомов элементов С и Н в углеводороде.

В цепной реакции окисления азота и воздуха, разработанной советскими учеными Зельдовичем Я. Б., Садовниковым П. Н. решающая роль отведена свободным атомам кислорода и азота, механизм состоит из следующих эндотермических и экзотермических взаимодействий:



Суммарная энергия активации  $E$  взаимодействия складывается из энергии, необходимой на образование атома кислорода по реакции (2.13)  $E_1 = 247$  КДж/моль и энергии активации по реакции (2.14)  $E_2 = 314$  КДж/моль.

Так как очень высока энергия активации ( $E_3$ ) по реакции (2.15), то это свидетельствует о зависимости данной реакции от температуры скорости реакции образования  $NO_x$ . В большинстве топочных камер время сгорания топливовоздушной смеси находится в диапазоне от 1 до 5 с, и до 24 с затрачивается для формирования равновесной концентрации ( $T = 1600$  °С).

Константа скорости реакции (по уравнению Аррениуса):

$$K = A^* \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (2.16)$$

где  $T$  – термодинамическая температура, К;  $R = 8,31446262$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);  $E_a$  – энергия активации, кДж/кмоль;  $A^* \approx 1$  – предэкспоненциальный множитель, принимаемый для биометрических гомогенных смесей.

Моделирование турбулентно-кинетического горения представляется более сложной задачей, чем моделирование сжиганию без предварительного смешивания и диффузионного горения.



Скалярное уравнение для переменной, локализирующей фронт пламени:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{c}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{c}) = \frac{\partial}{\partial x_i}(-\bar{\rho}\overline{c^{II}u_j^{II}}) + \bar{\omega}_c, \quad (2.17)$$

где  $\bar{\omega}_c$  – скорость реакции, требующей моделирование;  $\overline{c^{II}u_j^{II}}$  – корреляция скорости [98]. Прогрессивная переменная скорости реакции определяется выражением

$$c = \frac{T - T_B}{T_A - T_B}, \quad (2.18)$$

где  $T_A, T_B$  – температура сгоревшей и несгоревшей части смеси, К.

## 2.2. Аналитическое вычисление радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной смеси при сжигании природного газа

При определении коэффициента монохроматической излучательной способности воспользуемся следующей методикой [100].

Приведенная степень черноты, определяется из выражения

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / \left( \frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1 \right), \quad (2.19)$$

где  $\varepsilon_{\text{ст}} = 0,8$  – эффективная степень черноты стенки;  $\varepsilon_r = \mathcal{F}(Bu)$  – степень черноты объема продуктов сгорания.

Объем дымовых газов:

$$V_{\Gamma} = V_{CO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O} + (\alpha - 1) \cdot V_B^0, \quad (2.20)$$

где  $V_{CO_2}, V_{N_2}^0, V_{H_2O}, V_B^0$ , теоретический объем воздуха, азота, водяных паров и двуокиси углерода,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\alpha$  – избыток воздуха в топке котельного агрегата;

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot \left( CO_2 + \sum m C_m H_n \right), \quad (2.21)$$

$$V_B^0 = 0,0476 \cdot \left( 0,5 \cdot H_2 + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) \cdot (C_m H_n) - O_2 \right), \quad (2.22)$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + \frac{N_2}{100}, \quad (2.23)$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left( H_2 + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n + 0,124d \right) + 0,016 \cdot V_B^0. \quad (2.24)$$

Количественные параметры  $C_m H_n$  определяются по данным из паспорта газа.

Объемные доли трехатомных газов:

$$r_{CO_2} = V_{CO_2} / V_{\Gamma}, \quad (2.25)$$

$$r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_{\Gamma}. \quad (2.26)$$

Сумма объемных долей трехатомных газов:

$$r_{\Pi} = r_{CO_2} + r_{H_2O}. \quad (2.27)$$

Радиационной характеристикой продуктов сгорания является критерий Бугера:

$$Bu = k \cdot p \cdot s, \quad (2.28)$$

где  $k$  – коэффициент поглощения топочной среды, рассчитываемый по температуре и составу дымовых газов до входа в регенеративный воздухоподогреватель,  $1/(m \cdot MPa)$ ;  $p = 0,01$  МПа – давление в топочной камере;  $s$  – эффективная толщина излучающего слоя, м;

$$k = k_{\Gamma}^0 \cdot r_{\Pi}, \quad (2.29)$$

здесь  $k_{\Gamma}^0$  – коэффициент излучения лучей газовой фазой,  $1/(m \cdot MPa)$ .

Результатом расчета являются:

- приведенная степень черноты, необходимая для определения расчетной действительной температуры горения;
- таблица объемов воздуха и газов, необходимая для просчета состава окислителя, подаваемого в горелочное устройство (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Объем воздуха и дымовых газов [104]

| Компонент для расчета приведенной степени черноты | $V_{CO_2}$ | $V_{N_2}^0$ | $V_{H_2O}$ | $V_B^0$ | $V_{\Gamma}$ |
|---|------------|-------------|------------|---------|--------------|
| Величина показателя, $m^3/m^3$                    | 1,03       | 2,17        | 2,17       | 9,69    | 11,16        |

Адиабатическая (калориметрическая) температура горения соответствует условию, когда все полезное тепловыделение в топке воспринимается продуктами сгорания и соответствует максимальной расчетной температуре

(недостижимой в реальных условиях). При рециркуляции дымовых газов из конвективной шахты и вводе их через горелки адиабатическая температура будет ниже из-за увеличения объема газов в зоне горения [101]:

$$T_{max} = \frac{Q_T}{\sum V_i C_i} = \frac{Q_H^p + Q_B + r \cdot H_{г.отб}}{\sum V_i C_i}, \quad (2.30)$$

где  $Q_B$  – теплота горячего воздуха, поступающего в топку, кДж/кг;  $H_{г.отб}$  – теплота рециркулирующих газов, кДж/кг;  $\sum V_i C_i$  – произведение объема на теплоемкость  $i$ -го компонента продуктов сгорания при температуре  $T_{max}$ ,  $r$  – доля газов, используемых для рециркуляции.

Произведение объема на теплоемкость  $i$ -го компонента продуктов сгорания:

$$\sum V_i C_i = C_{N_2} \cdot V_{N_2}^0 + C_{CO_2} \cdot V_{CO_2}^0 + C_{H_2O} \cdot V_{H_2O}^0, \quad (2.31)$$

где  $C_{N_2}$ ,  $C_{CO_2}$ ,  $C_{H_2O}$  – удельные теплоемкости продуктов сгорания при температуре газов в зоне горения, кДж/кг.

Теплота горячего воздуха, поступающего в топку, кДж/кг:

$$Q_B = V_D^0 \cdot C_B \cdot T_B, \quad (2.32)$$

где  $V_D^0$ ,  $C_B$ ,  $T_B$  – объем, удельная теплоемкость и температура горячего воздуха после воздухоподогревателя (при наличии).

Теплота рециркулирующих газов на всем участке рециркуляции, кДж/кг:

$$H_{г.отб} = (1 + r) \cdot H_r. \quad (2.33)$$

Для определения теплоты продуктов сгорания, используемых для рециркуляции, необходимой для последующего получения результирующей температуры двух основных потоков: воздух, дымовые газы, и уточнения радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси применяется выражение

$$H_r = (C_{N_2} \cdot V_{N_2}^0 + C_{CO_2} \cdot V_{CO_2}^0 + C_{H_2O} \cdot V_{H_2O}^0) \cdot T_r + (\alpha - 1) \cdot V_D^0 \cdot C_B \cdot T_B, \quad (2.34)$$

где  $H_r$  – энтальпия газов без учета рециркуляции, кДж/кг.

Для уточнения радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси после предварительных расчетов по уравнениям (2.19)–(2.33) для учета химической кинетики, а также влияния инициируемых воздействий, таких как рециркуляция дымовых газов, получено выражение

$$T_{\text{я}} = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{p}} + Q_{\text{B}} + (d/100) \cdot r \cdot H_{\text{г.отб}}}{C_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2}^0 + C_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2}^0 + C_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}}^0 + (d/100) \cdot r \cdot C_{\text{г}} V_{\text{г}}} \cdot \eta, \quad (2.35)$$

где  $T_{\text{я}}$  – температура у ярусов горелок при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства, °С;  $d$  – доля перераспределения рециркуляции дымовых газов для учета взаимного влияния струй смеси при многоярусной компоновке в топочном устройстве;  $\eta$  – пирометрический коэффициент.

Для определения результирующей температуры реагирующих смесей получено выражение, °С:

$$T = \frac{(1 - r) \cdot V_{\text{B}}^0 \cdot T_{\text{B}} + r \cdot V_{\text{г}} \cdot T_{\text{г}}}{V_{\text{B}}^0}. \quad (2.36)$$

Результатом уточнения характеристик струй смеси при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства являются:

- таблица объемов воздуха и газов с результирующей температурой реагирующих смесей, необходимая для учета химической кинетики с учетом влияния инициируемых воздействий, таких как рециркуляция дымовых газов;
- «критическое значение» доли перераспределения рециркуляции дымовых газов, которое соответствует условию отсутствия смещения максимальной температуры в обратном направлении при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства (рисунок 2.4).

Дополнительно на каждом этапе вычисляется максимально возможная степень подачи газов рециркуляции в диапазоне паровых нагрузок для данного типа котлов, выраженной экспоненциальной зависимостью и представленной на (рисунке 2.5).

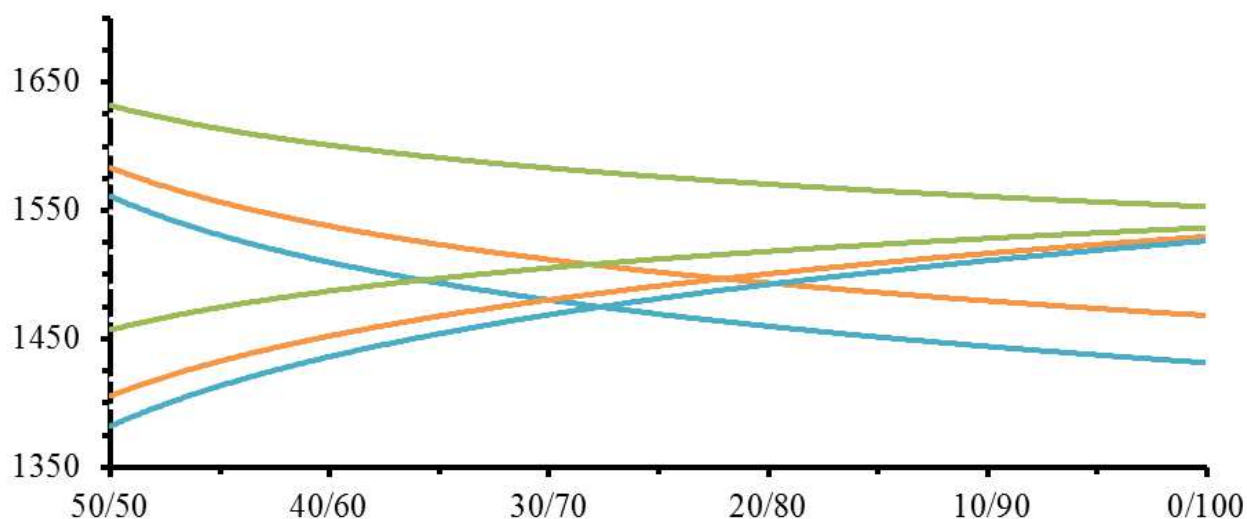


Рисунок 2.4 – Пример аналитического уточнения температуры струй смеси при многоярусной компоновке. Ось абсцисс – доля перераспределения рециркуляции дымовых газов при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства; ось ординат – температура, °С; Синяя прямая при  $r = 30\%$ ; оранжевая прямая при  $r = 25\%$ ; зеленая прямая при  $r = 15\%$  [118, 119]

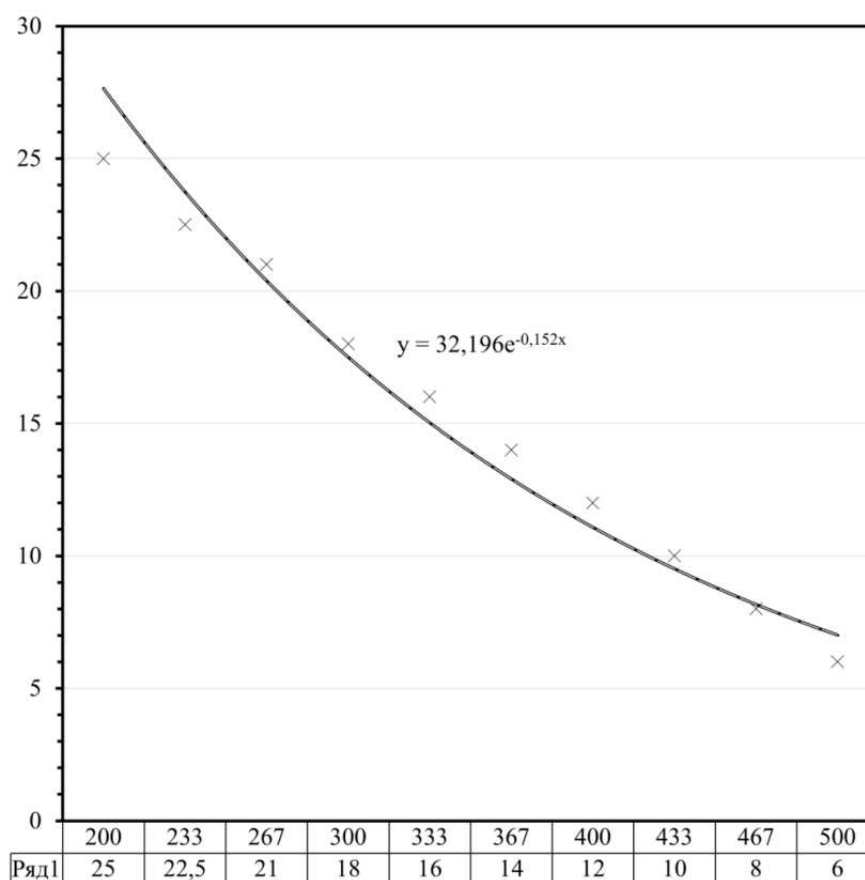


Рисунок 2.5 – Зависимость степени подачи газов рециркуляции для парового котла ТГМЕ-464. Ось абсцисс – паропроизводительность, т/ч; ось ординат – степень рециркуляции, %

### **2.3. Численный метод моделирования тепловых и газодинамических процессов при горении для прогнозирования эмиссии оксидов азота**

Решение представленной системы дифференциальных уравнений (2.1)–(2.3) аналитически не представляется возможным. Решение осуществляется численным методом, например методом конечных объемов, основанным на интегрировании уравнений по конечному объему, и являющимся основой решения программных пакетов Ansys (Fluid/CFX) и STAR-CCM+. Данный метод имеет ряд важных для решения задач преимуществ: произвольная форма расчетной области; возможность увеличения размера сетки в тех местах, где нет резкого изменения параметров и не требуется высокая точность [102]. Большинство программных пакетов, имеющих широкие возможности по моделированию тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания, имеют закрытый исходный код.

Для моделирования тепловых и газодинамических процессов при сжигании топлива в энергоустановках требуется обеспечить решение системы дифференциальных уравнений, учитывая при этом химическую кинетику. Решение задачи моделирования сжигания метано-воздушной смеси требует работы с большими данными, значительных вычислительных ресурсов при обеспечении требуемой точности и устойчивости решения.

Суть предложенной методики (рисунок 2.6) численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности, заключается:

- в применении уточнения радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с учетом влияния иницируемых воздействий, таких как рециркуляция дымовых газов (рисунок 2.7). Полученное решение применяется в комплексе программ на этапе задания начальных и граничных условий;

- в применении автоматического задания густоты расчетной сетки в исследуемых областях (рисунок 2.8). При задании параметров расчета

указывается рекомендованный размер конечного элемента и базовый размер сетки для получения требуемой точности, достоверности и скорости расчета.

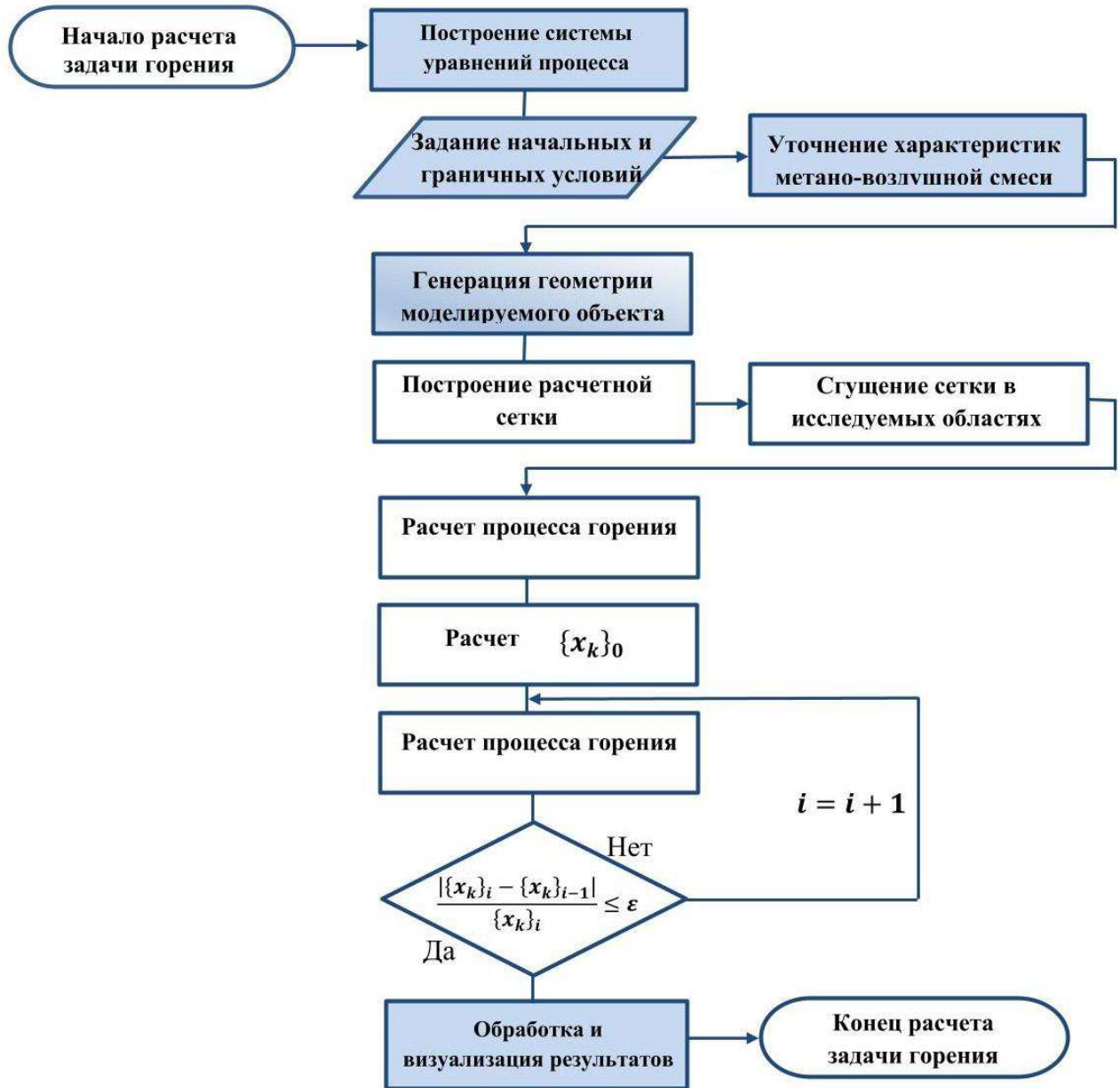


Рисунок 2.6 – Визуализация методики численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности: блоки с заливкой выполняются человеком; блоки без заливки выполняются ЭВМ



Рисунок 2.7 – Алгоритм уточнения радиационных характеристик





Рисунок 2.8 – Алгоритм задания густоты расчетной сетки

Разделение расчетной области на примере горелочного устройства приведено на рисунке 2.9:

- наиболее густая сетка применяется для горелочного устройства в месте выхода и смешения потоков;
- средняя по густоте сетка – в осесимметричном направлении в зоне развития пламени с максимальными температурами;
- наименее густая сетка – оставшееся пространство топочного устройства/камеры сгорания.

Дополнительно необходимо обратить внимание на затраченный машиноресурс при расчете на ЭВМ. Так, для «базового» размера 0,5 м было затрачено 1620 мин на 1000 итераций для расчета камеры сгорания только с одним комбинированным горелочным устройством с применением автоматического задания густоты сетки (до 5 % от базового размера) в различных расчетных областях. Без применения деления расчетной области при расчете на ЭВМ, для «базового» размера 0,05 м (10 % от базового размера 0,5 м) было затрачено 2153 мин на 1000 итераций.

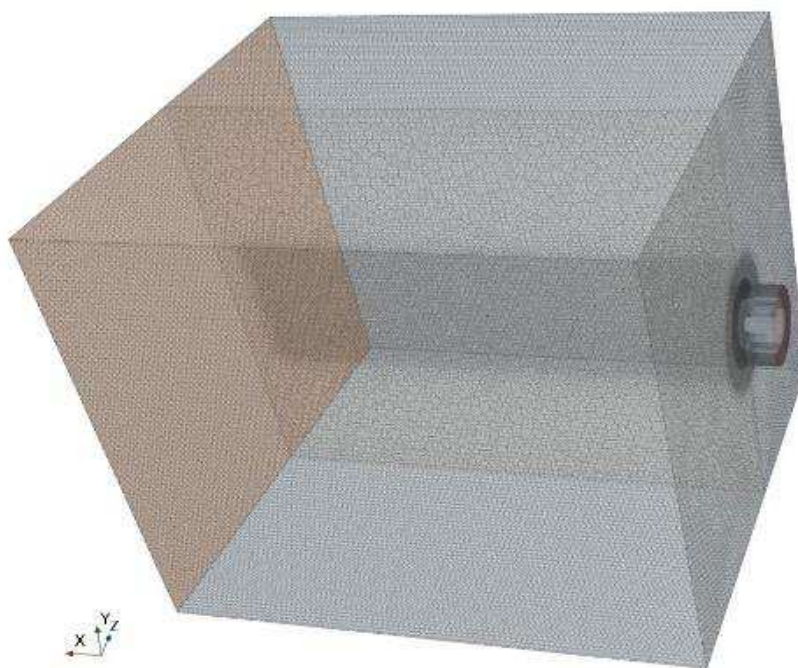


Рисунок 2.9 – Наложение сетки конечных элементов

Отличие поясняется разным количеством элементов за счет автоматического задания густоты сетки в различных расчетных областях, позволяющее провести оптимизацию для получения требуемой точности и скорости расчета. При тестовых расчетах сжигания метано-воздушной смеси в вычислительном эксперименте № 1 при «базовом» размере элемента расчетной сетки 0,5 м и позонной густотой сетки (до 5 % от базового размера) количество элементов расчетной сетки составляло 2 787 464 ед.; в вычислительном эксперименте № 2 при «базовом» размере элемента расчетной сетки 0,05 м (10 % от базового размера 0,5 м для достаточной точности в зоне выхода метана из горелочного устройства) количество элементов расчетной сетки составило 4 964 825 ед. (рисунок 2.10). Таким образом, реализация алгоритма по автоматическому заданию густоты расчетной сетки в исследуемых областях позволила сократить длительность процесса для просчета на 30 % и повысить точность расчета за счет увеличения густоты сетки в месте выхода и смещения потоков зоне развития и воспламенения пламени.

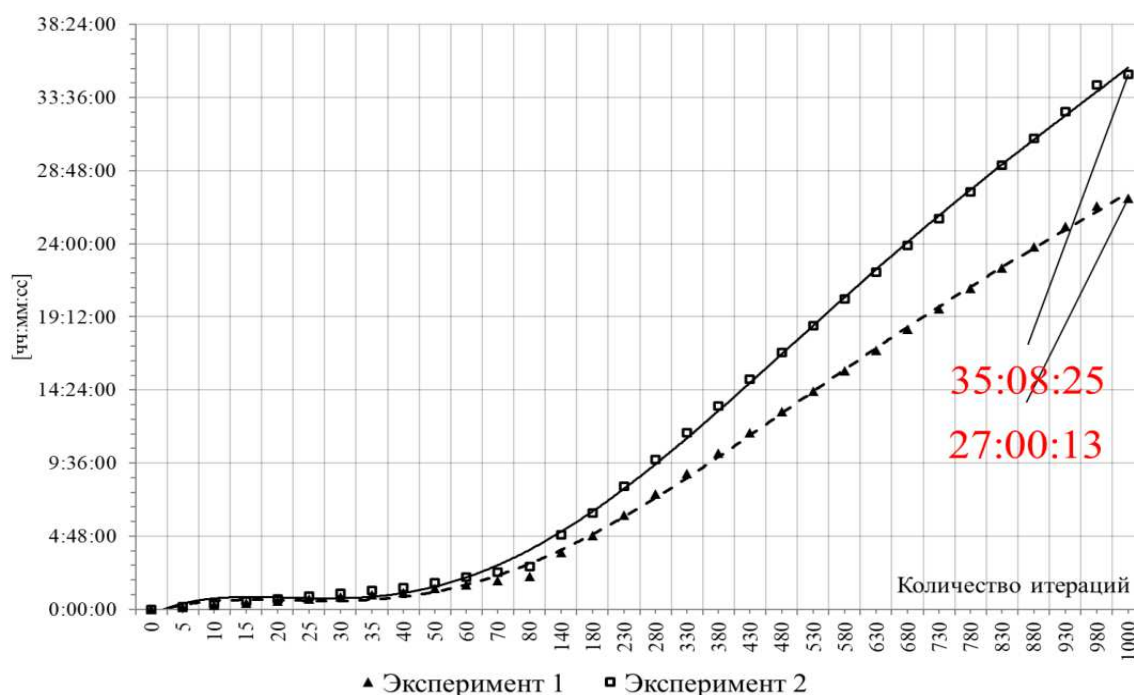


Рисунок 2.10 – Сравнение длительности процесса для просчета одного итерационного этапа

## **Основные результаты и выводы по главе 2**

1. Предложена модификация метода математического моделирования в сопряженной постановке тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топочного устройства, отличающаяся уточнением значения массовой диффузии компонентов метано-воздушной смеси, позволяющая учитывать влияние рециркуляции дымовых газов, что дает возможность с повышенной точностью и достоверностью прогнозировать эмиссию оксидов азота при производстве энергии.

