

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е. А. Бойко

подпись

Инициалы, фамилия

«__» _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка технических решений по снижению выбросов

оксидов азота на котельных агрегатах БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2

тема

13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.02 – Энергоэффективные технологии производства электрической
и тепловой энергии

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

Е. А. Бойко

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Е. С. Кашеева

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

Главный инженер

АО «Енисейская

ТГК (ТГК-13)» ф-л

«Красноярская

ТЭЦ-2»

должность, ученая степень

А. Е. Зубарев

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

П. В. Шишмарев

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е. А. Бойко

подпись

Инициалы, фамилия

«___» _____ 2020 г.

ЗАДАНИЕ

НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

в форме магистерской диссертации

бакалаврской работы, дипломного проекта, дипломной работы, магистерской диссертации

Студенту Кащеевой Евгении Сергеевне

фамилия, имя, отчество

Группа ФЭ18-06М

номер

Направление(специальность) 13.04.01.02

код

Эффективные технологии производства электрической и тепловой энергии

наименование

Тема выпускной квалификационной работы Разработка технических решений по снижению выбросов оксидов азота на котельных агрегатах БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2

Утверждена приказом по университету №16699/с от 17.11.2017

Руководитель ВКР профессор, д.т.н. Е. А. Бойко

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР Котлоагрегат БКЗ-500-140 ст. №6

Перечень разделов ВКР:

- 1) Обзорная часть
- 2) Основная часть
- 3) Техничко-экономическая часть
- 4) Список использованных источников
- 5) Приложения

Руководитель ВКР _____
подпись

Задание принял к исполнению

подпись

Е. А. Бойко
инициалы и фамилия

Е. С. Кащеева
инициалы и фамилия студента
«17» ноября 2017 г.

РЕФЕРАТ

Разработка компьютерно-математической трехмерной модели при помощи средств ANSYS Fluent, позволяющая производить оценку эффективности применения различных мероприятий с целью снижения выбросов вредных веществ. На примере двухступенчатого сжигания по технологии OFA произведено моделирование процессов сжигания пылеугольной смеси. Приложены варианты организации ступенчатого сжигания, произведен анализ зависимости образования NO_x от расположения инжекторов третичного дутья и угла водовода третичного воздуха.

Проект направлен на повышения экологической составляющей паровых котлов путем перераспределения подачи воздуха для горения по высоте топочной камеры.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Основные экологические проблемы и пути решения	5
1.1 Экологический анализ выбросов.....	5
1.2 Анализ наилучших доступных технологий снижения NO_x	6
2 Разработка подхода к оценке процессов образования оксидов азота	14
2.1 Объект исследования.....	15
2.2 Теоретические аспекты оценки снижения выбросов оксидов азота	17
2.3 Компьютерно-математические аспекты оценки выбросов вредных веществ	19
3 Разработка и исследование технических решений по организации горения	21
3.1 Теоретическое исследование	21
3.2 Математическое исследование	33
4 Техничко-экономическое обоснование	48
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
Список используемых источников.....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А	54

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые электрические станции – основной компонент генерирующих мощностей, воздействие на окружающую среду которых наиболее значительно и многообразно. Одной из основных видов воздействия на окружающую среду и наиболее опасной является загрязнение воздушной среды дымовыми выбросами и вредными газами (оксиды серы и азота, монооксид углерода и др.) и твердыми аэрозолями (зола, сажа), включающими, в свою очередь, токсичные и канцерогенные компоненты, в том числе соединения тяжелых металлов.

Красноярск входит в число самых загрязненных городов России и занимает 12 место [3]. Согласно ежегодному экологическому докладу Минприроды за 2018 год количество выбросов загрязняющих атмосферу веществ, отходящих от стационарных источников составляют 2318,9 тыс. т. (1789 тыс. т. ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» - г. Норильск). Без учета выбросов ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» суммарные выбросы в крае составили 529,9 тыс. т. На долю отрасли производства и распределения электроэнергии, газа и воды составили 43,3% (229,4 тыс. т.), из них на долю Красноярской ТЭЦ-2 приходится 6,5% (14,9 тыс. т.) [3]. Доля наиболее токсичных выбросов, таких как оксиды азота, составляет 37,4% (5710,14 тыс.т).

Снижение негативного воздействия на окружающую среду промышленными предприятиями является одним из приоритетных направлений экологической политики Красноярского края. Для уменьшения выбросов вредных веществ, снижения количества дней с неблагоприятными метеорологическими условиями и повышения качества жизни населения предлагаю рассмотреть техническое предложение по снижению выбросов оксидов азота на примере Красноярской ТЭЦ-2.

В данной работе рассматривается техническое предложение, которое основано на внутритопочной подготовке угля с организацией ступенчатого сжигания по технологии OFA (overfire air) на примере котельного агрегата БКЗ-500-140 и производится расчет на оптимальное перераспределения воздуха на горелки и сопла и расположение сопел третичного дутья при максимально возможном уменьшении выбросов NO_x и максимально возможном КПД, используя средства математического моделирования для более детального анализа сложных физических и химических процессов, протекающих в топочной камере.

1 Основные экологические проблемы и пути решения

Сжигание твердого топлива в топочных камерах котельных агрегатов помимо продуктов сгорания (CO_2 , H_2O , N_2) сопровождается выделением загрязняющих веществ – твердые (зола) и газообразные, такие как оксиды серы (SO_2 и SO_3), оксиды азота (NO и NO_2), бензапирен и другие, оказывающие вредное воздействие на человека.

Доля всех оксидов азота от промышленных предприятий невелика, но возникающие местные концентрации, вследствие неравномерности распределения в атмосфере, оказывают негативное воздействие на человека, растительный и животный мир. Кислотные дожди, возникающие вследствие соединения оксидов азота и серы с влагой атмосферы, наносят непоправимый характер окружающему миру.

Кроме того, оксиды азота приводят к потерям озона в приземном слое атмосферы, образованию смога. Выбросы оксидов азота тепловыми станциями в России составляют около 60% от их общего поступления в атмосферу [1].

1.1 Экологический анализ выбросов

Согласно данным статистической отчетности Красноярской ТЭЦ-2 за 2018 год количество выбросов вредных веществ распределилось согласно рисунку 1. Количество произведенных вредных веществ: твердые вещества – 41,6 т, диоксид серы – 6297,4 т, оксиды азота – 6245,6 т, оксид углерода – 302,17 т.



Рисунок 1 – Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу

Количество предельно допустимых выбросов NO_x составляет 6997,9 т, SO_2 – 9230,6 т. Анализирую приведенную информацию, отношение произведенных выбросов к допустимым для оксидов азота составляет 89,2%, для оксидов серы – 68,2%.

С учетом того, что оборудование на станции работает в переменных режимах, можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки количество выбросов увеличится и достигнет предельно допустимых.

Оксид азота - бесцветный ядовитый газ, оказывает отрицательное воздействие на нервную систему и кровь человека, может привести к летальному исходу, относится к третьему классу опасности; диоксид азота имеет красно-бурый цвет, отрицательно воздействует на легкие и дыхательные пути, при достаточной концентрации усиливает действие канцерогенных веществ, второй класс опасности.

В уходящих газах содержится оксид диазота N_2O . Закись азота способствует уменьшению озонового слоя Земли и усилению парникового эффекта в атмосфере.

Одним из составляющих компонентов дымовых газов являются оксиды азота. При выходе из дымовой трубы 40-80% оксидов азота переходит в диоксид азота, при этом образование диоксидов азота в корне дымового факела происходит в результате окисления кислородом, преобразование в приземистом слое при более низких концентрациях NO происходит за счет озона, содержащегося в атмосферном воздухе.

Массовые концентрации нормативных удельных выбросов оксидов азота в дымовых газах при н.у. для котлов производительностью свыше 420т/ч и введенных в эксплуатацию до 2001 года составляют 700мг/м^3 , для аналогичных котлов, введенных в эксплуатацию после 2001 г. составляют 300мг/м^3 . По данным фактических замеров на Красноярской ТЭЦ-2 в зимние месяцы концентрация оксидов азота достигала пределов, выше нормативных значений.

Несмотря на допустимое количество выбросов оксидов азота в год, имеются единовременные превышения концентрации. Далее рассмотрим возможные мероприятия для снижения NO_x до нормативных величин.

1.2 Анализ наилучших доступных технологий снижения NO_x

Для рассмотрения путей уменьшения образования оксидов азота необходимо понимание их образования. На текущий момент хорошо определены и изучены 3 принципиально разных источника оксидов азота, которые представлены ниже:

1. Термические оксиды азота

Образование термических NO из молекулярного азота воздуха, подаваемого в топку котла. Образование происходит вследствие достаточного времени пребывания продуктов сгорания в зоне горения и при высоких (выше 1300°C) температурах. Скорость образования NO увеличивается с ростом температуры. Увеличение времени пребывания в зоне горения приводит к прямо пропорциональному росту эмиссии оксида азота. Линейно растет концентрация оксидов азота с увеличением концентрации кислорода. Первичные мероприятия для снижения NO_x основаны на воздействии на один или несколько факторов в зоне максимальной генерации NO_x .

2. Топливные оксиды азота

Образование NO из азотосодержащих соединений на начальном участке факела при достаточно низких температурах до образования термических. Данные оксиды образуются параллельно с горением топлива, в промежуток времени меньший, чем время его горения и при относительно низких температурах (выше 1000°C). Степень образования концентрации увеличивается с ростом коэффициента избытка воздуха при температуре 670-1050°C, слабо зависит от температуры и пропорционален квадрату средней концентрации кислорода в факеле. Главным образом эмиссия NO_x зависит от вида и состава топлива, основным критерием является содержание азота в топливе.

3. Быстрые оксиды азота

Образование NO путем реакции молекулярного азота воздуха с углеводородными радикалами, образующимися в промежуточных реакциях горения («быстрое» NO). Образуются в зоне фронта пламени при температуре около 1300°C. Установлена преобладающая зависимость образования NO_x от коэффициента избытка воздуха и смещения его максимума концентрации в область обогащенных горючих смесей. Количество «быстрых» оксидов азота слабо зависит от температуры горения. Доля этих оксидов азота в суммарном их выбросе составляет 10-15% [2].

Изменяя характеристики топочного процесса (содержание кислорода в топке, температура газов, длительность их пребывания) можно добиться уменьшения образования NO_x. Рассмотрим существующие технологии по снижению эмиссии вредных веществ.

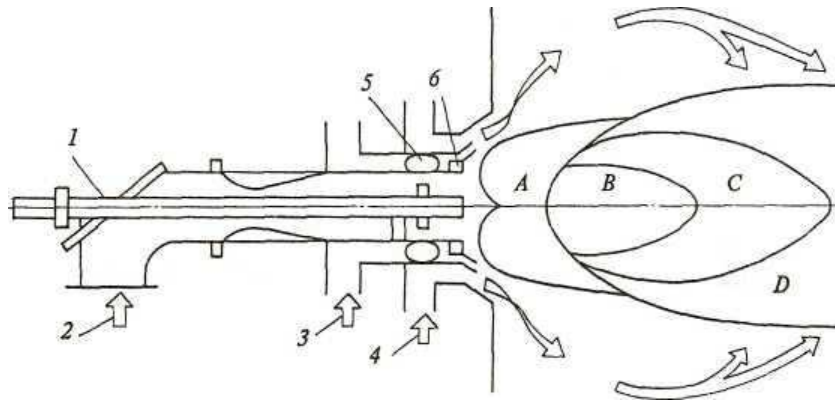
Современные принципы ограничения негативного воздействия ТЭС на атмосферу включают в себя подавление образования вредных веществ в процессе сжигания топлива в топке котла, удаление примесей в аппаратах пыли и газоочистки, установленных непосредственно за котлом.

К одной из основных технологий по уменьшению образования NO_x относятся низкоэмиссионные горелки.

В этих горелках используется метод двухступенчатого сгорания в области факела горелки (рис. 2). Это получается путем создания зоны горения с количеством воздуха ниже стехиометрического. Для образования зоны используют смесь первичного воздуха с частью вторичного. Остальной воздух, необходимый для процесса горения, вводят через специальные сопла определенным образом, не ухудшает первичный процесс снижения выхода NO_x, и обеспечивает эффективное сжигание топлива.

Пылевоздушная смесь подается через центральную трубу, в то время вторичный воздух подразделяется на 2 кольцевых потока: периферийный и внутренний. Горелка спроектирована таким образом, что ее аэродинамика обеспечивает расширенную внутреннюю зону рециркуляции. Важная конструктивная особенность горелки – это наличие стабилизатора. Именно благодаря ему обеспечивается интенсивное воспламенение вблизи от сопла пылевоздушной смеси. Повышенная температура в этой области определяет быстрое выделение летучих и его раннее воспламенение. Это, наряду с

расширенной внутренней зоной рециркуляции, обеспечивает благоприятные условия и достаточное время пребывания в восстановительной зоне факела.



A — зона выхода летучих; B — выделение промежуточных радикалов; C — зона восстановления NO; D — окислительная зона
 1 — мазутная форсунка; 2 — аэрозоль; 3 — внутренний воздушный канал; 4 — внешний воздушный канал; 5 — аксиальный лопаточный аппарат; 6 — стабилизатор

Рисунок 2 – Схема процесса горения в горелке

Высокотемпературная рециркуляционная внутренняя зона непосредственно на выходе из вала первичного воздуха способствует увеличению выхода летучих. Их незамедлительное попадание в область с глубоким недостатком кислорода, способствует усиленному переходу азотсодержащих компонентов в молекулярный азот, а не в оксид азота.

Другой не менее экологичной технологией является организация ступенчатого сжигания. При ступенчатом сжигании топлива горелки в топке котла размещают в несколько ярусов, с организацией поярусного изменения коэффициента избытка воздуха. Принципиальная схема двухступенчатого сжигания по технологии OFA (или метод «острого дутья») представлена на рисунке 3.

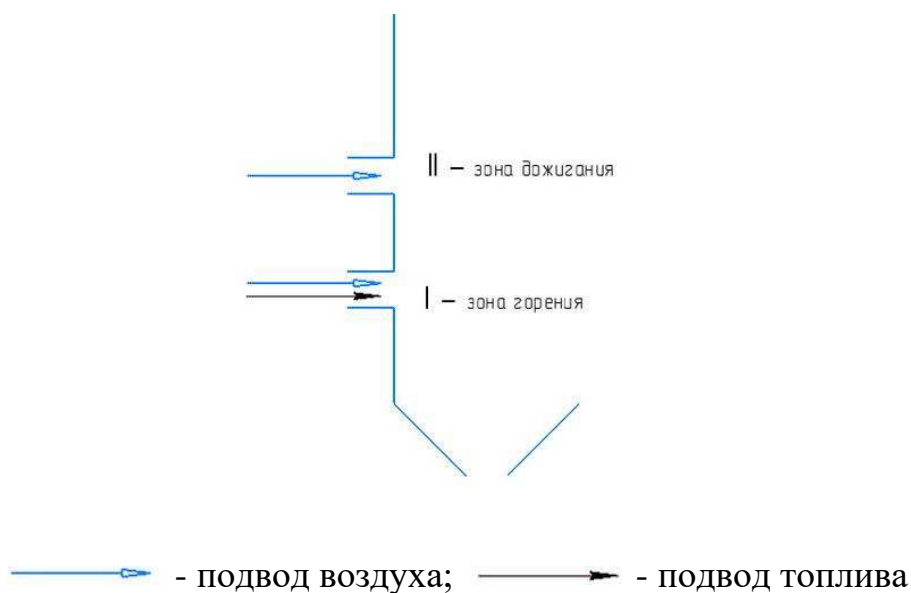


Рисунок 3 – Принципиальная схема двухступенчатого сжигания топлива в топке котла.

В зону I подается 70–90 % воздуха через горелки горелки. При смешивании в горелке топлива с контролируемым потоком воздуха создается обедненная кислородом и обогащенная топливом зона горения с относительно низкой температурой, способствующая снижению образование оксидов азота из азота, содержащегося в топливе.

Над основной зоной горения – вторая зона, технологией острого дутья через инжекторы над горелками попадает оставшаяся часть воздуха для обеспечения догорания топлива. Снижение образование воздушных NO_x происходит вследствие относительно низкой температуры в зоне дожигания. Данная технология является достаточно малозатратной и эффективной. В качестве примера были найдены статьи о внедрении данной технологии или расчетных исследований с ней на действующих тепловых станциях России.

На Алматинской ТЭЦ для котельного агрегата БКЗ-160 была применена технология Overfire Air для численного моделирования процессов в топке. Подача воздуха осуществлялась в несколько воздушных каналов, расположенных на передней и задней стенках камеры сгорания над верхним уровнем горелок (рис. 4). Подача топлива и окислителя осуществлялась тангенциально через четыре блока прямооточных щелевых горелок. Для реализации OFA-технологии было выбрано 2 режима, соответственно 10% и 20% от общего объема воздуха подавалось через инжекторы в верхней части камеры сгорания. По результатам численного моделирования снижение концентрации оксидов азота достигло 27%(при OFA=20%) по сравнению с базовым режимом.

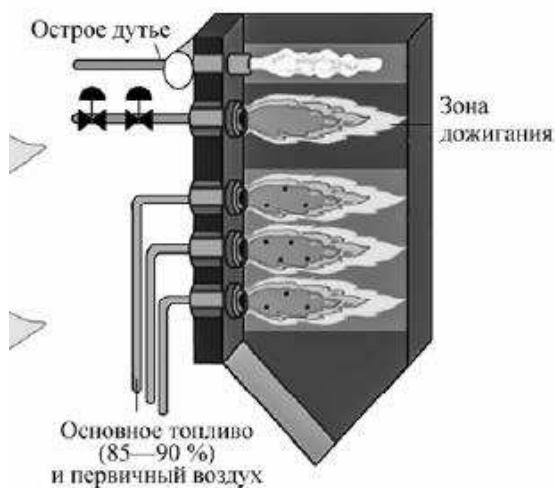


Рисунок 4 – Схема организации топочного процесса по OFA-технологии

На Экибастузской ГРЭС-1 была проведена реконструкция котла П-57-3М с переводом на двухступенчатое сжигание. С помощью 24 вихревых низкоэмиссионных пылеугольных горелок, расположенных на боковых стенках в 2 яруса по встречной схеме и 8 сбросных горелок, расположенных над основными горелками, по тангенциальной схеме таким образом, что в каждой полутопке организуется вихревое движение пылевоздушной по диаметру воображаемой окружности (рис. 5,6)

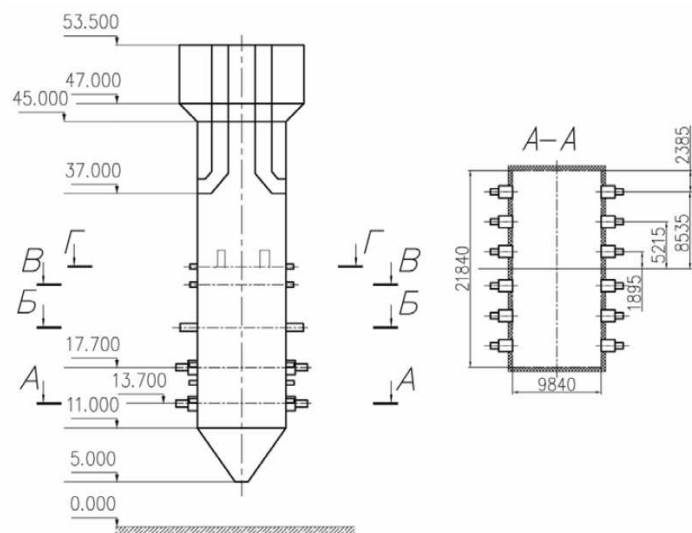


Рисунок 5 – Принципиальная схема расположения основных горелок и направления их круток на Экибастузской ГРЭС-1

Организация вертикального ступенчатого сжигания осуществляется за счет подачи части вторичного воздуха через сопла третичного дутья (ОФА), расположенные в 2 яруса выше сбросных горелок (рис 5,6). В целом, при применении технологии ОФА совместно с низкоэмиссионными горелками обеспечивает достижение выбросов $NO_x \leq 600 \text{ мг/нм}^3$ (вместо $\sim 1200\text{-}1400 \text{ мг/нм}^3$)[5].

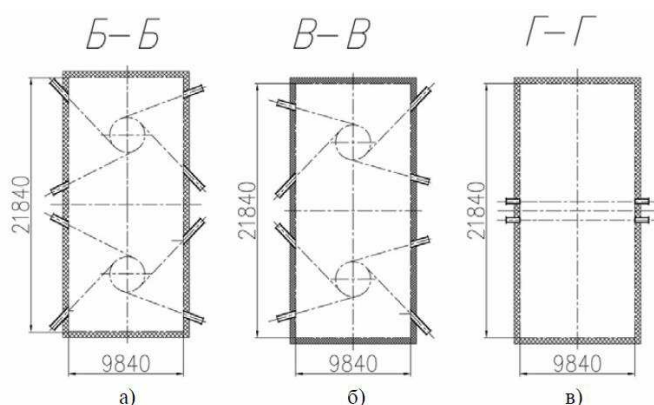


Рисунок 6 – Схема расположения сбросных сопел (а) и сопел третичного дутья (б,в)

Имеется технология бустерного двухступенчатого сжигания. Основная идея – установка инжекторов подвода третичного дутья как можно ближе к выходу из топки. Скорость в таких соплах значительно превышает скорость при обычной организации ступенчатого сжигания. Более высокая скорость необходима для интенсификации смешивания продуктов сгорания и третичного воздуха. Для обеспечения необходимой скорости требуется установка дополнительного дутьевого вентилятора, что приведет к удорожанию проекта.

Еще более сильный эффект подавления NO_x , особенно на котлах с жидким шлакоудалением, дает трехступенчатое сжигание, принципиальная схема которого приведена на рисунке 7.

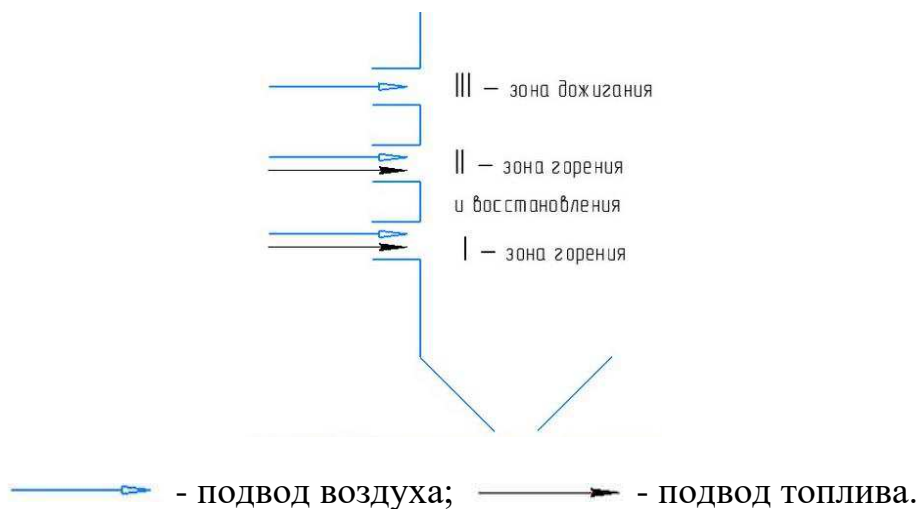


Рисунок 7 - – Принципиальная схема трехступенчатого сжигания топлива в топке котла

По высоте топочной камеры образуются три зоны. В первую зону (нижняя часть топки) подается основная часть топлива (70–85%) при избытке воздуха близком к единице. На выход из зоны активного горения подается оставшая часть топлива (15–30 %) и соответствующее количество воздуха с таким расчетом, чтобы суммарный избыток воздуха в ней составлял 0,9–0,95 (т. е. небольшой недостаток для полного сжигания топлива), благодаря чему в этой части топки создается зона с восстановительной средой, в которой продукты неполного горения (CO , H_2 , C_nH_m) восстанавливают уже образовавшиеся окислы азота NO до N_2 [6].

Для достижения низких выбросов оксидов азота в современных пылеугольных котлах одновременно реализуется целый комплекс внутритопочных (технологических) мероприятий. При реконструкции котла ОР-210М фирмы Rafako на электростанции «Скавина» (Польша), внедрена система трехступенчатого сжигания (reberning) с использованием в качестве восстановительного топлива мелкодисперсной угольной пыли. Последняя в виде потока высокой концентрации подается через специальные щелевые горелки третьего яруса и сжигается с малыми избытками воздуха ($\alpha_r=0,45-0,75$). Оставшийся третичный воздух, необходимый для полного сгорания топлива, в количестве до 25% поступает в верхнюю часть топки через плоские сопла [7].

Дополнительное снижение эмиссии оксидов азота достигнуто также тангенциальным расположением горелок в трех ярусах и организацией горизонтальной стадийности сжигания топлива в результате подачи части воздуха через боковые сопла, установленные рядом с основными горелками (концентрическая схема сжигания). В результате проведенной реконструкции выбросы оксидов азота были снижены с 800 до 350–380 мг/нм^3 [7].

Еще одним примером комплексного внедрения внутритопочных мероприятий является современный котел энергоблока 1000 МВт на ССКД электростанции Niederaussem (Германия), работающий на буром угле. Сжигание основной массы угля (около 90%) осуществляется с избытком воздуха $\alpha_{гор}=0,94$ в восьми основных малоэмиссионных прямоточных горелках, установленных тангенциально на противоположных стенах топочной камеры. Над каждой основной горелкой расположены сбросные горелки коэффициент воздуха снижается до 0,9. В верхней части газов на сушку в два яруса расположены сопла третичного воздуха. С учетом ввода третичного воздуха коэффициент избытка воздуха составляет 1,15. Таким образом, в топке реализовано трехступенчатое сжигание угля с восстановлением оксидов в объеме между сбросными горелками и соплами третичного воздуха. Благодаря внедрению данного комплекса мероприятий (малоэмиссионные горелки, тангенциальная компоновка, трехступенчатое сжигание) удалось обеспечить выполнение заданных норм по содержанию примесей в дымовых газах: $NO_x < 200 \text{ мг/м}^3$ [7].