2. Предложена методика для численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности (применяемых для моделирования в камере сгорания топочного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси), реализованная в виде комплекса алгоритмов, отличающаяся применением уточнения радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси и автоматическим заданием густоты расчетной сетки в исследуемых областях, что позволяет сократить вычислительные затраты на процесс расчета горения турбулентной метано-воздушной смеси и обеспечить требуемую точность и достоверность прогнозирования эмиссии оксидов азота.

### Глава 3

## ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ ГАЗОМАЗУТНОЙ ГОРЕЛКИ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭНЕРГИИ

### 3.1. Описание объединенного состава, организационной схемы и алгоритма

Программный комплекс по параметрическому моделированию газомазутной горелки для отработки эффективных технологий сжигания топлива [138] – набор программных модулей, каждый из которых имеет свои функции с файловой структурой на языках программирования Java, Python (рисунок 3.1).

Для повышения функционала комплекса программ на языках программирования Python, Java реализованы элементы компьютерного кода, которые представляются единой системой с формированием отдельных элементов среды программного комплекса. Структурная схема последовательного взаимодействия элементов программного комплекса представлена на рисунке 3.2.

Основой созданного программного комплекса является таблица исходных данных (рисунок 3.3), с которой взаимодействует каждый автономный модуль. Для функционирования автономных модулей применяются встроенные программные библиотеки в среде Компас-3D, STAR-CCM+. Опираясь на таблицу исходных данных, в зависимости от внесенных в нее значений, модуль запуска последовательно запускает автономные модули для формирования внутри программного комплекса STAR-CCM+ и Компас-3D решаемой задачи и итогового отчетного файла.



Рисунок 3.1 – Структурное содержание и процессы элементов комплекса

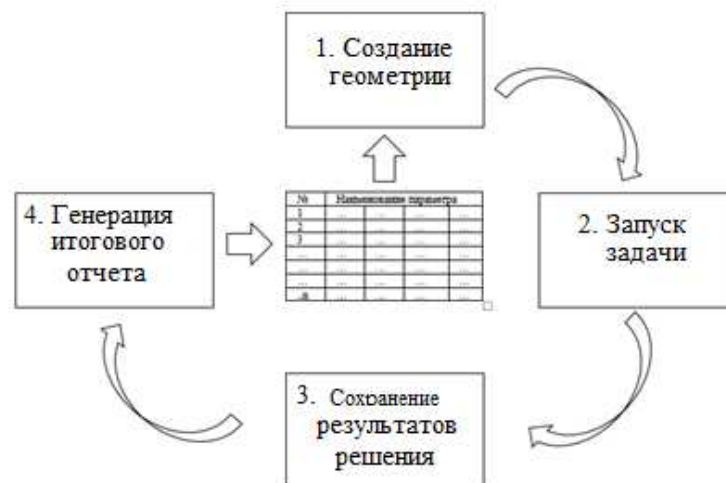


Рисунок 3.2 – Структурная схема последовательного взаимодействия элементов программного комплекса

| Ядро создания геометрии (в Компас 3 D) |  |  |   |   |   |  |   |   |   |   |
|--|--|--|---|---|---|--|---|---|---|---|
| номер эксперимента                     | Количество лопаток в среднем контуре (номин. значение) | Ширина лопаток в среднем контуре (номин. значение) | Количество лопаток в наружном контуре (номин. значение) | Длина лопаток в наружном контуре (номин. значение)            | Угол наклона лопаток в наружном контуре (номин. значение)                 | Количество лопаток во внутреннем контуре подачи водорода (номин. значение) | Ширина лопаток во внутреннем контуре подачи водорода (номин. значение)    | тип амбразуры   | диаметр входа воздуха   | диаметр выхода газа   |
| Название по Компас 3D                  | N1 (18)  | L1 (105)   | N2 (24)   | L2 (70)   | a2 (60)   | N3 (9)   | L3 (29,6)   | .....   | .....   | .....   |
| 1,1                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 1,2                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 1....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 1.n                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2,1                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2,2                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2.n                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| .....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i.1                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i.2                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i.n                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| Ядро запуска задачи                    |  |  |   |   |   |  |   |   |   |   |
| номер эксперимента                     | скорость входа воздуха 1                               | скорость входа воздуха 2                           | скорость входа газа                                     | температура гор. воздуха                                      | исходная концентрация S2  | исходная концентрация H <sub>2</sub>                                       | исходная концентрация O <sub>2</sub>                                      | исходная концентрация N <sub>2</sub>                                      | исходная концентрация CO <sub>2</sub>                                     | исходная концентрация H <sub>2</sub> O                                    |
| Название по Star CCM+                  | Air blades Velocity Magnitude                          | Air inlet Velocity Magnitude                       | CH4 Mass Flow Rate                                      | FGM table generation / Fluid streams / Oxidizer / Temperature | FGM table generation / Fluid streams / Oxidizer / Fluid Stream Components | FGM table generation / Fluid streams / Oxidizer / Fluid Stream Components  | FGM table generation / Fluid streams / Oxidizer / Fluid Stream Components | FGM table generation / Fluid streams / Oxidizer / Fluid Stream Components | FGM table generation / Fluid streams / Oxidizer / Fluid Stream Components | FGM table generation / Fluid streams / Oxidizer / Fluid Stream Components |
| 1,1                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 1,2                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 1....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 1.n                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2,1                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2,2                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| 2.n                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| .....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i.1                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i.2                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i....                                  | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |
| i.n                                    | .....  | .....  | .....   | .....   | .....   | .....  | .....   | .....   | .....   | .....   |

Рисунок 3.3 – Таблица исходных данных вычислительного эксперимента для комплекса программ

С использованием первого модуля – модуля запуска – осуществляется обработка (возможно дополнение) входных параметров из таблицы исходных данных эксперимента (рисунок 3.3), формирование которой позволяет выявить

связь между постановкой задачи и конечным результатом решения по обработанным данным из итогового отчета. Первый модуль представляется необходимым составляющим комплекса программ, несущим ответственность за возникновение потоков данных, поступающих от опрашиваемых окон и управляющих модулей, и запускает обработку постановленной задачи.

Таблица исходных данных вычислительного эксперимента для комплекса программ является редактируемым файлом в формате \*.xlsx с параметрами для задания параметров расчетов моделируемого изделия, которые внедряются на этапе передачи шагов в расчетный модуль программного пакета STAR-CCM+.

Модуль запуска основывается на обработке входных данных и в их последующей передаче в сформированные для работы в комплексе программ алгоритмы. Для записи и хранения данных работа модуля запуска осуществляется в отдельной области в памяти, а запуск сгенерированных файлов осуществляется в защищенном отдельном консольном окне, это позволяет не влиять на работу самого комплекса программ и запускаемые процессы в используемых программных пакетах STAR-CCM+ и Компас-3D. Дополнительно модуль запуска осуществляет на определенных этапах проверку входных параметров, методов и структуры конечных файлов.

Модули представляются автономными структурами, со своими алгоритмами, дающими возможность управлять разнородными составными частями комплекса программ. Независимость гарантируется обработкой данных свободно от других составных частей комплекса программ. Оконный интерфейс передачи и получения данных между составными частями комплекса программ выстраивается модулем, отвечающим за представление интерфейса.

Оконный интерфейс, передача данных и получение данных между комплексом программ формируются блоком технической надстройки, за счет реализации которой имеется возможность оценки этапности выполнения группы экспериментов и проведения первичной сверки.

Модуль формирования геометрии опирается на заложенный алгоритм с авторскими библиотеками по выработанным методам создания геометрии



с возможностью выполнения операций на языке программирования Python по параметризации геометрической модели из таблицы исходных данных вычислительного эксперимента для комплекса программ. Работа данного модуля совместно с таблицей исходных данных вычислительного эксперимента для комплекса программ дает возможность реализовать ряд изменений и усовершенствований с испытываемым объектом, не прибегая к запуску интерфейса Компас-3D и STAR-CCM+. Помимо вышеизложенного, данный модуль и алгоритм позволяют не обладать знаниями работы с интерфейсом и инструментами вычислительного модуля пакета трехмерного проектирования. В данном модуле реализованы все методы создания геометрии, необходимые для решения поставленной перед исследователем задачи.

Созданный комплекс программ представляет собой набор взаимодействующих между собой вычислительных модулей (вычислительный модуль для работы с геометрией, вычислительный модуль для обработки результатов эксперимента, вычислительный модуль для работы с сеткой, вычислительный модуль для решения задачи).

За хранение данных для последующей работы или возможности возврата решения на предыдущий этап работы отвечает модуль памяти.

Принцип работы комплекса программ заключается в считывании на каждом этапе исходных данных с таблицы исходных данных вычислительного эксперимента на каждом этапе работы: техническая настройка, построение геометрии и наложение сетки конечных элементов, расчет и анализ вычислительных результатов.

Также одной из особенностей работы с таблицей исходных данных является предварительная проработка ряда исходных данных с формулами для аналитического решения задач, которые хранятся в отдельном редактируемом файле, что позволяет в реальном времени работы комплекса программ и на итерационных шагах расчета задачи добавлять новые формулы в расчет, редактировать существующие, повышая точность и скорость решения

поставленной перед исследователем задачи в программном пакете STAR-CCM+ (рисунок 3.4).

|  |              |             |  |         |         |       |   |       |       |        |        |        |         |
|--|--------------|-------------|--|---------|---------|-------|---|-------|-------|--------|--------|--------|---------|
| Пирометрический коэф. нижнего яруса    |              |             |  | 0,77    |         |       |   |       |       |        |        |        |         |
| Пирометрический коэф. верхнего яруса   |              |             |  | 0,70    |         |       |   |       |       |        |        |        |         |
| Теплота вносимая в топку воздухом      |              |             |  | 3474,7  | кДж/кг  |       |   |       |       |        |        |        |         |
| Степень рециркуляции                   |              |             |  | 0       | 0,05    | 0,1   | 0,12                                    | 0,15  | 0,2   | 0,25   | 0,3    | б / р  |         |
| Объем продуктов сгорания + рецирк      |              |             |  | 16,8874 | 17,6527 | 18,42 | 18,724                                  | 19,18 | 19,95 | 20,71  | 21,48  | м3/м3  |         |
| Теплота вносимая в топку рецирк        |              |             |  | 0       | 247,3   | 494,6 | 593,52                                  | 741,9 | 989,2 | 1236,5 | 1483,8 | кДж/кг |         |
| Максимальная температура               |              |             |  | 2223    | 2127    | 2041  | 2008                                    | 1962  | 1892  | 1827   | 1768   | С      |         |
| Действительная температура             |              |             |  | 1715    | 1641    | 1574  | 1550                                    | 1514  | 1459  | 1410   | 1364   | С      |         |
| Доля подачи рециркуляции дымовых газов | верхний ярус | нижний ярус |  |         |         |       | Расчетная действительная температура, С |       |       |        |        |        | Примеч. |
| верхний                                | 0            | 100         |  | 1715    | 1547    | 1547  | 1547                                    | 1547  | 1547  | 1547   | 1547   | 1547   |         |
| нижний                                 |              |             |  |         | 1641    | 1574  | 1550                                    | 1514  | 1459  | 1410   | 1364   |        |         |
| средняя                                |              |             |  |         | 1594    | 1561  | 1548                                    | 1531  | 1503  | 1478   | 1456   |        |         |
| верхний                                | 10           | 90          |  |         | 1540    | 1533  | 1531                                    | 1527  | 1520  | 1514   | 1508   |        |         |
| нижний                                 |              |             |  |         | 1648    | 1587  | 1565                                    | 1532  | 1481  | 1435   | 1392   |        |         |
| средняя                                |              |             |  |         | 1594    | 1560  | 1548                                    | 1529  | 1501  | 1474   | 1450   |        |         |
| верхний                                | 20           | 80          |  |         | 1533    | 1520  | 1515                                    | 1507  | 1495  | 1482   | 1471   |        |         |
| нижний                                 |              |             |  |         | 1655    | 1601  | 1580                                    | 1550  | 1504  | 1461   | 1422   |        |         |
| средняя                                |              |             |  |         | 1594    | 1560  | 1547                                    | 1529  | 1499  | 1472   | 1446   |        |         |
| верхний                                | 30           | 70          |  |         | 1526    | 1507  | 1499                                    | 1488  | 1470  | 1452   | 1435   |        |         |
| нижний                                 |              |             |  |         | 1663    | 1614  | 1596                                    | 1569  | 1527  | 1489   | 1453   |        |         |
| средняя                                |              |             |  |         | 1594    | 1560  | 1547                                    | 1528  | 1498  | 1470   | 1444   |        |         |
| верхний                                | 40           | 60          |  |         | 1520    | 1494  | 1484                                    | 1469  | 1446  | 1423   | 1402   |        |         |
| нижний                                 |              |             |  |         | 1670    | 1628  | 1612                                    | 1588  | 1552  | 1517   | 1485   |        |         |
| средняя                                |              |             |  |         | 1595    | 1561  | 1548                                    | 1529  | 1499  | 1470   | 1443   |        |         |
| верхний                                | 50           | 50          |  |         | 1513    | 1481  | 1469                                    | 1451  | 1422  | 1395   | 1370   |        |         |
| нижний                                 |              |             |  |         | 1677    | 1642  | 1628                                    | 1608  | 1576  | 1547   | 1519   |        |         |
| средняя                                |              |             |  |         | 1595    | 1561  | 1548                                    | 1529  | 1499  | 1471   | 1444   |        |         |

Рисунок 3.4 – Пример предварительной проработки исходных данных

Составной элемент «Проверка» реализован в модулях с автономными структурами в алгоритме запуска расчета, алгоритме технической настройки, алгоритме формирования геометрии и наложения сетки конечных элементов, алгоритме анализа вычислительных результатов.

За формирование структуры данных, получаемых от управляющих блоков, отвечает модуль, в соответствии с алгоритмом выполняющий последовательность действий, обрабатывая решаемую задачу.

На рисунках 3.5, 3.6 представлены алгоритмы этапов от построения геометрии моделируемого объекта до этапа построения расчетной сетки и проверки ее элементов на ошибки. На рисунке 3.7 показан алгоритм этапа начала вычислительного эксперимента и последующего анализа конечного результата.

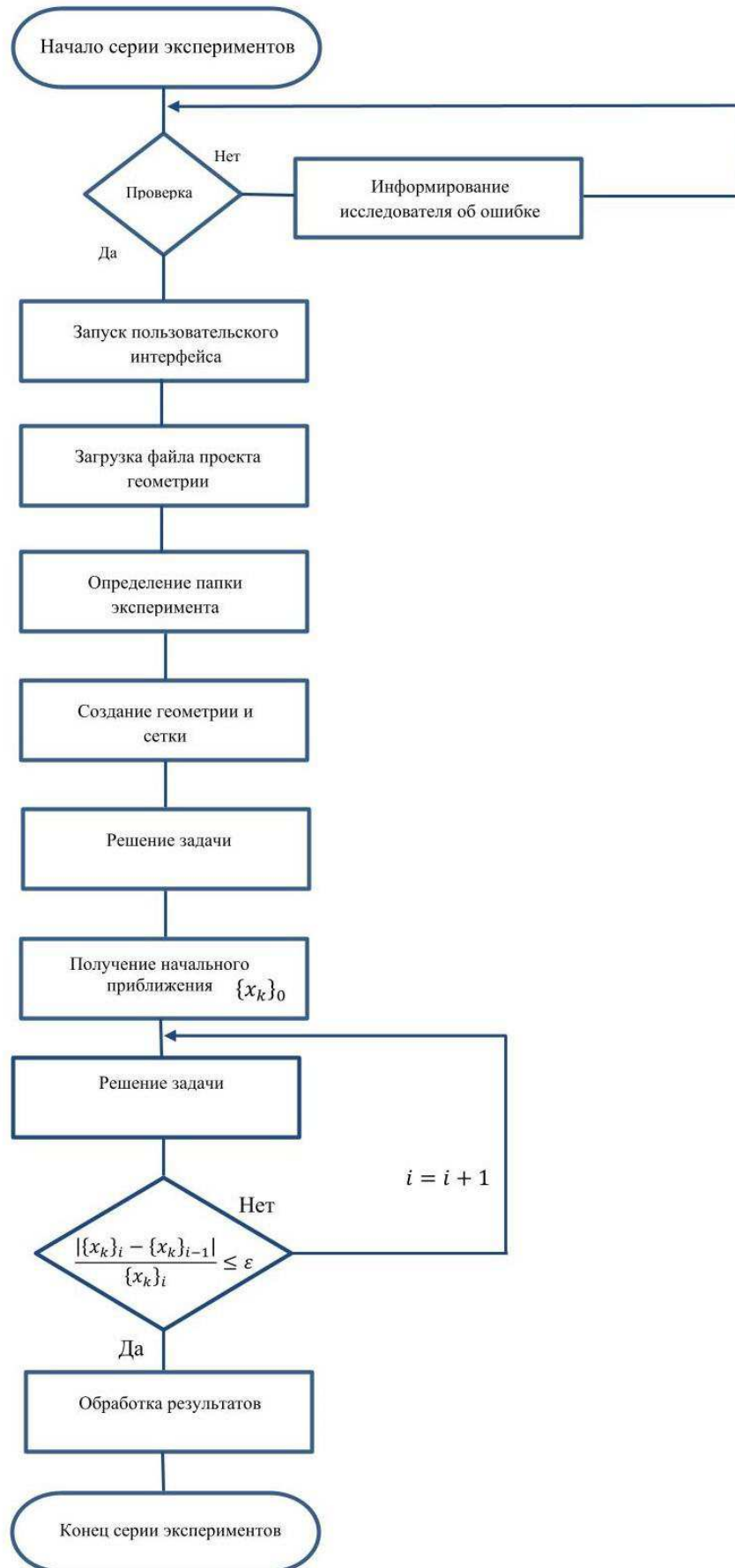


Рисунок 3.5 – Алгоритм этапа начальной настройки

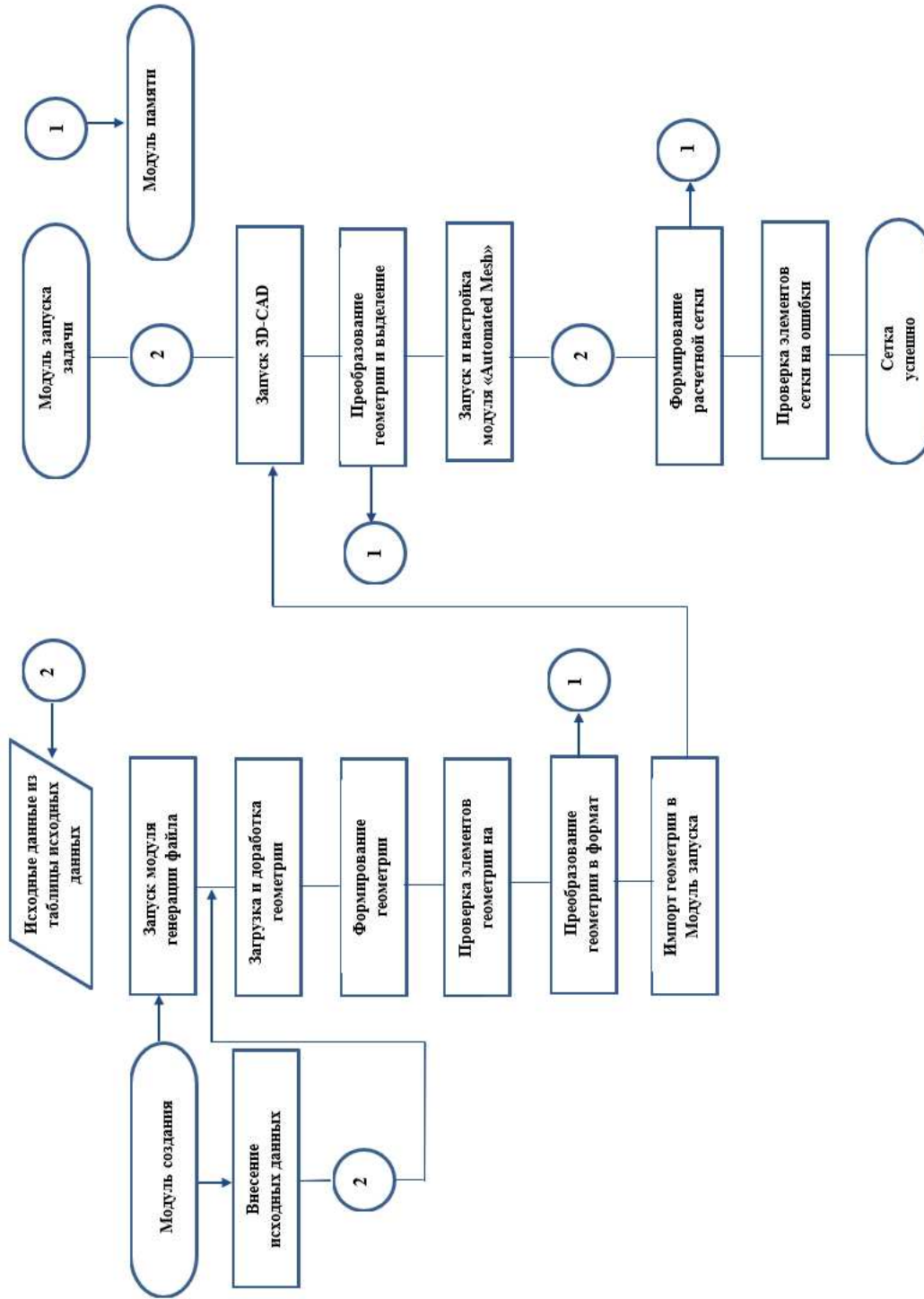


Рисунок 3.6 – Алгоритм этапов от построения геометрии моделируемого объекта до этапа построения расчетной сетки и проверки ее элементов на ошибки

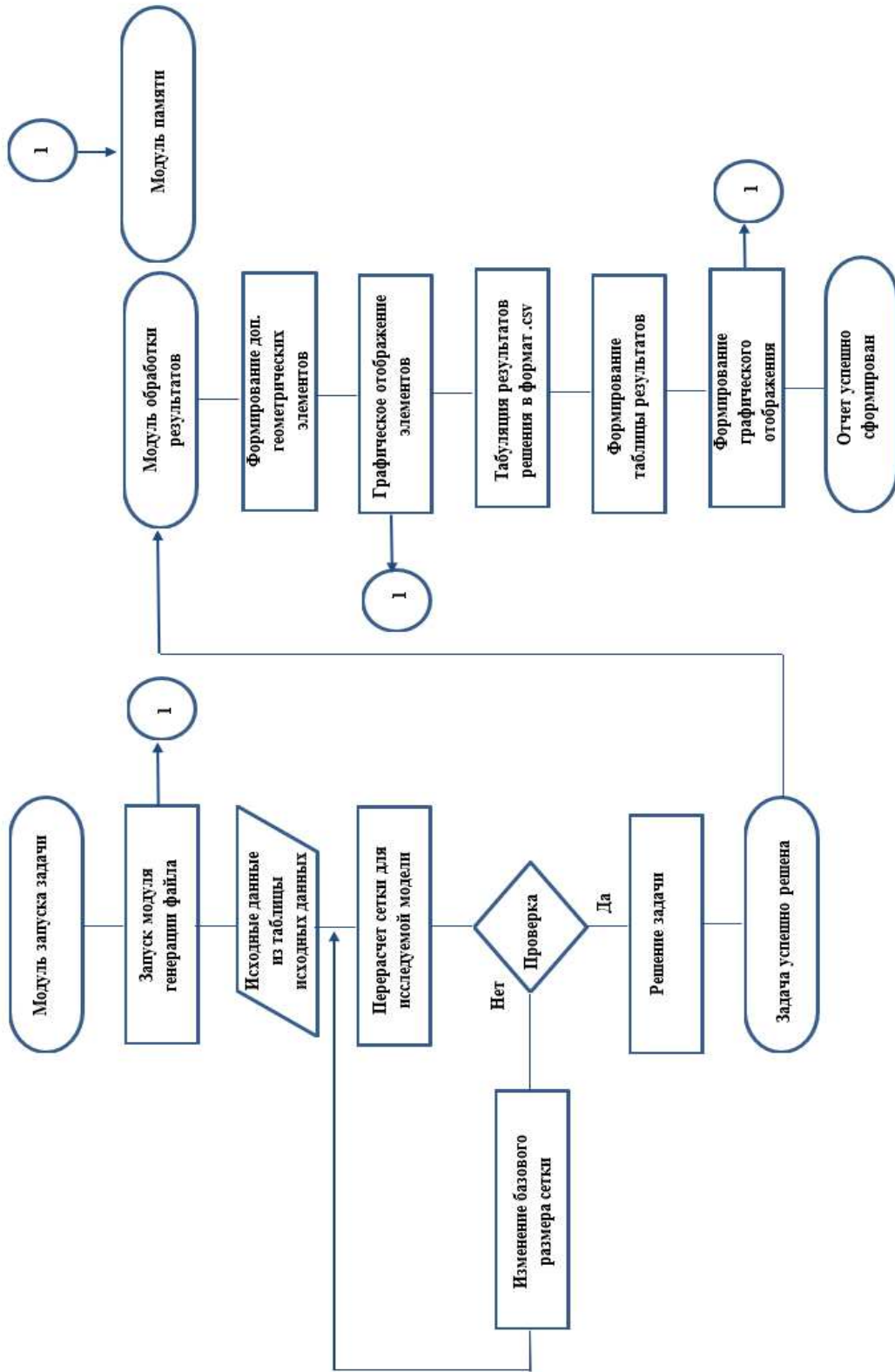


Рисунок 3.7 – Алгоритм этапа начала вычислительного эксперимента и последующего анализа конечного результата

### 3.2. Представление функциональности реализованного программного комплекса

Процесс работы с комплексом программ состоит из нескольких этапов. На первом этапе исследователь заполняет таблицу исходных данных вычислительного эксперимента по актуальным режимным картам энергетического оборудования и предварительно рассчитанным данным, также осуществляется техническая настройка (рисунок 3.8), за счет реализации которой имеется возможность оценки этапности выполнения группы экспериментов с проведением их первичной сверки. При технической настройке осуществляется подбор шаблонных исполняющих файлов пакетных программных продуктов STAR-CCM+, Компас-3D в комплекс программ (ComplexCore.java).

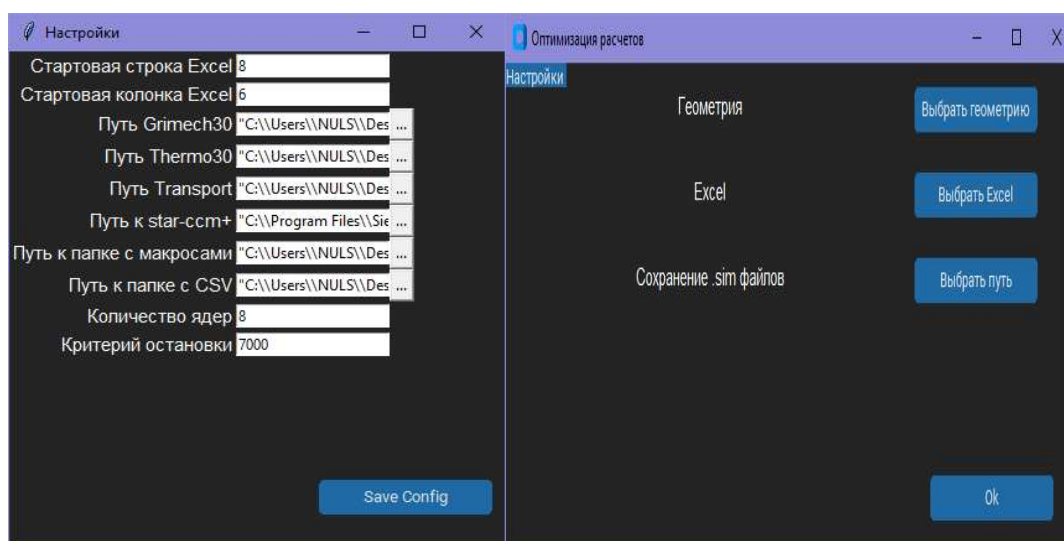


Рисунок 3.8 – Окна технической настройки комплекса программ

Для простоты настройки и проведения вычислительного эксперимента комплекс имеет таблицу исходных данных, из которой исходные данные поступают в исполнительный файл программных продуктов. После выбора исполняющих файлов пакетных программных продуктов в каталоге ЭВМ

пользователя выбирается расположение проекта, выполняется ввод названия проекта по решению задачи.

Одни из основных команд сценария реализованного кода комплекса программ:

- <StarDir> – системный путь к исполняемому файлу STAR-CCM+;
- <CompasDir> – системный путь к исполняемому файлу Компас-3D;
- <GeometryDir> – системный путь к каталогу с исходной геометрией;
- <GeometryPy> – название файла скрипта Python для изменения геометрии;
- <CoreStar> – название исполняемого файла программного комплекса на языке Java;
- <OutDir> – системный путь каталога для сохранения результатов моделирования.

Основным алгоритмом работы комплекса программ является процедура, которая при передаче данных в шаблонные исполняющие файлы пакетных программных продуктов STAR-CCM+, Компас-3D также отлавливает ошибки на различных этапах вычислительного эксперимента, такие как: несогласованность элементов трехмерного изображения объекта эксперимента, несогласованность элементов расчетной сетки, несогласованность исходных данных скоростей потоков в объекте эксперимента и т.п.

После формирования частей оконного интерфейса следует этап построения геометрии моделируемого объекта. На данном этапе процедурой из таблицы исходных данных задаются геометрические параметры: угол наклона лопаток закручивающего аппарата первичного и вторичного воздуха, количество лопаток закручивающего аппарата, диаметры входа/выхода и т.п.

Созданное геометрическое тело в вычислительном модуле Компас-3D экспортируется, в вычислительный модуль 3D-CAD Models программного пакета STAR-CCM+ с последующей обработкой и созданием цилиндрических зон (рисунок 3.9). Вышеуказанные действия являются ключевыми для построения расчетной сетки в модуле «Automated Mesh» и задания граничных условий модуля запуска задачи (рисунок 3.10).

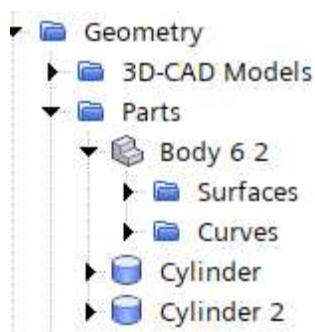
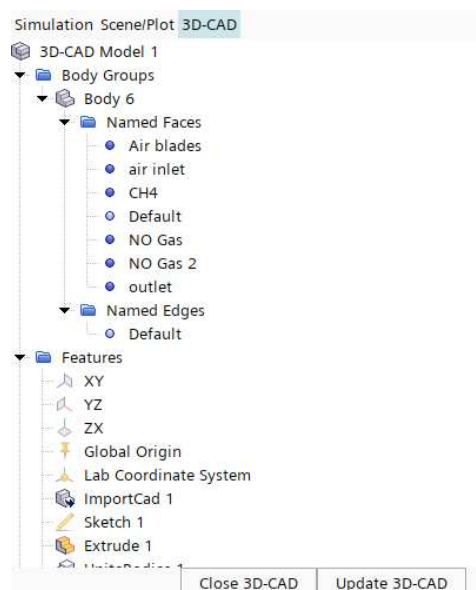


Рисунок 3.9 – Интерфейс создания цилиндрических зон в модуле 3D-CAD Models (Cylinder; Cylinder 2)

| Деталь (Тел-1)  |         |         |  |
|---|---------|---------|--|
| N1  | 18      | 18      |  |
| N2  | 24      | 24      |  |
| N3  | 9       | 9       |  |
| a2  | 60      | 60      |  |
| L2  | 70      | 70      |  |
| L1  | 105     | 105     |  |
| L3  | 29.6216 | 29.6216 |  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Начало координат</li> <li>▶ Деталь</li> <li>▶ Эскиз:1</li> <li>▶ Операция выдавливания:1</li> <li>▶ Эскиз:2</li> <li>▶ Операция выдавливания:2</li> <li>▶ Смещенная плоскость:1</li> </ul> |         |         |  |

а)



б)

Рисунок 3.10 – Интерфейс задания геометрических параметров 3D-модели модуля создания геометрии (а) и ее экспорта и надстройки в модуле 3D-CAD Models модуля запуска задачи (б)

После формирования элементов 3D-модели горелочного устройства и камеры сгорания с цилиндрическими зонами идет автоматическое наложение расчетной сетки, отличающееся позонным измельчением самой сетки по цилиндрическим зонам (рисунки 3.11, 3.12) относительно базового размера:

- наиболее густая сетка применяется для горелочного устройства в месте выхода и смещения потоков;



- средняя по густоте сетка – в осесимметричном направлении в зоне развития пламени с максимальными температурами;
- наименее густая сетка – оставшееся пространство топочного устройства/камеры сгорания.

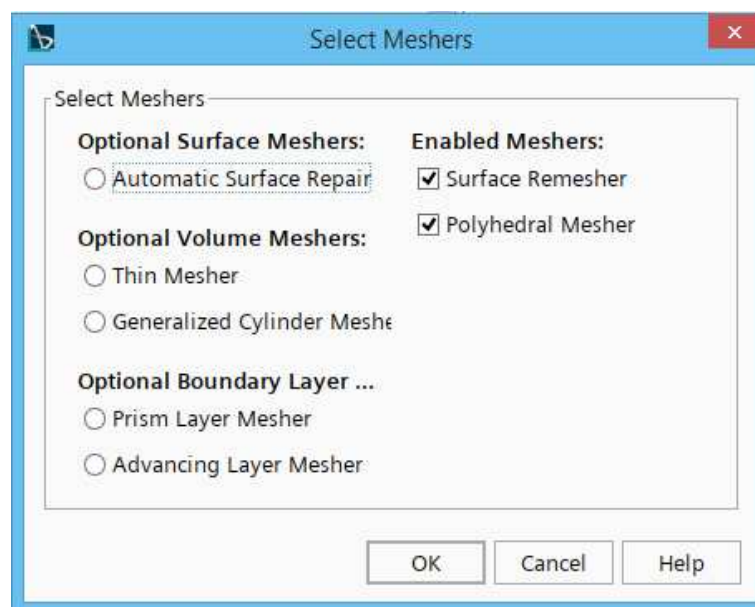


Рисунок 3.11 – Интерфейс настройки процесса наложения сетки на проектируемый элемент в программном комплексе

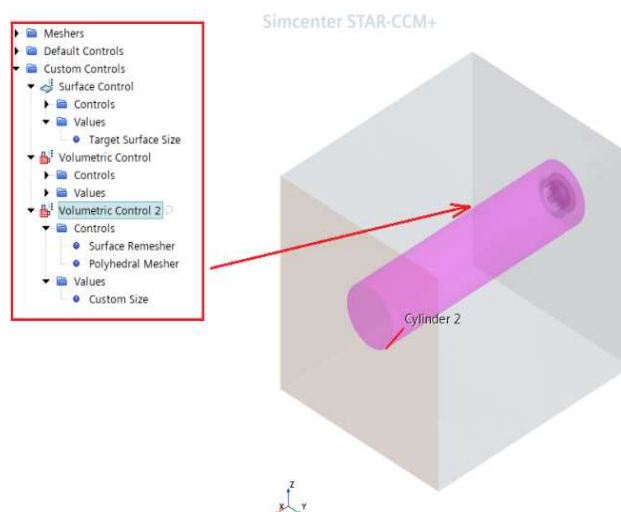


Рисунок 3.12 – Интерфейс настройки расчетной сетки цилиндрических зон (Cylinder; Cylinder 2)

В программном комплексе STAR-CCM+ в модуле построения геометрии «Automated Mesh» построение расчетной сетки производится с помощью языка программирования Java.

Следующим этапом после создания расчетной сетки идет этап формирования начальных и граничных условий, выбора моделей горения и применяемых в вычислительном эксперименте уравнений, в том числе химических реакций и т.п. (рисунок 3.13).

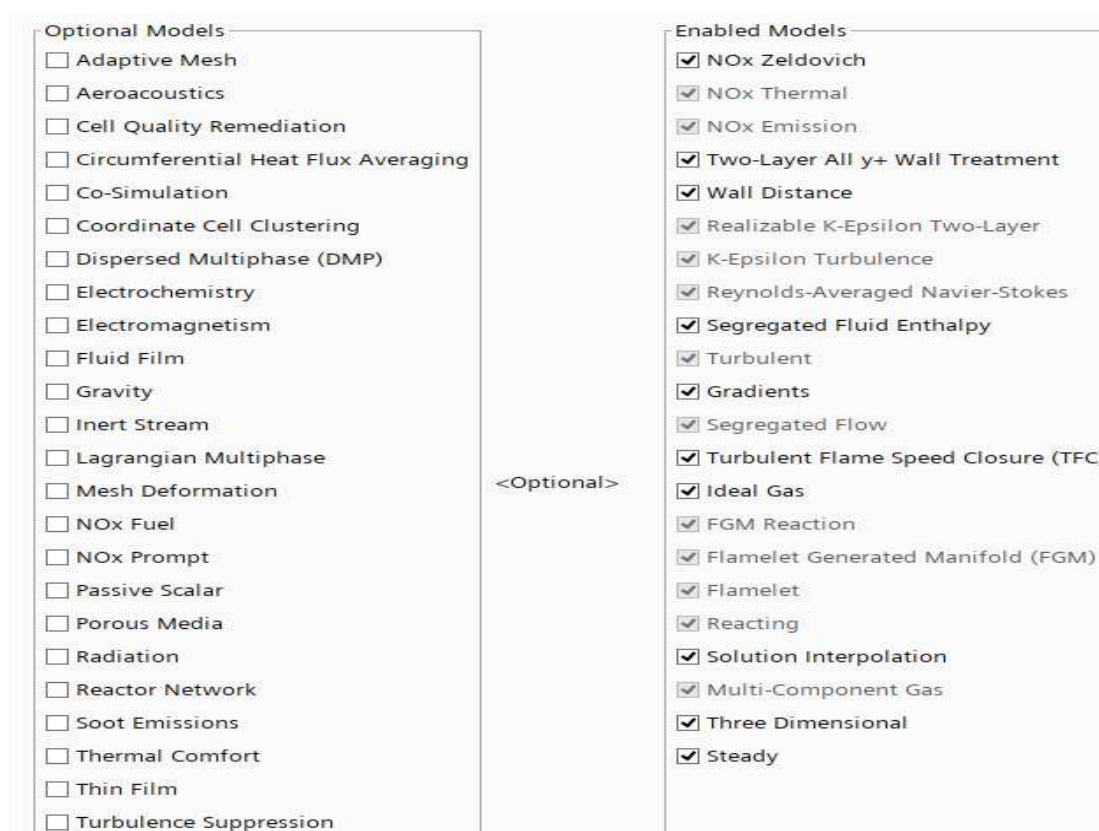


Рисунок 3.13 – Интерфейс настройки элементов расчетной модели в программном комплексе

У исследователя нет необходимости повторного внесения численных значений граничных условий (рисунок 3.14), поскольку они берутся по данным таблицы исходных данных вычислительного эксперимента. Вычислительный блок формируется готовым кодом в STAR-CCM+, и не требуется заходить в программный пакет, что сильно упрощает работу.

У исследователя есть возможность дополнительной настройки проекта вручную с последующим сохранением внесенных изменений. Программная среда просчитывает этапы модуля решения задачи уже исходя из последней редакции параметров.

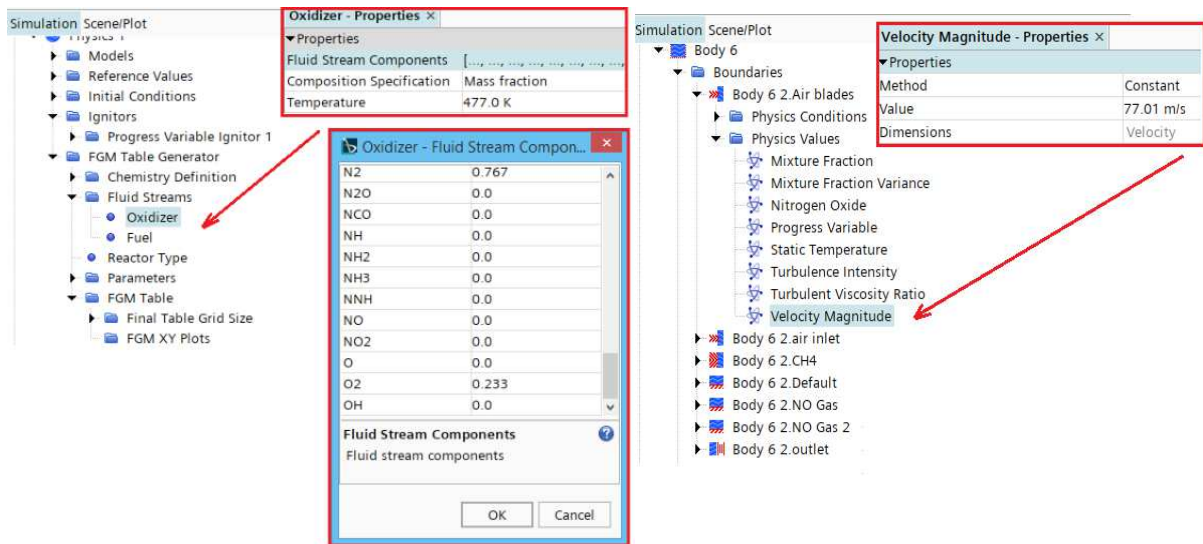


Рисунок 3.14 – Интерфейс для настройки граничных условий в программном комплексе

Модуль обработки результатов решений, получив уведомление об исполнении процесса модулем запуска задачи, уже сохраненным модулем «Память», приступает к следующему этапу вычислительного эксперимента (рисунок 3.15).

На данном этапе идет формирование дополнительных геометрических объектов, таких как линии, планы для отображения результатов выполненного решения задачи на предыдущем этапе работы программного комплекса. Запускается процесс формирования графического отображения скалярных величин (температура, массовое содержание  $\text{NO}_x$ , массовое содержание CO и  $\text{CO}_2$  и т.п.) с последующей табуляцией данных по сформированным дополнительным на данном этапе геометрическим объектам в формат \*.csv. Все скалярные величины имеют строгую привязку к координатам, что позволяет проводить их сравнительный анализ и сформировать итоговую таблицу результатов.

Полученные в ходе проведения вычислительного эксперимента (при помощи разработанного программного комплекса) данные с привязкой не только к определенным координатам, но и начальным и граничным условиям, формируются в итоговую таблицу эксперимента. Данная таблица эксперимента (и ее графическое отображение параметров) позволяет провести исследование по выявлению закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси как с учетом инициируемых воздействий, так и без них.

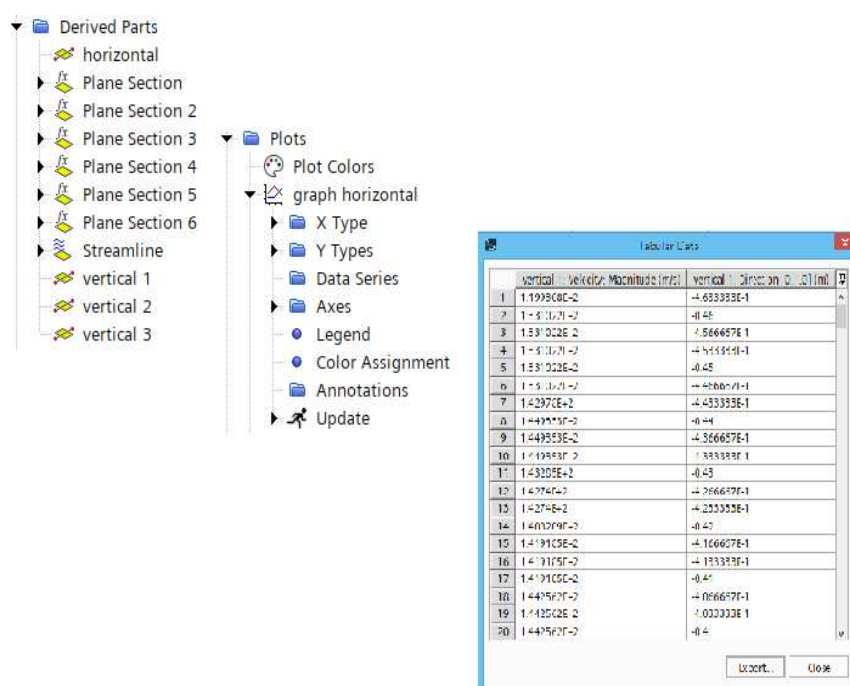


Рисунок 3.15 – Интерфейс модуля обработки результатов решений с таблицей результатов вычислительного эксперимента для последующей генерации итогового отчета результатов вычислительного эксперимента в программном комплексе

В дальнейшем таблица экспериментов может быть представлена в качестве выборки эксперимента для последующего прогнозирования работоспособности горелочного устройства [135, 139, 140] в технологии машинного обучения. В данном случае под работоспособностью подразумевается горение метано-воздушной смеси с обеспечением экологически низкоэмиссионного сжигания топлива с достигнутой наивысшей эффективностью использования топлива. Система искусственного интеллекта также имеет возможность обучения при

определении работоспособности горелочного устройства на примерах из итоговой таблицы эксперимента. В ходе экспериментов имеются данные серии с наихудшими экологическими показателями и наименьшей эффективностью использования топлива [127, 140].

### **Основные результаты и выводы по главе 3**

1. Разработан алгоритм численного исследования закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси, являющийся основой взаимодействия автономных модулей комплекса программ, отличающийся автоматическим параметрическим моделированием газомазутной горелки, что позволяет упростить работу с интерфейсом прикладных программ трехмерного проектирования и прикладных программ для моделирования.

2. На основе разработанных алгоритмов разработан комплекс программ для проведения комплексных исследований, вычислительного эксперимента, отработки технических решений для устойчивого низкоэмиссионного горения перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с учетом инициируемых воздействий (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация, № 2023614041).

## Глава 4

### ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ

Учитывая литературный обзор и задачи, поставленные в диссертационном исследовании, приведенные в главе 1, разработка новых технологий снижения эмиссии оксидов азота при производстве энергии может быть основана на новых результатах в области математического моделирования горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с применением разработанного комплекса программ [138].

Реализация природоохранных мероприятий на паровых котлах, введенных в эксплуатацию до 30 лет назад, в которых реализация данных мероприятий не предусмотрена, требует выполнения тепловых расчетов котла как в существующих условия эксплуатации, так и в предлагаемых режимах. Так, в работе [103] для котла Е-320-13.8-560ГМ установлено, что реализация двух-ступенчатого сжигания и организация рециркуляции дымовых газов оказывает влияние: на работу котла на номинальной нагрузке; на температуру пара проектного режима; на изменение температурных напоров в конвективных ступенях нагрева и ширмах пароперегревателя; на изменение скорости продуктов сгорания; на величину поддерживаемого уровня избытка воздуха в топке.

#### 4.1. Условия проведения вычислительного эксперимента

На российских тепловых электростанциях одной из широко распространенных является модель парового котла ТГМЕ-464, конструкция которого разработана в 60-е годы XX в., производство Таганрогского котельного

завода «Красный котельщик», и введена в эксплуатацию по Приволжскому федеральному округу РФ на Новочебоксарской ТЭЦ-3, Чебоксарской ТЭЦ-2, Ульяновской ТЭЦ-1, Пензенской ТЭЦ-1, Саранской ТЭЦ-2, Саратовской ТЭЦ-5, Сакмарской ТЭЦ, Сызранской ТЭЦ и Самарской ТЭЦ. Данная модель парового котла принята в качестве репрезентативного прототипа для моделирования процесса горения с применением разработанного комплекса программ. В качестве основного топлива данного типа паровых котлов применяется природный газ, а резервным топливом является мазут М-100. Состав сжигаемого газа приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Состав сжигаемого газа

| Компонент<br>Сжигаемого газа | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | CO <sub>2</sub> | N    | Прочие |
|------------------------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|------|--------|
| Показатель, %                | 94,82           | 2,53                          | 0,7                           | 0,093                          | 0,146           | 1,52 | 0,191  |

Необходимо отметить, что рециркуляция дымовых газов в котлах, работающих под наддувом, не оказывает влияния на избыток воздуха, так как количество воздуха, подаваемого на 1 кг топлива, не изменяется, в отличие от паровых котлов с уравновешенной тягой [116].

Паровой газоплотный котел ТГМЕ-464 спроектирован для сжигания природного газа и мазутного топлива, имеет один барабан и П-образную компоновку. Пароперегреватель выполнен двухпоточным – ширмовый пароперегреватель; четыре ступени пароперегревателя. В верхней части топки подвешены в один ряд вертикальные ширмы из U-образных змеевиков. Потолочный пароперегреватель расположен над топочной камерой, переходным газоходом и конвективной шахтой. В тракт пароперегревателя включены панели ограждений переходного газохода и конвективной шахты. Для регулирования температуры пара и защиты поверхностей нагрева на котлоагрегате установлены три ступени впрыска собственного конденсата, состоящих из шести конденсатных установок. Основные технические характеристики агрегата приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики котла ТГМЕ-464

| Наименование                        | Ед. изм.       | Значение   |
|-------------------------------------|----------------|------------|
| Номинальная производительность      | т/ч (Гкал/ч)   | 500 (300)  |
| Рабочее давление в барабане         | ати            | 162        |
| Рабочее давление на выходе из котла | ати            | 140        |
| Температура перегретого пара        | °С             | 560        |
| Температура питательной воды        | °С             | 230        |
| Размеры топочной камеры             | мм             | 7680·13520 |
| Водяной объем котла                 | м <sup>3</sup> | 86         |
| Паровой объем котла                 | м <sup>3</sup> | 95         |
| Объем топочной камеры               | м <sup>3</sup> | 1610       |

Данный тип парового котла оснащен восемью горелками типа ГМУ-45, способными к отдельному и совместному сжиганию природного газа и мазутного топлива. Горелочные устройства номинальной производительностью 4500 нм<sup>3</sup>/ч (45 МВт) установлены в два яруса на отметках 6,15 и 8,75 м.

Для более качественного смешения топливо-воздушной смеси горелочное устройство ГМУ-45 имеет два канала для подачи воздуха в зону горения, которые оснащены закручивающими аппаратами (рисунок 4.1): осевым и тангенциальным.

Для более качественного распыла топлива в устройстве предусмотрена центральная подача топлива. Со стороны топочного пространства (зона амбразуры) газовый коллектор представляет собой укороченный конус, в котором имеются два ряда отверстий.

Котлоагрегат ТГМЕ-464 оборудован дутьевым вентилятором типа ВДН-25х2-1, предназначенным для подачи воздуха в топку. Забор воздуха



вентилятором осуществляется из верхней части котельного отделения или с улицы.

Для регулирования температуры перегретого пара и с целью уменьшения вредных выбросов в атмосферу на котле предусмотрена рециркуляция дымовых газов. Рециркуляция дымовых газов осуществляется дымососом ГД–20/500У. Дымовые газы отбираются после экономайзера и подаются в воздуховод горячего воздуха после регенеративного воздухоподогревателя. Максимально допустимая температура газов перед дымососом 400 °С при рабочей температуре газов 300 °С.