Для исследования выбираем самый малозатратный и эффективный метод – двухступенчатое сжигание с организацией третичного дутья по технологии «overfire air». В качестве исследования необходимо определить оптимальное расположение сопел третичного дутья и угол подвода воздуха. Сравнить проведенный анализ современных технологий с получившимися результатами исследования.

Объектом исследования является котельный агрегат с твердым шлакоудалением БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2 стационарный номер 6, сжигающий уголь бурый уголь Бородинского месторождения.

Предметом исследования – являются процессы образования вредных веществ, такие как оксиды азота, при сжигании пылеугольного топлива.

Цель: предложение мероприятий, направленных на снижение образования вредных веществ – оксидов азота в уходящих газах котельного агрегата БКЗ-500-140 с учетом сохранения его текущих показателей экономичности и надежности работы.

Для достижения поставленной цели рассмотрены и решены следующие **задачи:**

1. Рассмотреть и проанализировать современные методы борьбы на пылеугольных котельных агрегатах с оксидами азота, путем литературного обзора российских и иностранных источников, в виде научных журналов и статей. Выбрать оптимальное решение с целью рассмотреть дальнейшей применимости на объекте исследования

2. Проанализировать объем и состав выбросов вредных веществ, определить преобладающие среди них. Выполнить анализ текущего состояния оборудования, рассмотреть методы образования оксидов азота при сжигании твердого топлива.

3. Рассмотреть методики исследования оценки снижения образования вредных веществ.

4. Выполнить ряд расчетных теоретических исследований с применением методики СО 153-34.02.304-2003 и выполнить позонный тепловой расчет топочной камеры

5. Выполнить ряд расчетных исследований котельного агрегата с использованием средств математического моделирования с целью сопоставления теоретических расчетов с действительными (математическое моделирование базового режима) и детальной проработки предложенного технического решения на основе технологии OFA.

6. Выполнить технико-экономическое обоснование целесообразности применения двухступенчатой технологии сжигания.

Методы исследования: для решения поставленных задач планируется применять методы расчетно-теоретического исследования, посредством существующих зависимостей и методы компьютерно-математического моделирования топочных процессов, с применением расчетно-программного комплекса ANSYS Fluent.

Научная новизна и практическая значимость:

1. Рассмотреть варианты по организации ступенчатого сжигания на котельном агрегате БКЗ-500-140, позволяющие снизить концентрацию оксидов азота в уходящих газах.

2. Разработать математическую модель котла, учитывающую изменения режимных факторов, позволяющую анализировать различные мероприятия с целью снижения вредных выбросов.

2 Разработка подхода к оценке процессов образования оксидов азота

Красноярская ТЭЦ-2 — тепловая электростанция в Красноярске, одна из крупнейших ТЭЦ Сибири. Красноярская ТЭЦ-2 входит в группу ООО «Сибирская генерирующая компания». Располагается в южной части города Красноярска, на правом берегу реки Енисей вблизи жилых домов. Общая площадь территории, занимаемой сооружениями ТЭЦ, составляет 110,3 га.

В котельном отделении Красноярской ТЭЦ-2 установлено шесть угольных паровых котлов (три котла БКЗ-420-140-ПТ1 производительностью по 380 т/ч и три котла БКЗ-500-140 производительностью 500 т/ч). В машинном зале установлено четыре турбины (три турбины Т-110/120-130 с теплофикационными отборами и одна турбина ПТ-135/165-130/15 с теплофикационным и производственным отборами пара). Максимальная производительность теплофикационных отборов составляет соответственно 175 и 110 Гкал/ч. В пиковой котельной располагаются два пиковых водогрейных котла ПТВМ-180 с эксплуатационной производительностью по 135 Гкал/ч каждый.

Основным топливом для энергетических котлов является бурый уголь бородинского месторождения марки Б2Р, основным топливом для пиковых водогрейных котлов является топочный мазут марки М100, который так же является растопочным топливом для котельных агрегатов БКЗ-420-140 и БКЗ-500-140 [3].

Установленная электрическая мощность — 465 МВт. Установленная тепловая мощность — 1405 Гкал/ч.

Угольный склад открытый, максимально-возможная вместимость которого составляет 400 тыс. тонн. Эксплуатационная вместимость мазутных резервуаров составляет 5150 тонн. Доставка угля с угольного разреза осуществляется железнодорожным транспортом в полувагонах, дальность доставки – 200км. Теплота сгорания угля около 16 МДж/кг.

Рассеивание дымовых газов осуществляется через две дымовые трубы высотой 180 м, одна общая для энергетических котлов ст.№1,2,3,4 и водогрейных котлов ст.№1,2 и вторая для энергетических котлов ст.№5,6.

Система технического водоснабжения прямоточная, источником которой служит р. Енисей. Подача воды осуществляется береговой насосной станцией технического водоснабжения, расположенной на о. Отдыха в пяти километрах от ТЭЦ. Напорные подводящие водоводы выполнены стальными диаметрами 1200 мм в две нитки. Отводящие безнапорные водоводы за пределами промплощадки проложены железобетонными трубами, диаметром 1400 мм. Сброс отработанной циркуляционной воды осуществляется рассеивающим выпуском в Абаканскую протоку р. Енисей.

Отпуск тепла в тепловые сети осуществляется через два тепловых вывода, температура прямой сетевой воды, отпускаемой потребителям, поддерживается в зависимости от температуры наружного воздуха.

Подпитка теплосети производится для восполнения безвозвратных потерь горячей воды у потребителей тепла г. Красноярска при открытой схеме горячего водоснабжения.

ТЭЦ-2 обеспечивает теплом Свердловский, Октябрьский, Центральный и Железнодорожный районы города и осуществляет отпуск пара промышленным потребителям Красноярска: ЗАО «Краскон», ООО «Красноярский цементный завод», ООО «ХМЗ», АО «Кульбытстрой», ООО «Полипак».

Для очистки дымовых газов за котлоагрегатами БКЗ-420-140 ПТ1 ст. № 1-3 установлены электрофильтры типа УГ2-4-74 с проектным КПД 98%. За котлоагрегатами БКЗ-500-140 ст. № 4,5,6 - электрофильтры ЭГА-88-12-6-4 с проектным КПД 98,8%.

На ТЭЦ установлены котлы БКЗ-420 с жидким шлакоудалением и БКЗ-500 с твердым шлакоудалением. Существует проблема повышенного содержания NO_x в дымовых газах, для решения которой, на котлоагрегатах выполнена система подачи смывной воды в камеру горения.

2.1 Объект исследования

Паровой котел Е-500-140 (модель БКЗ-500-140-1) однобарабанный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией, предназначен для получения пара высокого давления при сжигании Ирша-Бородинского бурого угля с твердым шлакоудалением.

Компоновка котла выполнена по П-образной схеме (рис. 8). Топочная камера является первым восходящим газоходом. Во втором (горизонтальном) газоходе расположен пароперегреватель. В третьем (опускном) газоходе расположены: водяной экономайзер и трубчатый воздухоподогреватель.

Основные расчетные характеристики котла приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные расчетные характеристики котельного агрегата БКЗ-500-140.

№пп	Наименование показателей	Расчетные характеристики
1	Давление пара в барабане котла	162 кгс/см ²
2	Рабочее давление в паросборной камере	140 кгс/см ²
3	Температура перегретого пара	560°С
4	Температура питательной воды	230°С
5	Температура уходящих газов	158°С
6	Часовой расход топлива	85,9т/час
7	Водяной объем котла	96м ³
8	Паровой объем котла	102м ³
9	КПД котла, брутто	91,2%

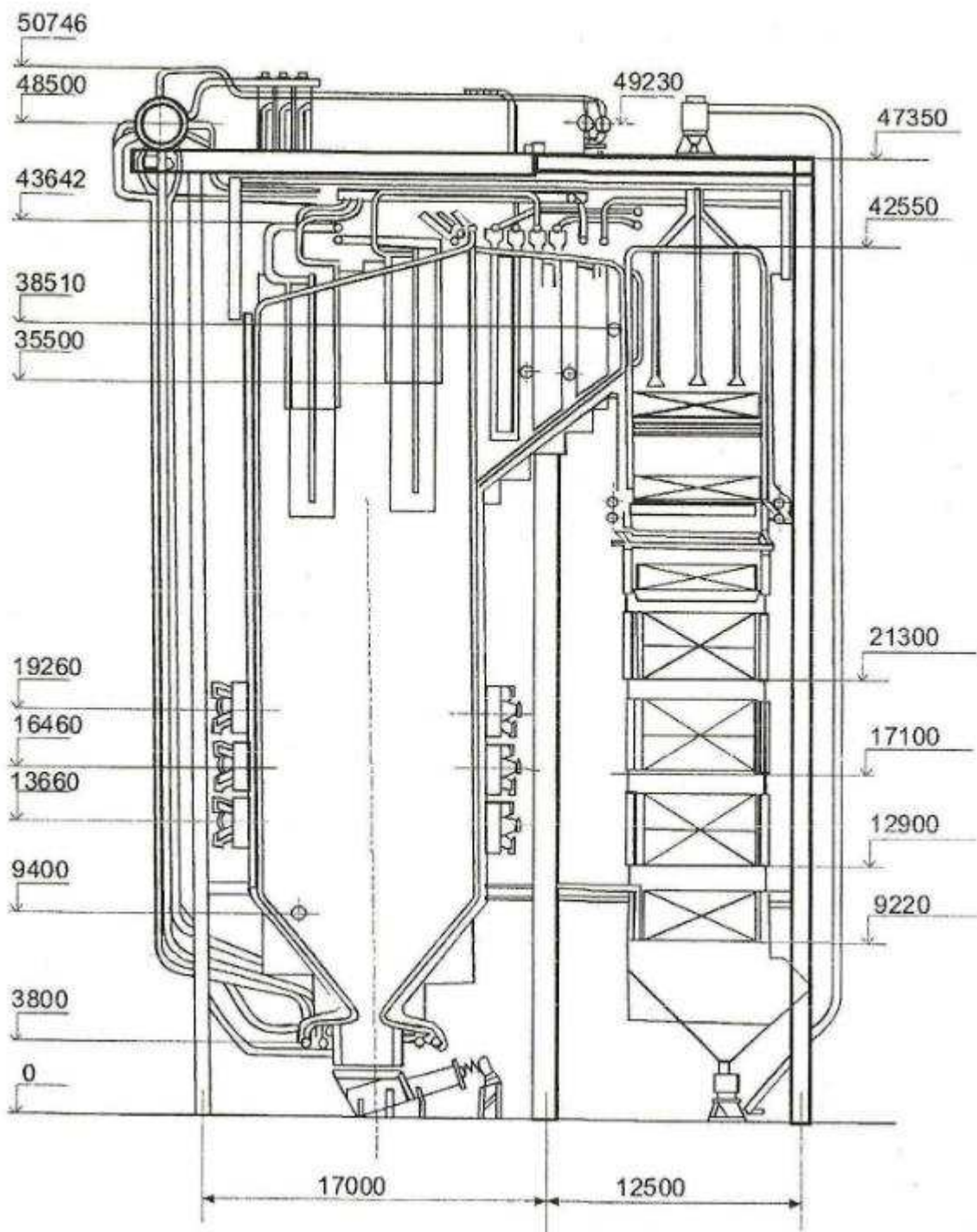


Рисунок 8 – Общий вид котла БКЗ-500-140

Топочная камера открытого типа призматической формы полностью выполнена из цельносварных панелей, изготовленных сваркой труб 60х6 с полосой 6х20. Шаг труб 80мм.

В нижней части топочной камеры фронтной и задней экраны образуют скаты «холодной» воронки. Топочная камера в горизонтальном сечении по осям труб противоположных экранов имеет размер 11260х10260 мм. Объем топочной камеры составляет 3770 м³.

Котел оборудован прямоточными горелками, расположенными в каждом углу топки в три яруса. Каналы аэросмеси и вторичного воздуха

выполнены в виде примыкающих друг к другу вертикальных щелей. Подача вторичного воздуха осуществляется по внешней стороне вращения факела в топке. Для уменьшения потери тепла с механическим недожогом на котле заведено нижнее дутье.

2.2 Теоретические аспекты оценки снижения выбросов оксидов азота

При проведении мероприятий, направленных на сокращение NO_x необходимо проведение теоретических расчетных мероприятий с применением уже известных методик. Рассмотрим методику расчета выбросов вредных веществ.

Методика расчета выбросов

В настоящий момент на станциях для расчета выбросов вредных веществ используется СО 153-34.02.304-2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций».

Массовый выброс оксидов азота, г/с

$$M_{NO_2} = C_{NO_2} \cdot B_p \cdot V^{\Gamma} = K_{NO_2} \cdot B_p \cdot Q_p^H, \quad (1)$$

где C_{NO_2} – концентрация оксидов азота, г/м³;

V^{Γ} – объем сухих газов, м³/кг;

K_{NO_2} – удельный выброс оксидов азота, г/МДж;

С точки зрения оценки определенных параметров для снижения выбросов, интересна вторая часть формулы. Качественное влияние параметров на удельные выбросы рассмотрены ниже. Первая часть формулы применяется в реальных условиях, когда известна концентрация NO_x .

Удельные выбросы оксидов азота (в пересчете на NO_2), г/МДж:

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{топл} + K_{NO_2}^{возд}, \quad (2)$$

где $K_{NO_2}^{топл}$ – топливные оксиды азота, г/МДж;

$K_{NO_2}^{возд}$ – воздушные оксиды азота, г/МДж;

Топливные оксиды азота подсчитывают по формуле:

$$K_{NO_2}^{топл} = 0,12 \cdot \varepsilon_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha_T} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \beta_{см}, \quad (3)$$

где ε_{NO_x} – безразмерный коэффициент, учитывающий характеристики топлива;

$$\varepsilon_{NO_x} = FR^{0,6} + (1 + N^d), \quad (4)$$

где FR – топливный коэффициент;

N^d – содержание азота в сухой массе топлива, %;

$$FR = \frac{100 - W^r - A^r - V^r}{V^r}, \quad (5)$$

β_{α_r} – коэффициент, учитывающий влияние коэффициента избытка воздуха в прямоточной горелке;

$$\beta_{\alpha_r} = (0,53 \cdot \alpha_r + 0,12)^2, \quad (6)$$

α_r – коэффициент избытка воздуха в горелке;

β_{α_1} – коэффициент, учитывающий влияние доли первичного воздуха в горелке;

$$\beta_{\alpha_1} = 1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48, \quad (7)$$

β_R – коэффициент, учитывающий влияние рециркуляции дымовых газов в первичный воздух;

$$\beta_R = 1 - 0,016 \cdot \sqrt{R}, \quad (8)$$

β_{ϑ} – коэффициент, учитывающий влияние максимальной температуры на участке образования топливных оксидов азота;

$$\beta_{\vartheta} = 0,11 \cdot \sqrt[3]{T''_{\text{заг}} - 1100}, \quad (9)$$

$\beta_{\text{см}}$ – коэффициент, учитывающий влияние смесеобразования в корне факела;

$$\beta_{\text{см}} = 0,98 \cdot \frac{w_2}{w_1} - 0,47, \quad (10)$$

Воздушные оксиды азота подсчитывают по формуле:

$$K_{NO_2}^{\text{возд}} = \frac{1,54 \cdot 10^{16}}{\sqrt{T''_{\text{заг}}}} \cdot \sqrt{\frac{\alpha''_{\text{заг}} - 1}{\alpha''_{\text{заг}}}} \cdot \exp\left(-\frac{67000}{T''_{\text{заг}}}\right), \quad (11)$$

где $\alpha''_{\text{заг}}$ – коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения;

Формула справедлива в диапазоне $1,05 \leq \alpha''_{\text{заг}} \leq 1,4$ и до температуры $T''_{\text{заг}} = 2050$ К, при этом при $T''_{\text{заг}} < 1800$ К значением $K_{NO_2}^{\text{возд}}$ можно пренебречь.

Температура на выходе из зоны активного горения $T''_{\text{заг}}$ рассчитывается в соответствии с тепловым расчетом котельного агрегата.

Данная методика позволяет оценить влияние таких факторов, как коэффициент избытка воздуха в горелках, доля первичного воздуха, рециркуляция дымовых газов, максимальная температура, скорость смесеобразования на образование NO_x .

Основной недостаток методики – показывает примерное влияние указанных факторов, для точных результатов необходимо дополнительно использовать трехмерное моделирование топочных процессов при помощи

специализированных программ. В качестве одной из них рассмотрим программный комплекс ANSYS Fluent.

2.3 Компьютерно-математические аспекты оценки выбросов вредных веществ

Все топочные процессы, а именно аэродинамика, химическое реагирование, горение, тепломассообмен и моделирование процессов образования оксидов азота рассмотрены взаимосвязано в едином вычислительном комплексе Ansys Fluent v. 17.2. Условно принимается, что газовый поток в топочной камере представлен из следующего перечня компонентов: диоксида углерода CO_2 , молекулярного азота N_2 , водяных паров H_2O , кислорода O_2 и летучих веществ. Описание турбулентных характеристик течения производится модифицированной моделью турбулентности k-ε Standard.

Расчет траекторий движения угольных частиц выполнен в Лагранжевой постановке. Для дисперсной фазы описывался тепломассообмен, определялись траектории движения твердых частиц угля. Для учета полидисперсности частиц используется формула Розина – Раммлера.

В данной работе для моделирования процессов горения угольной пыли была принята модель, учитывающая основные стадии выгорания, а именно: испарение влаги, прогрев, воспламенение, горение летучих веществ и выгорание коксового остатка. В топочной камере угольная частица подвергается термообработке за счет радиационно-конвективного теплообмена (рисунок 9).

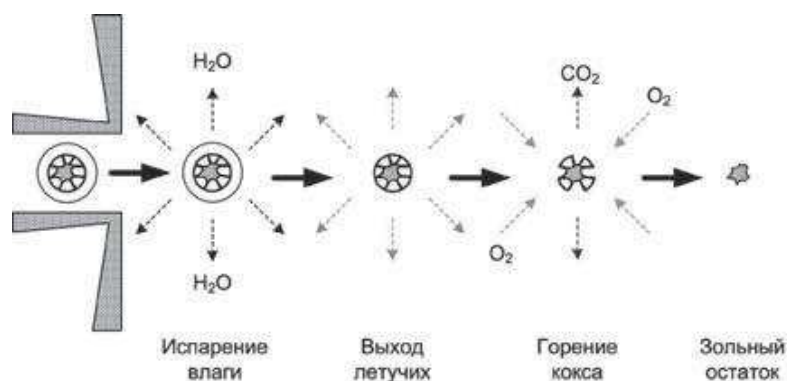


Рисунок 9 – Схемы выгорания угольной частицы

Для описания химического реагирования используется модель «обрыва вихря» Eddy Dissipation (Eddy break-up model). В данной работе применяется двухстадийный механизм взаимодействия оксида углерода и летучих веществ (vol) с кислородом. В качестве модели для выхода летучих веществ и горения коксовых частиц выбраны: “Single Rate Devolatilization Model” и Kinetics/Diffusion-Limited Combustion Model (диффузионно – кинетическая модель горения) соответственно. Перечисленные модели предполагают, что скорость поверхностной реакции определяется либо кинетикой процесса, либо скоростью диффузии.

В таблицах и представлены показатели, необходимые для проведения расчетных исследований для коксовых частиц и летучих веществ соответственно.

Таблица 2 – Параметры модели “Kinetics/Diffusion-Limited Combustion Model”.

Наименование величины	Значение
Константа скорости диффузии	$5 \cdot 10^{-12}$
Предэкспоненциальный множитель, г/(см ² · с · атм)	120
Энергия активации, Дж/(кгмоль)	$1,55 \cdot 10^8$

Таблица 3 – Параметры модели “Single Rate Devolatilization Model”

Наименование величины	Значение
Предэкспоненциальный множитель, 1/с	10000
Энергия активации, Дж/(кгмоль)	$4,19 \cdot 10^7$

Усредненные по времени математические выражения были решены для уравнений переноса массы, импульса, энергии и газовых компонентов используя, SIMPLEC-процедуру. Использование данной схемы позволило получить достаточно хорошую сходимость решения поставленной задачи.

Высокий температурный уровень топочной среды и экранных поверхностей нагрева обуславливает преобладание радиационной составляющей теплообмена. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на модели P1 аппроксимации метода сферических гармоник. Коэффициент поглощения газовой фазы рассчитан с помощью модели серых газов, а именно WSGGM – domain – based (Weighted-sum-of-gray-gases model).

Образование оксидов азота при сжигании угля происходит по трем фундаментальным механизмам, а именно: термические, быстрые и топливные.

При моделировании топливных NO_x учитывалось, что азотсодержащие радикалы, высвобождаются из летучих веществ, представляющие собой соединения в виде цианистоводородной кислоты HCN и аммиака NH₃ с соотношением 9:1 [11]. В исследованиях также указывается, что связанный с азотом коксовый остаток преобразуется непосредственно в NO. Поправочный коэффициент пересчета в этом случае принимается равным 1 для летучих веществ и 0,7 для коксовой основы [10].

Присутствие свободного кислорода способствует нежелательному образованию NO. Для минимизации выхода топливных оксидов азота уголь

должен освобождаться от летучих веществ при максимально возможной температуре в зоне обогащенной топливом, где преобладают реакции с образованием N_2 по отношению к NO . Принципиальная схема реакций прогнозирования NO_x с учетом процессов восстановления (reburning) приведена на рисунке 10.

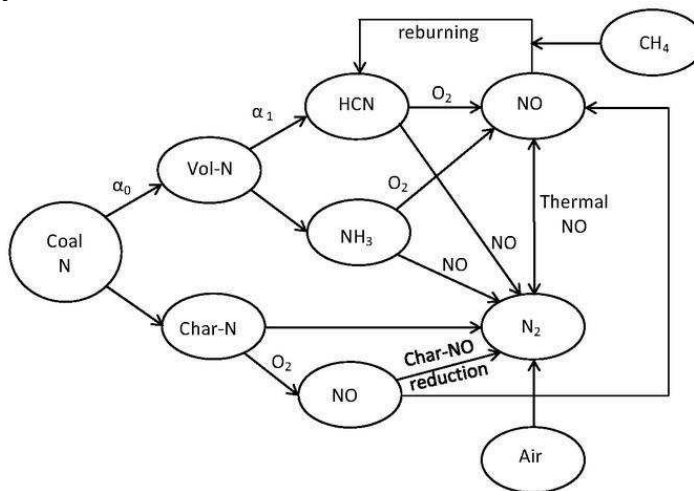


Рисунок 10 – Принципиальная схема реакций прогнозирования

3 Разработка и исследование технических решений по организации горения

3.1 Теоретическое исследование

Для применения методики СО 153-34.02.304-2003 необходимо предварительно произвести тепловой расчет топочной камеры котла, для определения $T''_{заг}$ температуры на выходе из активного горения. Для ее определения воспользуемся методикой позонного расчете топочной камеры [8].

Исходные данные для расчета являются характеристика топлива, температура горячего воздуха, температура уходящих газов.