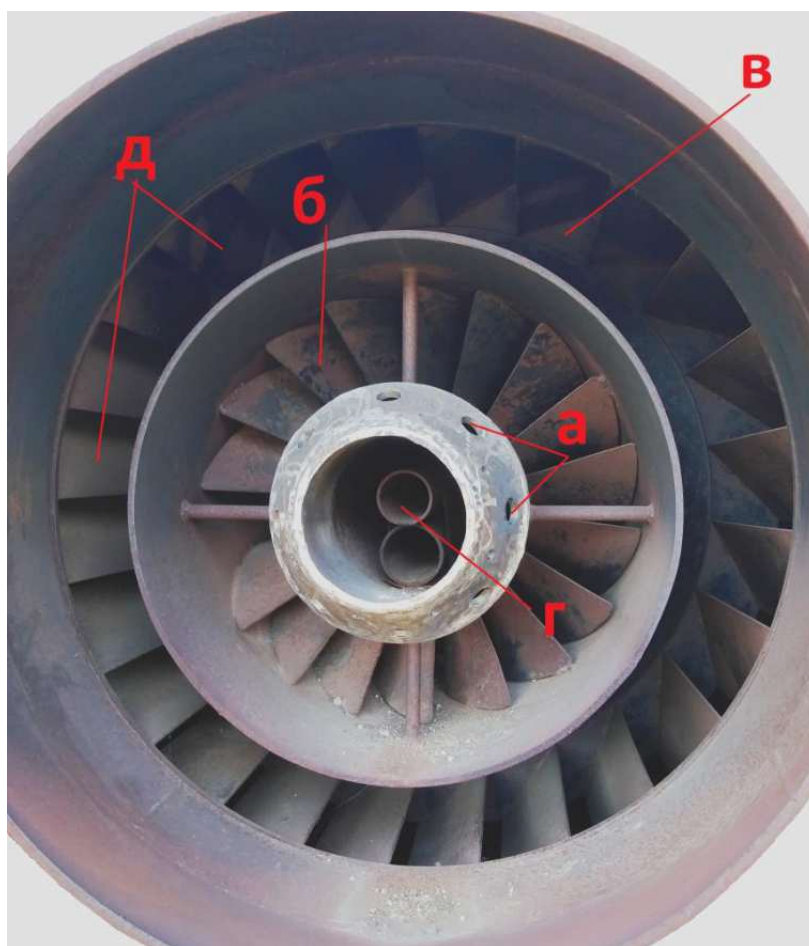


Рисунок 4.1 – Эксплуатируемое горелочное устройство:

- а – отверстия для выхода газа;
- б – внутренний канал выхода воздушной смеси;
- в – периферийный канал выхода воздушной смеси;
- г – канал для выхода топчного мазута;
- д – лопатки осевого закручивающего аппарата

Ограниченность применения рециркуляции дымовых газов связана со снижением экономических показателей котла. КПД котла снижается на 0,01–0,03 % на каждый 1 % степени рециркуляции. Снижение КПД котла поясняется ростом потерь тепла с продуктами сгорания топлива из-за повышения температуры уходящих газов, помимо роста потерь тепла увеличиваются затраты на перекачку продуктов сгорания топлива. На рисунке 4.2 представлено сравнение КПД парового котла от его нагрузки при реализации рециркуляции дымовых газов и без нее.

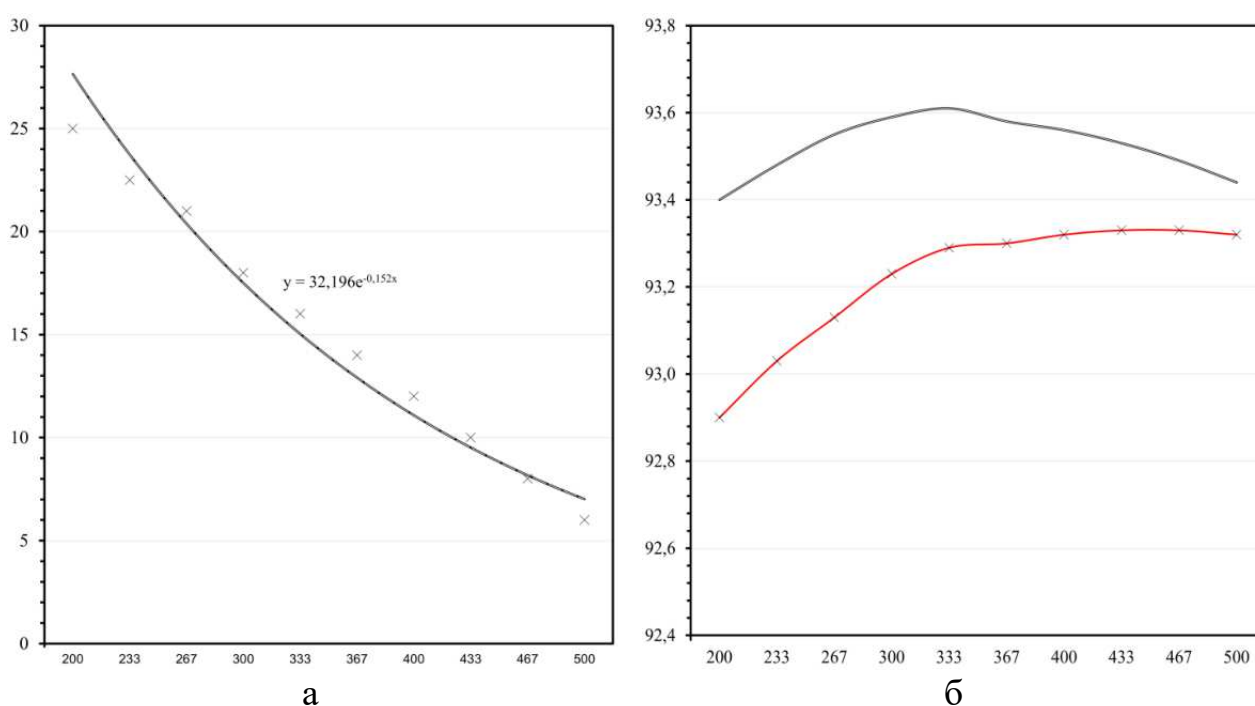


Рисунок 4.2 – Зависимость степени подачи газов рециркуляции для парового котла ТГМЕ-464 (а). Ось абсцисс – паропроизводительность, т/ч; ось ординат – степень рециркуляции, %; зависимость КПД парового котла от его нагрузки (б): красная прямая – с организацией рециркуляции дымовых газов, черная прямая – без рециркуляции дымовых азот. Ось абсцисс – паропроизводительность, т/ч; ось ординат – КПД, %

По данным режимных карт (рисунок 4.3), сформированных по результатам проведенных испытаний котла на различных нагрузках, присутствует периодическое превышение концентрации  $\text{NO}_x$  [9, 10].

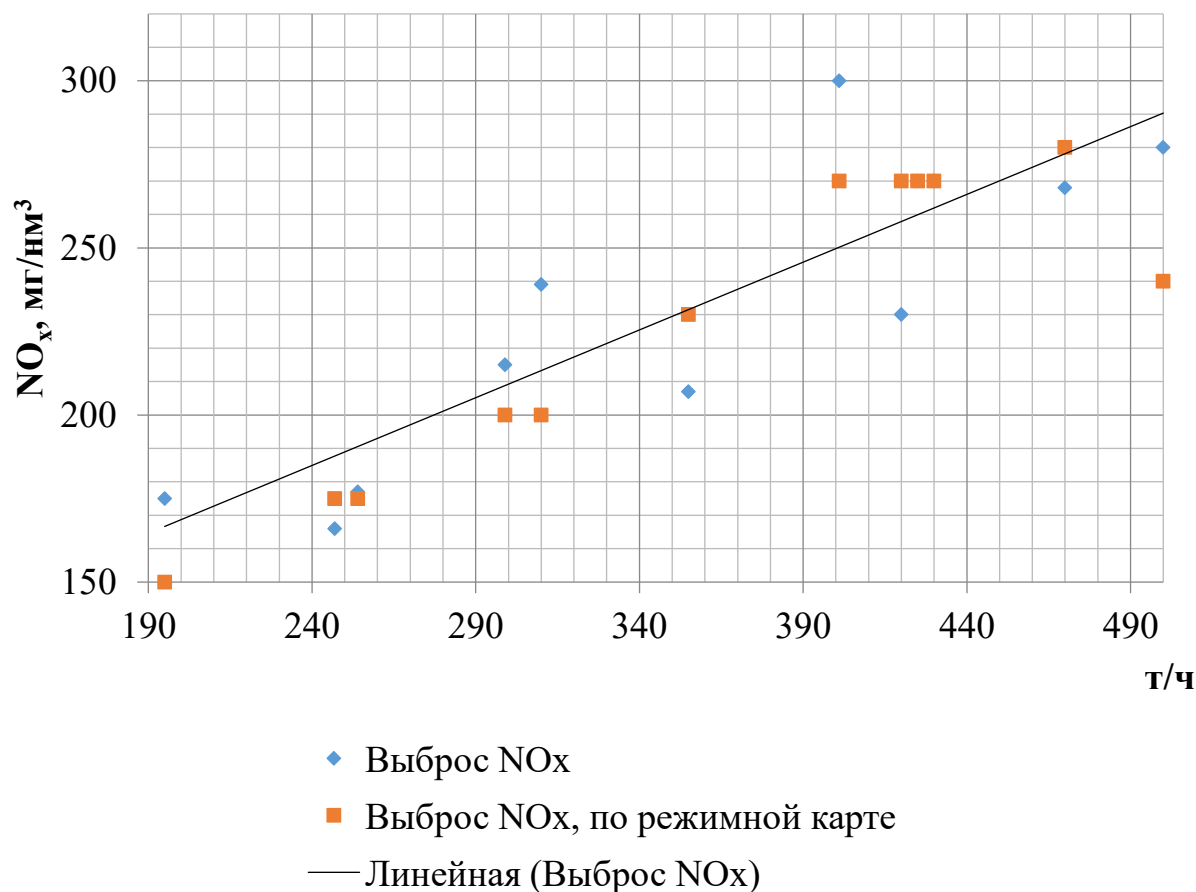


Рисунок 4.3 – Зависимость выбросов NO<sub>x</sub> на паровом котле ТГМЕ-464 по данным режимных карт действующих котлов [124]

Данный тип парового котла имеет ряд характерных отличительных особенностей, которые оказывают особое влияние на превышение концентрации NO<sub>x</sub> над нормативом удельных выбросов в атмосферу:

– Установленный теплоизолированный под, входящий в расчетную зону активного горения, верхняя и нижняя границы которой для энергических котлов с фронтальным расположением горелок, определяется выражением  $1,5 + h_{\text{яр}}$  [106]. В работе [107] проанализированы условия работы труб слабонаклонного подового экрана котлов типа ТГМЕ-464 на Северодвинской ТЭЦ-2. Установлена целесообразность наличия подового экрана из огнеупорного кирпича для исключения возможности расслоения потока, являющегося следствием разрыва заднего и боковых экранов труб данного типа котлов.

– Распределение максимумов тепловых потоков. В. В. Холщевым представлены результаты, полученные измерительным циркуляционным контуром для наиболее полной картины величины теплового потока по заднему, фронтovому и боковым экранам котла ТГМЕ-464 на максимальной нагрузке в 500 т/ч. При проведении эксперимента установлено нахождение максимума теплового потока для данного типа котла ниже первого яруса горелок, что объясняется развитием нижнего факела в ограниченном объеме [108]. В работах [109, 110] представлены результаты натуральных замеров на энергетических котлах ТГМ-96 и ТГМЕ-464 Нижнекамской ТЭЦ-1. Замеры проводились по ярусам горелок на разных диапазонах паровых нагрузок при сжигании природного газа через смотровые лючки, необходимые для эксплуатирующего котлы персонала. При замерах на котле ТГМЕ-464 установлено, что максимальный тепловой поток близ второго яруса при паровой нагрузке в 450 т/ч достигает величины 358,6 кВт/м<sup>2</sup>.

Учитывая описанные особенности, оказывающие влияние на увеличение концентрации NO<sub>x</sub>, особое внимание необходимо обратить на выполненную в 1998 г. реконструкцию данного типа котла на ТЭЦ-5 в г. Саратове [111]. При реконструкции данного типа котла, взамен теплоизоляционного пода, был смонтирован подовый экран из труб с винтовым оребрением на внутренней стороне труб. При оценке влияния выполненной реконструкции на эмиссию NO<sub>x</sub> установлено снижение выбросов оксидов азота в среднем на 23,7 %.

#### **4.2. Анализ горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси в горелочном устройстве ГМУ-45 с использованием функциональности реализованного программного комплекса**

В общей сложности проведено более 100 расчетов с разным количеством сеточных элементов, моделей горения, количеством итераций, количеством горелочных устройств, моделируемой нагрузкой и рециркуляцией дымовых газов. План экспериментов представлен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – План серии экспериментов

| Наименование   | Ед. изм. | Значение    |
|--|----------|-------------|
| Моделирование 60 % паровой нагрузки                      |          |             |
| Расход метана через одно горелочное устройство           | кг/с     | 0,5556      |
| Коэффициент избытка воздуха в топке                      | –        | 1,06        |
| Температура газа на входе в горелочное устройство        | К        | 293         |
| Температура воздуха на входе в горелочное устройство     | К        | 471-478     |
| Доля подачи газов рециркуляции                           | %        | 0,10,15,20  |
| Содержание компонента CO <sub>2</sub> в воздушной смеси  | %        | 1–2         |
| Содержание компонента H <sub>2</sub> O в воздушной смеси | %        | 2,1–4,2     |
| Моделирование 80 % паровой нагрузки                      |          |             |
| Расход метана через одно горелочное устройство           | кг/с     | 0,7334      |
| Коэффициент избытка воздуха в топке                      | –        | 1,02        |
| Температура газа на входе в горелочное устройство        | К        | 293         |
| Температура воздуха на входе в горелочное устройство     | К        | 477–488     |
| Доля подачи газов рециркуляции                           | %        | 0,5,8,10,15 |
| Содержание компонента CO <sub>2</sub> в воздушной смеси  | %        | 0,5–1,5     |
| Содержание компонента H <sub>2</sub> O в воздушной смеси | %        | 1,1–3,3     |
| Моделирование 95 % паровой нагрузки                      |          |             |
| Расход метана через одно горелочное устройство           | кг/с     | 0,8477      |
| Коэффициент избытка воздуха в топке                      | –        | 1,02        |
| Температура газа на входе в горелочное устройство        | К        | 293         |
| Температура воздуха на входе в горелочное устройство     | К        | 483-493     |
| Доля подачи газов рециркуляции                           | %        | 0,5,8,10    |
| Наименование   |          |             |
| Содержание компонента CO <sub>2</sub> в воздушной смеси  | Ед. изм. | Значение    |
| Содержание компонента CO <sub>2</sub> в воздушной смеси  | %        | 0,5–1       |
| Содержание компонента H <sub>2</sub> O в воздушной смеси | %        | 1,1–2,1     |

На первом этапе в среде STAR-CCM+ для проведения исследования процессов горения природного газа горелочного устройства ГМУ-45 в модуле «3D-CAD Models» (рисунок 4.4) сформирована топочная камера с одной горелкой (рисунок 4.5) и разделением на цилиндрические расчетные зоны (рисунок 4.6) для последующего построения расчетной сетки в модуле «Automated Mesh». Визуализация расчетной сетки представлена на рисунке 4.7. Для получения адекватного решения основой для 3D-CAD-модели горелки являлись реальные размеры и формы конструктивных элементов, а также их количество.

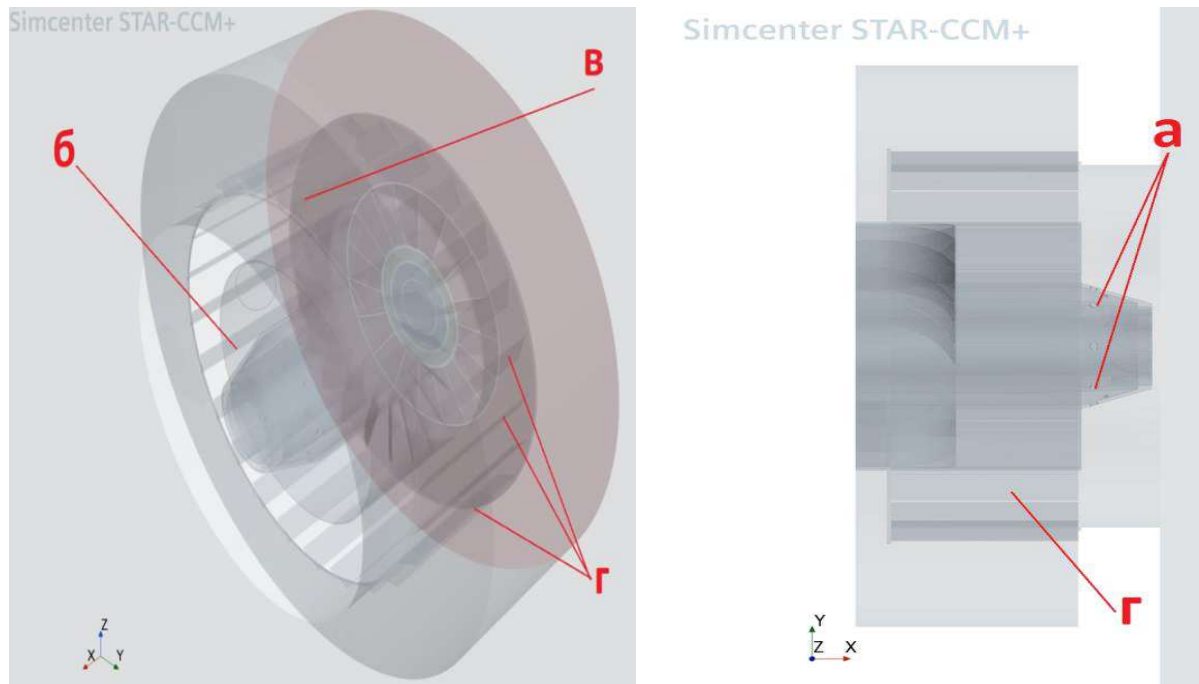


Рисунок 4.4 – Трехмерная модель горелки в среде STAR-CCM+:  
 а – отверстия для выхода газа; б – внутренний канал выхода воздушной смеси;  
 в – периферийный канал выхода воздушной смеси;  
 г – лопатки осевого закручивающего аппарата

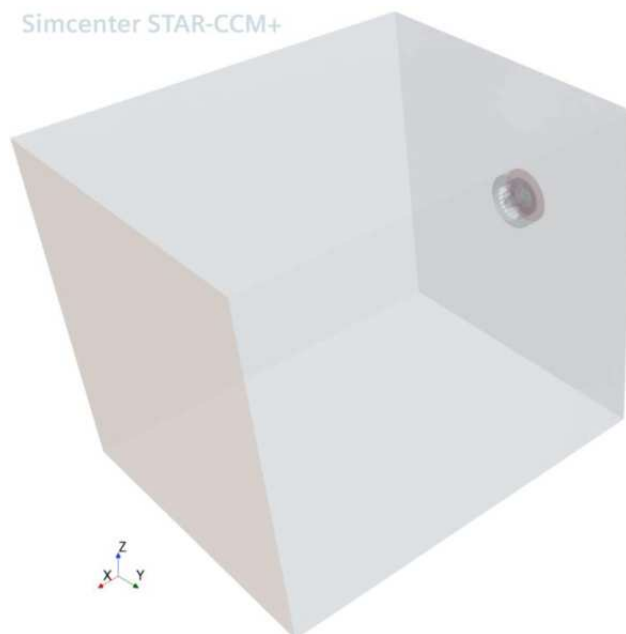


Рисунок 4.5 – Трехмерная модель топочной камеры с одним горелочным устройством: длина 10 м, ширина 8 м, высота 8 м, в полной мере охватывающей расчетную зону активного горения [106]

## Simcenter STAR-CCM+



Рисунок 4.6 – Распределение цилиндрических расчетных зон в смоделированной камере сгорания: Cylinder 1 – зона горелочного устройства, Cylinder 2 – зона наиболее высоких скоростей и температур

На втором этапе проводилось исследование по выбору необходимого количества элементов сетки на основе тестовых расчетов метано-воздушной смеси. На рисунках 4.8, 4.9 показаны результаты численного расчета представленных выше топочной камеры и горелочного устройства ( $T = 477$  К,  $\alpha = 1,02$ ,  $Q = 3936$  газа в час), для проведения исследования по выбору необходимого количества элементов сетки на основе тестовых расчетов метано-воздушной смеси.



Рисунок 4.7 – Визуализация расчетной сетки в модуле «Automated Mesh»

На рисунках 4.8, 4.9 при «базовом» размере 0,4 м количество элементов расчетной сетки составило 5 192 600 ед.; при «базовом» размере 0,5 м – 2 787 464 ед.; при «базовом» размере 0,75 м – 951 840 ед.; при «базовом» размере 1,0 м – 456 125 ед.

Как видно из рисунков 4.8, 4.9, с увеличением базового размера сетки возрастает погрешность вычислений. Так, профиль температуры при «базовых» размерах 1,0 и 0,75 имеют большую погрешность сетки, которая оказывает влияние на профиль температуры. При меньшем базовом размере идет уточнение структуры потока в области за горелочным устройством. Дополнительно необходимо обратить внимание на затраченный машиноресурс при расчете на ЭВМ. Так, для «базового» размера 0,5 м было затрачено 28 ч времени на 10 тыс. итераций для расчета камеры сгорания только с одним комбинированным горелочным устройством. В этой связи для дальнейших расчетов мы используем сетку «базового» размера 0,5 м с количеством элементов 2 787 464.

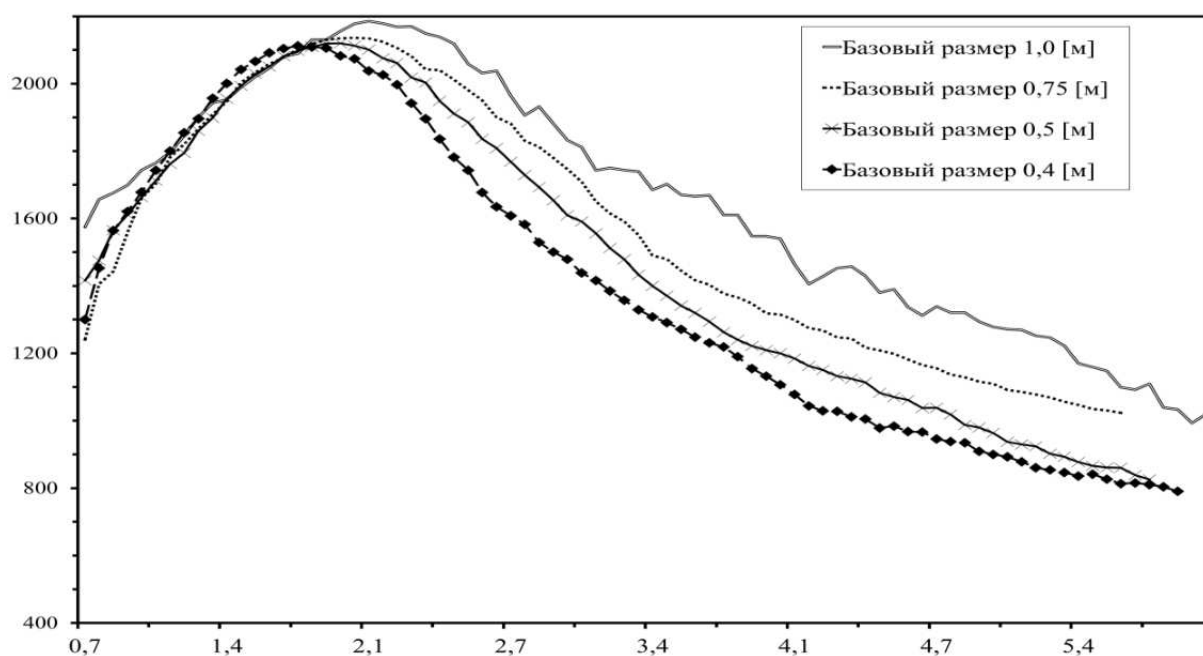


Рисунок 4.8 – Профиль температуры при тестовых расчетах сжигания метано-воздушной смеси при «базовом» размере элемента расчетной сетки 0,4–1,0 м. Ось абсцисс – длина топочной камеры, м; ось ординат – температура, К



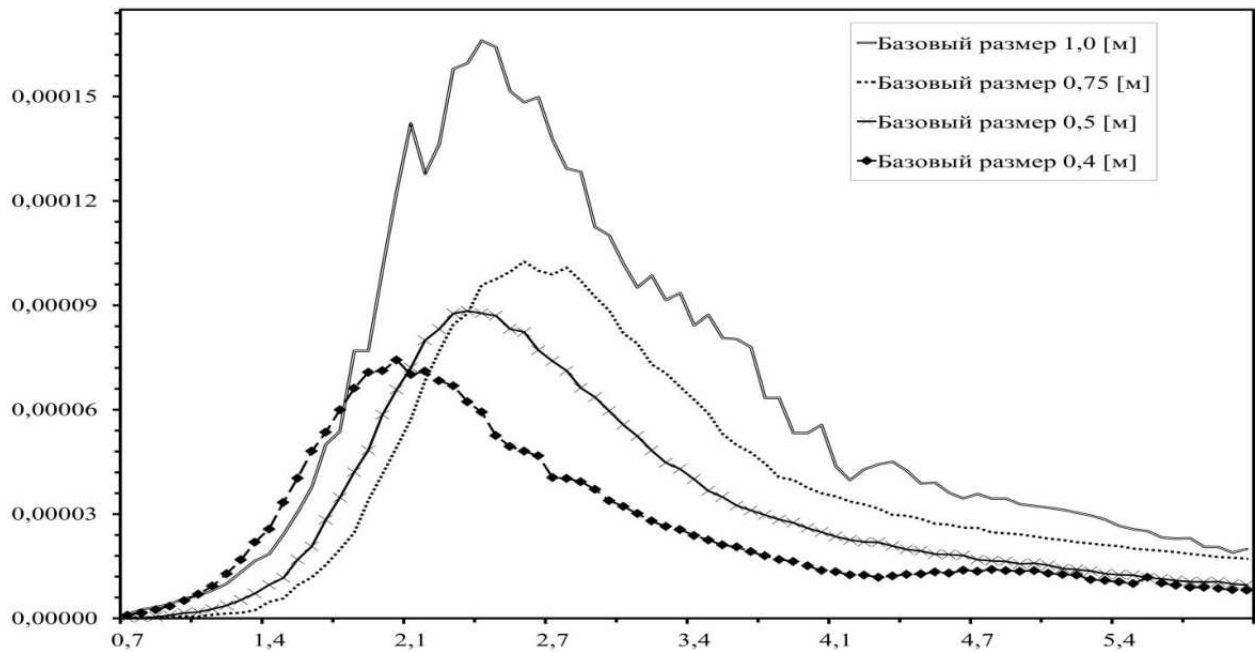


Рисунок 4.9 – Профиль  $\text{NO}_x$  при тестовых расчетах сжигания метано-воздушной смеси при «базовом» размере элемента расчетной сетки 0,4–1,0 м. Ось абсцисс – длина топочной камеры, м; ось ординат – массовое содержание  $\text{NO}_x$

На третьем этапе проводилось тестовое исследование по выбору модели для проведения численного эксперимента. В мультидисциплинарной платформе STAR-CCM+ имеется широкий спектр таких инструментов для моделирования предварительно перемешанной метано-воздушной смеси. С изменением модели горения при базовым размере сетки, определенной на предыдущем этапе, максимальный уровень температуры остается на прежнем уровне, при этом в зависимости от применяемой в расчете модели горения, происходит смещение зоны активного горения по фронту пламени смоделированной камеры сгорания. Но в этом случае в каждой из моделей соблюдается условие нахождения максимального содержания  $\text{NO}_x$  в зоне максимальных температур. По результатам расчетов и исходя из литературного обзора для последующих расчетов применена модель горения Flamelet Generated Manifold (далее – FGM), преимуществом которой является снижение вычислительных затрат ЭВМ без потери точности вычисления [66].

На рисунке 4.10 представлены результаты вычислительных экспериментов при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,06$ – $1,03$  и расходе газа через одно

горелочное устройство 2985–4550 м<sup>3</sup>/ч. В качестве исходных данных для начальных и граничных условий использовалась режимная карта действующего энергетического котла ТГМЕ-464.

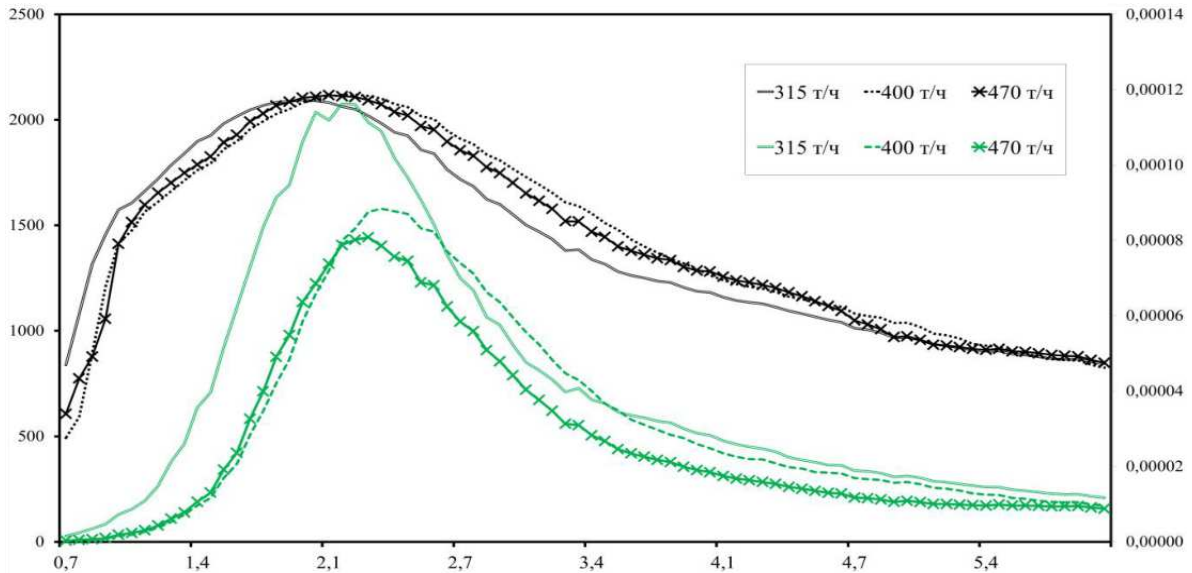


Рисунок 4.10 – Исследование эмиссии вредных веществ на разных паровых нагрузках котлоагрегата типа ТГМЕ-464. Ось абсцисс – длина топочной камеры, м; ось ординат (основная) – температура, К; ось ординат (вспомогательная) – массовое содержание  $\text{NO}_x$ . Черная прямая – профиль температуры, зеленая прямая – профиль  $\text{NO}_x$

Из рисунка 4.10 видно, что по мере увеличения нагрузки идет рост температуры в ядре пламени и массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания. Максимальная температура и концентрации  $\text{NO}_x$  по расчету установились при большем коэффициенте  $\alpha$  на смоделированной нагрузке пара в 315 т/ч.

Необходимо отметить, что коэффициент избытка воздуха в данном случае определялся при проведении режимно-наладочных испытаний данного типа котлов исходя из условия отсутствия потерь тепла с химической неполнотой сгорания топлива с помощью индикаторных трубок на оксид углерода [116]. При изменении степени рециркуляции  $r$  происходит изменение температуры пламени, что объясняется увеличением объема 3-атомных газов в зоне горения природного газа.

Исследование эмиссии вредных веществ на разных паровых нагрузках представлено на рисунке 4.11

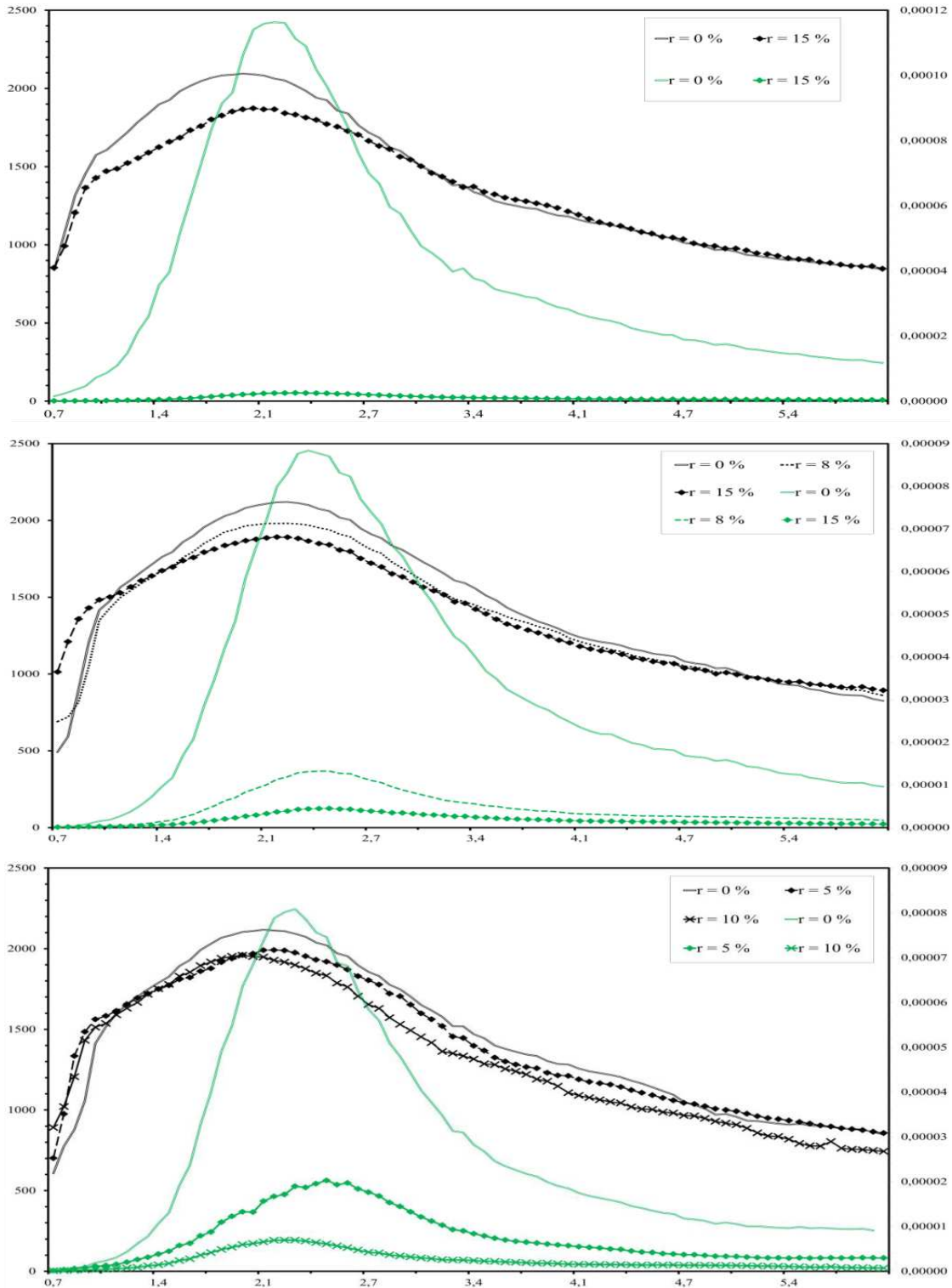


Рисунок 4.11 – Исследование эмиссии вредных веществ на разных паровых нагрузках котлоагрегата типа ТГМЕ-464: а – при нагрузке 315 т/ч; б – при нагрузке 400 т/ч; в – при нагрузке 470 т/ч. Ось абсцисс – длина топочной камеры, м; ось ординат (основная) – температура, К; ось ординат (вспомогательная) – массовое содержание NO<sub>x</sub>. Черная прямая – профиль температуры, зеленая прямая – профиль NO<sub>x</sub>

Из рассмотрения рисунка 4.11 следует, что за приростом доли подачи рециркуляции дымовых газов до 15 % следует уменьшение (по фронту факела) величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания. Уменьшение величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  поясняется уменьшением температуры. Так, исходя из проведенного вычислительного эксперимента, при подаче доли рециркуляции дымовых газов  $r = 15 \%$  удалось достигнуть снижения максимальной температуры до  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  [130].

### **4.3. Исследование процессов горения парового котла ТГМЕ-464 с оценкой взаимного влияния струй смеси при многоярусной компоновке в камере сгорания**

В данном разделе представлены результаты горения в ходе вычислительных экспериментов по исследованию эмиссии вредных веществ паровых нагрузок 400 т/ч (80 %) энергетического котла ТГМЕ-464 с рециркуляцией дымовых газов и без нее (рисунок 4.12).

Результаты, представленные на рисунках 4.13, 4.14 показывают, что максимальная температура по высоте камеры сгорания топочного устройства при  $r = 5\%$  снижается в среднем на 46 К; при  $r = 10\%$  снижается в среднем на 76 К. Рециркуляция дымовых газов позволяет достигнуть 1,5-кратного снижения концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 5\%$  и более чем 2-кратного снижения концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 10\%$ . Снижение концентрации  $\text{NO}_x$  обусловлено снижением уровня максимальных температур на 2–4 % из-за увеличения объема 3-атомных газов в воздушной смеси, подаваемой в горелочное устройство с 1,61 до 3,24 % общей доли воздушной смеси.

Результаты, представленные на рисунке 4.15, показывают, что отношение значений концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 5\text{--}10 \%$  к концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 0 \%$ , полученных до конвективных поверхностей нагрева при смоделированной нагрузке парового котла ТГМЕ-464 с рециркуляции дымовых газов и без нее находится в диапазоне от 0,66 до 0,45 при отношении 0,61–0,47 по данным

натурных режимно-наладочных испытаний для данного типа котлов. Отклонение находится в диапазоне 4–8 %, что указывает на соответствие модели моделируемому процессу.

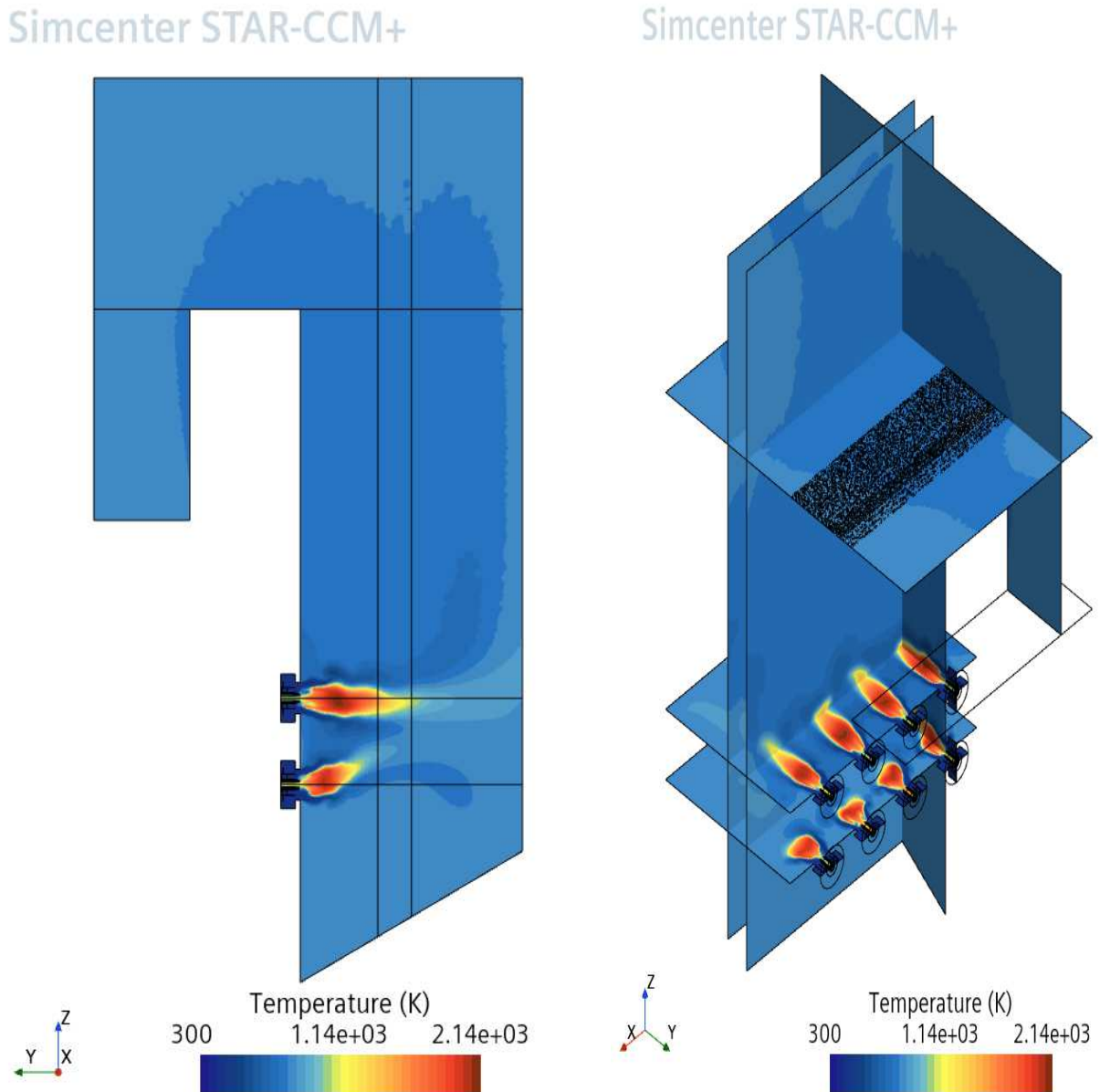


Рисунок 4.12 – Распределение температуры в смоделированном энергетическом котле ТГМЕ-464 при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства

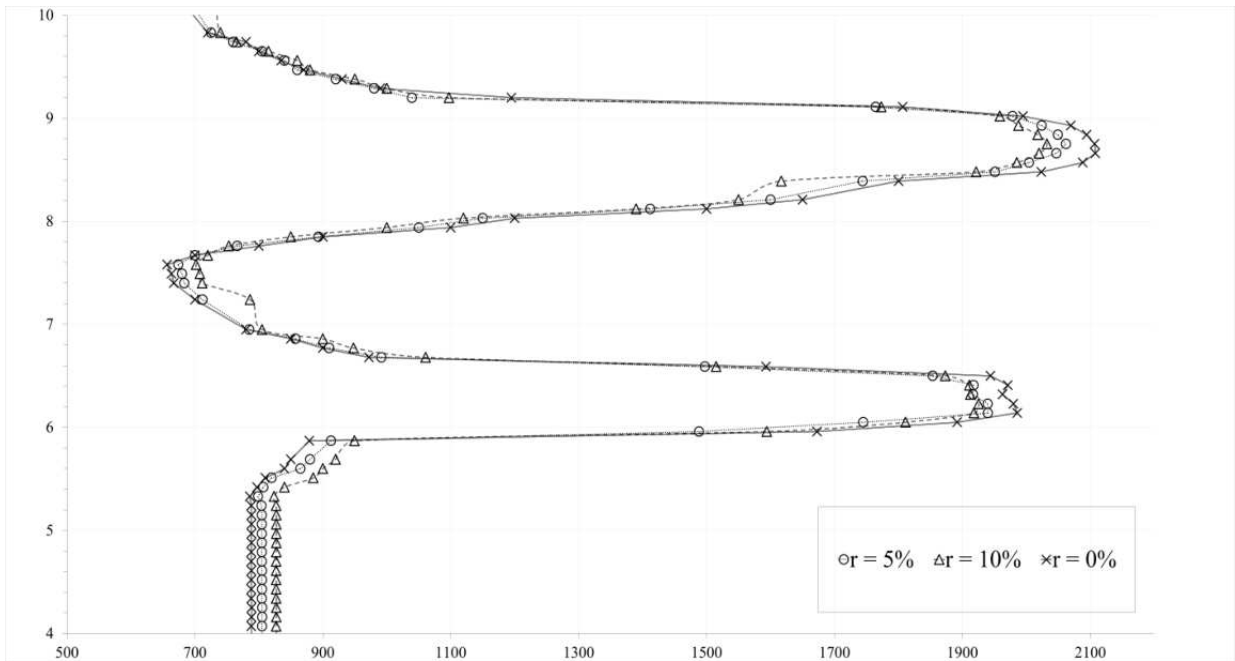


Рисунок 4.13 – Профиль температур в камере сгорания с взаимным влиянием струй смеси при многоярусной компоновке по высоте на расстоянии 1 м от амбразуры парового котла. Ось ординат – высота топочной камеры, м; ось абсцисс – температура, К

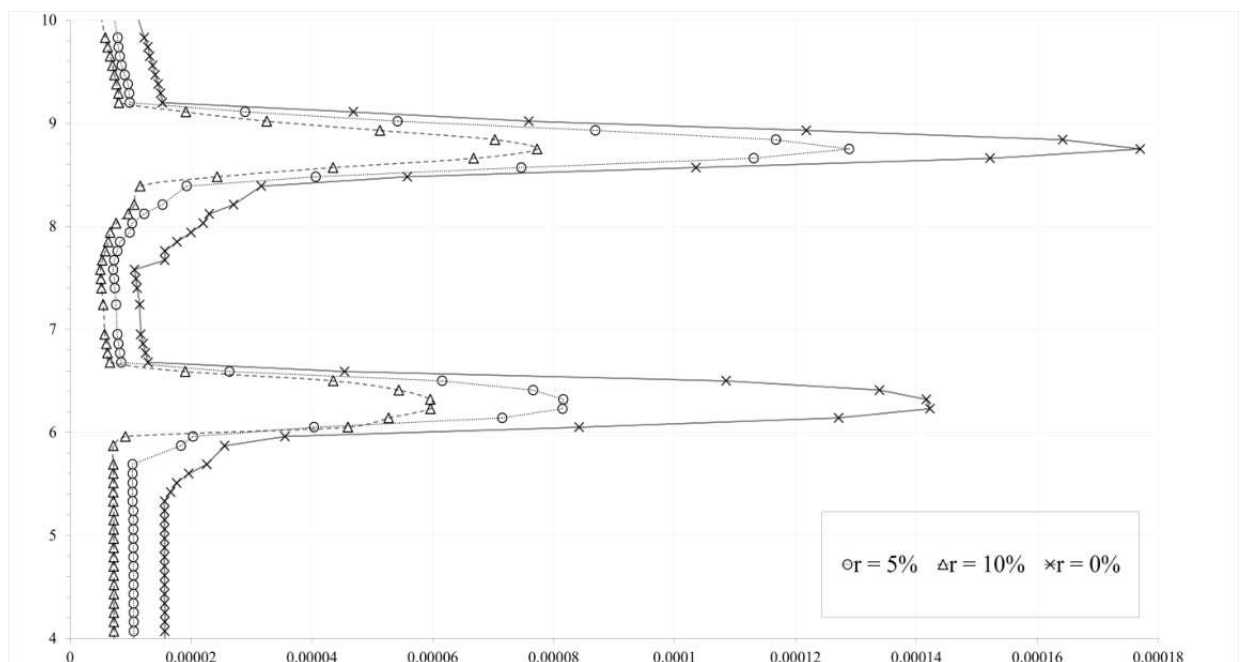


Рисунок 4.14 – Профиль  $\text{NO}_x$  в камере сгорания с взаимным влиянием струй смеси при многоярусной компоновке по высоте на расстоянии 1 м от амбразуры парового котла. Ось ординат – высота топочной камеры, м; ось абсцисс – массовое содержание  $\text{NO}_x$

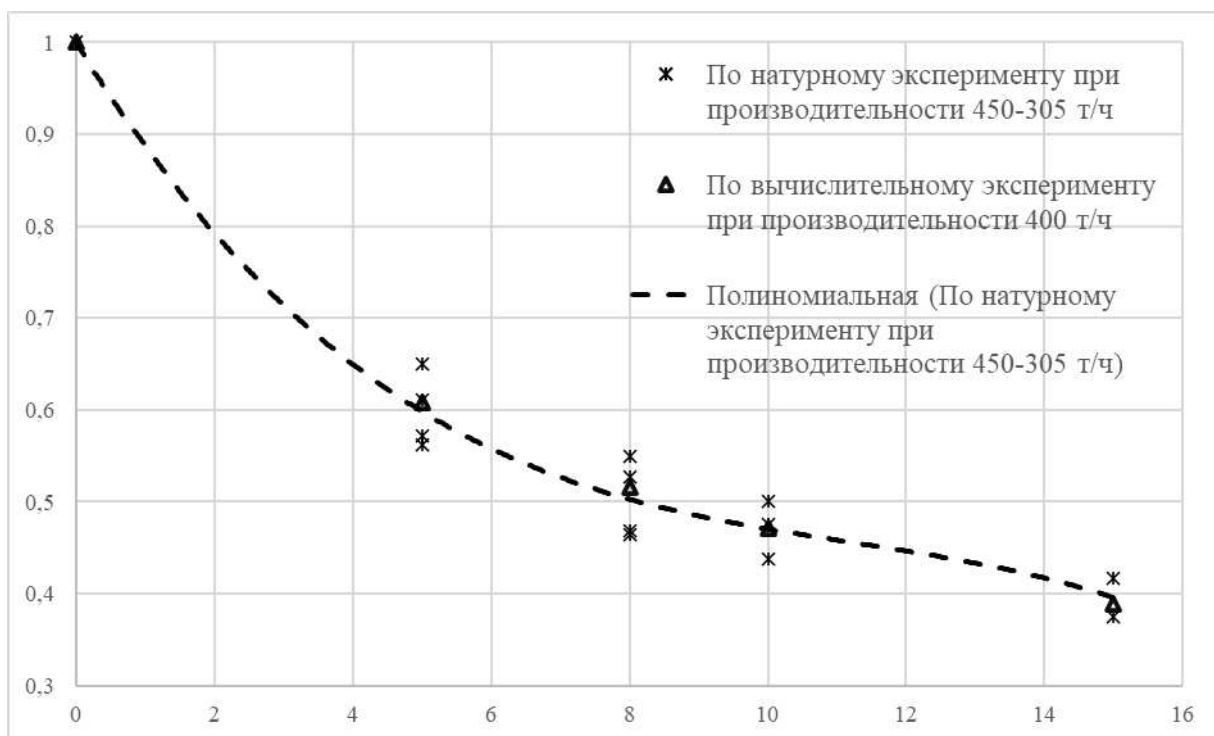


Рисунок 4.15 – Сопоставление отношений величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания. Ось ординат – отношение величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания при  $r = 5, 8, 10$  % к величине при  $r = 0$  %, представленные уравнением шестой степени [113, 125]; ось абсцисс – доли рециркуляции дымовых газов, %

#### 4.4. Практическое применение результатов численного исследования образования эмиссии оксидов азота с разработкой и обоснованием эффективных технических решений

На основе проведенных исследований, сформулированных выводов и выявленных закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси в разделах 4.1–4.3 разработано техническое решение, а именно газомазутная горелка с изменяемым углом факела (Патент 215191 Российская Федерация, МПК F 23 D 17/00 (2006.01) № 2022126426) [131].

Технической новизной газомазутной горелки является то, что у основания амбразуры установлено поворотное сопло для изменения угла наклона факела.

Разработанное горелочное устройство позволит осуществить управление формой факела, процессом смешения топлива с воздухом, полями распределения

скоростей эмиссией  $\text{NO}_x$ . Разработанное горелочное устройство представлено на рисунке 4.16.

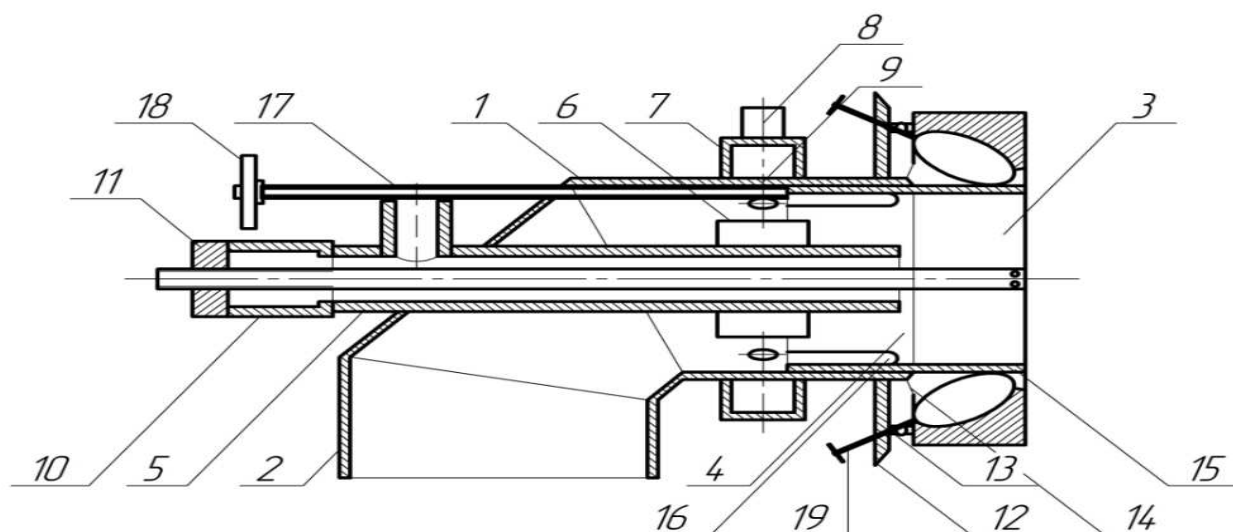


Рисунок 4.16 – Газомазутная горелка с изменяемым углом факела:

- 1 – корпус горелочного устройства; 2 – патрубок подачи воздуха в горелочное устройство; 3 – изменяемая амбразура горелочного устройства; 4 – смесительная камера; 5 – труба для подачи воздуха в горелочное устройство при сжигании мазутного топлива; 6 – вставка; 7 – периферийный кольцевой коллектор; 8 – патрубок подачи воздуха в кольцевой коллектор; 9 – отверстия для выхода природного газа; 10 – форсунка мазутного топлива; 11 – винт-гайка регулировочного механизма; 12 – канал регулировочного механизма; 13 – заслонка канала регулировочного механизма; 14 – отверстие подачи в зону горения газов рециркуляции; 15 – цилиндрический канал; 16 – смесительная камера; 17 – шток для изменения положения цилиндрического канала; 18 – штурвал штока для изменения положения цилиндрического канала; 19 – поворотное сопло

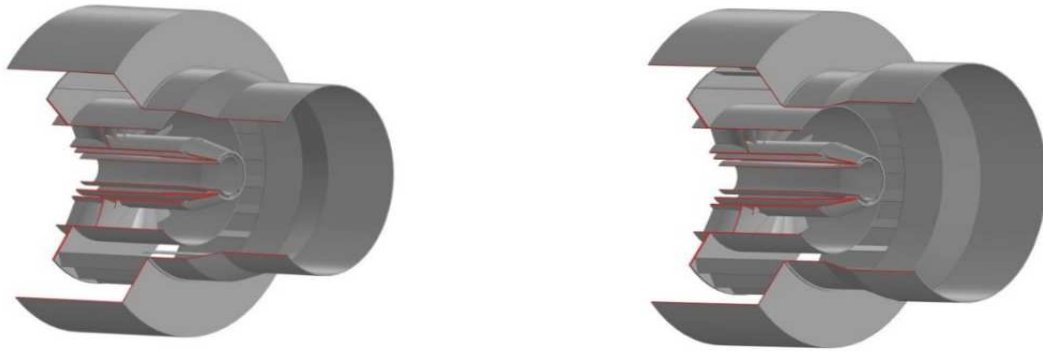
При сжигании только природного газа газомазутная горелка с изменяемым углом факела работает следующим образом: предварительно закрученная воздушная смесь с увеличенной скоростью потока (за счет установленной вставки б) встречается в смесительной камере с потоком природного газа, поступающего из отверстий для выхода природного газа на периферийном кольцевом коллекторе. Образованная закрученная предварительно перемешанная газозвудушная смесь воспламеняется в зоне амбразуры горелочного устройства. Одновременно с газозвудушной смесью в зону



амбразуры горелочного устройства через отверстие по цилиндрическому каналу поступают газы рециркуляции для снижения уровня максимальной температуры в зоне активного горения. Форма факела, массообмен природного газа и воздушной смеси, скорость выхода топливовоздушной смеси регулируются за счет перемещения штоком с штурвалом цилиндрического канала вдоль оси горелочного устройства.