Таблица 4- Расчетные характеристики топлива

Рабочая масса топлива, %							Выход летучих, $V_f, \%$	Теплота сгорания Q_n^p , МДж/кг	Температуры плавления золы, $^{\circ}C$		
W^p	A^p	S^p	C^p	H^p	N^p	O^p			t_1	t_2	t_3
33	7,4	0,2	42,6	3	0,6	13,2	47	15,28	1180	1010	1230

Температура горячего воздуха $t_{г.в.}=340^{\circ}C$, температура холодного воздуха $t_{х.в.}=10^{\circ}C$, температура уходящих газов $t_{у.г.}=160^{\circ}C$

Коэффициент избытка воздуха принимаем $\alpha_T = 1,2$. Присосы холодного воздуха по газоходам парогенератора: $\Delta\alpha_{пл} = 0,04$ - присос холодного воздуха в пылесистеме;

Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания:

Теоретический объем воздуха $V_B^0, \text{м}^3/\text{кг}$ для сжигания одного кг твердого топлива, определяется по следующему выражению:

$$V_B^0 = 0,0889 \cdot (C^p + 0,375 \cdot S^p) + 0,275 \cdot H^p - 0,333 \cdot O^p, \quad (12)$$

где C^p, S^p и т. д. – характеристики топлива на рабочую массу, %;

$$V_B^0 = 0,0889(42,6 + 0,375 \cdot 0,2) + 0,265 \cdot 3 - 0,0333 \cdot 13,2 = 4,149$$

Объем азота, $\text{м}^3/\text{кг}$, определяется по следующему выражению:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V_B^0 + 0,8 \cdot \frac{N^p}{100}, \quad (13)$$

где V_B^0 – теоретический объем воздуха, $\text{м}^3/\text{кг}$;

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot 4,149 + 0,8 \cdot \frac{0,6}{100} = 3,283,$$

Объем трехатомных газов, $V_{RO_2}, \text{м}^3/\text{кг}$, определяется по следующей формуле:

$$V_{RO_2} = 1,866 \cdot \frac{C^p + 0,375 \cdot S^p}{100}, \quad (14)$$
$$V_{RO_2} = 1,866 \cdot \frac{42,6 + 0,375 \cdot 0,2}{100} = 0,796,$$

Объем водяных паров для твердого топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$, определяется по следующему выражению:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,0161 \cdot V_B^0, \quad (15)$$

где W^p – влажность топлива на рабочую массу, %;

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot 3 + 0,0124 \cdot 33 + 0,0161 \cdot 4,149 = 0,81$$

Суммарный объем дымовых газов, $\text{м}^3/\text{кг}$, находим по формуле:

$$V_{\Gamma}^0 = V_{N_2}^0 + V_{RO_2} + V_{H_2O}^0, \quad (16)$$
$$V_{\Gamma}^0 = 3,283 + 0,769 + 0,81 = 4,888.$$

Действительные объемы продуктов сгорания по газоходам при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_T > 1$

Таблица 5 - Объёмы продуктов сгорания, объёмные доли трехатомных газов и концентрация золовых частиц

Название величины и обозначение	Топочная камера		
	$\alpha_T = 1,2$ $\alpha_{тр.дуг} = 0$	$\alpha_T = 1,2$ $\alpha_{тр.дуг} = 10\%$	$\alpha_T = 1,2$ $\alpha_{тр.дуг} = 15\%$
Коэффициент избытка Воздуха средний $\alpha'' = \alpha_T + \sum \alpha_i$	1,2	1,14	1,11
Объём водяных паров, м ³ /кг, $V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161 \cdot (\alpha_m - 1) \cdot V_B^0$	0,822	0,818	0,816
Полный объём газов м ³ /кг, $V_T = V_T^0 + 1,016 \cdot (\alpha_{cp} - 1) \cdot V_B^0$	5,731	5,225	4,972
Объёмная доля трёхатомных газов $r_{RO_2} = V_{RO_2} / V_T$	0,139	0,152	0,16
Объёмная доля водяных паров $r_{H_2O} = V_{H_2O} / V_T$	0,143	0,157	0,164
Суммарная объёмная доля $r_n = r_{RO_2} + r_{H_2O}$	0,282	0,309	0,324
Масса дымовых газов $G_T = 1 - 0,01 \cdot A^p + 1,306 \cdot \alpha_{cp} \cdot V_B^0$	7,429	7,104	6,941
Концентрация золовых частиц, кг/кг, $\mu_{зл} = A^p \cdot a_{yH} / 100 \cdot G_T$	0,00946	0,0099	0,01013

Расчет энтальпий воздуха и продуктов сгорания

При сжигании твердого топлива энтальпия дымовых газов H_T^0 , кДж/кг, подсчитывается по следующей формуле:

$$H_T^0 = (c_{RO_2} \cdot V_{RO_2} + c_{H_2O} \cdot V_{H_2O} + c_{N_2} \cdot V_{N_2}^0) \cdot \vartheta, \quad (17)$$

где V_{RO_2} – объём трехатомных газов, м³/кг;

c_{RO_2} – теплоемкость трехатомных газов при постоянном давлении, кДж/(м³К),

$V_{N_2}^0$ – объём азота, м³/кг;

c_{N_2} – теплоемкость азота при постоянном давлении, кДж/(м³К);

$V_{H_2O}^0$ – Объём водяных паров, м³/кг;

c_{H_2O} – теплоемкость водяных паров при постоянном давлении, кДж/(м³К).

ϑ – расчетная температура, °С;

Энтальпия воздуха определяется из следующего выражения:

$$H_B^0 = V_B^0 \cdot c_B \cdot \vartheta, \quad (18)$$

где c_B – теплоемкость воздуха при постоянном давлении, кДж/м³.

Энтальпия золы определяется из следующего выражения:

$$H_{зл} = 0,01 \cdot a_{ун} \cdot A^p \cdot c_{зл} \cdot \vartheta, \quad (19)$$

где $c_{зл}$ – теплоемкость золы, кДж/кгК;

A^p – зольность топлива на рабочую массу;

$a_{ун}=0,95$ – доля золы топлива, уносимая газами;

Найдем приведенную величину уноса золы из топки, %:

$$a_{пр} = a_{ун} \cdot A^{пр}, \quad (20)$$

$$A^{пр} = \frac{A^p}{Q_H^p} \geq 1,4, \quad (21)$$

где $A^{пр}$ – приведенная зольность топлива;

Q_H^p – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, МДж/кг;

$$A^{пр} = \frac{7,4}{15,25} = 0,48$$

$$a_{пр} = 0,95 \cdot 2,8 = 0,46.$$

Так как приведенная зольность меньше 1,4%, то теплосодержание золы не учитываем.

Энтальпия продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива, кДж/кг, подсчитывается по формуле:

$$H_{г} = H_{г}^0 + (\alpha - 1) \cdot H_{в}^0 + H_{зл}, \quad (22)$$

где $H_{г}^0$ – энтальпия дымовых газов, кДж/кг;

α – коэффициент избытка воздуха за соответствующей поверхностью нагрева;

$H_{в}^0$ – энтальпия воздуха, кДж/кг;

Подсчитанные значения энтальпий заносим в таблицу:

Таблица 6 - Энтальпия продуктов сгорания.

$\vartheta^{\circ}\text{C}$	$H_{г}^0$	$H_{в}^0$	$H_{г} = H_{г}^0 + (\alpha - 1) \cdot H_{в}^0 + H_{зл}$		
			$\alpha_{тр.дуг} = 0$	$\alpha_{тр.дуг} = 10\%$	$\alpha_{тр.дуг} = 15\%$
100	673,7	547,6			
200	1366,1	1099,8			
300	2077,9	1659			
400	2851,8	2249,7			
500	3616,6	2840,8			
600	4402	3445,5			
700	5207,9	4062,2			
800	6031,6	4688,3	6969,3	6406,67	6125,38

Продолжение таблицы 6

900	6870,2	5324,8	7935,1	7296,17	6976,68
1000	7723,1	5968,3	8916,7	8200,53	7842,44
1100	8589,3	6661	9921,5	9122,21	8722,55
1200	9466,8	7280,9	10922,9	10049,23	9612,37
1300	10356,4	7948,6	11946,2	10992,32	10515,40
1400	11252,3	8621,1	12976,5	11941,95	11424,69
1500	12157,4	9296,6	14016,8	12901,17	12343,37
1600	13070,1	9977,4	15065,5	13868,25	13269,60
1700	13991,6	10660,3	16123,6	14844,40	14204,78
1800	14915,3	11344,1	17184,2	15822,86	15142,21
1900	15845	12036,6	18252,4	16807,98	16085,78

Тепловой баланс, коэффициент полезного действия и расход топлива котельного агрегата

Потеря тепла с уходящими газами, %, зависит от заданной температуры уходящих газов $t_{y.g.}$ и определяется по формуле:

$$q_2 = \frac{(H_{yx} - \alpha_{yx} \cdot H_{xg}^0) \cdot (100 - q_4)}{Q_H^P}, \quad (23)$$

где $H_{yx.g.}$ – энтальпия уходящих газов, кДж/кг, находится методом линейной интерполяции по температуре уходящих газов $t_{yx.g.} = 160^\circ\text{C}$:

$$H_{yx.z.} = H_{100} + (H_{200} - H_{100}) \cdot \frac{t_{yx.z.} - 100}{100}, \quad (24)$$

$$H_{yx.g.} = 673,7 + \frac{1366,1 - 673,7}{100} \cdot (158 - 100) = 1309,653,$$

$H_{x.b.}$ – энтальпия холодного воздуха, кДж/кг, находится по температуре холодного воздуха $t_{x.b.} = 10^\circ\text{C}$:

$$H_{x.b.} = \frac{547,6}{100} \cdot 10 = 54,76,$$

$\alpha_{yx} = 1,27$ – коэффициент избытка воздуха за воздухоподогревателем

q_4 – потеря тепла от механического недожога, %

$$q_4 = 0,5\%, \quad (25)$$

Q_H^P – теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Потеря тепла с уходящими газами:

$$q_2 = \frac{(1309,653 - 1,27 \cdot 54,76) \cdot (100 - 0,5)}{15280} = 8,07.$$

Потеря тепла от химического недожога принимается равной нулю:

$$q_3 = 0, \quad (26)$$

Потеря тепла в окружающую среду q_5 , %, принимается в зависимости от производительности котельного агрегата:

$$q_5 = q_5^H \cdot \frac{D_{ном}}{D}, \quad (27)$$

где $D_{пе}$ – паропроизводительность, кг/с (см. таблицу исходных данных);

$$\begin{aligned} D_{пе}^{ном} &= \frac{500}{3,6} = 138,889, \\ q_5^H &= \frac{(60/D_{ном})^{0,5}}{\lg D_{ном}}, \\ q_5^H &= \frac{\left(\frac{60}{138,889}\right)^{0,5}}{\lg (138,889)} = 0,31. \end{aligned} \quad (28)$$

Находим потерю тепла в окружающую среду по формуле (3.16):

$$q_5 = 0,31 \cdot \frac{500}{500} = 0,31.$$

Найдём коэффициент сохранения тепла φ :

$$\begin{aligned} \varphi &= 1 - \frac{q_5}{100}, \\ \varphi &= 1 - \frac{0,301}{100} = 0,9969. \end{aligned} \quad (29)$$

Потеря с физическим теплом шлака q_6 , %, определяется по следующей формуле:

$$q_6 = \frac{a_{шл} \cdot (C_t)_{шл} \cdot A^p}{Q_H^p}, \quad (30)$$

где $C_{шл} \cdot t_{шл}$ – теплосодержание 1 кг золы, кДж/м³, принимается равным 560 при температуре шлака $t_{шл} = 600^\circ\text{C}$.

$$\begin{aligned} a_{шл} &= 1 - a_{ун}, \\ a_{шл} &= 1 - 0,95 = 0,05, \\ q_6 &= \frac{0,05 \cdot 560 \cdot 35,7}{15280} = 0,011. \end{aligned} \quad (31)$$

Коэффициент полезного действия, %, котельного агрегата брутто:

$$\begin{aligned} \eta_k^{бр} &= 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \\ \eta_k^{бр} &= 100 - 8,07 - 0 - 0,5 - 0,31 - 0,011 = 91,1. \end{aligned} \quad (32)$$

Полный расход топлива, кг/с, определяется из следующего выражения:

$$B = \frac{D_{пе} \cdot (h_{пе} - h_{не}) + D_{пр} \cdot (h_{пр} - h_{не})}{Q_n^p \cdot \eta_{ка}^{бр}}, \quad (33)$$

где $D_{пе}$ – паропроизводительность, равная 138,889 кг/с; $h_{пе}$, $\bar{t}_{пв}$, $\bar{t}_{пр}$ – энтальпии соответственно перегретого пара, питательной воды и воды на линии насыщения, кДж/кг, определяются по соответствующим температурам пара и воды и давлению в пароводяном тракте:

$$h_{пе} = f(P_{пе}, t_{пе}), \quad (34)$$

$$\bar{t}_{пв} = f(P_{пв}, t_{пв}), \quad (35)$$

$$\bar{t}_{пр} = h'(t_s(P_6)) \quad (36)$$

где $t_{пе}$, $t_{пв}$, t_s – температуры соответственно перегретого пара, питательной воды и воды на линии насыщения, °С;

$P_{пе}$, $P_6 = 1,1 \cdot P_{пе}$, $P_{пв} = 1,2 \cdot P_{пе}$ – давления соответственно перегретого пара, давление в барабане парового котла и давление питательной воды, кгс/см²;

$G_{пр}$ – расход продувочной воды из барабана парового котла, кг/с, принимаем в расчёте $G_{пр} = (1 - 2)\% \cdot D_{пе}$.

$$h_{пе} = f(P_{пе}, t_{пе}) = 3490,3,$$

$$P_{пв} = 1,2 \cdot P_{пе} = 1,2 \cdot 15 = 18,$$

$$\bar{t}_{пв} = f(P_{пв}, t_{пв}) = 993,38,$$

$$P_6 = 1,1 \cdot P_{пе} = 1,1 \cdot 140 = 154,$$

$$\bar{t}_{пр} = h'(t_s(P_6)) = 1614,2,$$

$$G_{пр} = 0,015 \cdot D_{пе} = 2,09.$$

где $\eta_{к}^{бр}$ – коэффициент полезного действия, % (см. формулу 3.20).

$$B = \frac{141,667 \cdot (3490,3 - 993,38) + 2,09 \cdot (1614,2 - 993,38)}{15280 \cdot 0,911} = 25,$$

Расчетный расход топлива с учетом механической неполноты сгорания, кг/с:

$$B_p = B \cdot (1 - q_4 \cdot 0,01), \quad (37)$$

$$B_p = B \cdot (1 - 0,5 \cdot 0,01) = 24,88.$$

Расчет теплообмена в топочной камере

Для определения температуры газов на выходе из зоны максимального тепловыделения воспользуемся методикой позонного расчета топочной камеры и разделим ее на две части:

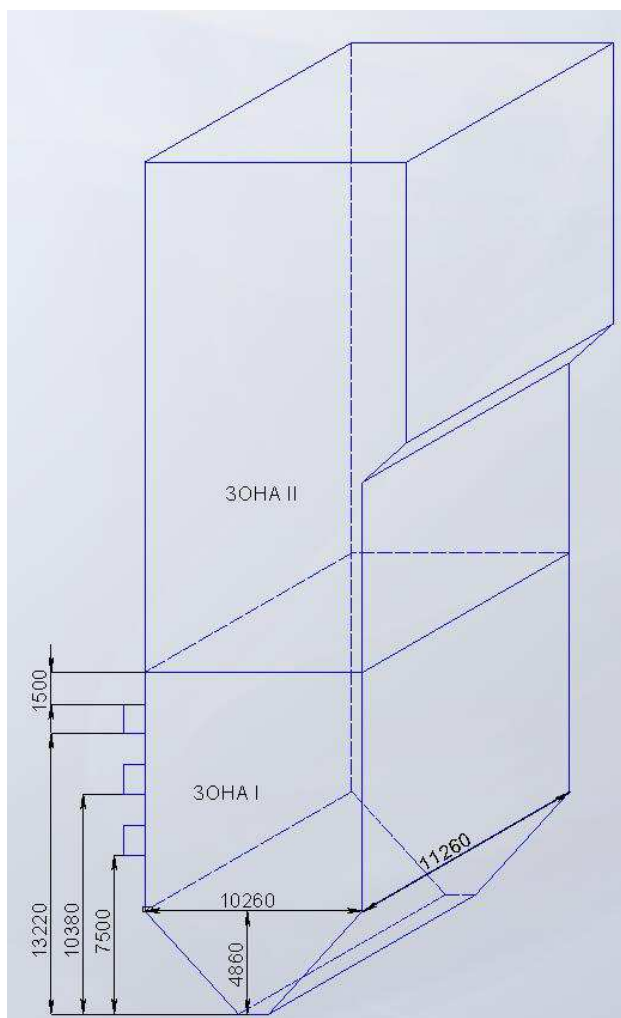


Рисунок 11 – Конструктивные размеры топочной камеры

Таблица 7 – Основные конструктивные размеры топки зоны максимального тепловыделения.

Высота топки h_T , м	Ширина топочной камеры b_T , м	Площадь фронтальной стенки $F_{ф.СТ}$, $м^2$	Площадь задней стенки $F_{з.СТ}$, $м^2$	Площадь боковой стенки $F_{б.СТ}$, $м^2$	Площадь выходного окна $F_{в.ОК}$, $м^2$
29	11,26	289	289	224	115

Тепловой расчет проводится для зоны I, т.к. в дальнейших расчетах необходима температура из зоны максимального тепловыделения.

Температуры на выходе из зоны максимального тепловыделения ϑ_1'' , °С, определяется методом последовательных приближений по уравнению:

$$\vartheta_1'' = \frac{\beta'_{сг} \cdot Q_H^p + Q_B}{V \cdot C''} - \frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot a_T \cdot (T_T'')^4}{B_p \cdot V \cdot C_I''} \cdot (\psi \cdot F), \quad (38)$$

где Q_B – теплота поступающего в топку горячего воздуха, кДж/кг.

$\beta'_{сг} = 0,985$ - степень выгорания топлива в зоне;

$V \cdot C''$ - суммарная теплоемкость продуктов сгорания в зоне ядра факела, кДж/кг

$V \cdot C_I''$ - суммарная теплоемкость продуктов сгорания на выходе из зоны I, кДж/кг

a_T - степень черноты топки;

$\psi \cdot F$ - произведение коэффициента тепловой эффективности на суммарную поверхность, ограничивающую зону;

Теплота поступающего в топочную камеру воздуха, кДж/кг, рассчитывается по формуле:

$$Q_B = \beta_{ГВ} \cdot H_{ГВ}^0 + (\Delta\alpha_T + \Delta\alpha_{пл}) \cdot H_{ХВ}^0, \quad (39)$$

где $\beta_{ГВ}$ - относительный избыток воздуха;

$H_{ГВ}^0$ - энтальпия горячего воздуха после воздухоподогревателя, кДж/кг;

$\Delta\alpha_T = 0,07$ - присосы воздуха в топочную камеру;

$\Delta\alpha_{пл} = 0,04$ - присосы воздуха в пылесистему;

Энтальпии горячего и холодного воздуха определяются по температурам $t_{ГВ}$ и $t_{ХВ}$ при $\beta_{ГВ} = 1,08$: $H_{ГВ}^0 = 1959,035$ кДж/кг.

Относительный избыток воздуха:

$$\beta_{ГВ} = \Delta\alpha_{гор} - \Delta\alpha_{пл} = \alpha_T - \Delta\alpha_T - \Delta\alpha_{пл}, \quad (40)$$

где α_T - коэффициент избытка воздуха в топке.

$$\beta_{ГВ} = 1,2 - 0,08 - 0,04 = 1,08,$$

$$Q_B = 1,08 \cdot 1959,035 + 0,11 \cdot 55,92 = 1798,329$$

Зададимся температурой на выходе из зоны - $\vartheta_1'' = 1265$

$$\psi \cdot F = \psi_{экр} \cdot F_{ст} + \psi' \cdot F' + \psi'' \cdot F'', \quad (41)$$

$$\psi_{экр} = \psi'' = \xi_{экр} \cdot x,$$

где $\xi_{экр}$ - условный коэффициент загрязнения;

x - угловой коэффициент экрана.

Коэффициент загрязнения экранов выбираем $\xi_{экр} = 0,5$;

Угловой коэффициент экрана принимаем $x=0,97$

Коэффициент тепловой эффективности экранов:

$$\psi_{экр} = 0,5 \cdot 0,97 = 0,446$$

$F_{ст} = 705$ - площадь поверхности стен, ограничивающих зону, м²;

$F' = F'' = 115$ - сечение топочной камеры, ограничивающие зону сверху и снизу, м²;

$$\psi \cdot F = 0,485 \cdot 705 + 0,485 \cdot 115 + 0,1 \cdot 115 = 409,3,$$

Степень черноты топки в зоне:

$$a_{\Gamma} = \frac{a_{\Phi}}{a_{\Phi} + (1 - a_{\Phi}) \cdot \psi_{\text{ср}}}, \quad (42)$$

Степень черноты факела:

$$a_{\Phi} = 1 - \exp^{-B\tilde{u}}, \quad (43)$$

где $B\tilde{u}$ – приведенный критерий поглощательной способности;

$$B\tilde{u} = 1,6 \ln \left(\frac{1,4Bu^2 + Bu + 2}{1,4Bu^2 - Bu + 2} \right), \quad (44)$$

$$Bu = k \cdot p \cdot s_{\Gamma}, \quad (45)$$

где k – коэффициент поглощения топочной среды, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$;

$p = 0,1$ – давление в топочной камере, МПа;

s_{Γ} – эффективная толщина излучающего слоя топочной камеры, м.

Коэффициент поглощения топочной среды, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, при сжигании твердых топлив определяется по формуле:

$$k = k_{\Gamma} \cdot r_{\Pi} + k_{\text{зл}} \cdot \mu_{\text{зл}} + k_{\text{к}}, \quad (46)$$

где k_{Γ} – коэффициент поглощения лучей газовой фазой продуктов сгорания, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$;

r_{Π} – объемная доля трехатомных газов;

$k_{\text{зл}}$ – коэффициент ослабления лучей взвешенными в топочной среде частицами летучей золы, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$;

$\mu_{\text{зл}}$ – концентрация золых частиц в топочной камере;

$k_{\text{к}}$ – коэффициент ослабления лучей частицами горящего кокса, принимаем $k_{\text{к}} = 0,5 \text{ } 1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$.

Коэффициент поглощения лучей, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, газовой фазой продуктов сгорания:

$$k_{\Gamma} = \left(\frac{7,8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{r_{\text{H}_2\text{O}} s_m}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \frac{T_m''}{1000} \right), \quad (47)$$

где $r_{\text{H}_2\text{O}}$ – объемная доля водяных паров;

Абсолютная температура газов на выходе из топки, температуру принимаем равной $\vartheta_{\Gamma}'' = 1142^{\circ}\text{C}$

$$T_{\Gamma}'' = \vartheta_{\Gamma}'' + 273 = 1142 + 273 = 1415 \text{ К.}$$

$$k_{\Gamma} = \left(\frac{7,8 + 16 \cdot 0,143}{\sqrt{0,282 \cdot 7,96}} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0,37 \cdot \frac{1415}{1000} \right) = 2,73.$$

Коэффициент ослабления лучей взвешенными в топочной среде частицами летучей золы:

$$k_{\text{зл}} = \frac{43 \cdot \rho_{\text{зл}}}{(T_m'' \cdot d_{\text{зл}})^{0,67}}, \quad (48)$$

где $\rho_{\Gamma} = 1300 \text{ г/м}^3$ – плотность дымовых газов при атмосферном давлении;
 $d_{\text{зл}}$ – эффективный диаметр золовых частиц, для молотковых мельниц, принимается равным $d_{\text{зл}} = 16 \text{ мкм}$.

$$K_{\text{зл}} = \frac{43 \cdot 1300}{(1415 \cdot 16)^{0,67}} = 67,55$$

Тогда коэффициент поглощения, $1/(\text{м} \cdot \text{МПа})$, топочной средой:

$$k = 2,73 \cdot 0,282 + 67,55 \cdot 0,009 + 0,5 = 1,91$$

Критерий Бугера:

$$Bu = 1,91 \cdot 0,1 \cdot 7,96 = 1,52$$

По найденному значению Bu определяем приведенное значение критерия Бугера \tilde{Bu} :

$$\tilde{Bu} = 1,6 \cdot \ln \left(\frac{1,4 \cdot 1,52^2 + 1,52 + 2}{1,4 \cdot 1,52^2 - 1,52 + 2} \right) = 0,956$$

Степень черноты факела:

$$a_{\phi} = 1 - \exp^{-\tilde{Bu}} = 0,781$$

Степень черноты топки в зоне:

$$a_{\tau} = \frac{0,781}{0,781 + (1 - 0,781) \cdot 0,485} = 0,88$$

Теплоемкость продуктов сгорания в зоне ядра факела:

$$V \cdot C'' = \frac{H_a}{\vartheta_a} = \frac{17076,6}{1789,9} = 9,54, \quad (49)$$

Теплоемкость продуктов сгорания на выходе из зоны I:

$$V \cdot C_I'' = \frac{H_1''}{\vartheta_1''} = \frac{11588}{1265} = 9,16$$

Температура на выходе из зоны максимального тепловыделения:

$$\begin{aligned} \vartheta_1'' &= \frac{0,985 \cdot 15671 + 1798,3}{9,54} - \frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot 0,88 \cdot (1538)^4}{24,88 \cdot 9,16} \cdot 409,3 = \\ &= 1264 \end{aligned}$$

Разница от ранее принятой температуры составляет 1°C , расчет можно считать корректным.

При проведении теплового расчета топочной камеры с организацией третичного дутья температура на выходе из зоны активного горения при подаче 10% воздуха от необходимого для горения – 1216°С, при 15% подачи воздуха - 1202°С.

Полученные температуры используем для дальнейших расчетов.

Расчет выбросов вредных веществ – оксидов азота в пересчете на NO₂ по методике СО 153-34.02.304-2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций».

Массовый выброс оксидов азота, г/с

Удельные выбросы оксидов азота (в пересчете на NO₂), г/МДж:

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{ТОПЛ} + K_{NO_2}^{ВОЗД}, \quad (50)$$

Исходя из расчета $T''_{заг} < 1800K$, следовательно воздушными оксидами азота пренебрегаем $K_{NO_2}^{ВОЗД} = 0$.

Расчет топливных оксидов азота представлен в таблице 8.

Таблица 8 – Расчет топливных оксидов азота.

Формула	$\alpha_r = 1,12$ $\alpha_{тр.дуть} = 0$	$\alpha_r = 1$ $\alpha_{тр.дуть} = 10\%$	$\alpha_r = 0,94$ $\alpha_{тр.дуть} = 15\%$
$K_{NO_2}^{ТОПЛ} = 0,12 \cdot \varepsilon_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha_r} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \beta_{см}, \text{ г/МДж}$	0,184	0,147	0,131
$FR = \frac{100 - W^r - A^r - V^r}{V^r}$		0,268	
N^d		0,896	
$\varepsilon_{NO_x} = FR^{0,6} + (1 + N^d)$		2,35	
$\beta_{\alpha_r} = (0,53 \cdot \alpha_r + 0,12)^2$	0,51	0,42	0,38
$\beta_{\alpha_1} = 1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48$ При $\alpha_1 = 53\%$		1,397	
$\beta_R = 1 - 0,016 \cdot \sqrt{R}$ При $R = 0$		1	
$\beta_{\vartheta} = 0,11 \cdot \sqrt[3]{T''_{заг} - 1100}$	0,835	0,803	0,796
$\beta_{см} = 0,98 \cdot \frac{w_2}{w_1} - 0,47$ При $\frac{w_2}{w_1} = 1,6$		1,1	
$M_{NO_2} = \frac{K_{NO_2} \cdot B_p \cdot Q_p^H}{1000}, \text{ г/с}$	69,9	55,8	49,8
$C_{NO_2} = \frac{M_{NO_2} \cdot 1000}{B_p \cdot V_r}, \text{ кг/м}^3$	490,2	391,3(-20,2%)	349,6(-28,7%)

Распределение подачи воздуха по высоте невозможно без изменения избытка воздуха в горелках. Если допустить тот вариант, что избыток воздуха в горелках не измениться, и рассмотреть только влияние изменения

температуры в области максимальных температур, то результаты представлены ниже:

Таблица 9 – Расчет топливных оксидов азота.