При совместной работе на природном газе и мазутном топливе газомазутная горелка с изменяемым углом факела работает следующим образом: предварительно закрученная воздушная смесь с увеличенной скоростью потока (за счет установленной вставки б) встречается в смесительной камере с потоком природного газа, поступающего из отверстий для выхода природного газа на периферийном кольцевом коллекторе. Образованная закрученная предварительно перемешанная газовоздушная смесь поступает для воспламенения в зону амбразуры горелочного устройства. В то же время мазутное топливо, распыленное потоком воздуха из трубы для подачи воздуха, поступает через форсунку для воспламенения в зону амбразуры горелочного устройства. Одновременно с топливовоздушной смесью в зону амбразуры горелочного устройства через отверстие по цилиндрическому каналу поступают газы рециркуляции для снижения уровня максимальной температуры в зоне активного горения. Форма факела, массообмен природного газа, мазутного топлива и воздушной смеси, скорость выхода топливовоздушной смеси регулируются за счет перемещения штоком с штурвалом цилиндрического канала вдоль оси горелочного устройства.

Для сравнительного анализа практической значимости проведено моделирование предложенной амбразуры (рисунки 4.17–4.20).



а)

б)

Рисунок 4.17 – Вид смоделированного горелочного устройства:  
а – конфузорной амбразуры; б – диффузорной амбразуры

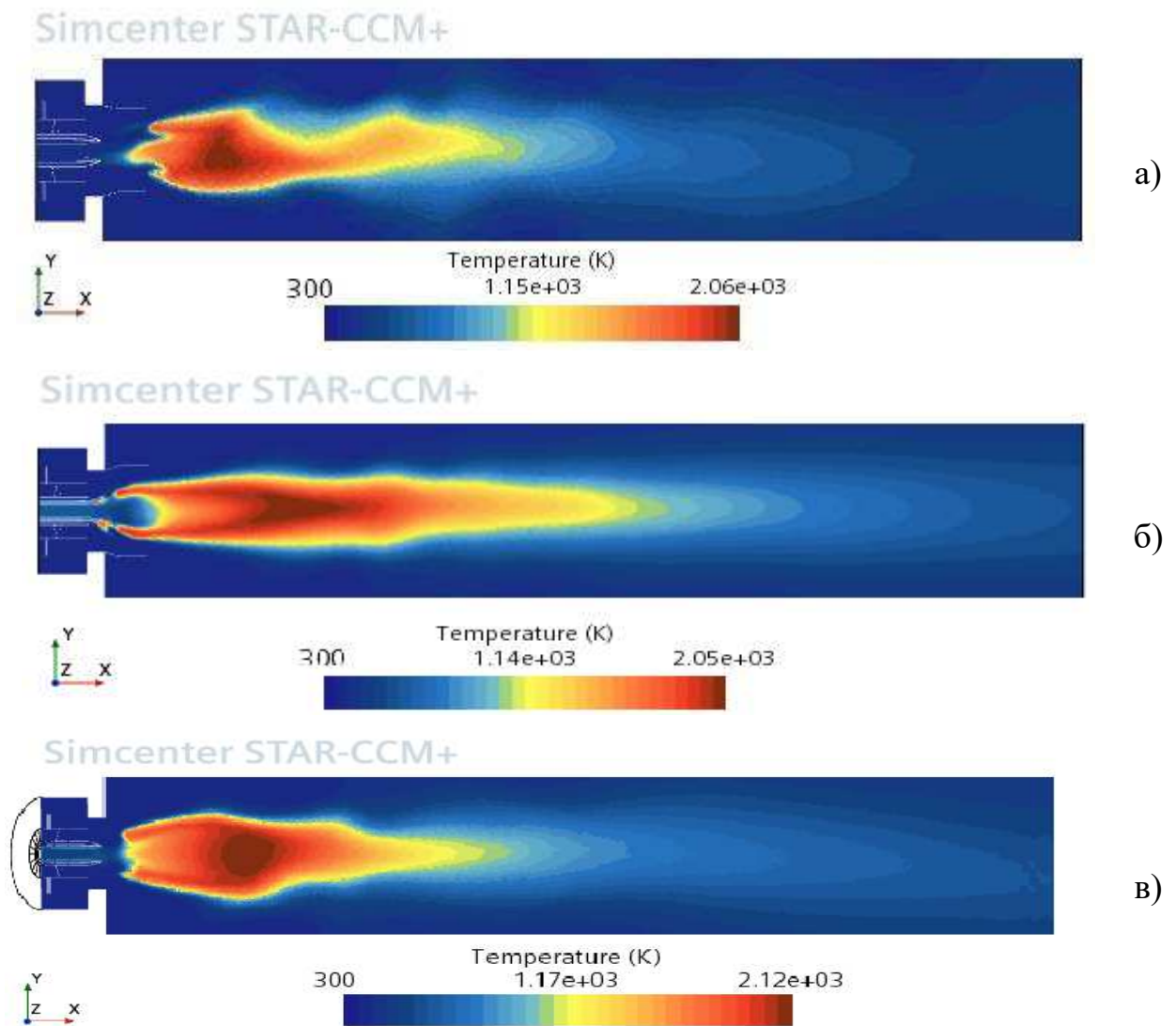


Рисунок 4.18 – Профили температур в камере сгорания:  
а – конфузорной амбразуры; б – диффузорной амбразуры; в – без амбразуры

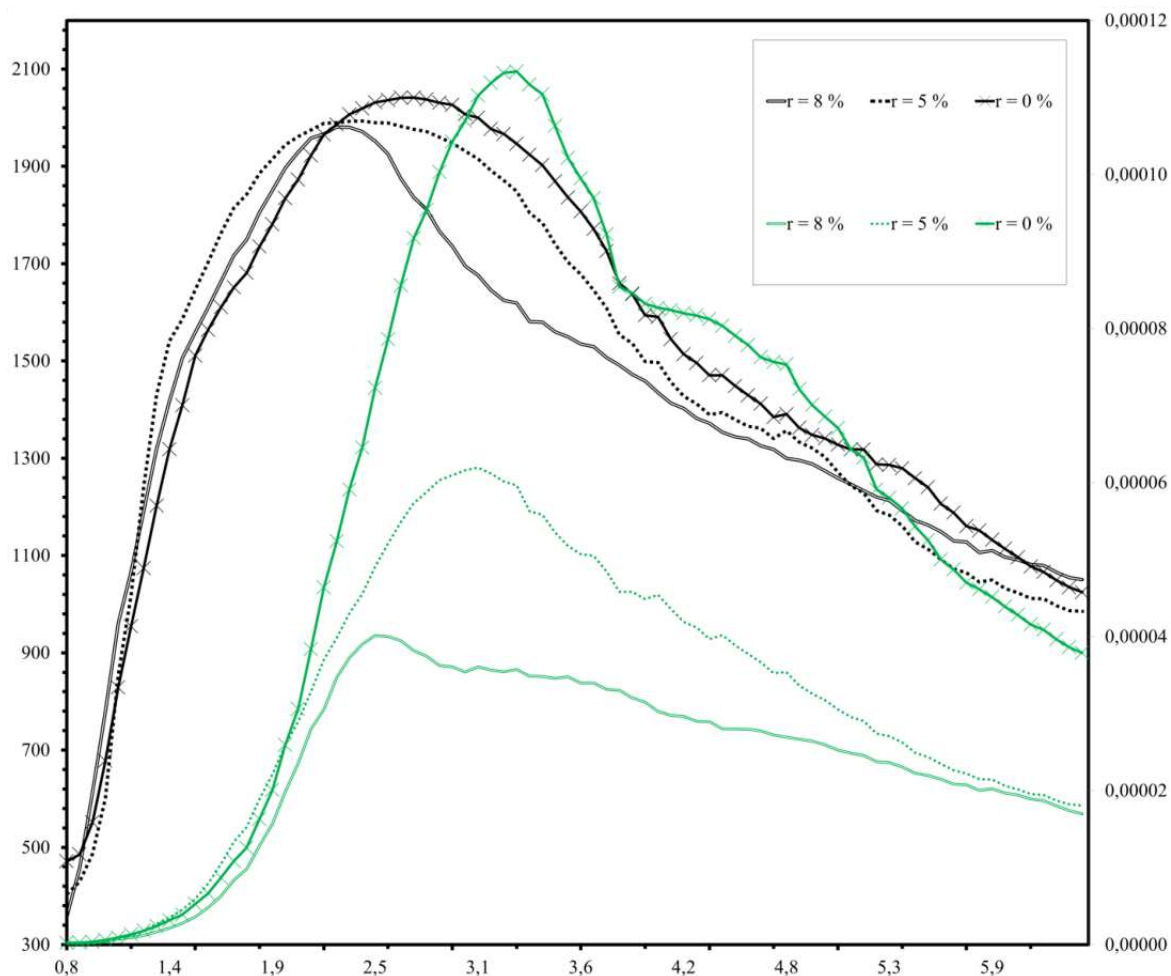


Рисунок 4.19 – Профиль температуры в камере сгорания топочного устройства с горелкой ГМУ-45 с применением диффузорной амбразуры. Ось абсцисс – длина топочной камеры, м; ось ординат (основная) – температура, К; ось абсцисс (вспомогательная) – массовое содержание  $\text{NO}_x$ . Черная прямая – профиль температуры, зеленая прямая – профиль  $\text{NO}_x$

Результаты, представленные на рисунках 4.17–4.20, показывают, что за счет изменения типа амбразуры меняются не только границы и длина факела, но и его радиационные характеристики. Так, при применении конфузорного типа амбразуры максимальная температура по длине факела составила 2046 К, а при применении диффузорного типа амбразуры – 2041 К, что на 3 % ниже стандартного типа амбразуры горелки ГМУ-45. Важно отметить, что при реализации рециркуляции дымовых газов при данном режиме на данном типе котлов совместно с конфузорным типом амбразуры получена более высокая эффективность, оцениваемое снижение составляет (при  $r = 8\%$ ) до 200 К.

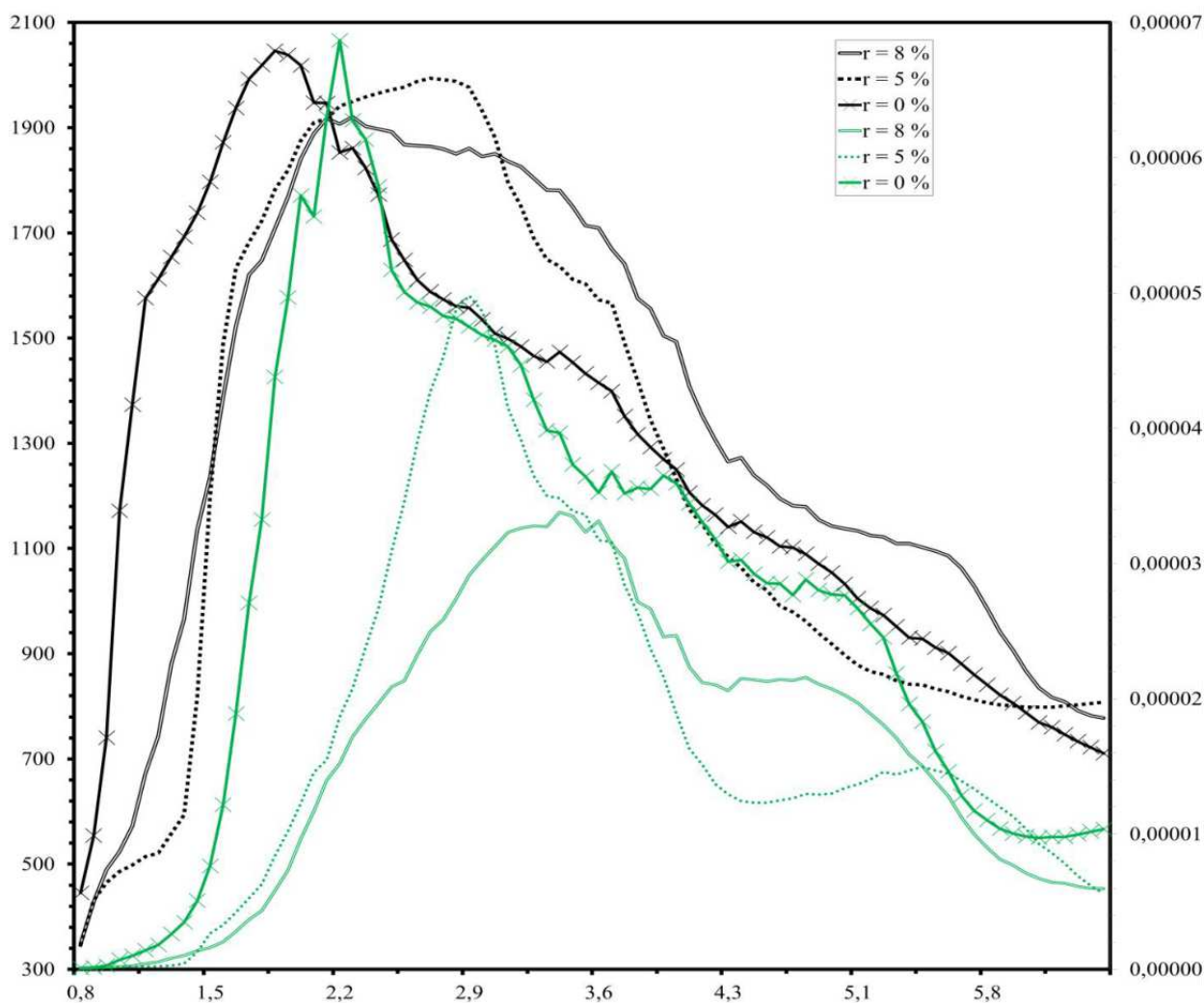


Рисунок 4.20 – Изменение профиля температуры в камере сгорания топочного устройства с горелкой ГМУ-45 с применением конфузурной амбразуры. Ось абсцисс – длина топочной камеры, м; ось ординат (основная) – температура, К; ось ординат (вспомогательная) – массовое содержание NO<sub>x</sub>. Черная прямая – профиль температуры, зеленая прямая – профиль NO<sub>x</sub>

При паровой нагрузке  $D = 400$  т/ч данного типа котлов степень рециркуляции дымовых газов ограничена величиной в 15 %. Последующее совершенствование эффективности снижения величины массовой концентрации NO<sub>x</sub> в диапазоне тепловых нагрузок не представляется возможным за счет увеличения степени подачи газов рециркуляции в связи с достижением максимальной производительности дутьевого вентилятора при данной тепловой нагрузке. Совершенствование эффективности снижения величины массовой концентрации NO<sub>x</sub> можно добиться снижением локальной температуры при реализации организационных или технических мероприятий [130].

Для снижения величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах горения парового котла типа ТГМЕ-464 предлагается свести к расчетному минимуму температуру в зоне активного горения за счет перераспределения между ярусами горелочных устройств степени рециркуляции дымовых газов.

На основе проведенных исследований, сформулированных выводов и выявленных закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси в разделах 4.1–4.3 разработано техническое решение, а именно Устройство для рециркуляции дымовых газов энергетических котлов (Патент 210008 Российская Федерация, МПК F 23 C 9/00 (2006.01) № 2021122765) [112, 129, 137].

Технической новизной является то, что в предлагаемой полезной модели в нагнетательном участке линии рециркуляции встроен блок перераспределения газов рециркуляции для разделения потока газов рециркуляции на два отдельных потока газов таким образом, чтобы большая часть газов рециркуляции подавалась в зону с максимальными тепловыми потоками энергетического котла.

Разработанное устройство позволит уменьшить появление оксидов азота и частично нейтрализовать один из существенных недостатков рециркуляции дымовых газов – снижение КПД парового котла ТЭЦ. Разработанное устройство представлено на рисунке 4.21.

Устройство для рециркуляции дымовых газов энергетических котлов работает следующим образом: образованная предварительно перемешанная газо-воздушная смесь сгорает в топочном пространстве. Продукты горения, перемещаясь по своему ходу к дымовой трубе, отдают большую часть своей теплоты водяному экономайзеру, а до 25 % продуктов сгорания узлом отбора дымовых газов дымосос рециркуляции направляет в нагнетательный участок линии рециркуляции. В нагнетательном участке линии рециркуляции размещен блок перераспределения газов рециркуляции, который разделяет поток продуктов сгорания на два отдельных потока газов, подаваемых в тракт подачи воздуха в топочное пространство.

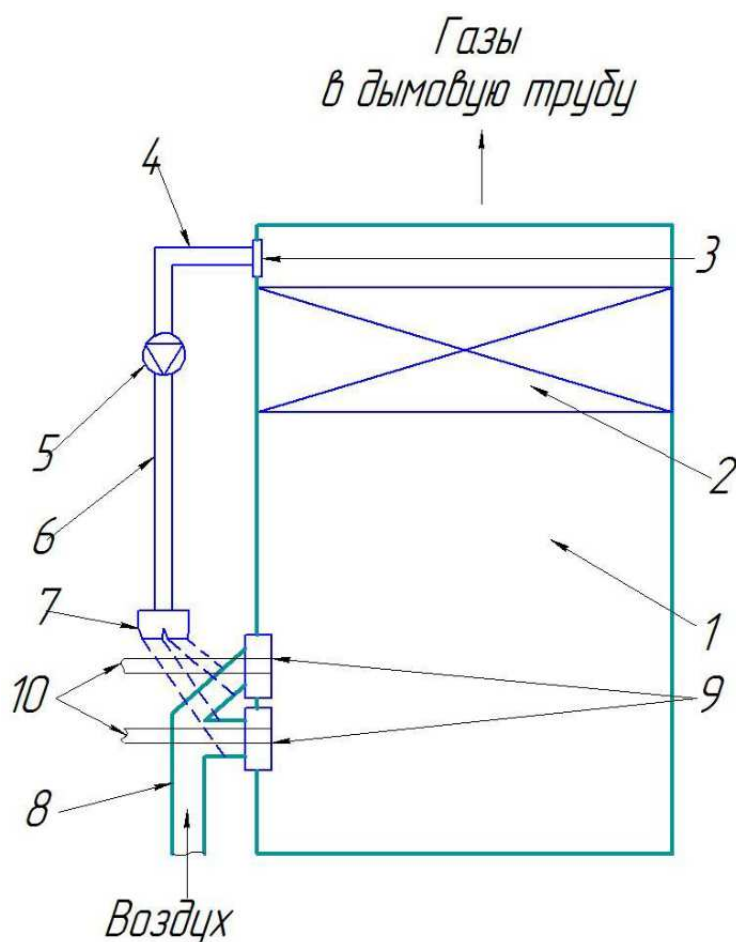


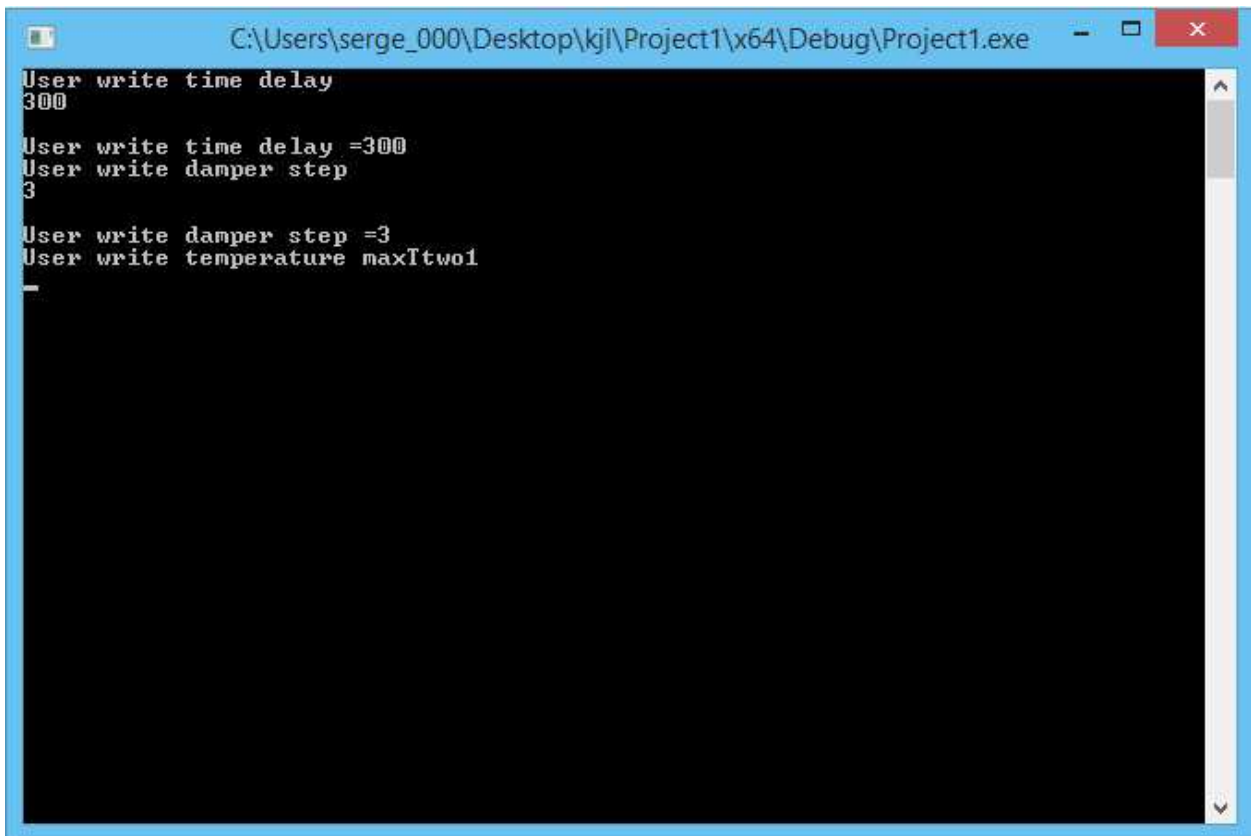
Рисунок 4.21 – Устройство для рециркуляции дымовых газов энергетических котлов: 1 – топочное пространство; 2 – водяной экономайзер парового котла; 3 – узел отбора дымовых газов; 4 – участок газохода до дымососа рециркуляции; 5 – дымосос рециркуляции; 6 – нагнетательный участок линии рециркуляции; 7 – блок перераспределения газов рециркуляции; 8 – тракт подачи воздуха в топочное пространство; 9 – горелочные устройства парового котла; 10 – тракт для подачи топлива в горелочные устройства

Блок перераспределения газов рециркуляции позволяет снизить максимальную температуру, которая является основным индикатором эффективности образования термических оксидов азота, в зоне с максимальным тепловым потоком энергетического котла. Поток подогретого в конвективной поверхности воздуха на горение по тракту подачи воздуха в топочное пространство и газ по тракту для подачи топлива в горелочные устройства поступают в горелочные устройства парового котла для образования предварительно перемешанной газо-воздушной смеси и последующего сгорания в топочном пространстве.

Дополнительно для осуществления управления блоком перераспределения в нагнетательном участке линии рециркуляции с целью постоянного поддержания наименьшей величины массовой концентрации  $\text{NO}_x$  в диапазоне тепловых нагрузок предлагается дополнить систему промышленным микроконтроллером для автоматизированных систем управления технологическим процессом. Разработан алгоритм, заложенный в техническое решение, а именно Программа для управления блоком перераспределения газов рециркуляции котла при сжигании органического топлива, осуществляющей управление топочным режимом (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация, № 2022684874) [134].

Технической новизной является то, что программа может применяться в автоматизированной системе управления технологическим процессом в энергетической отрасли, в частности на тепловых электрических станциях и котельных. Программа обеспечивает управление блоком перераспределения газов рециркуляции, рассчитывая среднюю температуру по ярусам горелок и необходимое положение регулятора расхода воздуха за счет считывания информации с датчиков температуры и на основании введенных исходных данных.

На рисунке 4.23 представлена структурная схема алгоритма, имеющая: блок задания исходных данных оператором ЭВМ (переменная задержки времени, шаг хода изменения положения регулятора расхода газов, максимально возможная доля перераспределения рециркуляции от общей доли на ярус с большей температурой); блок сбора исходных данных с первичных датчиков (текущая паропроизводительность, средняя температура по ярусам, начальное положение регулятора расхода газов); расчетный блок; блок воздействия на регулятор расхода газов.

A screenshot of a Windows command prompt window. The title bar shows the file path: C:\Users\serge\_000\Desktop\kjl\Project1\x64\Debug\Project1.exe. The command prompt contains the following text:

```
User write time delay
300
User write time delay =300
User write damper step
3
User write damper step =3
User write temperature maxItwo1
-
```

Рисунок 4.22 – Окно предварительной настройки пользователем программы для осуществления управления блоком перераспределения в нагнетательном участке линии рециркуляции

Минимально необходимое фиксируемое количество параметров для автоматизации процесса работы блоком перераспределения рециркуляции дымовых газов: температура в зоне активного горения по уровню каждого яруса горелок, положение регулятора расхода дымовых газов. Для измерения температуры возможно применение термозонда с комбинированным принципом работы (контактный и оптический), который позволяет обеспечить минимально возможную погрешность измерения [117].



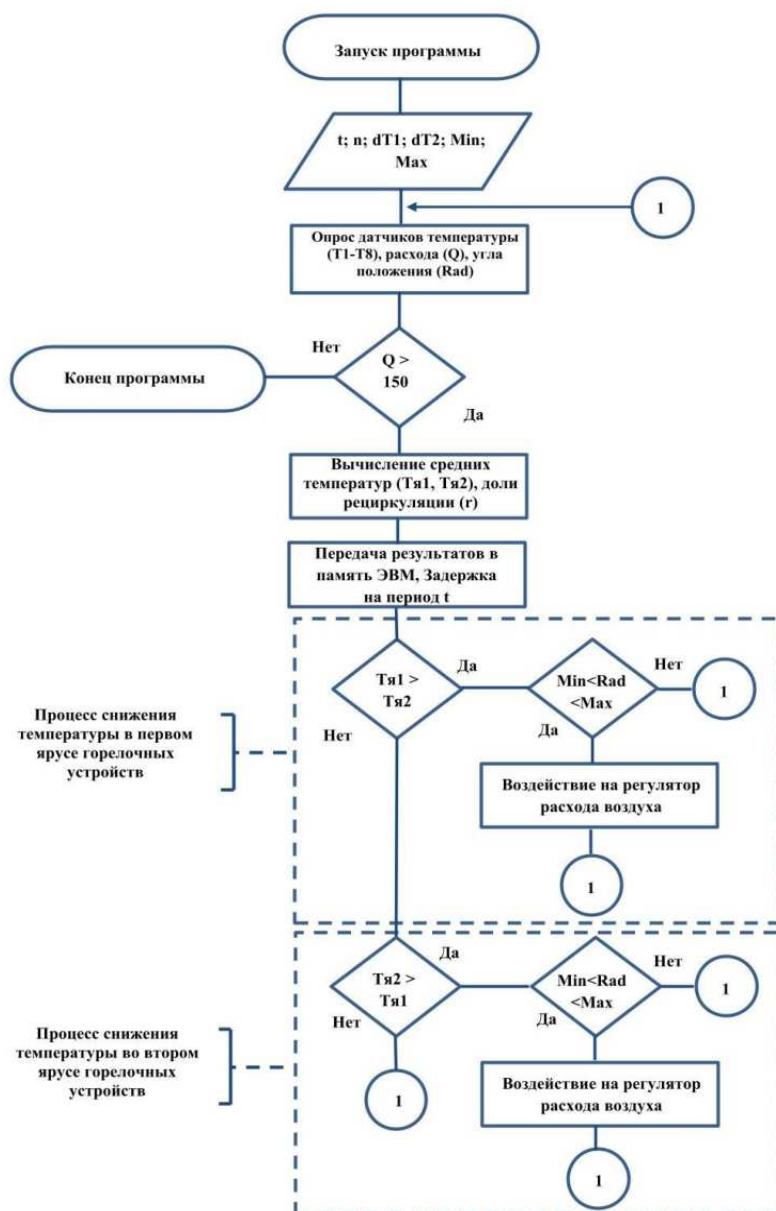


Рисунок 4.23 – Алгоритм программы для ЭВМ:

$t$  – переменная задержки времени,  $n$  - переменная шага хода изменения положения регулятора расхода дымовых газов,  $Q$  – паровая нагрузка,  $dT1$  и  $dT2$  – температура с датчиков первого и второго ярусов горелок

### Основные результаты и выводы по главе 4

1. Апробирован комплекс программ для проведения комплексных исследований, вычислительного эксперимента, отработки технических решений для устойчивого низкоэмиссионного горения перемешанной турбулентной

метано-воздушной смеси с учетом инициируемых воздействий (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация, № 2023614041).

Программный комплекс может применяться в научных исследованиях, в частности при моделировании процессов в энергетической отрасли на ТЭС и котельных [120–123, 126–128].

2. Проведена верификация математической модели и расчетов горения метано-воздушной смеси с многоярусной компоновкой в камере сгорания топочного устройства с рециркуляцией дымовых газов, так и без нее. Отклонение от данных эксплуатационных испытаний находится в диапазоне 4–8 %, что указывает на достоверность результатов моделирования.

3. Выявлены закономерности низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси с инициируемыми воздействиями. Рециркуляция дымовых газов позволяет достигнуть 1,5-кратного снижения концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 5\%$  и более чем 2-кратного снижения концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 10\%$ .

4. Получены в результате математического моделирования и вычислительного эксперимента с применением разработанного комплекса программ закономерности в виде профилей температуры и концентрации оксидов азота по длине факела при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства с рециркуляцией дымовых газов, отличающиеся тем, что они учитывают взаимное влияние струй смеси, что позволяет дать практические рекомендации для снижения эмиссии оксидов азота при производстве энергии:

– газомазутная горелка с изменяемым углом факела, позволяющая осуществить управление формой факела, процессом смешения топлива с воздухом, полями распределения скоростей, эмиссией  $\text{NO}_x$  (Патент 215191 Российская Федерация, МПК F 23 D 17/00 (2006.01) № 2022126426);

– устройство для рециркуляции дымовых газов энергетических котлов позволяющее разделить поток газов рециркуляции на два отдельных потока газов таким образом, чтобы большая часть газов рециркуляции подавалась в зону с максимальными тепловыми потоками энергетического котла, что дает

возможность снизить эмиссию вредных веществ в атмосферу и частично нейтрализовать один из существенных недостатков рециркуляции дымовых газов – снижение КПД парового котла ТЭЦ (Патент 210008 Российская Федерация, МПК F 23 C 9/00 (2006.01) № 2021122765);

– программа для управления блоком перераспределения газов рециркуляции котла при сжигании органического топлива котлов, позволяющая осуществить управление топочным режимом (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация, № 2022684874).

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена модификация метода математического моделирования в сопряженной постановке тепловых и газодинамических процессов в камере сгорания топочного устройства, отличающаяся уточнением значения массовой диффузии компонентов метано-воздушной смеси, позволяющая учитывать влияние рециркуляции дымовых газов, что дает возможность с повышенной точностью и достоверностью прогнозировать эмиссию оксидов азота при производстве энергии.

2. Разработана методика для численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности (применяемых для моделирования в камере сгорания топочного устройства газодинамических и тепловых процессов предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси), реализованная в виде комплекса алгоритмов, с применением уточнения радиационных характеристик предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси и автоматическим заданием густоты расчетной сетки в исследуемых областях, что позволяет сократить вычислительные затраты на процесс расчета горения турбулентной метано-воздушной смеси до 30 % и обеспечить требуемую точность и достоверность прогнозирования эмиссии оксидов азота.

3. Разработан алгоритм численного исследования закономерностей низкоэмиссионного горения метано-воздушной смеси, являющийся основой взаимодействия автономных модулей комплекса программ, с применением автоматического параметрического моделирования газомазутной горелки, что позволяет упростить работу с интерфейсом прикладных программ трехмерного проектирования и прикладных программ для моделирования.

4. На основе предложенных алгоритмов построен и апробирован комплекс программ для проведения исследований, вычислительного эксперимента, отработки технических решений для устойчивого низкоэмиссионного горения

перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с учетом инициируемых воздействий.

5. Проведена верификация математической модели и расчетов горения метано-воздушной смеси с многоярусной компоновкой в камере сгорания топочного устройства как с рециркуляцией дымовых газов, так и без нее. Отклонение от данных эксплуатационных испытаний находится в диапазоне 4–8 %, что указывает на достоверность результатов моделирования.

6. Выполнено математическое моделирование горения предварительно перемешанной турбулентной метано-воздушной смеси с установленной закономерностью в виде профилей температуры и концентрации оксидов азота по длине факела и учетом взаимного влияния струй смеси при многоярусной компоновке в камере сгорания топочного устройства с рециркуляцией дымовых газов, даны практические рекомендации для снижения эмиссии оксидов азота при производстве энергии:

- газомазутная горелка с изменяемым углом факела, позволяющая осуществить управление формой факела, процессом смешения топлива с воздухом, полями распределения скоростей, эмиссией  $\text{NO}_x$ ;

- устройство для рециркуляции дымовых газов энергетических котлов, позволяющее разделить поток газов рециркуляции на два отдельных потока таким образом, чтобы большая часть газов рециркуляции подавалась в зону с максимальными тепловыми потоками энергетического котла, что дает возможность снизить эмиссию оксидов азота при производстве энергии и частично нейтрализовать один из существенных недостатков рециркуляции дымовых газов – снижение КПД парового котла ТЭЦ;

- программа для управления блоком перераспределения газов рециркуляции котла при сжигании органического топлива котлов, позволяющая осуществить управление топочным режимом.

Рециркуляция дымовых газов позволяет достигнуть 1,5 кратного снижения концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 5 \%$  и более чем 2-кратного снижения концентрации  $\text{NO}_x$  при  $r = 10 \%$ .

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АЭС – атомная электростанция

ГЭС – гидроэлектростанция

КПД – коэффициент полезного действия

НДТ – наилучшие доступные технологии

ПДВ – предельно допустимый выброс

ПДК – предельно допустимая концентрация

ТЭС – тепловая электростанция

$L$  – длина камеры сгорания, м

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)

$P$  – давление потока, Па

$\rho$  – плотность несущей среды, кг/м<sup>3</sup>

$T_{max}$  – адиабатическая (калориметрическая) температура горения, К

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с

$T$  – температура, °С

$V_T$  – объем дымовых газов, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К)

$V_{CO_2}, V_{N_2}^0, V_{H_2O}, V_V^0$  – теоретический объем воздуха, азота, водяных паров и двуокиси углерода, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$Q$  – теплота, кДж/кг

$t$  – время, с

$r$  – доля подачи рециркуляции дымовых газов, %

$d$  – доля перераспределения рециркуляции дымовых газов между ярусами горелок

$\alpha$  – коэффициент избытка воздуха

$u, v, w$  – продольная, поперечная, тангенциальная, составляющая вектора скорости потока, м/с

$x_i, x_j$  – координаты, м

$T_{я}$  – температура у первого и второго ярусов горелок, °С

$P_0$  – давление газа в состоянии покоя, Па

$C_{в}, C_{г}, C_{N_2}, C_{CO_2}, C_{H_2O}$  – удельные теплоемкости воздуха, продуктов сгорания, Дж/(кг·К)

$u_i, u_j$  – компоненты вектора скорости, м/с

$NO_x$  – термические оксиды азота

$CFD$  – Computational Fluid Dynamics

$\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Стратегия экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года : [утв. Указом Президента РФ №176 от 19 апреля 2017 г.] : Правительство Рос. Федерации. – Москва : Кремль, 2017. – 14 с.
2. Skiba, U. Assessing the contribution of soil NO<sub>x</sub> emissions to European atmospheric pollution / U. Skiba, S. Medinets [et al.] // Environ. Res. Lett. – 2020. – Vol. 16, № 2. – P. 10. – doi: 10.1088/1748-9326/abd2f2
3. Котлер, В. Р. Экологический аспект обновления устаревшего оборудования ТЭС в Великобритании / В. Р. Котлер, Д. В. Сосин // Теплоэнергетика. – 2010. – № 4. – С. 75–77.
4. Клименко, В. В. От Рио до Парижа через Киото: как усилия по охране глобального климата влияют на развитие мировой энергетики / В. В. Клименко, А. В. Клименко, А. Г. Терешин // Теплоэнергетика. – 2019. – № 11. – С. 5–15. – doi: 10.1134/S004036361911002X
5. Схема и программы развития Единой энергетической системы России на 2020–2026 годы : [утв. Приказом Минэнерго России № 508 от 30 июня 2020 г.] : Минэнерго России. – Москва, 2020. – 272 с.
6. Макаров, И. А. Парижское соглашение по климату: влияние на мировую энергетику и вызовы для России / И. А. Макаров, И. А. Степанов // Актуальные проблемы Европы. – 2018. – № 1. – С. 77–100.
7. Ходаков, Ю. С. Оксиды азота и теплоэнергетика: проблемы и решения / Ю. С. Ходаков. – 2-е изд. – Москва : ООО «ЭСТ-М», 2001. – 432 с.
8. Котлер, В. Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов / В. Р. Котлер. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 144 с.
9. ГОСТ Р 50831–95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. Введ. 1997-01-01. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1996. – 27 с.



10. ГОСТ 28269–89. Котлы паровые стационарные большой мощности. Общие технические требования. Введ. 1991-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 22 с.

11. Росляков, П. В. Нормативно-правовое и методическое обеспечение перехода на наилучшие доступные технологии в теплоэнергетике / П. В. Росляков, О. Е. Кондратьева, А. М. Боровкова // Теплоэнергетика. – 2018. – № 5. – С. 85–92. – doi: 10.1134/S0040363618050107

12. Правила определения технологии в качестве наилучшей доступной технологии, а также разработки, актуализации и опубликования информационно-технических справочников : [утв. постановлением Правительства Российской Федерации № 1458 от 23 декабря 2014 г.]. – Москва, 2017. – 10 с.

13. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии : [утв. Приказом Росстандарта № 2929 от 22 декабря 2017 г.]. – Москва, 2014. – 271 с.

14. Методические рекомендации по определению технологии в качестве наилучшей доступной технологии : [утв. Приказом Минпромторга России № 665 от 31 марта 2015 г.]. – Москва, 2015. – 14 с.

15. Росляков, П. В. Алгоритм оптимального выбора наилучших доступных технологий для российских ТЭС / П. В. Росляков, О. Е. Кондратьева, А. Н. Головтеева, А. М. Сиваковский // Теплоэнергетика. – 2019. – № 4. – С. 60–72. – doi: 10.1134/S0040363619040064

16. Российская Федерация. Законы. «О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации» : [федер. закон: принят Гос. Думой 2 июля 2014 г. : одобр. Советом Федерации 9 июля 2014 г.]. – Москва : Кремль, 2014. – 42 с.

17. Росляков, П. В. Влияние основных характеристик зоны активного горения на выход оксидов азота / П. В. Росляков, Л. Е. Егорова // Теплоэнергетика. – 1996. – № 9. – С. 22–26.
18. Baranski, J. Physical and Numerical Modelling of Flow Pattern and Combustion Process in Pulverized Fuel Fired Boiler / J. Baranski. – Stockholm, Sweden, 2002. – 87 p.
19. Илющенко, В. И. Методы подавления образования оксидов азота в топках котлов / В. И. Илющенко, А. Г. Янковец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія проблеми екології. – 2008. – № 1-2. – С. 85–93.
20. Алехнович, А. Н. Снижение оксидов азота в энергетических котлах, сжигающих газ : учебное пособие / А. Н. Алехнович. – Челябинск : Цицеро, 2018. – 74 с.
21. Булысова, Л. А. Экспериментальные исследования эмиссий NO<sub>x</sub> при последовательном сжигании топлива с кинетической второй зоной горения / Л. А. Булысова, В. Д. Васильев, М. Н. Гутник, А. Л. Берне // Теплоэнергетика. – 2019. – № 7. – С. 51–58. – doi: 10.1134/S0040363619070026
22. Котлер, В. Р. Усовершенствованный метод двухступенчатого сжигания топлива / В. Р. Котлер // Теплоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 73–75.
23. Росляков, П. В. Снижение выбросов оксидов азота на котле ТГМЕ-464 / П. В. Росляков, И. Л. Ионкин // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 45–52.
24. Ivar, A. Emission-free gas power: Soon realizable / A. Ivar, P. Lynn // Greenhouse Issues. – 2001. – № 57. – 4 p.
25. Höglund-Isaksson, L. Innovation effects of the Swedish NO<sub>x</sub> charge / L. Höglund-Isaksson, T. Sterner // OECD Global forum on eco-innovation. – Paris, 2009. – 39 p.
26. Orfanoudakis, N. Emission reduction techniques and economics. Part 1: NO<sub>x</sub>. WIT Transactions on Ecology and the Environment / N. Orfanoudakis,

A. Vakalis [et al.] // Air Pollution XII. – 2004. – Vol. 74. – 10 p. – doi: 10.2495/AIR040771

27. Двойнишников, В. А. Влияние способа ввода газов рециркуляции и конфигурации амбразуры вихревой горелки на горение газового топлива и образование оксидов азота в факеле / В. А. Двойнишников, Д. А. Хохлов, В. П. Князьков, А. Ю. Ершов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 5. – С. 56–65. – doi: 10.1134/S0040363617050022

28. Кобзарь, С. Г. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов / С. Г. Кобзарь, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2009. – № 4. – С. 5–1.

29. Петров, Ю. И. Снижение выбросов NO<sub>x</sub> на котлах ТГМЕ-464 малозатратной реконструкцией горелок / Ю. И. Петров, А. А. Меренов, Ю. М. Усман [и др.] // Электрические станции. – 2000. – № 10. – С. 2–6.

30. Тишин, А. П. Совершенствование рабочих процессов в топках котлов ТЭЦ-21 на основе применения современных средств численного моделирования термогазодинамических процессов / А. П. Тишин, И. Т. Горюнов, Ю. Л. Гуськов, Д. А. Баршак, Г. В. Преснов [и др.] // Электрические станции. – 2003. – № 10. – С. 7–12.

31. Li, J. Effects of flue gas internal recirculation on NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions in a Co-Firing boiler / J. Li, X. Zhang [et al.] // International Journal of Clean Coal and Energy. – 2013. – Vol. 2. – P. 13–21. – doi: 10.4236/ijcce.2013.22002

32. Yanyan, J. Study on combustion and nitrogen oxide emissions of gas boiler / J. Yanyan, Z. Songsong [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 721 (1). – 7 p. – doi:10.1088/1757-899X/721/1/012054

33. Abdelaal, M. Characteristics and flame appearance of oxy-fuel combustion using flue gas recirculation / M. Abdelaal, M. El-Riedy [et al.] // Fuel. – 2021. – Vol. 297. – P. 120775. – doi: 10.1016/j.fuel.2021.120775

34. Pan, D. Effects of flue gas recirculation on self-excited combustion instability and NO<sub>x</sub> emission of a premixed flame Progress / D. Pan, T. Zhu [et al.] //

Thermal Science and Engineering. – 2022. – Vol. 30. – P. 101252. – doi: 10.1016/j.tsep.2022.101252

35. Chris, A. Analysis of Non-Selective Catalyst Reduction Performance with Dedicated Exhaust Gas Recirculation / A. Chris, V. Roekel [et al.] // *Advances in Chemical Engineering and Science*. – 2022. – Vol. 12. – P. 114–129. – doi: 10.4236/aces.2022.122009

36. Jančauskas, A. Combination of Primary Measures on Flue Gas Emissions in Grate-Firing Biofuel Boiler / A. Jančauskas, K. Buinevičius // *Energies*. – 2021. – Vol. 14 (4). – 16 p. – doi: 10.3390/en14040793

37. Kikuchi, K. Fundamental Study on Hydrogen Low-NO<sub>x</sub> Combustion Using Exhaust Gas Self-Recirculation / K. Kikuchi, T. Hori, F. Akamatsu // *Processes*. – 2022. – Vol. 10 (1). – 14 p. – doi: 10.3390/pr10010130

38. Иваницкий, М. С. Снижение выбросов загрязняющих веществ ТЭС при переходе на принципы наилучших доступных технологий // *Энергосбережение и водоподготовка*. – 2019. – № 4. – С. 21–25.

39. Бреус, В. И. Разработка новых топочно-горелочных устройств для энергетики и промышленности / В. И. Бреус, Н. С. Шестаков, А. Э. Лейкам, А. П. Сорокин [и др.] // *Надежность и безопасность энергетики*. – 2017. – Т. 10, (4). – С. 291–297. – doi: 10.24223/1999-5555-2017-10-4-291-297

40. Елсукова, В. К. Образование и снижение выбросов бенз(а)пирена и оксидов азота на котлах с вихревым движением газов / В. К. Елсукова, С. В. Латушкина // *Системы. Методы. Технологии*. – 2020. – № 3. – С. 55–62. – doi: 10.18324/2077-5415-2020-3-55-62

41. Галас, И. В. Опыт снижения эмиссии NO без ухудшения эксплуатационных характеристик котлов ТЭЦ-23 ОАО МОСЭНЕРГО / И. В. Галас, Н. А. Зройчиков, М. Г. Лысков // *Экология в энергетике* – 2005 : труды II Международной научно-практической конференции. – Москва : Изд-во МЭИ, 2005. – С. 91–95.

42. Ahn, J. Combustion Characteristics of 0.5 MW Class Oxy-Fuel FGR (Flue Gas Recirculation) Boiler for CO<sub>2</sub> Capture / J. Ahn, H. Kim // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – 13 p. – doi: 10.3390/en14144333

43. Соболев, В. М. Опыт внедрения инновационных технологий ТЭЦ-21 ОАО Мосэнерго на примере освоения горелок ЗАО «Экотоп» / В. М. Соболев, Ю. Л. Гуськов // *Электрические станции*. – 2003. – № 10. – С. 12–14.

44. Таймаров, М. А. Эффективность периферийной и комбинированной газораздачи в горелках котлов ТГМ-84а / М. А. Таймаров, Р. В. Ахметова, Ю. В. Лавирко, Л. И. Касимова // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 14–22. – doi: 10.30724/1998-9903-2020-22-3-14-22

45. Росляков, П. В. Снижение выбросов оксидов азота на котле ТГМЕ-464 электростанции IRU (Эстония) / П. В. Росляков, И. Л. Ионкин // *Теплоэнергетика*. – 2015. – № 1. – С. 45–52. – doi: 10.1134/S0040363615010099

46. Зройчиков, Н. А. Внедрение на энергетическом котле горелочных устройств с внутритопочной рециркуляцией дымовых газов / Н. А. Зройчиков, Д. Р. Григорьев, М. Gamburg, А. В. Пай // *Теплоэнергетика*. – 2021. – № 11. – С. 71–79. – doi: 10.1134/S0040363621110084

47. Кулиш, О. Н. Удаление оксидов азота из дымовых газов промышленных тепловых агрегатов методом некаталитического восстановления / О. Н. Кулиш, С. А. Кужеватов, И. Ш. Глейзер, М. Н. Орлова, Е. В. Иванова // *Экология и промышленность России*. – 2015. – Т. 19, № 8. – С. 4–9. – doi: 10.18412/1816-0395-2015-8-4-9

48. Аничков, С. Н. Развитие технологии СНКВ и перспективы ее применения / С. Н. Аничков, А. М. Зыков, А. Г. Тумановский, О. Н. Кулиш [и др.] // *Теплоэнергетика*. – 2021. – № 6. – С. 110–116. – doi: 10.1134/S0040363621060011

49. Мытарева, А. И. Семь современных трендов в области разработки катализаторов удаления оксидов азота / А. И. Мытарева, Д. А. Бокарева, А. Ю. Стахеева // Кинетика и катализ. – 2020. – Т. 61, № 6. – С. 751–782. – doi: 10.31857/S0453881120060118

50. Yun, S. Catalytic reduction of NO<sub>x</sub> by biomass-derived activated carbon supported metals / S. Yun, Z. Fan [et al.] // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2018. – Vol. 26 (10). – P. 2077–2083. – doi: 10.1016/j.cjche.2018.04.019

51. Зайчик, Л. И. Сопоставление результатов численного моделирования топочных процессов в пылеугольных топках котлоагрегатов на основе диффузионной и диффузионно-инерционной моделей / Л. И. Зайчик, М. В. Козелев // Теплофизика высоких температур. – 1997. – Т. 35, № 6. – С. 940–946.

52. Алтунин, К. В. Экспериментальное исследование газовой горелки с интенсификатором теплоотдачи в виде стержня / К. В. Алтунин // Теплофизика высоких температур. – 2020. – Т. 58, № 1. – С. 128–134. – doi: 10.31857/S0040364420010019

53. Qiaonan, Z. Estimation of NO<sub>x</sub> emissions from the combustion chamber of heavy-duty gas turbines / Z. Qiaonan, W. Guofeng [et al.] // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. – 2021. – Vol. 657 (1). – 7 p. – doi: 10.1088/1755-1315/657/1/012004

54. Елсуков, В. К. Комплексные исследования эффективности источников энергии в системах централизованного теплоснабжения : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.14.01 / Елсуков Владимир Константинович. – Иркутск, 2013. – 40 с.

55. Халид, Э. Образование и подавление выбросов NO<sub>x</sub> и N<sub>2</sub>O при сжигании топлив в среде кислорода с рециркуляцией CO<sub>2</sub> (обзор) / Э. Халид, Г. А. Рябов, Д. Х. Махар, Т. В. Бухаркина [и др.] // Теплоэнергетика. – 2020. – № 1. – С. 5–14. – doi: 10.1134/S004036361912004X

56. Таймаров, М. А. Оценка интенсивности химических реакций образования оксидов азота при сжигании метано-водородных смесей различного

состава / М. А. Таймаров, Ю. В. Лавирко // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 7 – С. 58–62.

57. Любов, В. К. Комплексная эффективность применения древесных гранул в энергоустановках / В. К. Любов, А. М. Владимиров // Лесной журнал. – 2021. – № 1. – С. 159–172. – doi: 10.37482/0536-1036-2021-1-159-172

58. Любов, В. К. Эффективность сжигания древесного топлива в водогрейных котлах КВУ-2000 / В. К. Любов, А. Н. Попов // Лесной журнал. – 2020. – № 1. – С. 167–79. – doi: 10.37482/0536-1036-2020-1-167-179

59. Meng, Y. Analysis of Gas Recirculation Influencing Factors of a Double Reheat 1000 MW Unit with the Reheat Steam Temperature under Control / Y. Meng, M. Guoqian, S. Yuetao // Energies. – 2020. – Vol. 13. – 21 p. – doi: 10.3390/en13164253

60. Fafara, J. M. Numerical investigation of the internal flue gas recirculation system applied to methane powered gas microturbine combustor / J. M. Fafara, N. Modlinski // Combustion Engines. – 2021. – Vol. 187. – P. 21–29. – doi: 10.19206/CE-141583

61. Козлов, В. Е. Двумерное моделирование v-образного турбулентного метановоздушного пламени / В. Е. Козлов, Н. С. Титова // Высокая температура. – 2019. – Т. 57, № 1. – С. 93–99. – doi: 10.1134/S0040364419010162

62. Козлов, В. Е. Моделирование эмиссии оксидов азота и углерода при турбулентном горении частично перемешанной метановоздушной смеси / В. Е. Козлов, Н. С. Титова // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Т. 59, № 4. – С. 557–565. – doi: 10.31857/S004036442104013X

63. Куксов, И. А. Численное моделирование процессов горения водоугольного топлива с использованием пакета STAR-CCM+ / И. А. Куксов, С. П. Мочалов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 5. – С. 144–148.