Формула	$\alpha_T = 1,12$ $\alpha_{тр.дуг} = 0$	$\alpha_T = 1$ $\alpha_{тр.дуг} = 10\%$	$\alpha_T = 0,94$ $\alpha_{тр.дуг} = 15\%$
$K_{NO_2}^{топли} = 0,12 \cdot \varepsilon_{NO_x} \cdot \beta_{\alpha_T} \cdot \beta_{\alpha_1} \cdot \beta_R \cdot \beta_{\vartheta} \cdot \beta_{см} \cdot \Gamma / МДЖ$	0,184	0,147	0,131
$FR = \frac{100 - W^r - A^r - V^r}{V^r}$	0,268		
N^d	0,896		
$\varepsilon_{NO_x} = FR^{0,6} + (1 + N^d)$	2,35		
$\beta_{\alpha_T} = (0,53 \cdot \alpha_T + 0,12)^2$	0,51	0,51	0,51
$\beta_{\alpha_1} = 1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48$ При $\alpha_1 = 53\%$	1,397		
$\beta_R = 1 - 0,016 \cdot \sqrt{R}$ При $R = 0$	1		
$\beta_{\vartheta} = 0,11 \cdot \sqrt[3]{T''_{заг} - 1100}$	0,835	0,803	0,796
$\beta_{см} = 0,98 \cdot \frac{w_2}{w_1} - 0,47$ При $\frac{w_2}{w_1} = 1,6$	1,1		
$M_{NO_2} = \frac{K_{NO_2} \cdot B_p \cdot Q_p^H}{1000}, \Gamma/c$	69,9	67,3	66,5
$C_{NO_2}, \text{кг/м}^3$	490,2	472,4(-3,6%)	466,5(-4,8%)

Как видно из расчетов, организация ступенчатого сжигания позволяет достичь до 30% снижения выбросов NO_x . При этом наибольшее влияние оказывает изменение коэффициента избытка воздуха в горелках. Перераспределение температур по внутреннему объему топки позволяет снизить образование оксидов азота на 4,8%.

При этом в расчете не учитывается на какой конкретно высоте необходимо располагать подвод третичного воздуха, а так же не учитывает тот фактор, что с подводом воздуха уменьшается догорание угольных частиц. Для решения данной проблемы воспользуемся моделирование горения в программе ANSYS Fluent.

3.2 Математическое исследование

При моделировании горения в топке рассмотрены варианты: базовый вариант, без подвода третичного воздуха, три варианта с подводом острого дутья на расстоянии 1,5, 3 и 4,5 м выше уровня расположения верхней границы горелок и 6 вариантов с аналогичным подводом дутья, но с изменением угла подвода воздуха 45° и -45° .

Для выполнения численного моделирования необходимо создать 3D модель топочной камеры с выходными сечениями горелок. Основные размеры для построения геометрической трехмерной модели парового котла БКЗ-500-140 взяты из чертежей котла. Сечение подвода топливно-воздушной смеси и вторичного воздуха определялось исходя из обеспечения скорости подвода, для топливно-воздушной смеси 23,1м/с, для вторичного/третичного воздуха - 36,8м/с. Эскиз расчетной сетки котельного агрегата представлен на рисунке 12.

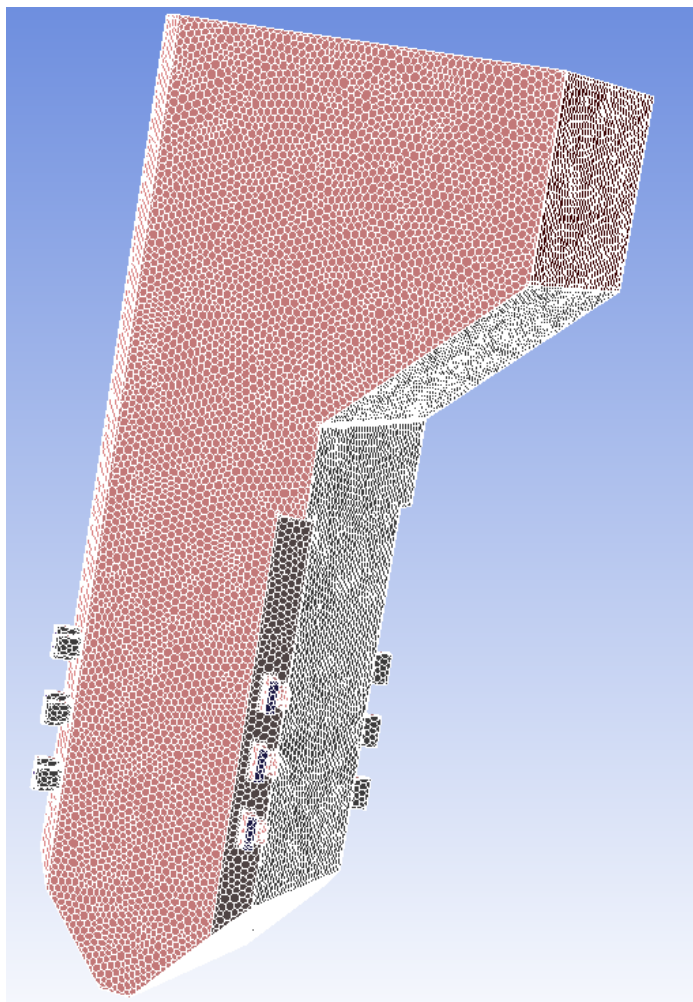


Рисунок 12 - Расчетная сетка котельного агрегата БКЗ-500-140

При разработке трехмерной модели топочной камеры привлекался программный комплекс Solid Works. Геометрическая 3D модель распределялась на конечное число элементов, ячеек расчетной сетки.

Важным этапом верификации численной модели является проверка ее сеточной чувствительности. Для этого один и тот же вариант расчета решался для сеток с увеличивающимся числом ячеек (до 512 тыс – ограничение учебной версии). После чего происходило сравнение с данными теплового расчета котельного агрегата. Было выявлено, что для моделей свыше 300 тыс. ячеек дальнейшее снижение размеров ячейки не оказывало значительного влияния на изменение параметров.

Исходные данные для моделирования определялись в соответствии с тепловым расчетом котельного агрегата. Расход угля на одну горелку составил

1,9 кг/с, расход воздуха – 17,15 кг/с. Свойства угольных частиц представлены в таблице. Граничные условия на стенке задавались по температуре на стенке - 300°C и степени черноты стенок – 0,76. Граничные условия на выходного окна задавались pressure-outlet.

Таблица 10 – Характеристика угля

Proximate analysis			
Volatile	Fixed carbon	Ash	Moisture
0,28	0,316	0,074	0,33
Ultimate Analysis (DAF)			
C	H	O	N
0,717511	0,050176	0,222278	0,010035

При моделировании образования NO использовались следующие параметры: массовая доля азота в летучих 0,00363, промежуточные вещества NH₃(0,1) и HCN(0,9), степень преобразования азота в летучих принято 1, массовая доля в коксе 0,006, степень конверсии азота в коксе 0,7. Параметр ВЕТ принят 25000 м²/кг.

Трехмерные расчеты, выполненные с помощью средств компьютерно-математического моделирования ANSYS Fluent дают возможность рассмотреть температурный режим топочной камеры, распределение скорости по высоте и в необходимых сечениях, концентрации оксидов азота в необходимых точках и проследить траектории движения угольных частиц.

Сопоставление результатов моделирования с данным теплового расчета. Таблица 11 – Сопоставление результатов.

Наименование показателя	Обозначение	Тепловой расчет	Численное моделирование
Температура на выходе из топки	ϑ_T'' , °C	1042	1071
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,5	0,605
Концентрация NO _x	NO _x , мг/нм ³	490,2	435

Потери с мехнедожогом определялись по соотношению:

$$q_4 = \frac{CO_2^{out}}{B \cdot C^{DAF} \cdot 1,866 \cdot \rho_{CO_2}}, \quad (51)$$

где CO_2^{out} – количество недогоревших частиц, определяется по результатам моделирования, кг/с;

C^{DAF} – содержание углерода на сухую массу;

ρ_{CO_2} – плотность вещества в уходящих газах, кг/м³;

Концентрация оксидов азота определялась по следующей формуле, мг/нм³:

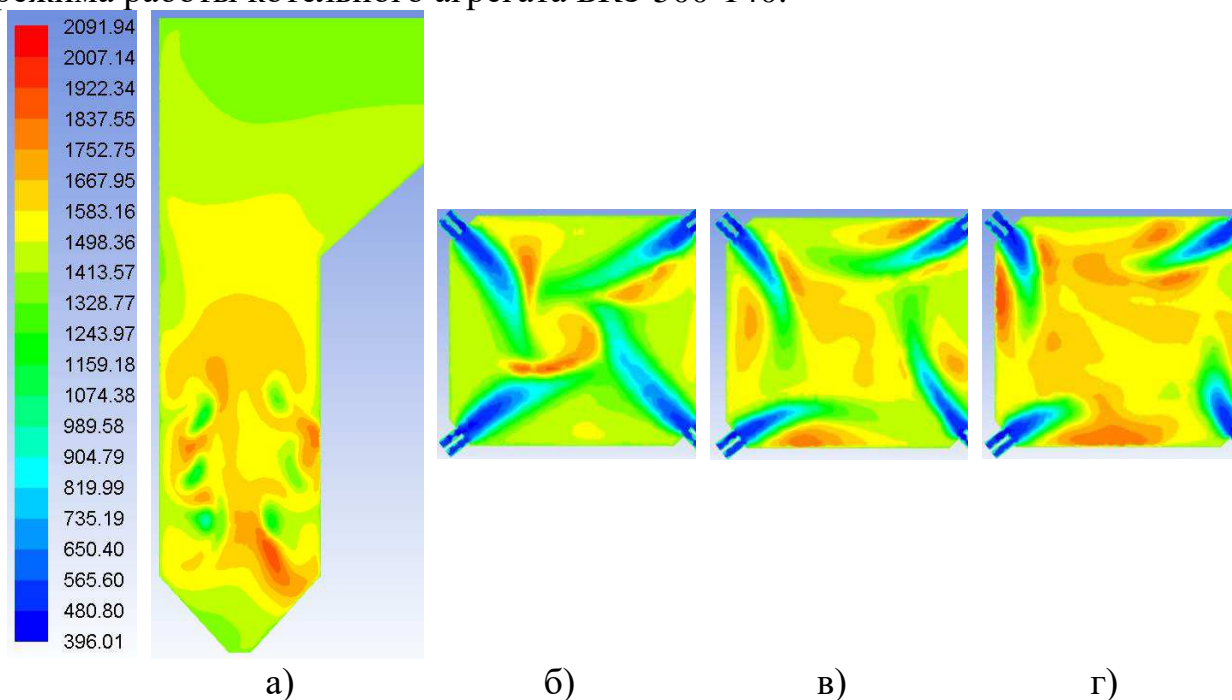
$$C_{NO_x} = \frac{n_{nox} \cdot 10^6}{1 - n_{H_2O}}, \quad (52)$$

где n_{nox} – количество вещества NO_x , определяется по результатам моделирования, моль;

n_{H_2O} – количества вещества H_2O , определяется по результатам моделирования

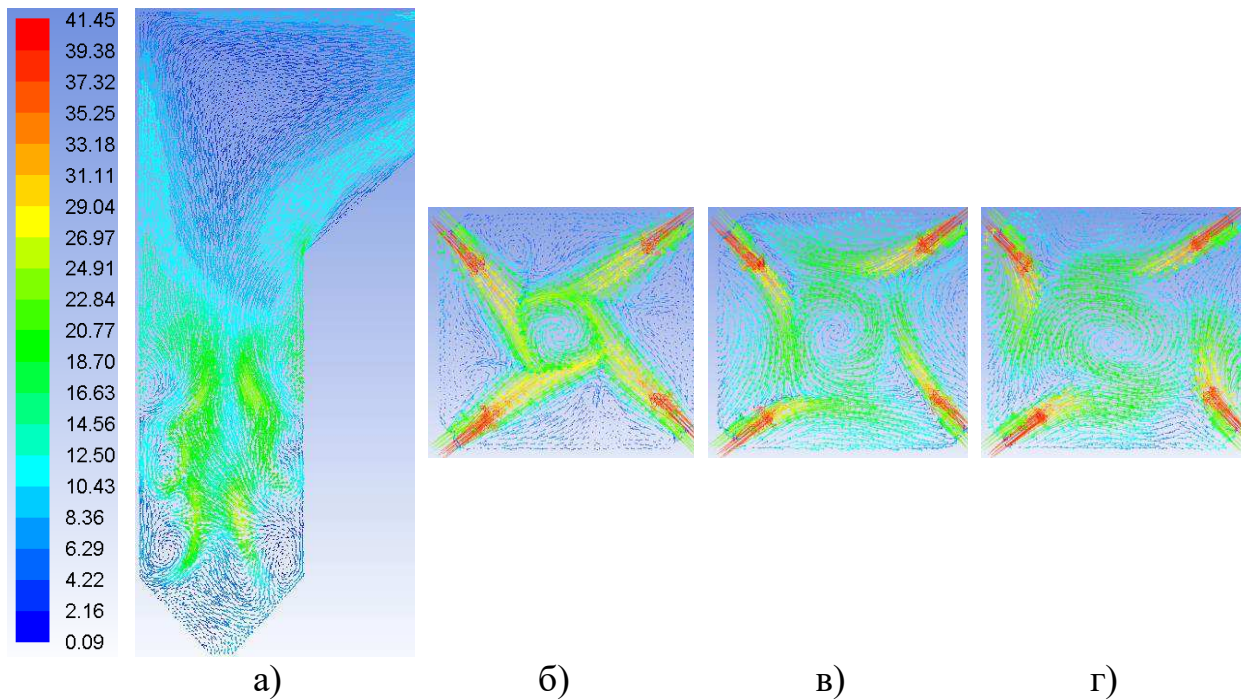
Разница температур на выходе из топки составляет 2,5%, при этом стоит учитывать, что результат моделирования топки производился без учета тепловосприятости ширм, поэтому температура получилась выше. Так же имеется отклонение по механическому недожогу (30%), но цифры близки и одного порядка. Концентрация оксидов азота сухих газов отличается от рассчитанной на 11%. В целом разница найденных параметров невелика, можно считать смоделированную модель режима корректной.

Ниже рассмотрены основные результаты моделирования номинального режима работы котельного агрегата БКЗ-500-140.



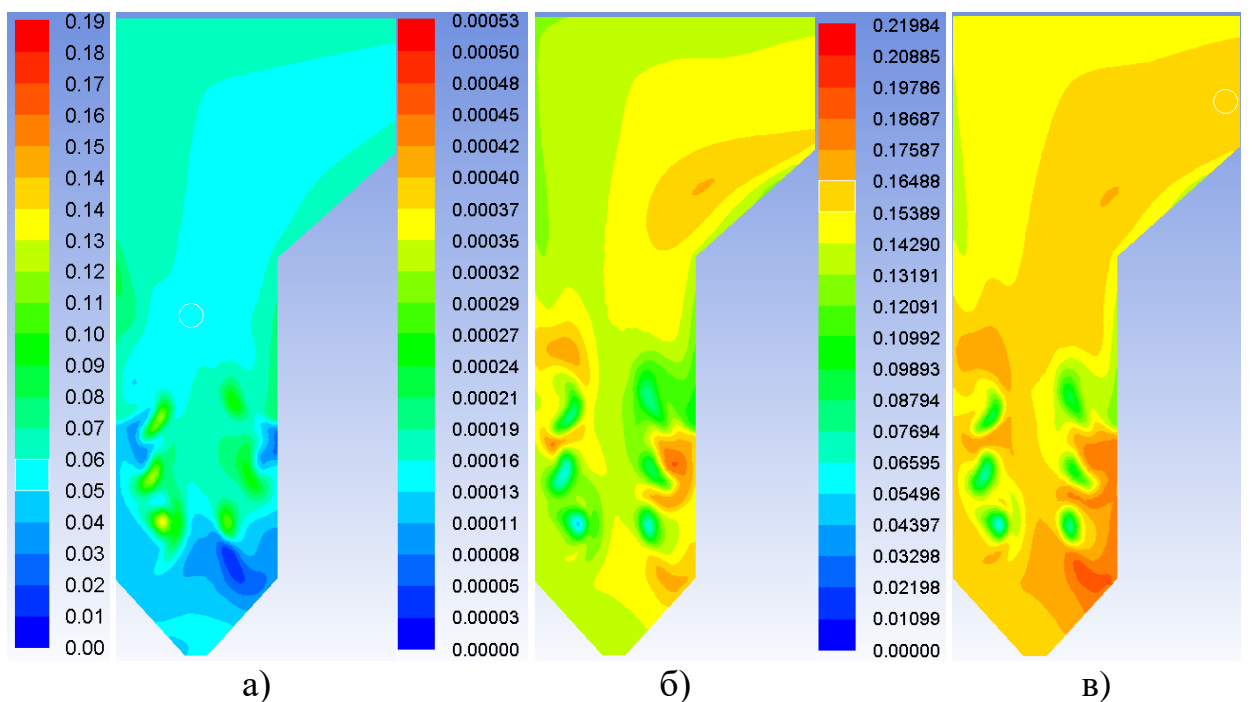
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок

Рисунок 13 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; в) сечение 3 яруса горелок

Рисунок 14 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

Рисунок 15 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

Для определения наилучшего варианта уменьшения NO_x при наименьшем росте q_4 рассмотрим 6 вариантов организации ступенчатого сжигания посредством расположения 4х сопел третичного дутья в углах топочной камеры на 1,5,3 и 4,5 м выше уровня горелок и подачи в них воздуха

в 10% и 15% от необходимого для горения с заданным коэффициентом избытка воздуха.

Расход первичной топливовоздушной смеси остается неизменным. Для обеспечения неизменной скорости подачи вторичного воздуха (36,8 м/с) выполнен предварительный расчет его расхода в сопла третичного дутья и вторичного воздуха, а также площадь сечений подвода.

Расход воздуха на одну горелку, кг/с:

$$G_{\text{гор}} = \frac{B}{12} \cdot V_{\text{в}}^0 \cdot \alpha_{\text{т}} \cdot \rho_{\text{в}}, \quad (53)$$

Площадь подвода топливно-воздушной смеси/воздуха, м²:

$$S = \frac{G_{\text{гор}}}{\rho_{\text{в}} \cdot V}, \quad (54)$$

где V – скорость подвода воздуха/смеси, м/с;

Результаты расчетов данных параметров для одной горелки (из 12) и одного сопла третичного дутья (из 4) представлены в таблице ниже.

Таблица 12 – Результаты расчетов

	10%	15%
$F_{\text{III}}^{\text{тр.дуть}}$, м ²	0,447	0,547
F_{II} , м ²	0,246	0,212
$G_{\text{III}}^{\text{тр.дуть}}$, кг/с	6,347	5,489
G_{II} , кг/с	5,146	7,719
G_{I} , кг/с	9,092	9,092

Остальные параметры оставались неизменными относительно базового расчета. В первичном варианте рассмотрен подвод первичного воздуха и топливной смеси без предварительного смешивания для оценки влияния температурного режима в топочной камере.

Основные результаты моделирования приведены ниже:

Таблица 13 – Результаты моделирования

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателя	
Без организации острого дутья			
Температура на выходе из топки	$\vartheta_{\text{т}}''$, °С	1095	
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,6	
Концентрация NO _x	NO _x , мг/нм ³	380	
		OFA=10%	OFA=15%
Нижнее расположение сопел третичного дутья на 1,5м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta_{\text{т}}''$, °С	1089	1055
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,605	0,602

Продолжение таблицы 13

Концентрация NO_x	$NO_x, \text{мг/м}^3$	363	372
Среднее расположение сопел третичного дутья на 3 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta_T'', \text{°C}$	1064	1045
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,601	0,604
Концентрация NO_x	$NO_x, \text{мг/м}^3$	366	355
Верхнее расположение сопел третичного дутья на 4,5 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta_T'', \text{°C}$	1063	1038
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,606	0,596
Концентрация NO_x	$NO_x, \text{мг/м}^3$	359	362

Представим результаты в графическом виде:

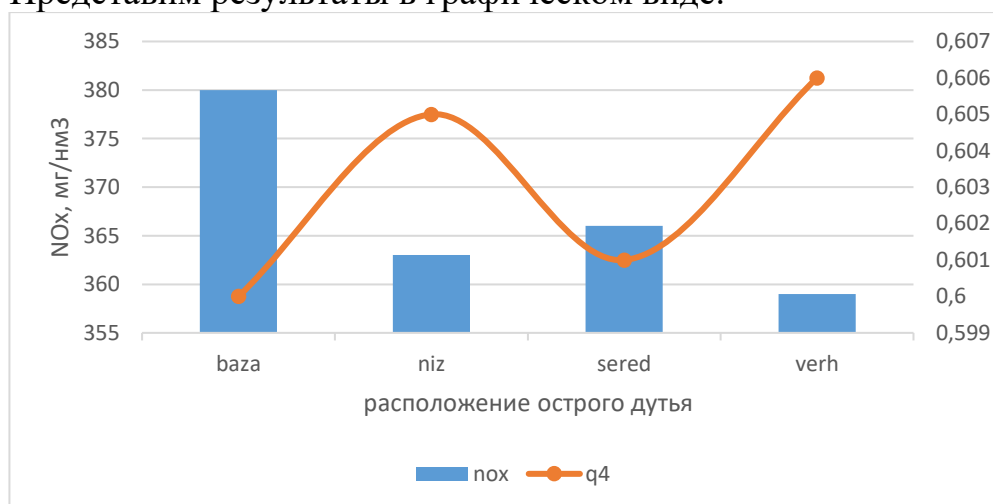


Рисунок 16 – Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 10%

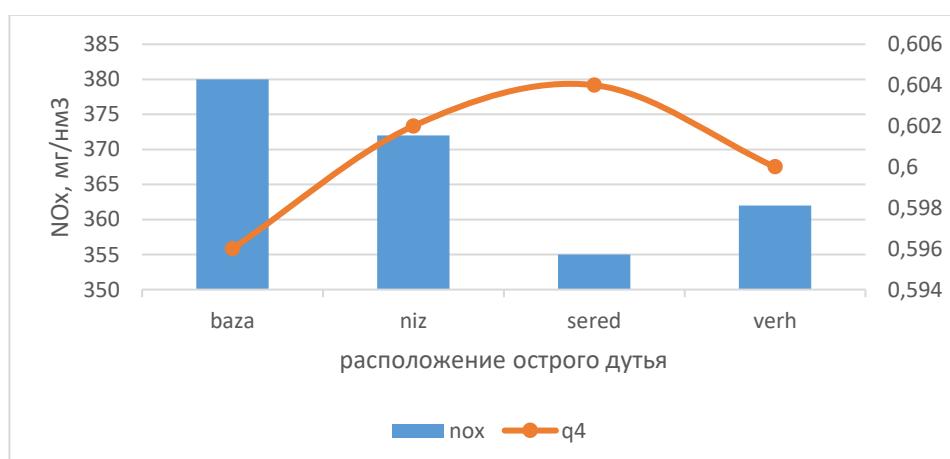


Рисунок 17 – Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 15%

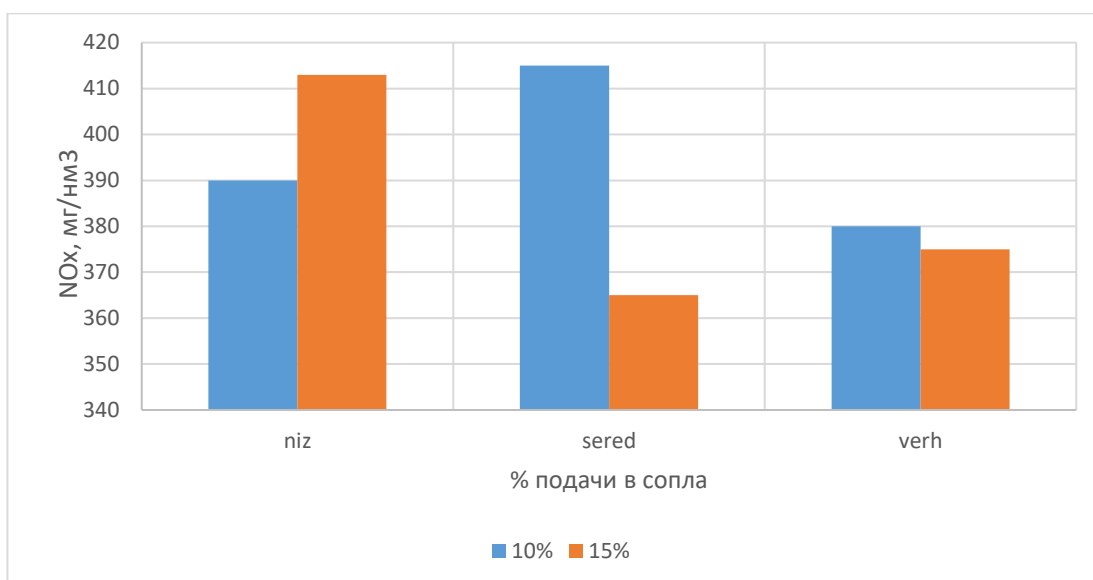


Рисунок 18 – Изменение образование NO_x от величины подачи воздуха в сопла третичного дутья

Результаты получились неоднозначны. С увеличением количества воздуха в сопла третичного дутья в нижнем и верхнем ярусе увеличивается образование NO_x , при этом в сопла на отметке на 3м выше уровня подачи горелок, происходит обратная ситуация, с увеличением подачи происходит снижение образования NO_x . Потери тепла с механическим недожогом изменяются слабо и даже не изменяются.