64. Редько, А. А. Моделирование рабочих процессов в топке парового водотрубного котла с целью снижения выбросов оксида азота / А. А. Редько,

А. В. Давиденко, С. В. Павловский, Н. В. Куликова [и др.] // Проблемы региональной энергетики. – 2017. – № 1. – С. 54–65.

65. Росляков, П. В. Опыт CFD-моделирования процессов горения жидкого и газообразного топлива в энергетических установках (обзор) / П. В. Росляков, I. V. Khudyakov, Д. А. Хохлов, М. Н. Зайченко // Теплоэнергетика. – 2019. – № 9. – С. 3–23. – doi: 10.1134/S0040363619090030

66. Jaggu, N. Анализ применения FGM и EDM моделей горения в горелках с частичным предварительным смешиванием для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / N. Jaggu, S. R. Alluru [et al.] // Теплоэнергетика. – 2021. – № 11. – С. 62–70. – doi: 10.1134/S0040363621110011

67. Иваницкий, М. С. Моделирование влияния температурного уровня в зоне активного горения на содержание оксидов азота и бенз(а)пирена в продуктах сгорания котельных установок систем теплоснабжения. Часть 2. Горение мазута в водогрейном котле КВ-ГМ-100(116,3/150) // Проблемы энергетики. – 2017. – № 19. – С. 3–11. – doi: 10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-3-11

68. Гиль, А. В. Численное исследование влияния избытка первичного воздуха на процессы горения в топочной камере энергетического котла с многоканальными вихревыми горелками / А. В. Гиль, А. С. Заворин, О. М. Кокшарев, Е. С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. – 2020. – Т. 331, № 9. – С. 18–27.

69. Марьяндышев, П. А. Численное моделирование топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котла / П. А. Марьяндышев, А. А. Чернов, В. К. Любов // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 7. – С. 59–66.

70. Михайлов, А. С. Разработка способа стабилизации горения твердого пылевидного топлива в ограниченном закрученном потоке : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 01.04.14 / Михайлов Артем Сергеевич. – Рыбинск, 2016. – 131 с.



71. Чернов, А. А. Численное моделирование топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котла с использованием программного пакета Ansys Fluent / А. А. Чернов, П. А. Марьяндышев, Е. В. Панкратов, В. К. Любов // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 5. – С. 36–40.

72. Верещетин, В. А. Совершенствование низкоэмиссионных газогорелочных устройств котлов ТЭС : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.14.14 / Верещетин Владимир Артурович. – Москва : ОАО «ВТИ», 2018. – 131 с.

73. Щедров, Е. А. Исследование образования оксидов азота в топочной камере котла БКЗ–320–140 от избытка воздуха / Е. А. Щедров, Н. В. Визгавлюст // Современные тенденции котлостроения : материалы I Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2017. – С. 141–145.

74. Юрьев, Е. И. Совершенствование характеристик топочного устройства котла при переводе на сжигание природного газа // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2013. – № 5. – С. 20–26.

75. Bin, X. A case study of digital-twin-modelling analysis on power-plant-performance optimizations / X. Bin, W. June [et al.] // Clean Energy. – 2019. – Vol. 3, iss. 3. – P. 227–234.

76. Habib, M. A. Computer Simulation of NO<sub>x</sub> Formation in Boilers / M. A. Habib, M. Elshafei // Proceedings of the 2006 International Conference on Modeling, Simulation & Visualization Methods. – Dhahran, KSA, 2006. 7 p.

77. Seyed, M. M. Numerical study of the combustion and application of SNCR for NO<sub>x</sub> reduction in a lab-scale biomass boiler / M. M. Seyed, F. Hesameddin, B. Xue-Song // Fuel. – 2021. – Vol. 293. – P. 120154. – doi: 10.1016/j.fuel.2021.120154

78. Dupoirieux, F. The Models of Turbulent Combustion in the CHARME Solver of CEDRE / F. Dupoirieux, N. Bertier // *AerospaceLab*. – 2011. – Iss. 2. – P. 1–7.
79. Matuszewskiy, L. Numerical calculation of the NO formation in a multi-point combustion chamber and results of the associated validation experiments / L. Matuszewskiy, F. Dupoirieux [et al.]. – Palaiseau Cedex, France, 2015. – 14 p.
80. Dupoirieux, F. Methodology for the Numerical Prediction of Pollutant Formation in Gas Turbine Combustors and Associated Validation Experiments / F. Dupoirieux, N. Bertier [et al.] // *AerospaceLab*. – 2016. – Vol. 11. – P. 1–20. – doi: 10.12762/2016.AL11-07
81. Habib, M. A. Computational fluid dynamic simulation of oxyfuel combustion in gas-fired water tube boilers / M. A. Habib // *Computers & Fluids*. – 2012. – Vol. 56. – P. 152–165. – doi: 10.1016/j.compfluid.2011.12.009
82. Jian, C. Computational investigation of hydrodynamics, coal combustion and NOx emissions in a tangentially fired pulverized coal boiler at various loads / C. Jian, Z. Zhijian [et al.] // *Particuology*. – 2022. – Vol. 65. – P. 105–116. – doi: 10.1016/j.partic.2021.06.012
83. Yun-tao, C. Distributed parameter modeling and simulation for the evaporation system of a controlled circulation boiler based on 3-D combustion monitoring / C. Yun-tao, L. Chun [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2008. – Vol. 28. – P. 164–177. – doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.03.027
84. Luis, I. D. Numerical investigation of NOx emissions from a tangentially-fired utility boiler under conventional and overfire air operation / I. D. Luis, C. Cortés, J. Pallarés // *Fuel*. – 2008. – Vol. 87 (7). – P. 1259–1269. – doi: 10.1016/j.fuel.2007.07.025
85. Dekterev, A. A. Simulation of aerodynamics of a four-vortex combustion chamber / A. A. Dekterev, V. A. Kuznetsov [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2020 – Vol. 2211 (1). – P. 070002. – doi: 10.1063/5.0000957

86. Двойнишников, В. А. Влияние способа ввода газов рециркуляции и конфигурации амбразуры вихревой горелки на горение газового топлива и образование оксидов азота в факеле / В. А. Двойнишников, Д. А. Хохлов, В. П. Князьков, А. Ю. Ершов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 5. – С. 56–65. – doi: 10.1134/S0040363617050022

87. Cristiano, V. S. CFD Analysis of the Pulverized Coal Combustion Processes in a 160 MWe Tangentially-Fired-Boiler of a Thermal Power Plant / V. S. Cristiano, M. L. Indrusiak, A. B. Beskow // Journal of The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2010. – Vol. 32 (4). – P. 427–435. – doi: 10.1590/S1678-58782010000400004

88. Yu, W. Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future / W. Yu, P. Patros [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 161. – P. 112407. – doi: 10.1016/j.rser.2022.112407

89. Ostroukh, A. Intelligent system for digital substation control / A. Ostroukh, M. Karelina [et al.] // Transportation Research Procedia. – 2021. – Vol. 57. – P. 385–391 p. – doi: 10.1016/j.trpro.2021.09.065

90. Glaessgen, E. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles / E. Glaessgen, D. Stargel // Conference: 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. – 2012. – April. – doi: 10.2514/6.2012-1818

91. Singh, S. Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation / S. Singh, M. Weeber, K. P. Birke // CIRP. – 2021. – Vol. 99. – P. 567–572. – doi: 10.1016/j.procir.2021.03.078

92. Agouzoul, A. Towards a Digital Twin model for Building Energy Management: Case of Morocco / A. Agouzoul, M. Tabaa [et al.] // Procedia Computer Science. – 2021. – Vol. 184. – P. 404–410. – doi: 10.1016/j.procs.2021.03.051

93. Luo, W. A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. / W. Luo, T. Hu [et al.] // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2020. – Vol. 65. – doi: 10.1016/j.rcim.2020.101974
94. Khitrykh, D. The Digital Transformation of the Energy Industry / D. Khitrykh // *Энергетическая политика*. – 2021. – № 10. – С. 76–89. – doi: 10.46920/2409-5516\_2021\_10164\_76
95. Dvortsevoy, A. I. Evaluation of components of an excess fuel flow in the heat power equipment / A. I. Dvortsevoy, O. K. Grigorieva, I. A. Tikhonov // *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*. – 2020. – Vol. 79. – P. 109–122. – doi: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-109-122
96. Sharovina, I. M. From Automated Design to Digital Double of APCS for a TPP / I. M. Sharovina, V. V. Lopatinb [et al.] // *Thermal Engineering*. – 2021. – Vol. 3. – P. 67–74. – doi: 10.1134/S004036362103006
97. Sleiti, A. K. Digital twin in energy industry: Proposed robust digital twin for power plant and other complex capital-intensive large engineering systems / A. K. Sleiti, J. S. Kapat, L. Vesely // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 3704–3726. – doi: 10.1016/j.egyр.2022.02.305
98. Юн, А. А. Моделирование турбулентных течений / А. А. Юн. – 2-е издание, исправленное и дополненное. – Москва : Либроком, 2010. – 349 с.
99. Федорова, Н. Н. Основы работы в ANSYS 17 / А. А. Юн, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 260 с.
100. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – 3-е издание переработанное и дополненное. – Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 1988. – 256 с.
101. Липов, Ю. М. Компоновка и тепловой расчет парового котла : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Липов, Ю. В. Самойлов, Т. В. Виленский. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 208 с.

102. Орлов, М. Ю. Моделирование процессов в камере сгорания : учеб. пособие / М. Ю. Орлов, С. В. Лукачѳв, С. Г. Матвеев. – Самара : Изд-во Самарского университета, 2017. – 292 с.

103. Тугов, А. Н. Опыт внедрения внутритопочных методов снижения NO<sub>x</sub> на котлах Е-320-13.8-560ГМ: проблемы и пути их решения / А. Н. Тугов, В. М. Супранов, М. А. Изюмов, В. А. Верещетин, Ю. М. Усман, А. С. Натальин // Теплоэнергетика. – 2017. – № 12. – С. 27–34. – doi: 10.1134/S0040363617120098

104. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – 3-е издание, переработанное и дополненное – Санкт-Петербург : НПО ЦКТИ, 1988. – 260 с.

105. Тепловой расчет котла ТГМЕ-464 (нагрузка 50 %, топливо – газ). – ТКЗ «Красный котельщик», 1976. – 8 с.

106. СО 153-34.02.304–2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций ОАО ВТИ (2005 г.).

107. Полонский, В. С. Комплексное исследование теплехимических условий работы наклонных труб подовой части фронтального экрана газоплотного котла ТГМЕ-464 / В. С. Полонский, В. В. Холщев, А. С. Криуля, К. А. Клеваичук [и др.] // Теплоэнергетика. – 1996. – № 9. – С. 35–39.

108. Холщев, В. В. Сравнительный анализ двух экспериментов, проведенных в разные годы на газомазутных котлах / В. В. Холщев // Электрические станции. – 2001. – № 3. – С. 12–15.

109. Таймаров, М. А. Лучистый поток от факела в котлах ТГМ-96 и ТГМЕ-464 / М. А. Таймаров, Ю. В. Лавирко // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2016. – № 1. – С. 143–147.

110. Салтанаева, Е. А. Тепловые потоки от факела в котлах с различной компоновкой горелок / Е. А. Салтанаева, М. А. Таймаров, Р. В. Ахметова, Р. Г. Сунгатуллин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы

энергетики. – 2017. – № 19. – С. 50–58. – doi: 10.30724/1998-9903-2017-19-9-10-50-58

111. Медведев, В. А. О модернизации котельного агрегата ТГМЕ-464 Саратовской ТЭЦ-5 с целью снижения выбросов NOx путем применения труб с внутренним винтовым оребрением в подовой поверхности нагрева / В. А. Медведев, О. Ю. Мясникова // Новости теплоснабжения. – 2013. – № 10. – С. 28–31.

112. Патент 210008 Российская Федерация, МПК F 23 С 9/00 (2006.01). Устройство для рециркуляции дымовых газов энергетических котлов / Ковальногов В. Н., Федоров Р. В., Бусыгин С. В., Чукалин А. В., Генералов Д. А. ; заявитель и патентообладатель УлГТУ. – № 2021122765 ; заявл. 29.07.21 ; опубл. 24.03.22, Бюл. № 9.

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

114. Технический отчет по результатам проведения опытов по пересмотру энергетических характеристик котла ТГМЕ-464 ст. № 3, установленного на Чебоксарской ТЭЦ-2, 2017. – 76 с.

115. Технический отчет режимно-наладочных испытаний котлов ТГМЕ-464 ст. № 3, 5 Чебоксарской ТЭЦ-2, 2004. – 97 с.

116. Трёмбовля, В. И. Теплотехнические испытания котельных установок / В. И. Трёмбовля, Е. Д. Фингер, А. А. Авдеева. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.

117. Бусыгин, С. В. Экспериментальное исследование температуры в топке котла ТГМЕ-464 // Научному прогрессу – творчество молодых: материалы XIV Международной молодежной научной конференции по естественнонаучным и техническим дисциплинам. – Йошкар-Ола : Изд-во ПГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 86–88.

118. Бусыгин, С. В. Исследование и разработка мероприятий по снижению эмиссии оксидов азота энергетического котлоагрегата // *Вузовская наука в современных условиях : сборник материалов 54-й научно-технической конференции.* – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2020. – С. 34–38.

119. Бусыгин, С. В. Исследование возможности снижения загрязнения атмосферного воздуха при сжигании природного газа в энергетических котлах / С. В. Бусыгин, У. Д. Мизхер, А. В. Чукалин // *Гражданская авиация: XXI век : сборник материалов XII Международной молодежной научной конференции.* – Ульяновск : Изд-во УИ ГА, 2020. – С. 221–224.

120. Мизхер, У. Д. Моделирование и исследование процессов горения топливовоздушных смесей на основе биогаза / У. Д. Мизхер, А. В. Чукалин, С. В. Бусыгин, В. Н. Ковальногов, Р. В. Федоров // *Вестник Ульяновского государственного технического университета.* – 2020. – № 2. – С. 90–91.

121. Mizher, U. J. Simulation of the Processes of Combined Fuel Combustion and Analysis of Harmful Substances Emissions / U. J. Mizher, V. N. Kovalnogov, A. V. Chukalin, S. V. Busygin [et al.] // *AIP Conference Proceedings.* – 2021. – Vol. 2343. – doi: 10.1063/5.0047875

122. Chukalin, A. V. Modeling and research of combustion processes of tangentially swirled air-fuel mixture / A. V. Chukalin, R. V. Fedorov, V. N. Kovalnogov, S. V. Busygin [et al.] // *AIP Conference Proceedings.* – 2021. – № 2343. – doi: 10.1063/5.0047877

123. Бусыгин, С. В. Моделирование процесса рециркуляции дымовых газов энергетического котла с применением комплекса программ для оценки эффективности мероприятий, направленных на подавление выбросов NOx при сжигании природного газа на ТЭС // *Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики : сборник трудов I Всероссийской научно-технической конференции с международным участием.* – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2021. – С. 176–179.

124. Генералов, Д. А. Численное исследование способов повышения эффективности сжигания топлива в энергетических установках / Д. А. Генералов, С. В. Бусыгин // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики : сборник трудов I Всероссийской научно-технической конференция с международным участием. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2021. – С. 51–54.

125. Бусыгин, С. В. Математическое моделирование и исследование эффективности рециркуляции дымовых газов в энергетических котлах / С. В. Бусыгин, В. Н. Ковальногов, А. В. Чукалин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10, № 4. – С. 12–19. – doi: 10.46548/21vek-2021-1056-0001

126. Kovalnogov, V. N. Modeling the processes of combined fuel combustion and temperature analysis in the zone of active combustion of power plants / V. N. Kovalnogov, U. J. Mizher, S. V. Busygin [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2425 (1). – P. 420031. – doi.org/10.1063/5.0081375

127. Kovalnogov, V. Applying the Random Forest Method to Improve Burner Efficiency / V. Kovalnogov, R. Fedorov, V. Klyachkin, D. Generalov, Y. Kuvayskova, S. Busygin // Mathematics. – 2022. – Vol. 10. – 24 p. – doi: 10.3390/math10122143

128. Ковальногов, В. Н. Численное исследование способов повышения эффективности сжигания топлива в топочных устройствах энергетических котлов / В. Н. Ковальногов, Р. В. Федоров, Д. А. Генералов, С. В. Бусыгин // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 2. – С. 70–79. – doi: 10.35752/1991-2927-2022-2-68-70-79

129. Бусыгин, С. В. Разработка и численное исследование устройства для поддержания минимальной эмиссии вредных газов в паровых котлах / С. В. Бусыгин, В. Н. Ковальногов, Р. В. Федоров, Д. А. Генералов [и др.] // Материалы Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 17–22 октября 2022 г.). – Москва : Изд-во МЭИ, 2022. – С. 18–20.



130. Ковальногов, В. Н. Математическое моделирование повышения эффективности сжигания комбинированного топлива / В. Н. Ковальногов, Р. В. Федоров, Д. А. Генералов, С. В. Бусыгин [и др.] // XXXVIII Сибирский теплофизический семинар : сборник тезисов Всероссийской конференции. – Новосибирск : Изд-во Институт теплофизики, 2022. – С. 113.

131. Патент 215191 Российская Федерация, МПК F 23 D 17/00 (2006.01). Газомазутная горелка с изменяемым углом факела / Ковальногов В. Н., Федоров Р. В., Генералов Д. А., Бусыгин С. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель УЛГТУ. – № 2022126426 ; заявл. 11.10.2022 ; опубл. 02.12.2022, Бюл. № 34.

132. Tucki, K. The Impact of Fuel Type on the Output Parameters of a New Biofuel Burner / K. Tucki, O. Orynych, A. Wasiak, A. Swi'c, J. Wichlacz // Energies. – 2019. – Vol. 12 (7). – doi:10.3390/en12071383

133. Wu, W. Optimization Research on Burner Arrangement of Landfill Leachate Concentrate Incinerator Based on “3T+E” Principle / W. Wu, J. Liu, S. Guo, Z. Zeng, G. Cui, Z. Yang // Energies. – 2022. – Vol. 15 (16). – doi: 10.3390/en15165855

134. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация. Программа для управления блоком перераспределения газов рециркуляции котла при сжигании органического топлива / Бусыгин С. В., Ковальногов В. Н., Федоров Р. В., Генералов Д. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель УЛГТУ. – № 2022684874 ; заявл. 14.12.2022 ; опубл. 19.12.2022.

135. Бусыгин, С. В. Оценка работоспособности технического объекта с использованием бинарной классификации / С. В. Бусыгин, В. Н. Клячкин, В. Н. Ковальногов // Автоматизация процессов управления. – 2022. – № 4. – С. 51–57. – doi: 10.35752/1991-2927\_2022\_4\_70\_51

136. Busygin, S. Runge–Kutta pairs of orders 8(7) with extended stability regions for addressing Linear Inhomogeneous systems / R. Fedorov, T. Karpukhina,

V. Kovalnogov, T. Simos, C. Tsitouras // *Math Meth Appl Sci.* – 2022. – Vol. 46 (4). – doi: 10.1002/mma.8750

137. Федоров, Р. В. Численное исследование способов сокращения эмиссии NO<sub>x</sub> на тепловых электростанциях / Р. В. Федоров, Д. А. Генералов, В. В. Сапунов, С. В. Бусыгин [и др.] // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики : сборник трудов II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Ульяновск : Изд-во УлГТУ, 2022. – С. 19–23.

138. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, Российская Федерация. Программный комплекс по параметрическому моделированию газомазутной горелки для отработки эффективных технологий сжигания топлива / Бусыгин С. В., Ковальногов В. Н., Федоров Р. В., Генералов Д. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель УлГТУ. – № 2023614041 ; заявл. 15.02.2023 ; опубл. 22.02.2023.

139. Ковальногов, В. Н. Прогнозирование содержания оксидов азота в дымовых газах горелочного устройства / В. Н. Ковальногов, С. В. Бусыгин, Д. А. Генералов, В. Н. Клячкин // *Экологические системы и приборы.* – 2023. – № 5. – С. 32–37. – doi: 10.25791/esip.5.2023.1370

140. Fedorov, R. Predicting the Optimal Operation of Burners Based on Random Forest / R. Fedorov, V. Kovalnogov, D. Generalov, V. Sapunov, S. Busygin // *Artificial Intelligence in Models, Methods and Applications. AIES 2022. Studies in Systems, Decision and Control.* – Springer, Cham, 2023. – P. 383–394. – doi: 10.1007/978-3-031-22938-1\_27

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**  
**Сертификаты участника**  
**(справочное)**



**ВОСЬМАЯ РОССИЙСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ТЕПЛООБМЕНУ (РНКТ-8)**

**17 – 22 октября 2022 года, Москва, НИУ «МЭИ»**

**СЕРТИФИКАТ**

выдан в подтверждении того, что доклад

Разработка и численное исследование устройства для поддержания минимальной эмиссии вредных газов в паровых котлах — *Рег. № 114*

*Авторы: Бусыгин С.В., Ковальногов В.Н, Федоров Р.В., Генералов Д.А., Чукалин А.В. (Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск)*

был сделан на Секции 7 «Дисперсные потоки и пористые среды» Восьмой Российской национальной конференции по теплообмену, которая проходила 17-22 октября 2022 г. в Москве на базе Национального исследовательского университета «МЭИ»

Председатель организационного комитета  
член-корр. РАН

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Дедов'.

Дедов А.В.





**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**Свидетельства о государственной регистрации**  
**(справочное)**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 210008**

**Устройство для рециркуляции дымовых газов  
энергетических котлов**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Ульяновский государственный технический университет"  
(RU)*

Авторы: *Ковальцов Владимир Николаевич (RU), Федоров  
Руслан Владимирович (RU), Бусыгин Сергей Валерьевич (RU),  
Чукалин Андрей Валентинович (RU), Генералов Дмитрий  
Александрович (RU)*

Заявка № 2021122765

Приоритет полезной модели **29 июля 2021 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации **24 марта 2022 г.**  
Срок действия исключительного права  
на полезную модель истекает **29 июля 2031 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 64848007/RS1-44-1010104040414145d9c7  
Владелец: **Зубов Юри Сергеевич**  
Действителен с 20.11.2022 по 29.05.2023

*Ю.С. Зубов*





## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 215191****Газомазутная горелка с изменяемым углом факела**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ" (RU)*

Авторы: *Ковальногов Владислав Николаевич (RU), Фёдоров Руслан Владимирович (RU), Генералов Дмитрий Александрович (RU), Сапунов Валерий Викторович (RU), Бусыгин Сергей Валерьевич (RU), Шепелев Игорь Игоревич (RU)*

Заявка № **2022126426**

Приоритет полезной модели **11 октября 2022 г.**  
 Дата государственной регистрации  
 в Государственном реестре полезных  
 моделей Российской Федерации **02 декабря 2022 г.**  
 Срок действия исключительного права  
 на полезную модель истекает **11 октября 2032 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
 по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью  
 Сертификат: 68b8007f214c40f0a9aedbd34149d5c7  
 Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
 Действителен с 2.03.2022 по 25.05.2023

*Ю.С. Зубов*



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022684874

**Программа для управления блоком перераспределения  
газов рециркуляции котла при сжигании органического  
топлива**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский  
государственный технический университет» (RU)*

Авторы: *Бусыгин Сергей Валерьевич (RU), Ковальников Владислав  
Николаевич (RU), Генералов Дмитрий Александрович (RU),  
Федоров Руслан Владимирович (RU), Шепелев Игорь Игоревич  
(RU)*

Заявка № 2022684605

Дата поступления 14 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 19 декабря 2022 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 68b80077e14c4803a94ecbd34145d5c/  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 2.03.2022 по 25.05.2023

Ю.С. Зубов



## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023614041

**Программный комплекс по параметрическому  
моделированию газомазутной горелки для отработки  
эффективных технологий сжигания топлива**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Бусыгин Сергей Валерьевич (RU), Ковальников Владислав Николаевич (RU), Федоров Руслан Владимирович (RU), Генералов Дмитрий Александрович (RU), Сапунов Валерий Викторович (RU), Шеркунов Вячеслав Владимирович (RU), Шепелев Игорь Игоревич (RU), Гладили Никита Дмитриевич (RU)*

Заявка № 2023612781

Дата поступления 15 февраля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 22 февраля 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат 68b80017e14c40f0294cedbd24145d3c7  
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 2012-02-22 по 26.05.2023

*Ю.С. Зубов*



**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**Акт внедрения результатов работы**  
**(справочное)**



Филиал «Марий Эл и Чувашии»  
ПАО «Т Плюс»

---

АКТ  
о внедрении результатов  
кандидатской диссертационной работы  
Бусыгина Сергея Валерьевича

Комиссия в составе:

Председатель:

Кузьмин Н. А. – технический директор Чебоксарской ТЭЦ-2 филиала «Марий Эл и Чувашии» ПАО «Т Плюс».

Члены комиссии:

Щекалев А.А. – начальник производственно-технического отдела Чебоксарской ТЭЦ-2 филиала «Марий Эл и Чувашии» ПАО «Т Плюс»,  
Казанцева К.С. – главный специалист производственно-технического отдела Чебоксарской ТЭЦ-2 филиала «Марий Эл и Чувашии» ПАО «Т Плюс».

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы: «Математическое моделирование, численное исследование для снижения эмиссии оксидов азота при производстве энергии», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, используются в аналитической и учебной деятельности на Чебоксарской ТЭЦ-2 филиала «Марий Эл и Чувашии» ПАО «Т Плюс».

С использованием программного комплекса проведены исследования эффективности малоэмиссионного горения метано-воздушной смеси.

Председатель: Кузьмин Н.А.

Члены комиссии: Щекалев А. А.

Казанцева К.С.