Таким решением удастся достичь снижение концентрации NO_x до 6%, при почти неизменных потерях с механическим недожогом.

Данное решение не учитывает влияние предварительного смесеобразования в горелке, и дает лишь понимание изменения концентрации образования вредных веществ по территории факела в следствии изменение его температурных характеристик. Относительно теоретического расчета по методике СО 153-34.02.304-2003 математическое моделирование показывает снижение на 2 % больше.

Рассмотрим вариант с предварительным смешением топливно-воздушной смеси, для этого увеличим длину подвода смеси и воздуха с целью принятия во внимание преобразований, происходящих при сушке топлива. Расчетная модель базового варианта расчета представлена выше. Результаты расчета 6-ти вариантов организации острого дутья представлены ниже.

Таблица 14 – Результаты моделирования

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателя
Без организации острого дутья		
Температура на выходе из топки	ϑ'' , °C	1071
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,605
Концентрация NO_x	NO_x , мг/м ³	435

Продолжение таблицы 14

		OFA=10%	OFA=15%
Нижнее расположение сопел третичного дутья на 1,5м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta_T'', \text{ }^\circ\text{C}$	1028	1023
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,618	0,609
Концентрация NO_x	$\text{NO}_x, \text{мг/м}^3$	390	413
Среднее расположение сопел третичного дутья на 3 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta_T'', \text{ }^\circ\text{C}$	1005	992
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,605	0,617
Концентрация NO_x	$\text{NO}_x, \text{мг/м}^3$	415	365
Верхнее расположение сопел третичного дутья на 4,5 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta_T'', \text{ }^\circ\text{C}$	1000	981
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,616	0,61
Концентрация NO_x	$\text{NO}_x, \text{мг/м}^3$	370	375

В данном варианте расчете с моделированием предварительного смешивания топливно-воздушной смеси достижение снижения концентрации составляет 16%. Именно изменение коэффициента избытка воздуха в горелке оказывает значительное влияние на уменьшение образования вредных веществ. Снижение концентрации NO_x в значительной мере достигается за счет снижения образования топливных оксидов азота.

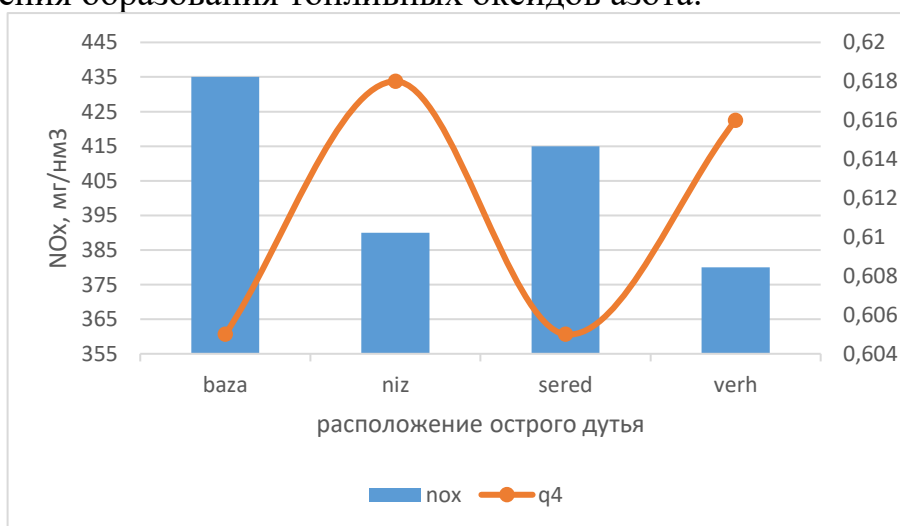


Рисунок 19 – Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 10%

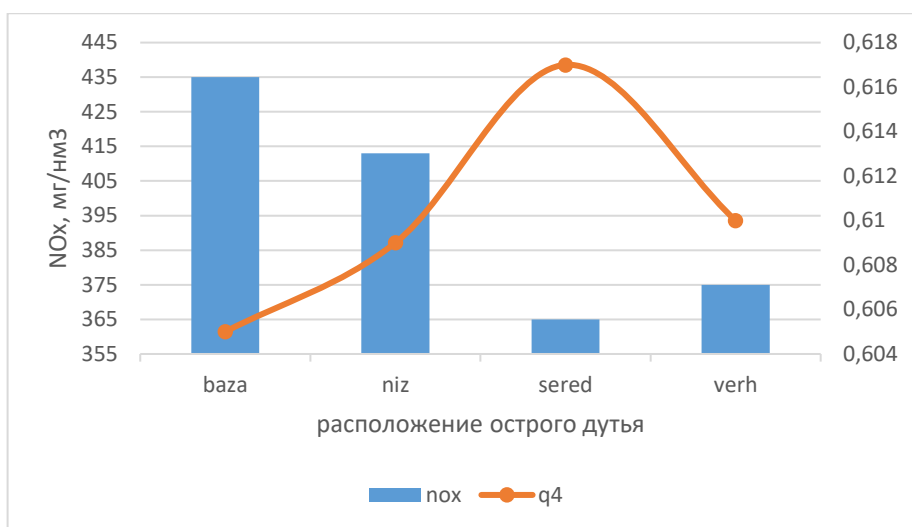


Рисунок 20 – Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 15%

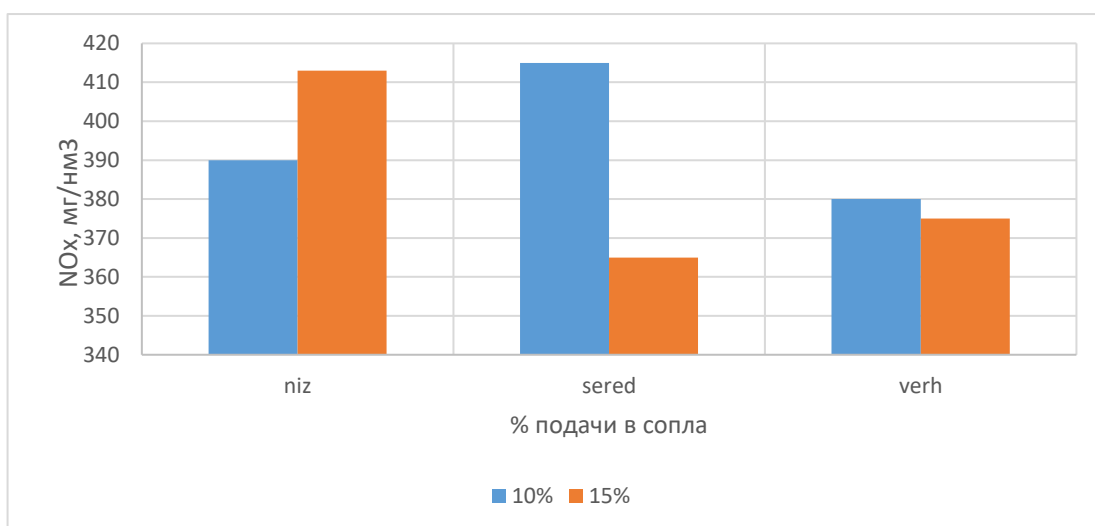


Рисунок 21 – Изменение образование NO_x от величины подачи воздуха в сопла третичного дутья

Картина по характеру зависимости получилась аналогична. Вероятно, существует точка, при которой достигается наименьшее образование NO_x . При этом несмотря на неоднозначность результатов, картина расчетов говорит о том, что применение острого дутья позволяет снизить образование NO_x .

Рассмотрим влияние угла подвода воздуха в сопла третичного дутья.

В первом варианте подвод третичного воздуха в сопла острого дутья осуществляется под углом -45° к горизонтали по оси Z.

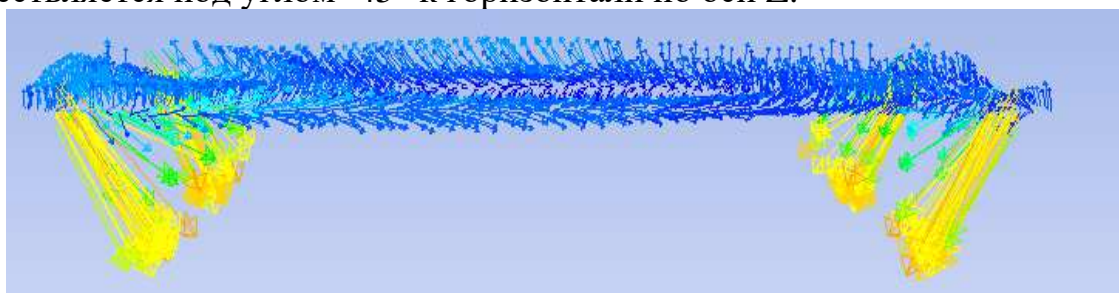


Рисунок 22 – Векторы скоростей подвода воздуха под углом -45°

Результаты моделирования данного варианта представлены в таблице 15.

Таблица 15 – Результаты моделирования

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателя	
Без организации острого дутья			
Температура на выходе из топки	ϑ_T'' , °C	1071	
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,605	
Концентрация NO_x	NO_x , мг/нм ³	435	
		OFA=10%	OFA=15%
Нижнее расположение сопел третичного дутья на 1,5м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	ϑ_T'' , °C	1026	1000
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,616	0,619
Концентрация NO_x	NO_x , мг/нм ³	415	405
Среднее расположение сопел третичного дутья на 3 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	ϑ_T'' , °C	1007	1000
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,619	0,618
Концентрация NO_x	NO_x , мг/нм ³	379	388
Верхнее расположение сопел третичного дутья на 4,5 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	ϑ_T'' , °C	1004	-
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,615	-
Концентрация NO_x	NO_x , мг/нм ³	398	-

При организации 15% подачи воздуха в верхний сопла возникает неустойчивость факела и затягивание его горения в поворотную камеру, см приложение А.

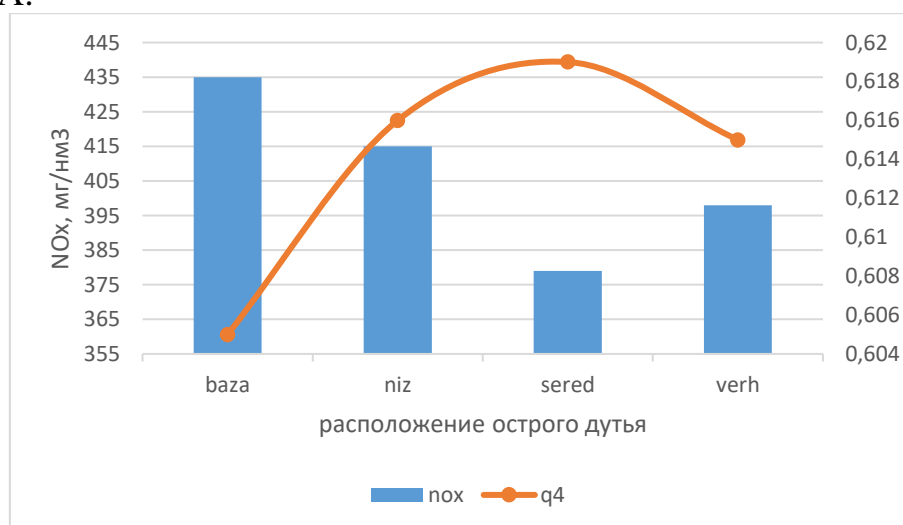


Рисунок 23 – Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 10%

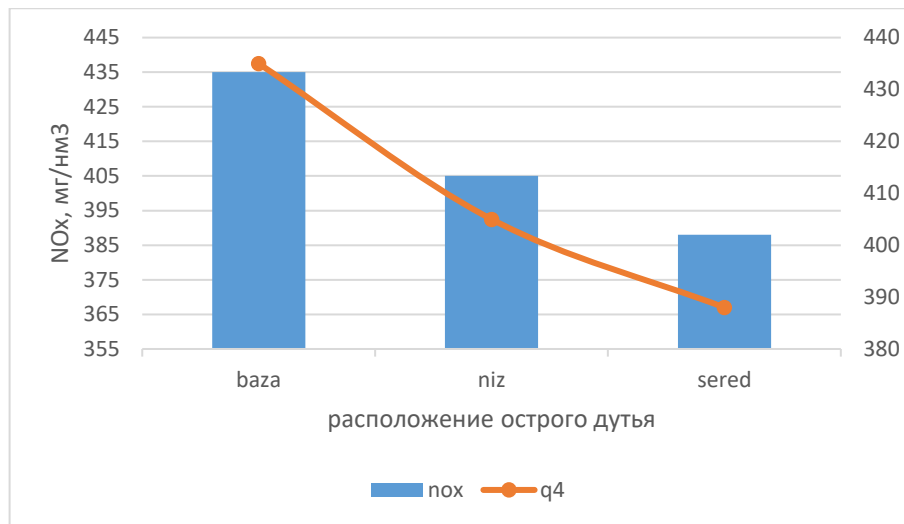


Рисунок 24 – Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 15%

Картина моделирования выглядит зеркально в сравнении с подводом воздуха по нормали сопел. При увеличении подачи воздуха в сопла «niz» наблюдается снижения концентрации образования оксидов азота, в то время как в предыдущем варианте наблюдался рост. При увеличении подачи в сопла «sered» наблюдается рост выбросов NO_x .

Наименьшая концентрация оксидов азота достигается при подводе острого дутья на расстоянии 3 м от верхней части горелок в количестве 10% от общего подвода, при этом снижение выбросов составляет 12,9%. В целом в данном варианте моделирования в сравнении с предыдущим наблюдается рост образования оксидов азота.

Рассмотрим вариант подвода третичного воздуха в сопла острого дутья под углом 45° к горизонтали по оси Z.

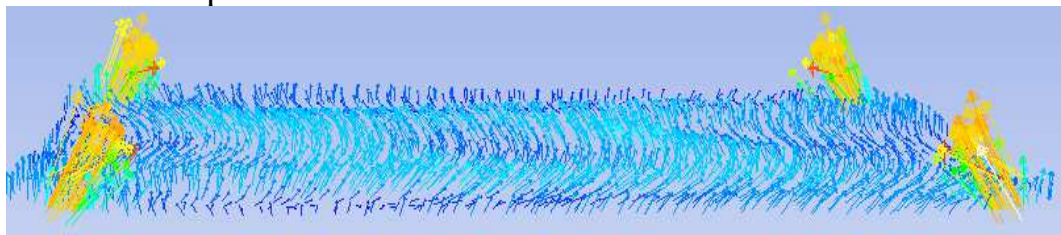


Рисунок 25 – Векторы скоростей подвода воздуха под углом 45°

Результаты моделирования данного варианта представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Результаты моделирования

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателя
Без организации острого дутья		
Температура на выходе из точки	ϑ_T'' , °C	1071
Потери с механическим недожогом	q_4 , %	0,605
Концентрация NO_x	NO_x , мг/нм ³	435

Продолжение таблицы 16

		OFA=10%	OFA=15%
Нижнее расположение сопел третичного дутья на 1,5м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta''_T, ^\circ\text{C}$	1004	980
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,619	0,611
Концентрация NO_x	$\text{NO}_x, \text{мг/м}^3$	416	425
Среднее расположение сопел третичного дутья на 3 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta''_T, ^\circ\text{C}$	1001	988
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,623	0,619
Концентрация NO_x	$\text{NO}_x, \text{мг/м}^3$	409	399
Верхнее расположение сопел третичного дутья на 4,5 м выше уровня горелок			
Температура на выходе из топки	$\vartheta''_T, ^\circ\text{C}$	1012	975
Потери с механическим недожогом	$q_4, \%$	0,625	0,621
Концентрация NO_x	$\text{NO}_x, \text{мг/м}^3$	405	361

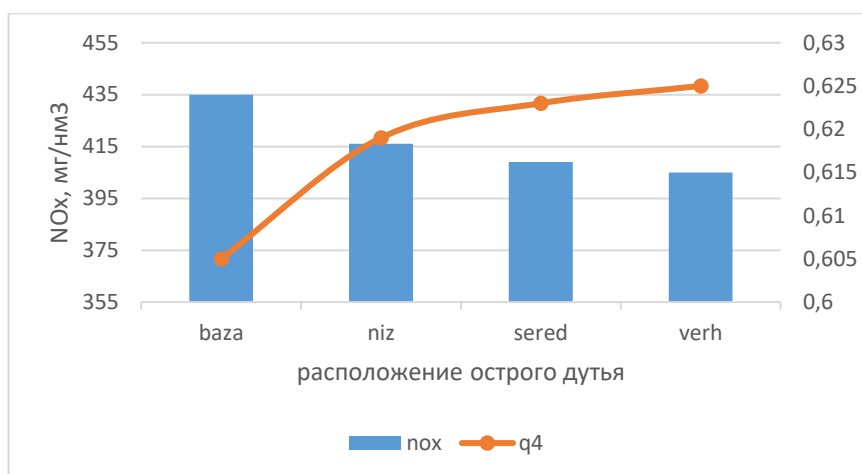


Рисунок 26 - Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 10%

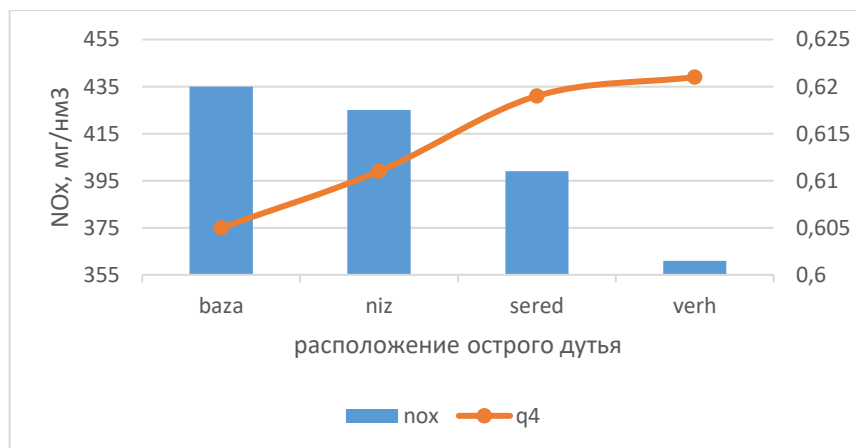


Рисунок 27 - Зависимость изменение q_4 и NO_x от расположение острого дутья, 15%

Картина по характеру аналогична с вариантом подвода третичного воздуха по нормали. При увеличении подачи воздуха в нижние сопла увеличивается образование NO_x . Снижение образование NO_x наблюдается при увеличении подачи воздуха в средние сопла воздуха. Стоит обратить внимание на самый крайний вариант расчета с подачей 15% воздуха в верхние сопла. Здесь достигается самая малая концентрация образования вредного вещества.

Ниже представлены графики влияния угла подвода воздуха на концентрацию NO_x .

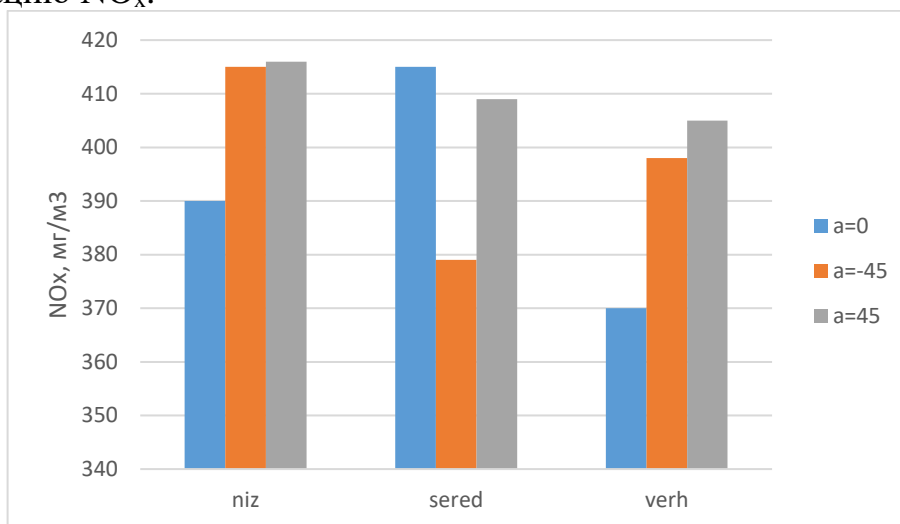


Рисунок 28 – Изменение образование NO_x от изменения угла подвода воздуха, 10% подача в сопла

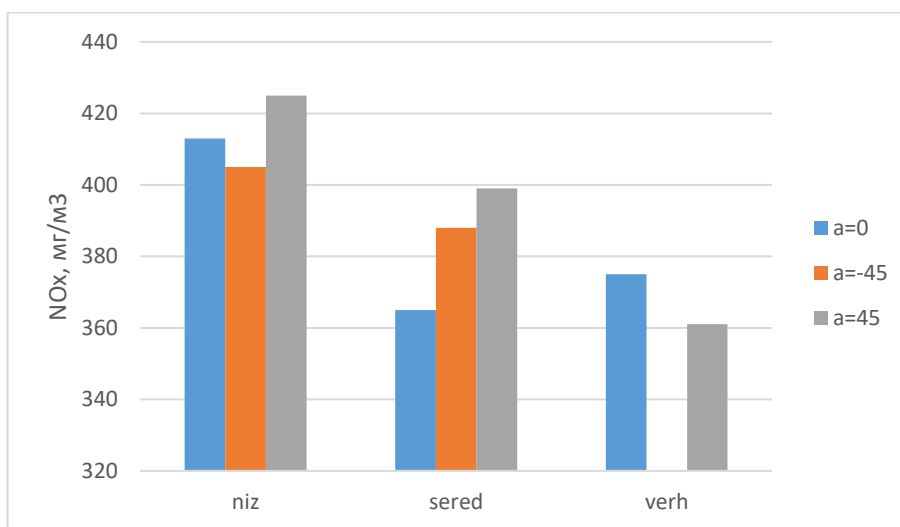


Рисунок 29 – Изменение образование NO_x от изменения угла подвода воздуха, 15% подача в сопла

В общем случае угол довода оказывает отрицательное влияние на образование NO_x , из 11 вариантов 7 показывают увеличение концентрации, 4 на снижение.

Наиболее оптимальный вариант из рассмотренных является вариант с подводом третичного воздуха в количестве 15% от необходимого для горения с расположением сопел на расстоянии 4,5 м от верхней горелки с подводом

воздуха по нормам сопел. При этом происходит снижение концентрации на 16% и составляет 365 мг/м³.

В рассмотренных вариантах моделирования не учтен фактор типа горелочного устройства и сушки топлива топочными газами. При правильно подобранных горелочных устройствах и еще более углубленном моделировании можно достичь значительного снижения выбросов вредных веществ.

4 Технико-экономическое обоснование

Целью расчета экономической части является определение срока окупаемости проекта – дисконтированного денежного потока нарастающим итогом.

Расчет производится на 1 котельный агрегат.

Смета затрат на реализацию мероприятий приведена в таблице:

Таблица 17 – Смета затрат

Наименование затрат и работ	Количество единиц	Стоимость единицы, тыс. руб.	Общая стоимость
Сопла третичного дутья	4	400	1 600
Монтаж сопел третичного дутья	1	1 200	1 200
Дутьевой вентилятор	1	500	500
Итого			3 300

Исходные данные приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Исходные данные

Показатель	Единица измерения	Условное обозначение	Значение показателя
Единовременные затраты на проведение мероприятия		K_m	3 300
Норматив платы за выброс загрязняющих веществ в атмосферу: Двуокись азота	руб/т	P_{NO_2}	138,8
Число часов работы котла в течении года	ч	T_k	6800
Процент налогов и отчислений	%	g	20
Норма амортизации	%	Ha	2

Экономический эффект заключается в экономии денежных средств на сокращении платы за выбросы в результате организации предложенных мероприятий.

Результат расчета платы за выбросы приведены в таблице 19.

Таблица 19

Показатель	Единица измерения	До реконструкции	После реконструкции
Коэффициент экологической ситуации		1,68	1,68
Коэффициент индексации платы за выбросы		2,45	2,45
Массовый выброс двуокиси азота	г/с	69,9	52,04

Продолжение таблицы 19

Масса выбросов двуокиси азота	т	1 711,15	1 282,75
Плата за выбросы загрязняющих веществ: Двуокись азота	тыс. руб.	977,58	732,84
Уменьшение платы за выбросы	тыс. руб.	244,75	

В таблице ниже приведен расчет показателей коммерческой эффективности проекта.

Таблица 20 – Показатели коммерческой эффективности инвестиций в проект

Показатели по проекту	Значение
Чистый дисконтированный доход (NPV) за 15 лет, млн. руб	786,5
Внутренняя норма доходности (IRR), %	1
Дисконтированный индекс доходности (DPI), доли	1,09
Дисконтированный срок окупаемости (DPP), лет	11,8

Таблица 21 – Денежные потоки и критерии эффективности инвестиционного проекта

Год	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Стоимость сэкономленных средств, тыс. руб.	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75
Годовой прирост балансовой прибыли, тыс. руб	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75	178,75
Амортизация, тыс. руб	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
Налоги, тыс. руб	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75
Чистая прибыль, тыс. руб	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143
Единовременные затраты, тыс. руб	-3300	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Чистый денежный поток, тыс.руб	-3300	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75
Чистый денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб	-3300	-3055,25	-2810,5	-2565,7	-2321	-2076,2	-1831,	-1586,7	-1342	-1097,2	-852,5	-607,75	-363	-118,25	126,5
Дисконтированный денежный поток, тыс.руб	-2640	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75	244,75
Дисконтированный денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб	-2640	-2395,25	-2150,5	-1905,7	-1661	-1416,2	-1172	-926,75	-682	-437,25	-192,5	52,25	297	541,75	786,5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной магистерской диссертации с помощью приведенных теоретических и математических исследований разработан вариант организации ступенчатого сжигания на котельном агрегате БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2, позволяющий уменьшить образование вредных веществ – оксидов азота. Произведена оценка влияния факторов температурного режима в топочной камере и влияние предварительного смесеобразования на образование NO_x .

В ходе работы выполнено:

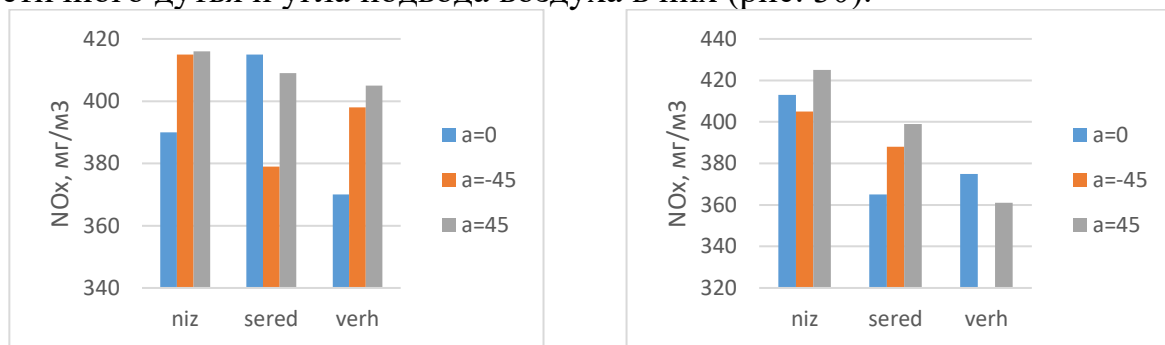
1. Рассмотрены и проанализированы современные методы борьбы на пылеугольных котельных агрегатах с оксидами азота. Рассмотрены технологии по организации ступенчатого сжигания и опыт применения на действующих тепловых станциях России. Среди рассмотренных технологий подобран эффективный и малозатратный способ – двухступенчатое сжигание «OFA (overfire air)».

2. Проанализирован объем и состав выбросов вредных веществ, среди преобладающих и требующих незамедлительного улучшения – оксиды азота. Определены пути их образования. Определено, что значительного уменьшения NO_x можно достичь за счет снижения образования топливных оксидов азота.

3. Рассмотрена методика СО 153-34.02.304-2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций», выявлены ее достоинства и недостатки. Для покрытия недостатков вышенаписанной методики, рассмотрена программное обеспечение ANSYS Fluent.

4. Выполнен ряд расчетно-теоретических исследований. При перераспределении подачи воздуха по высоте топочной камеры достигается снижение NO_x на 4%, при изменении коэффициента избытка воздуха в горелках и организации ступенчатого сжигания – 26%.

5. Разработана математическая модель котельного агрегата. Исследовано влияние образования NO_x в зависимости от расположения сопел третичного дутья и угла подвода воздуха в них (рис. 30).



а) 10% подача воздуха в сопла; б) 15% подача воздуха в сопла

Рисунок 30 – Изменение образование NO_x от изменения угла подвода воздуха

Среди смоделированных вариантов наиболее оптимальный является подвод третичного воздуха в количестве 15% от необходимого для горения с расположением сопел на расстоянии 4,5 м от верхней горелки с подводом воздуха по нормали сопел. При этом происходит снижение концентрации на 16% и составляет 365 мг/м³.

6. Выполнено технико-экономическое обоснование целесообразности применения двухступенчатой технологии сжигания, срок окупаемости за счет снижения платежей за выбросы вредных веществ составляет 11,8 лет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Росляков, П.В., Двойнишников, В.А., и др. Разработка рекомендаций по снижению выбросов оксидов азота для газомазутых котлов ТЭС / П.В. Росляков // Электрические станции. - 1991.
2. Росляков, П.В. Защита атмосферного воздуха от газообразных выбросов: Учеб. пособие по курсу "Методы защиты окружающей среды" / П. В. Росляков, Л. Е. Егорова; Под ред. М. А. Изюмова; Моск. энерг. ин-т (техн. ун-т). - М. : Изд-во МЭИ, 1996. - 71 с.
3. Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды РФ за 2018г;
4. Уменьшение выбросов вредных веществ при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ с применением технологии «Overfire Air». Теплофизика и аэромеханика, 2016, том 23, № 1;
5. Серант Ф.А., Квривишвили А.Р., Гордеев В.В., и др. Реконструкция котла П-57-3М энергоблока 500МВт Экибастузской ГРЭС-1 с переводом на двухступенчатое сжигание экибастузского угля. Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива». 2012г
6. Абрамов, А. И. Повышение экологической безопасности ТЭС : Учеб. Пособие / А.И Абрамов, Д. П Елизаров., А. Н. Ремезов и др., Под. ред А. С. Седлова. – М. : Издательство МЭИ, 2001 – 378 с.
7. Росляков, П.В. Современные воздухоохраные технологии на тепловых электростанциях (обзор) / П. В. Росляков // Теплоэнергетика. - 2017. -№10;
8. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Под ред. Н. В. Кузнецова и др., М., «Энергия», 1973;
9. Changdong Sheng, Behdad Moghtaderi, Rajender Gupta, Terry F. Wall. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverized coal-fired furnace // Fuel, No. 83, 2004. P. 1543—1552.
10. Numerical study of a 350MWe tangentially fired pulverized coal furnace of the As Pontes Power Plant / Constenla I., Ferrín J.L., Saavedra L. // Fuel Processing Technology, 2013. – Vol. 116. – P. 189–200;
11. Numerical investigation Greek lignite/cardoon cofiring in tangentially fired furnace / Karampinis E., Nikolopoulos N., Nikolopoulos A., Grammelis P., Kakaras E. // Applied Energy, 2012. – Vol. 97. – P. 514–524;
12. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды в Красноярском крае в 2018 году» Красноярск, 2019;
13. Липов, Ю. М. Компоновка и тепловой расчет парового котла: Учеб. пособие для вузов/ Ю. М. Липов, Ю. Ф. Самойлов, Т. В. Вленский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 208 с., ил;
14. Каверин, А.А. Исследование факельного сжигания низкосортного твердого топлива угрубленного помола в системе прямоточных турбулентных струй: дис. к.т.н., МЭИ, Москва, 2017.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Визуализация результатов численного моделирования процессов сжигания угля на котле БКЗ-500-140

1. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «низ».

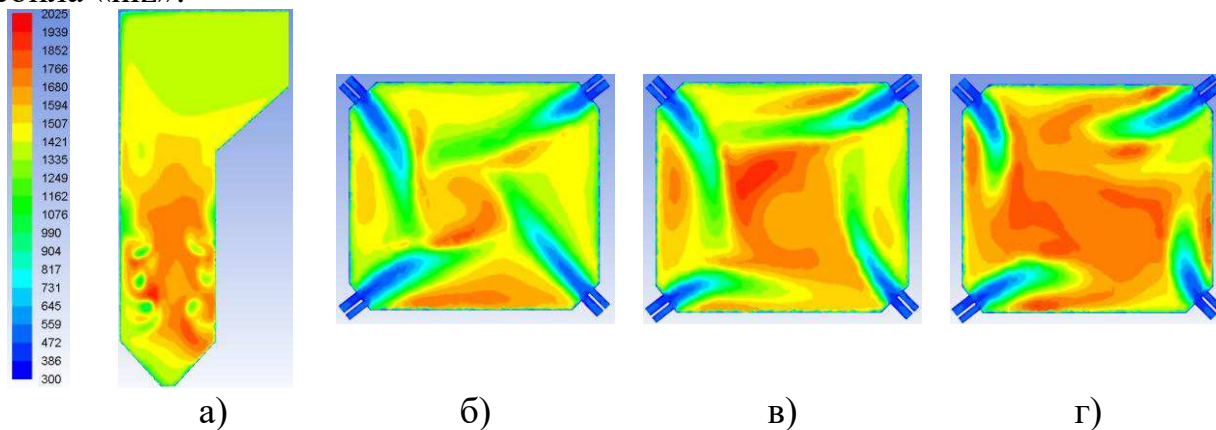


Рисунок А.1- Температурные поля

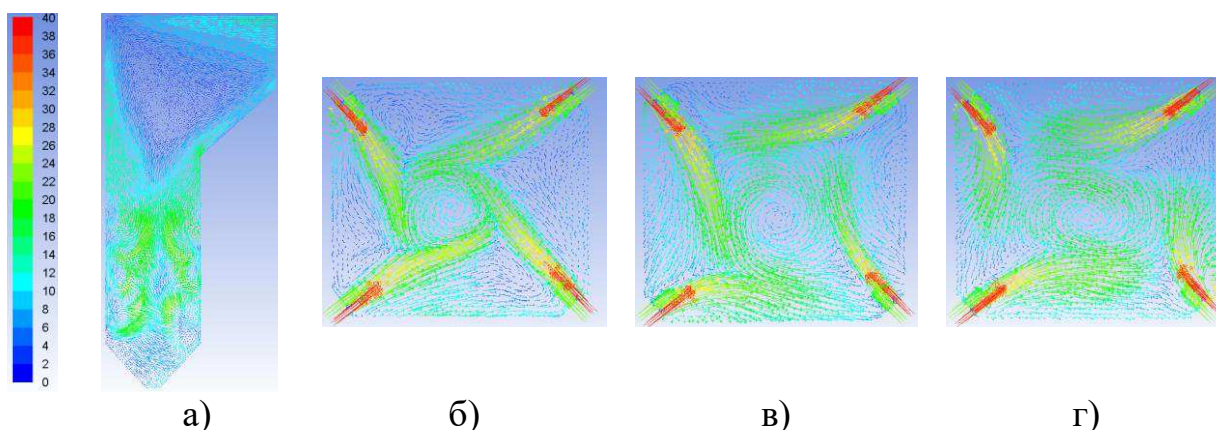


Рисунок А.2 – Векторные скорости

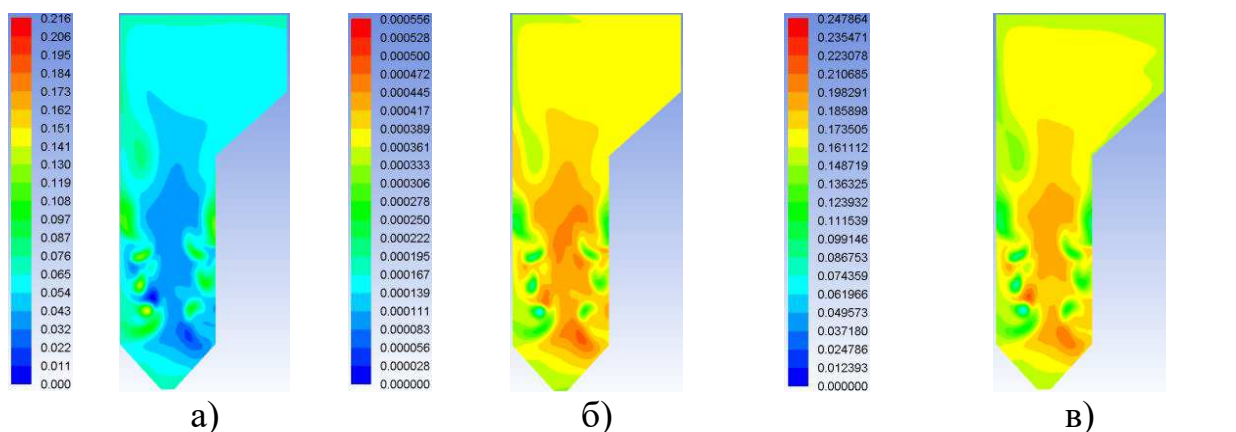
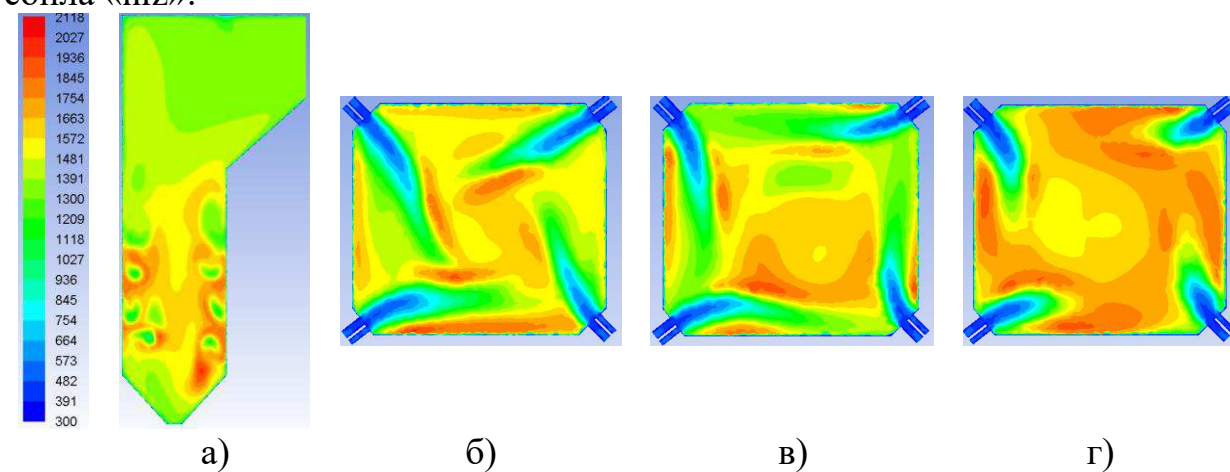


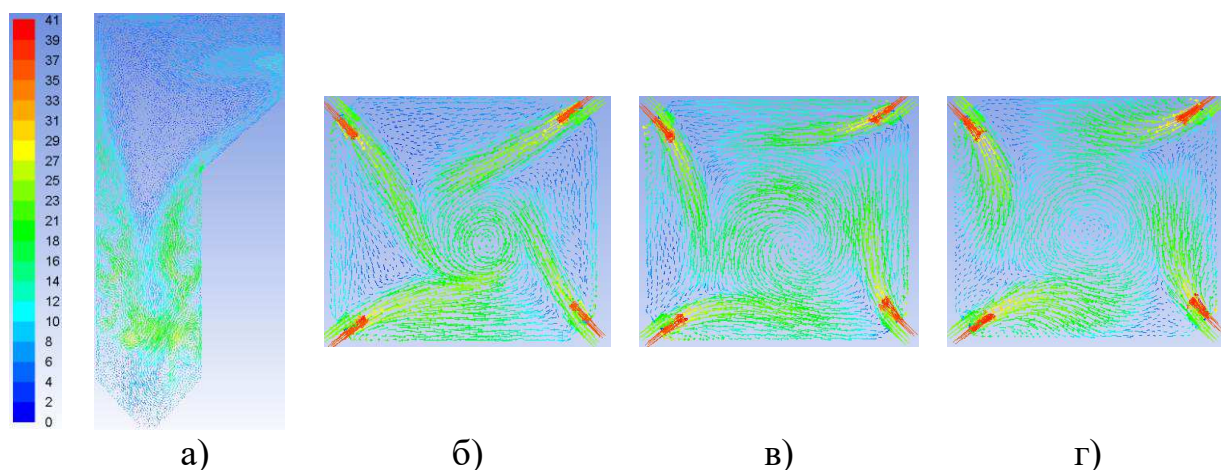
Рисунок А.3 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

2. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «низ».



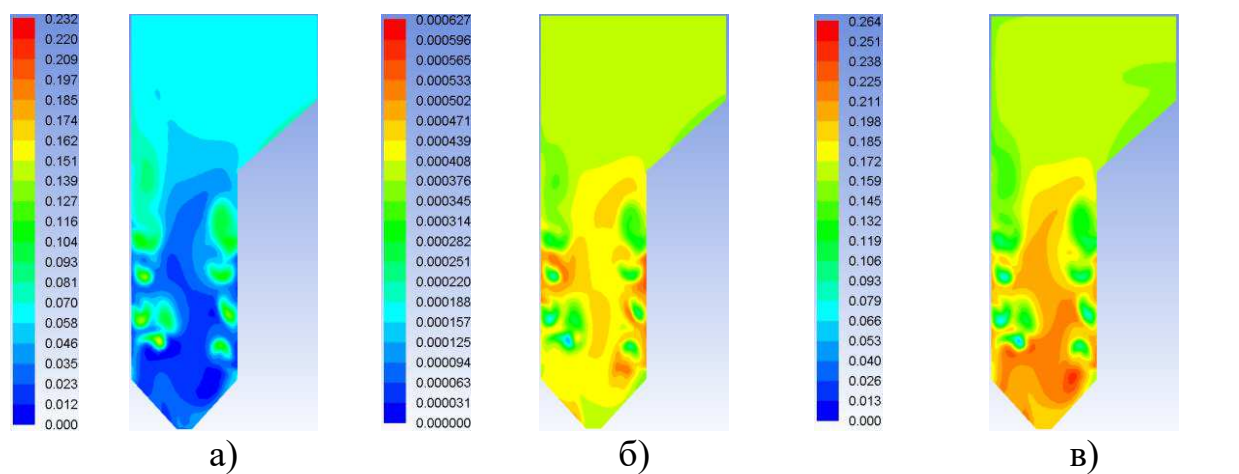
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.4 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.5 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

Рисунок А.6 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

3. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «sered».

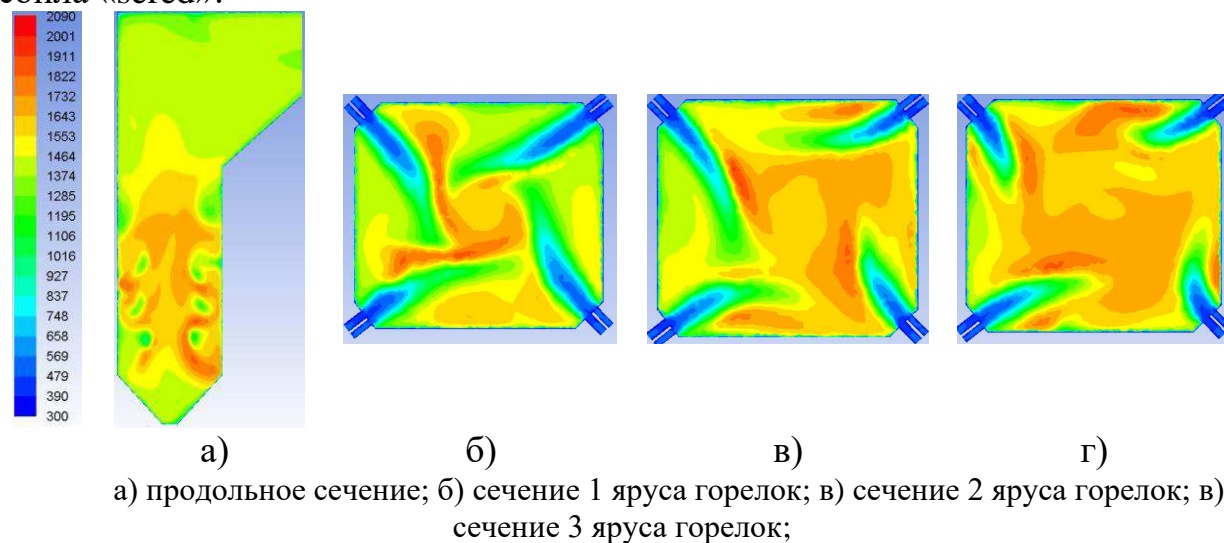


Рисунок А.7 - Температурные поля

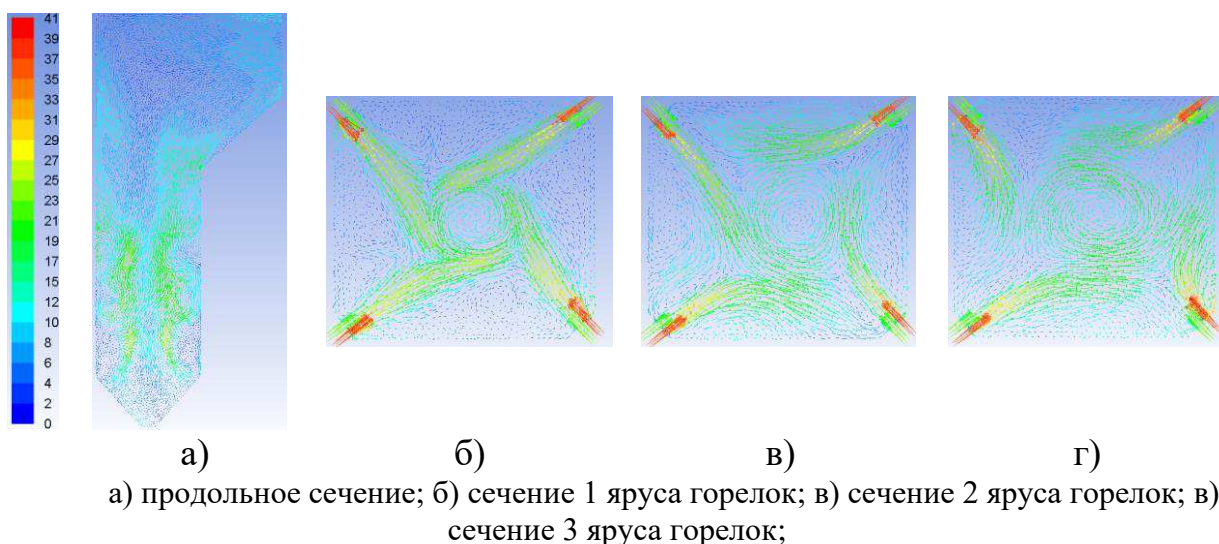


Рисунок А.8 – Векторные скорости

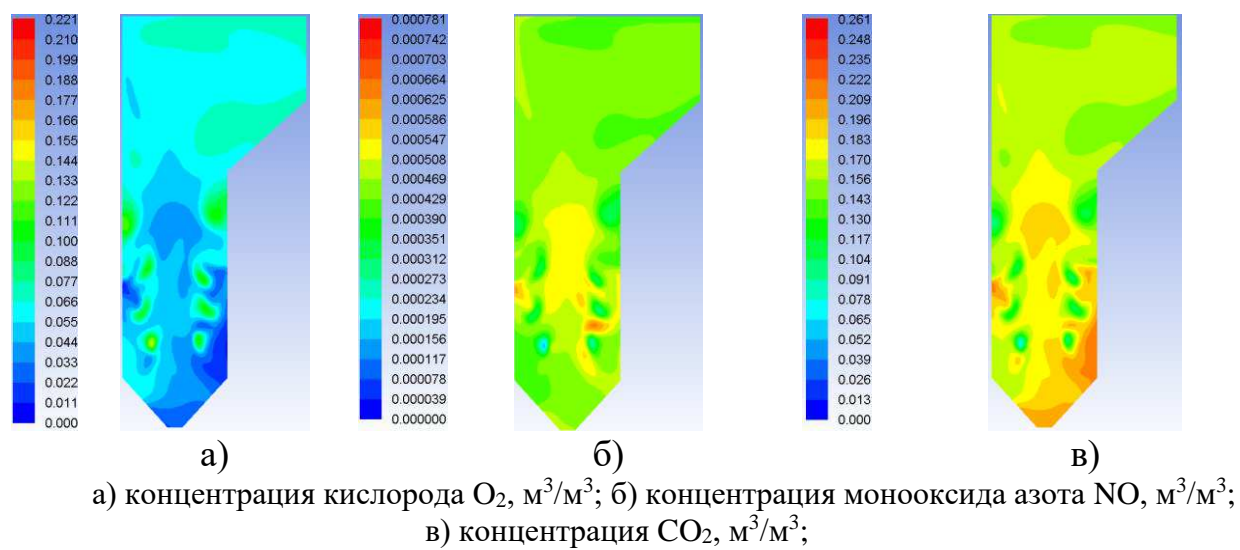


Рисунок А.9 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

4. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «sered».

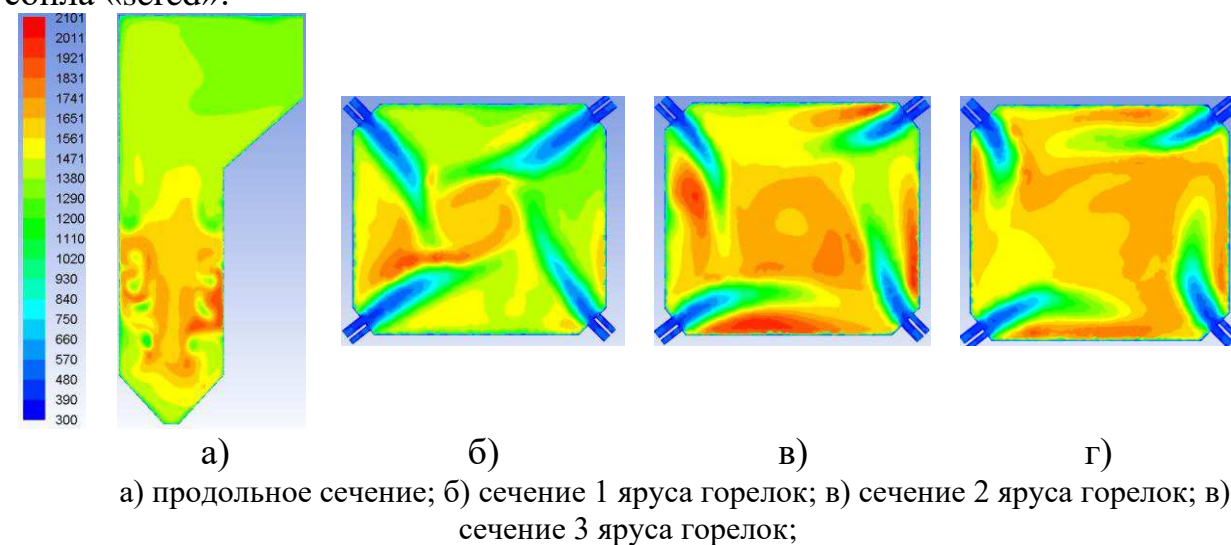


Рисунок А.10 - Температурные поля

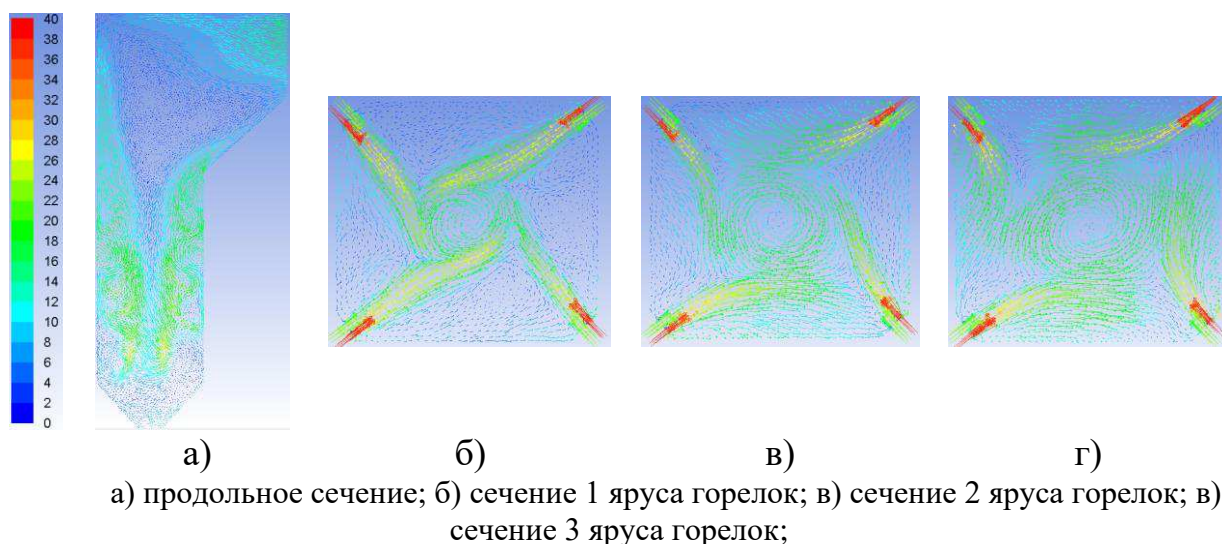


Рисунок А.11 – Векторные скорости

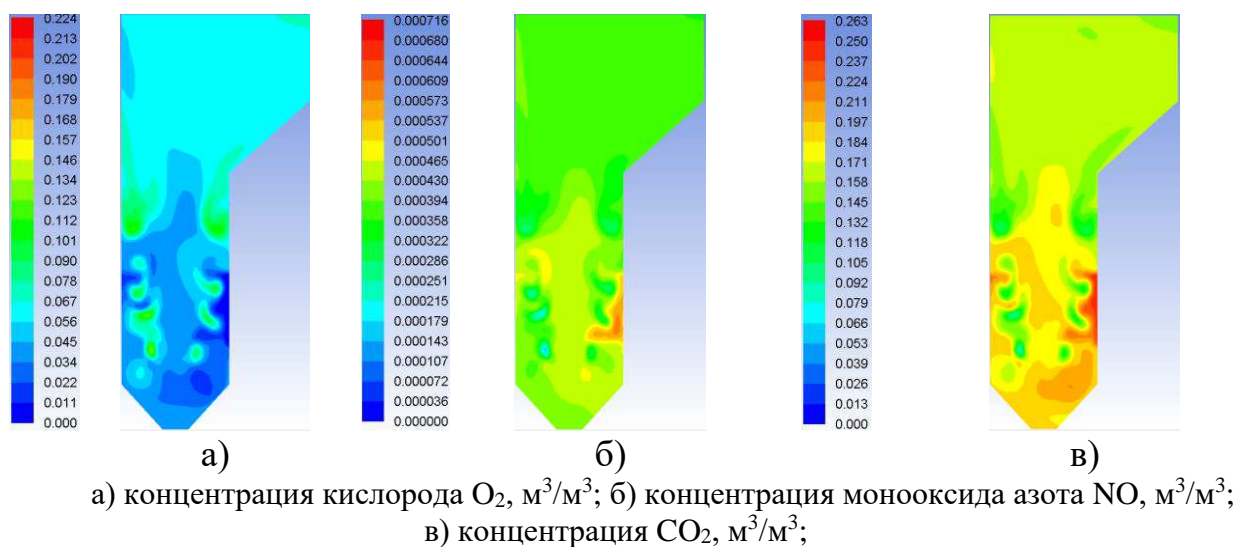


Рисунок А.12 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

5. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «verh».

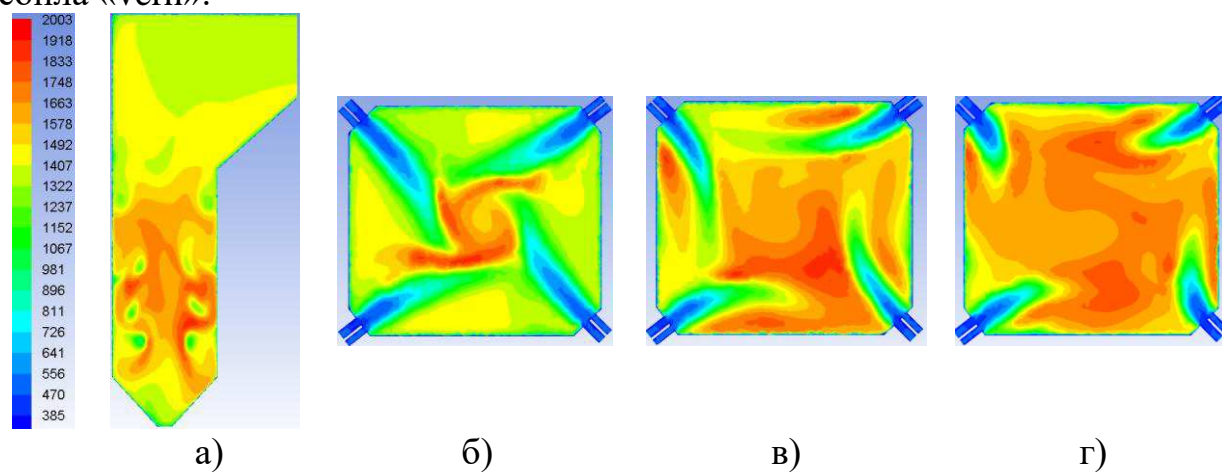


Рисунок А.13 - Температурные поля

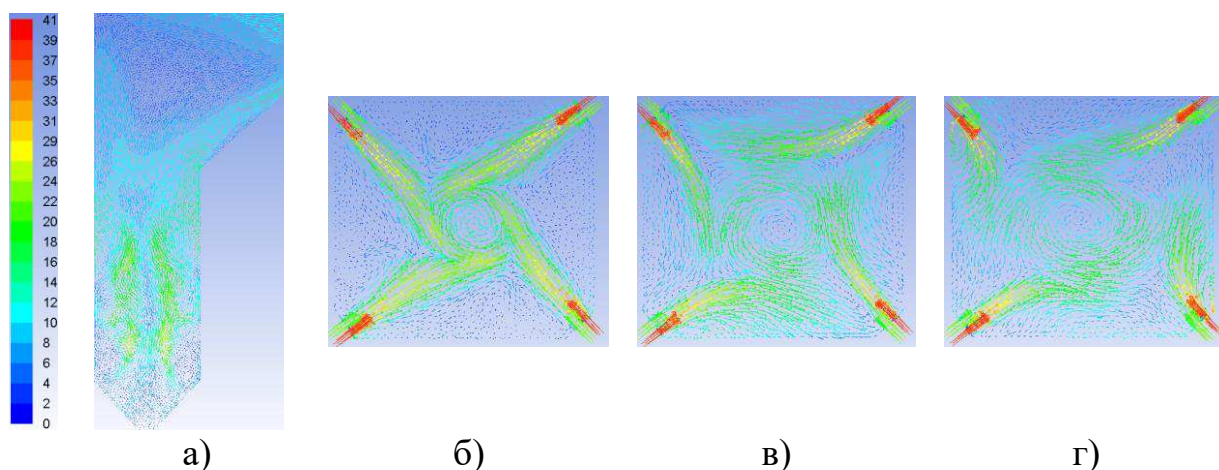


Рисунок А.1431 – Векторные скорости

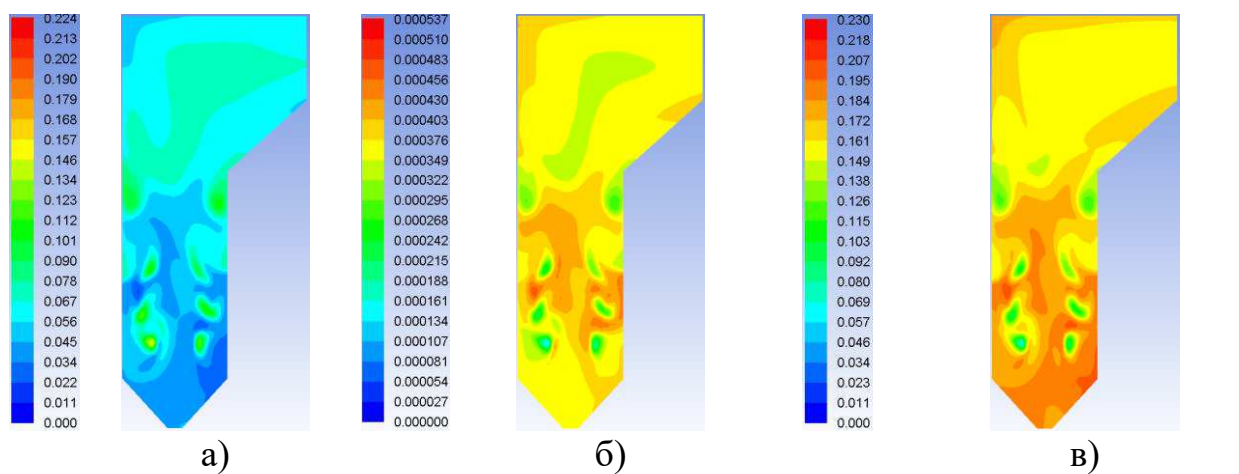
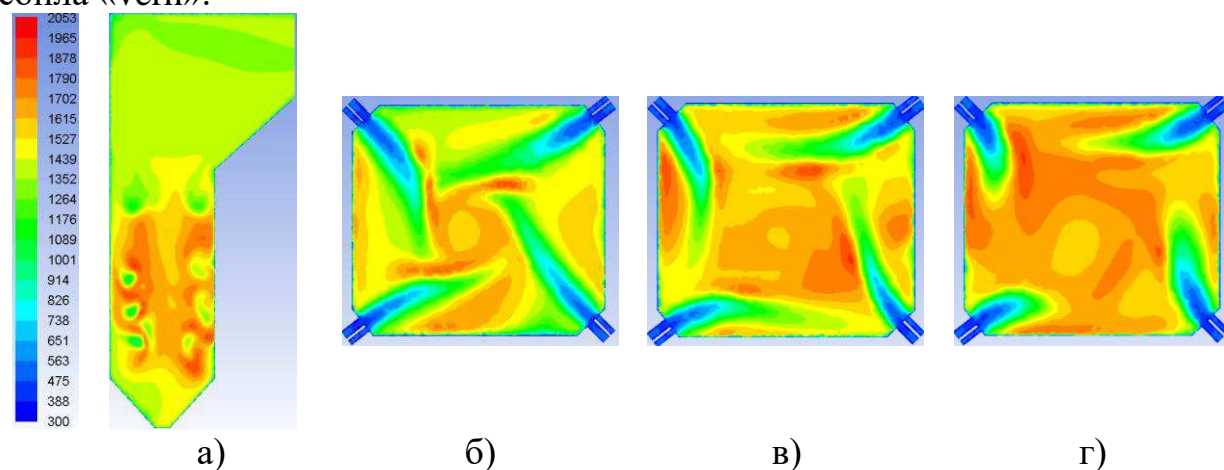


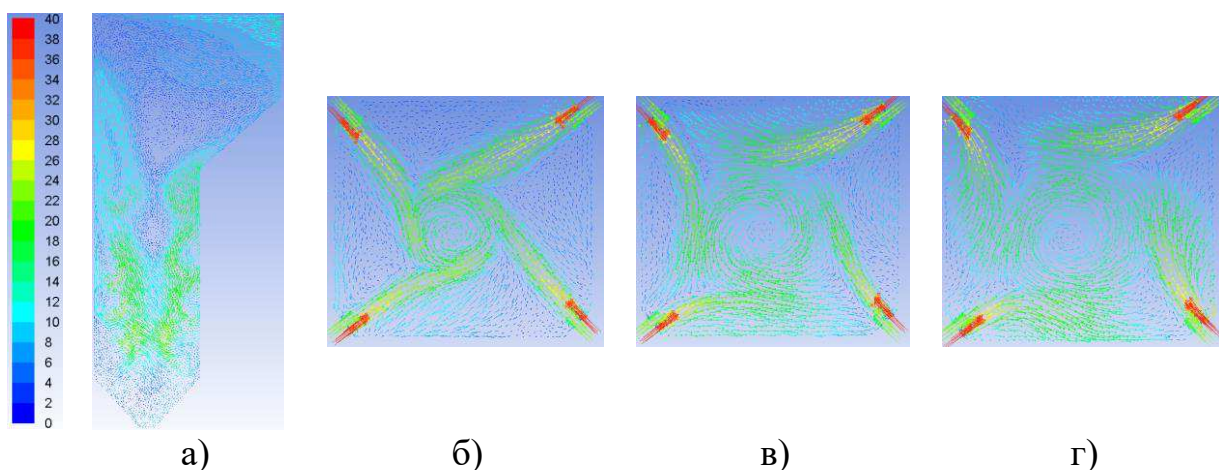
Рисунок А.1532 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

б. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «verh».



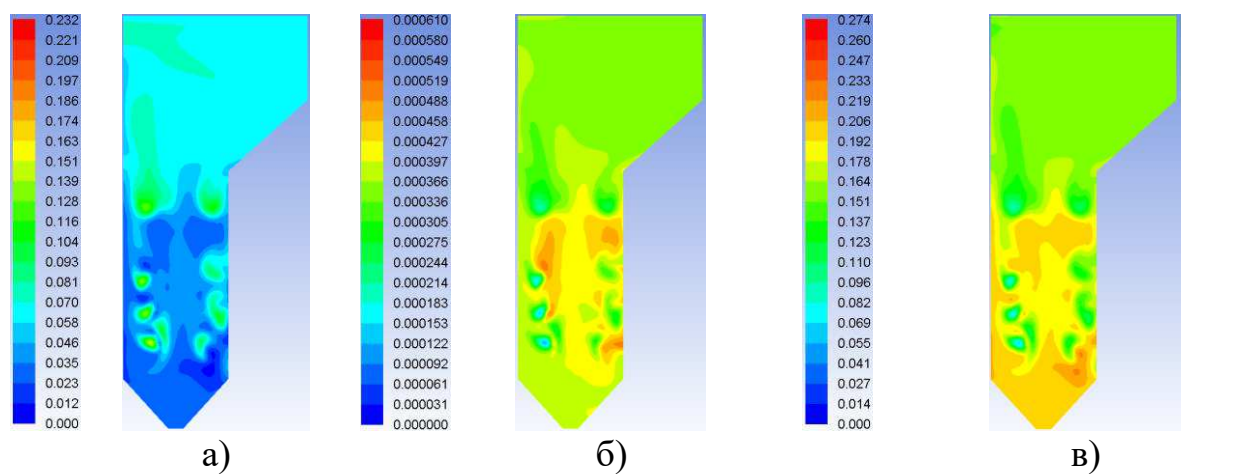
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.16 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.17 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

Рисунок А.18 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

7. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «піз», угол подвода третичного дутья -45°

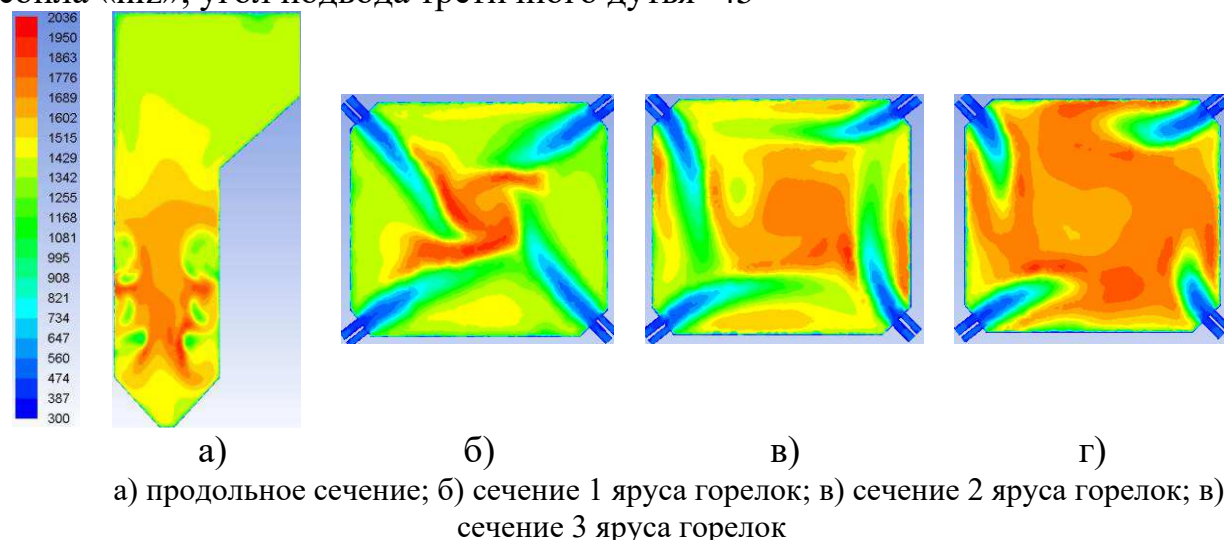


Рисунок А.1933 - Температурные поля

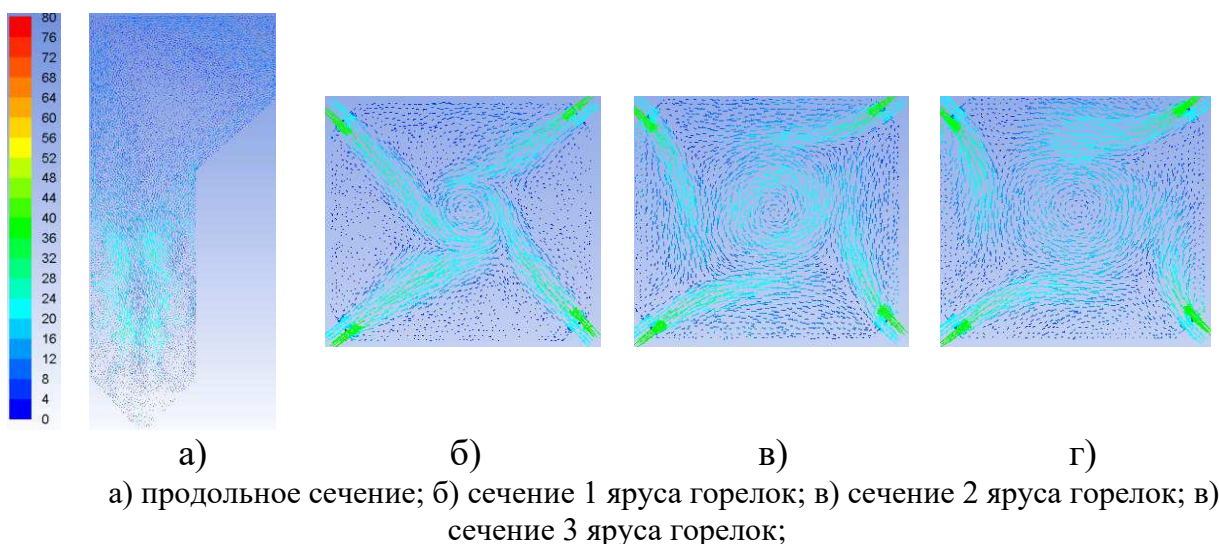


Рисунок А.2034 – Векторные скорости

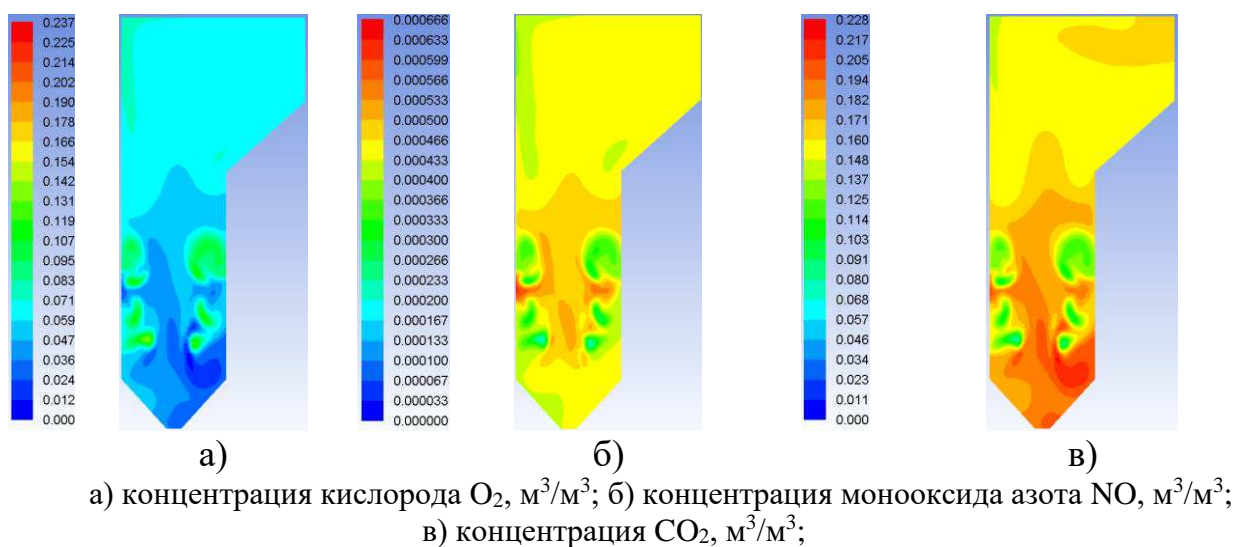
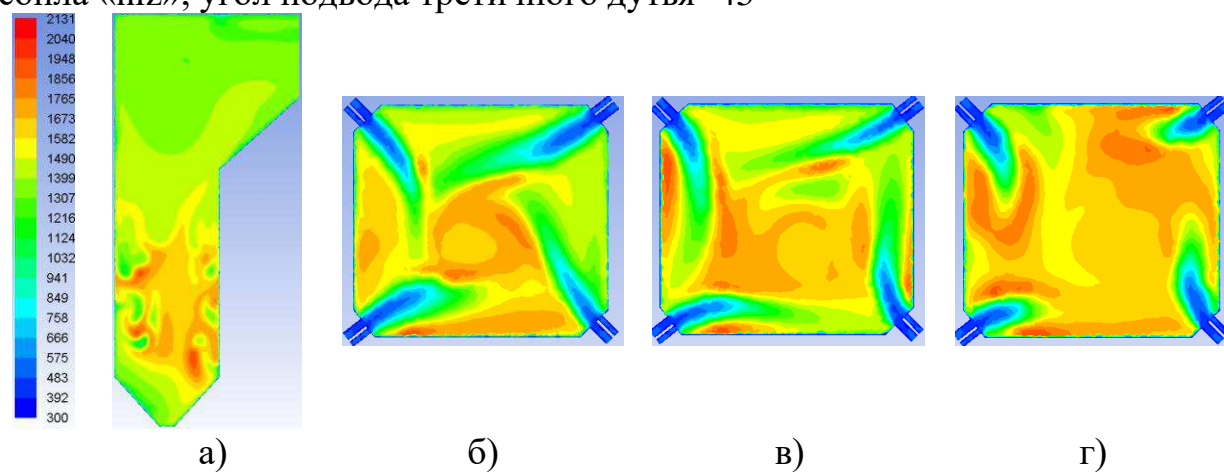


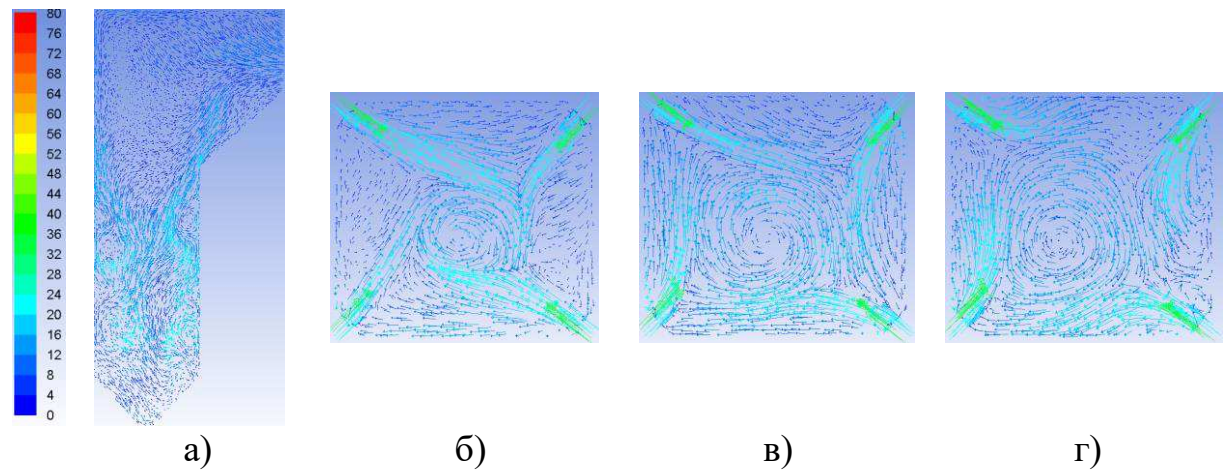
Рисунок А.21 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

8. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «піз», угол подвода третичного дутья -45°



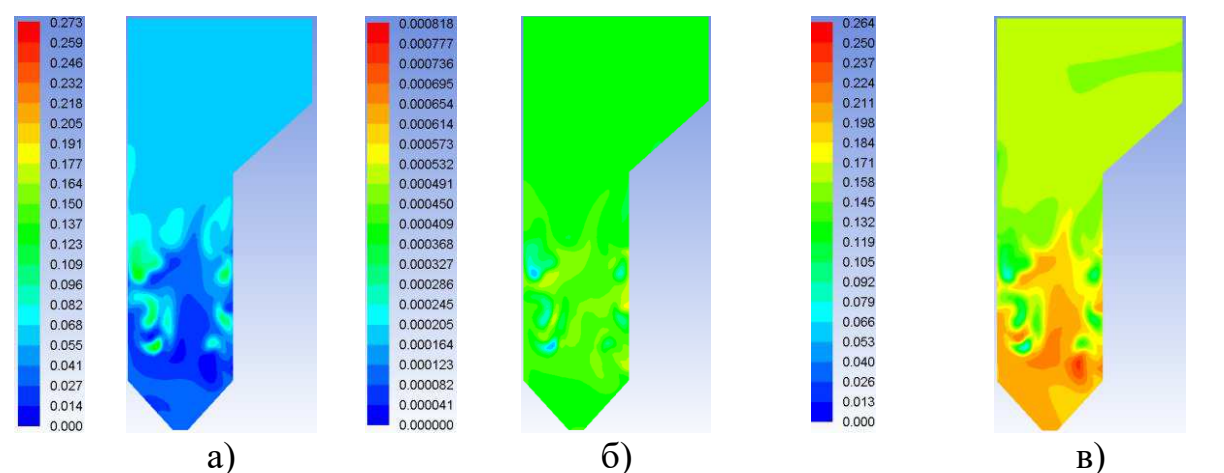
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.22 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

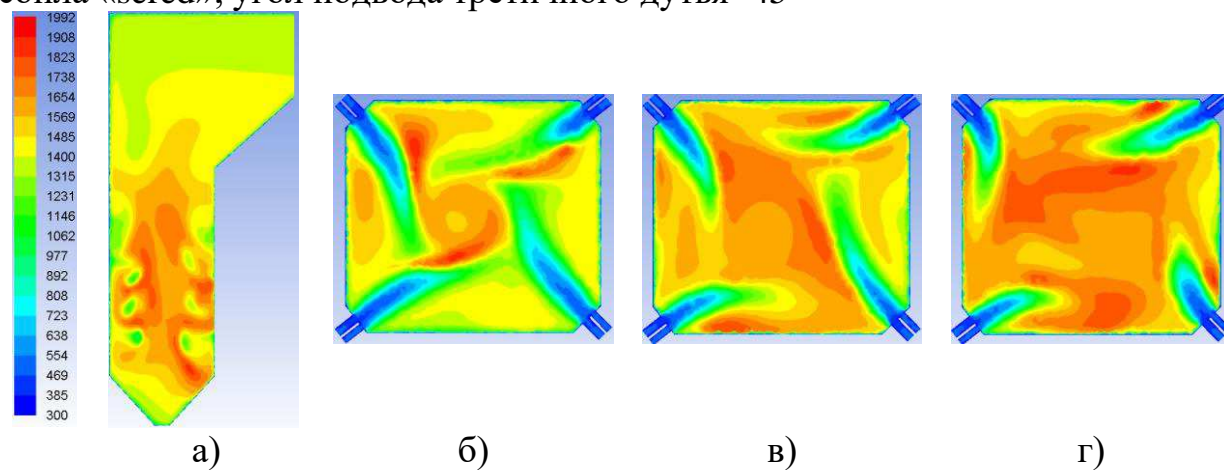
Рисунок А.23 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

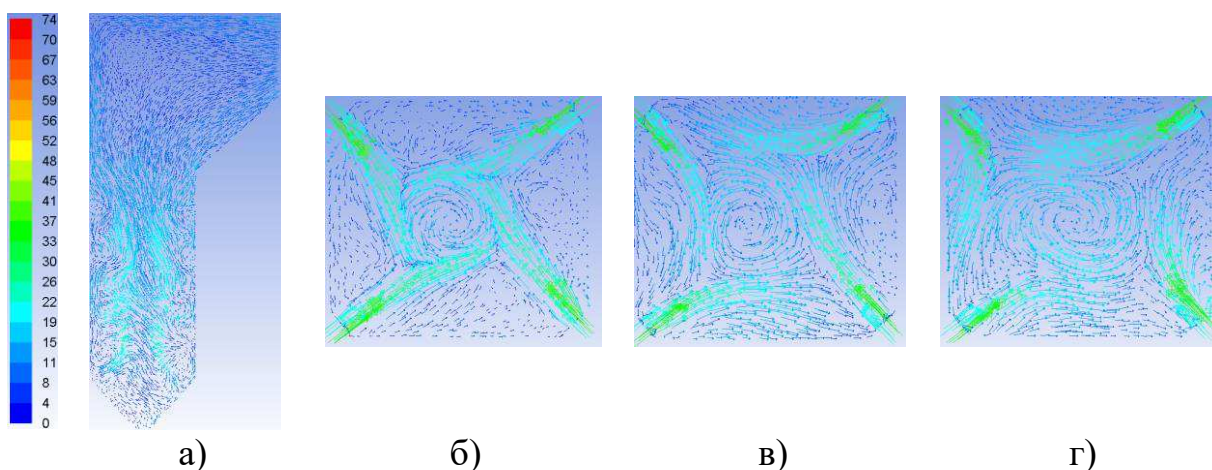
Рисунок А.24 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

9. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «sered», угол подвода третичного дутья -45°



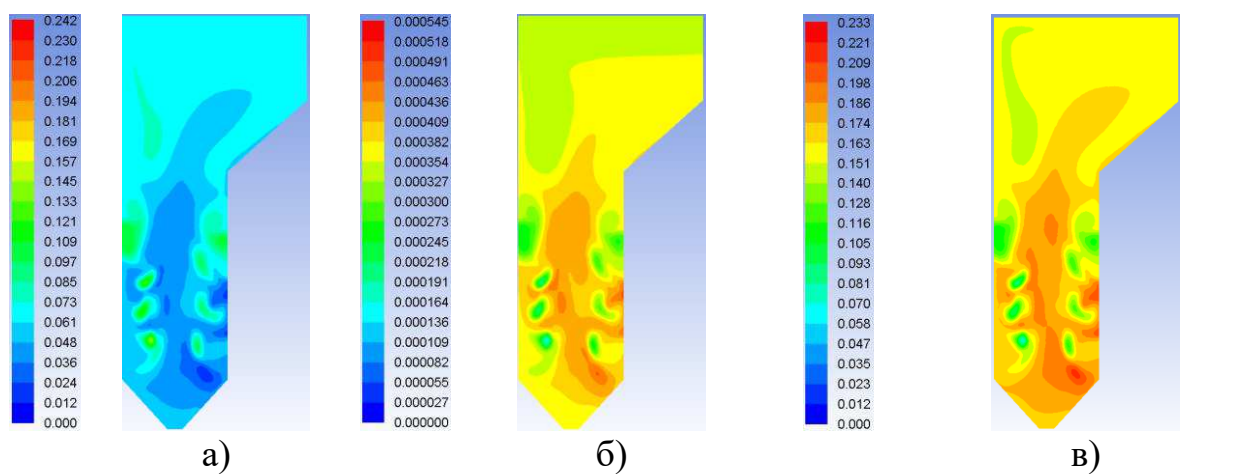
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.2535 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.2636 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

Рисунок А.27 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

10. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «sered», угол подвода третичного дутья -45°

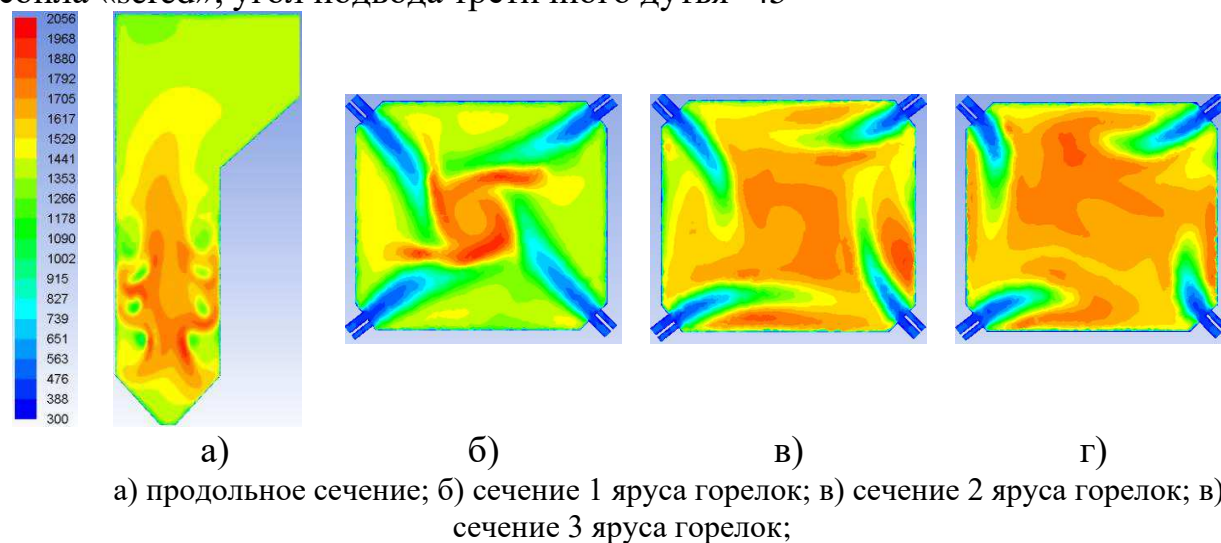


Рисунок А.2837 - Температурные поля

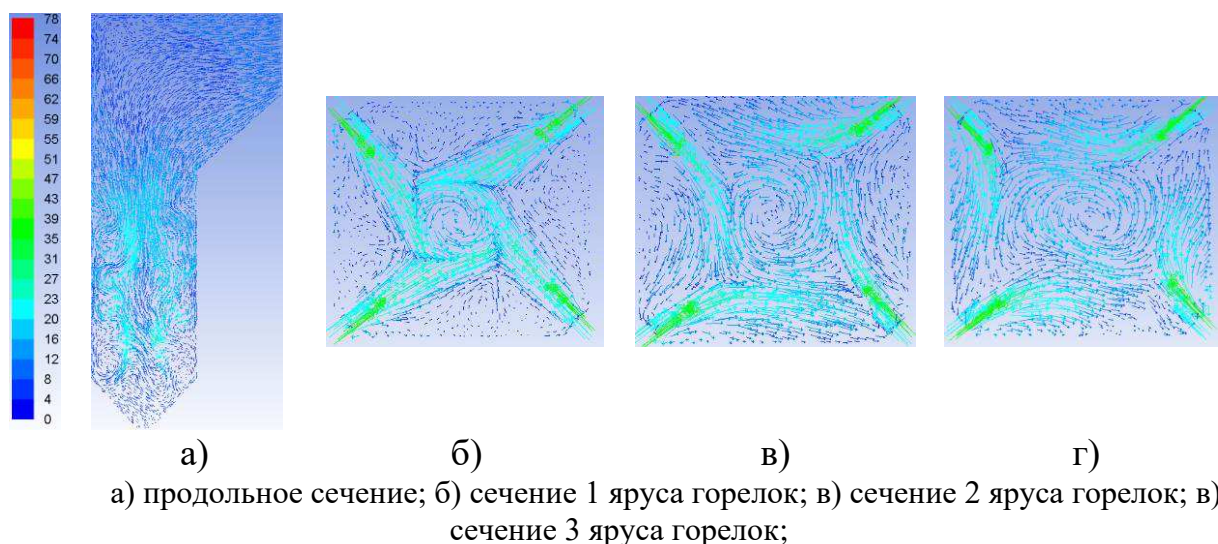


Рисунок А.29 – Векторные скорости

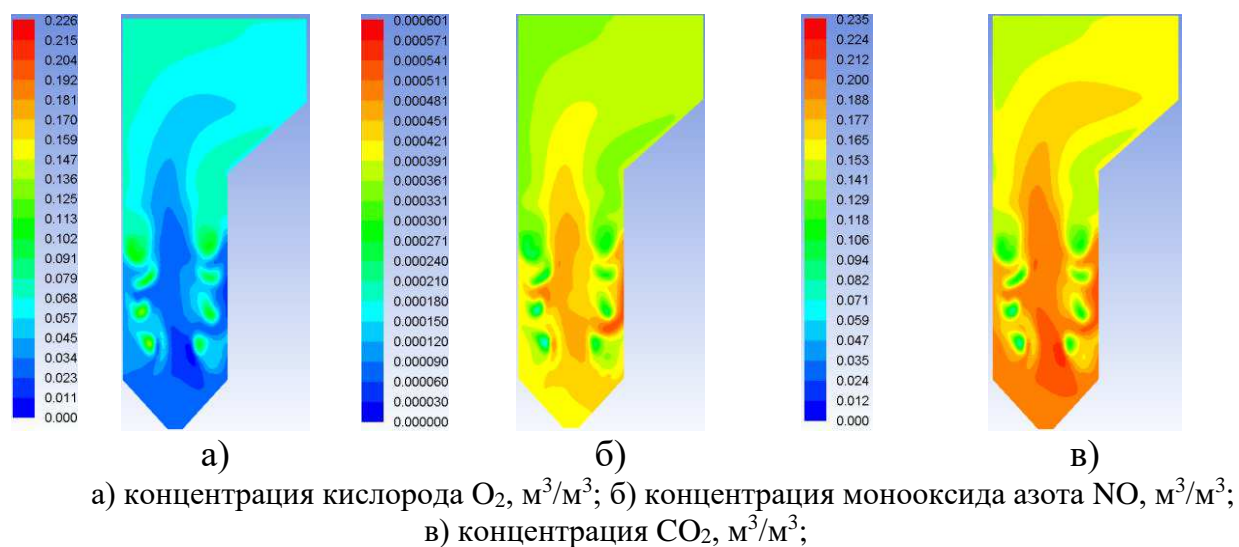
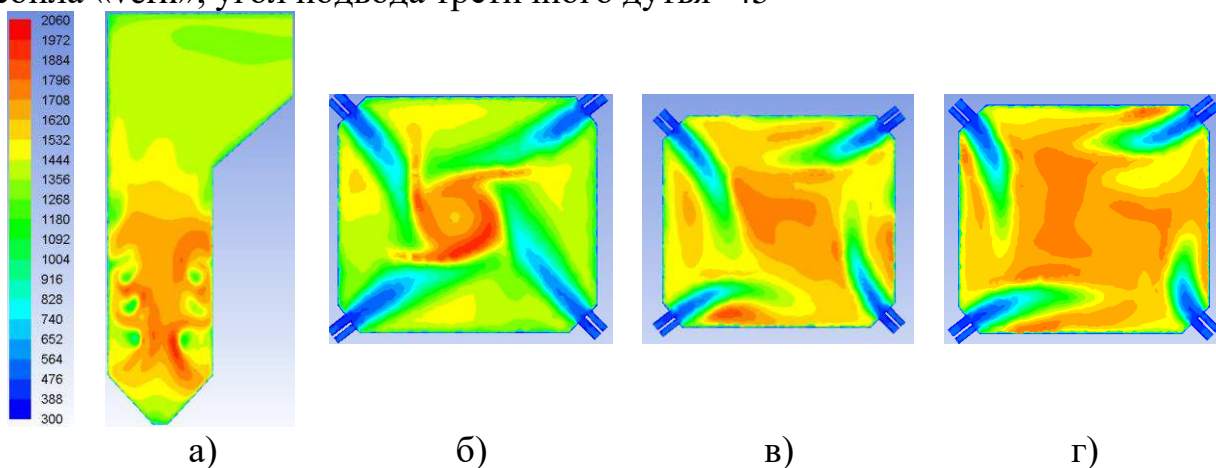


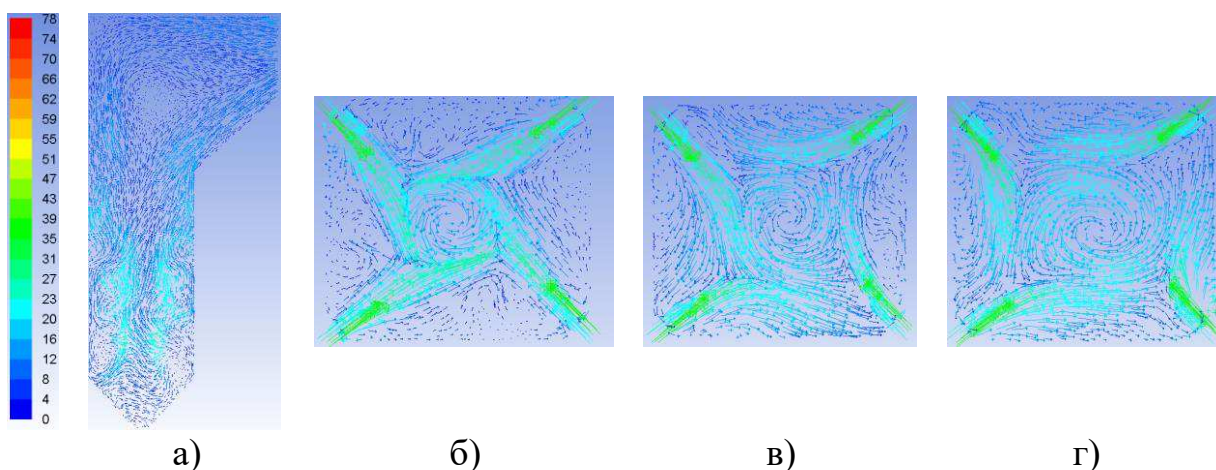
Рисунок А.30 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

11. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «verh», угол подвода третичного дутья -45°



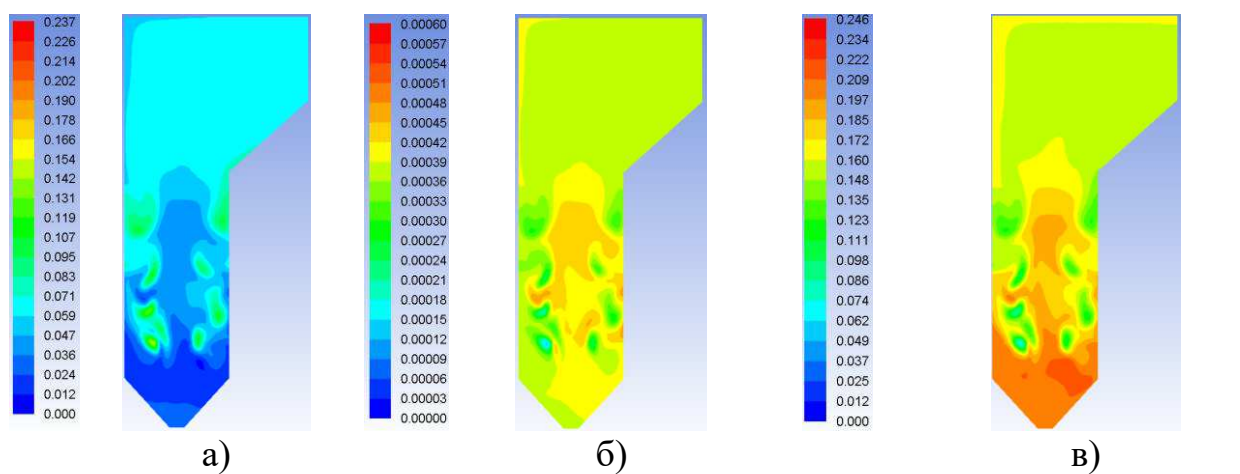
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.31 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.3238 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

Рисунок А.33 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

12. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «verh», угол подвода третичного дутья -45°

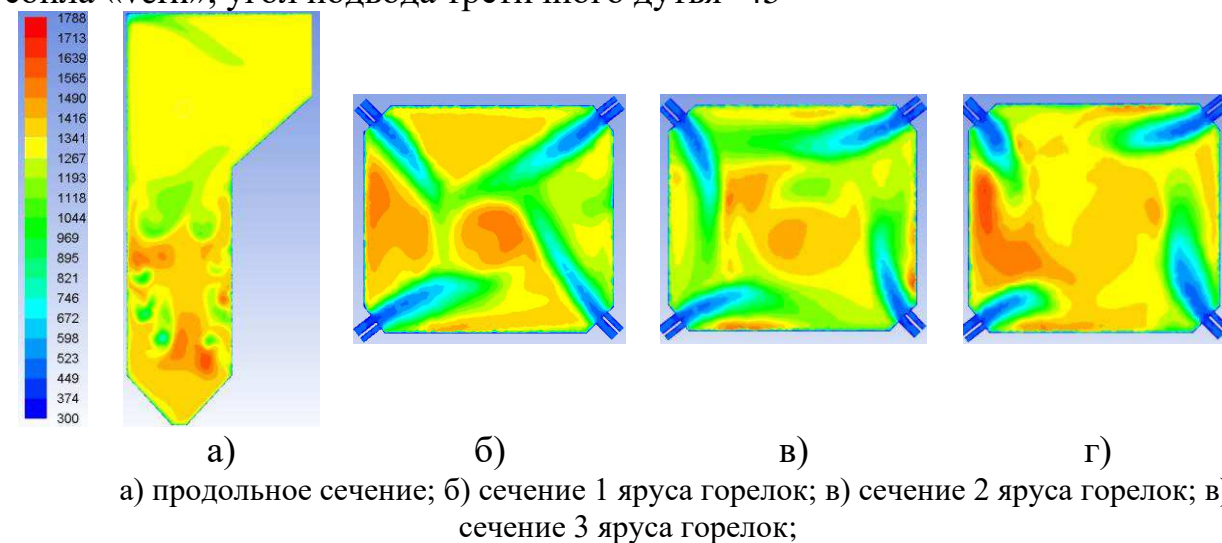


Рисунок А.34 - Температурные поля

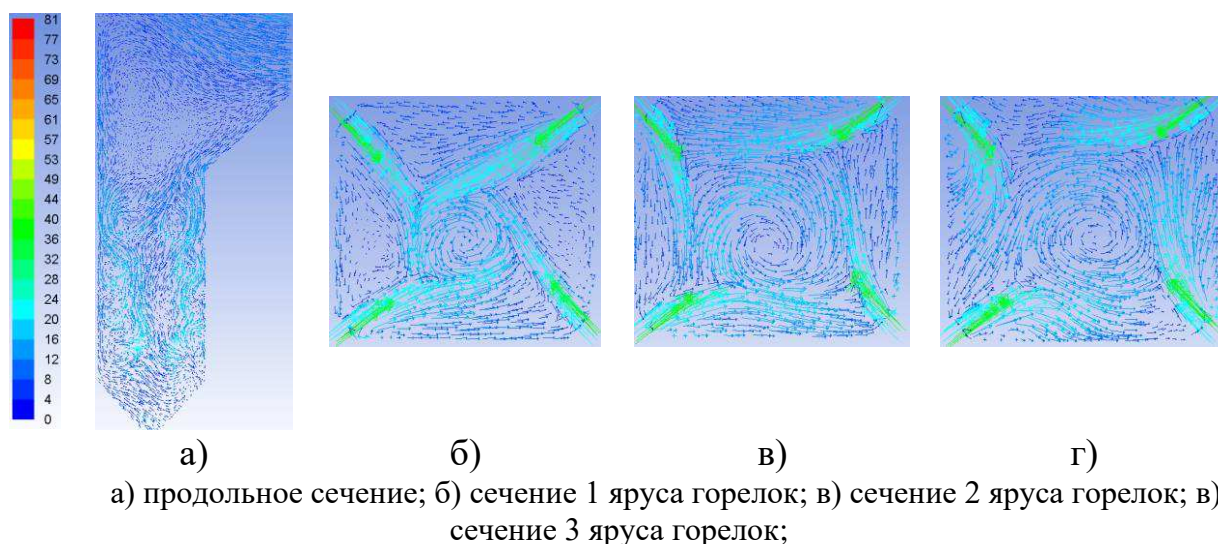


Рисунок А.35 – Векторные скорости

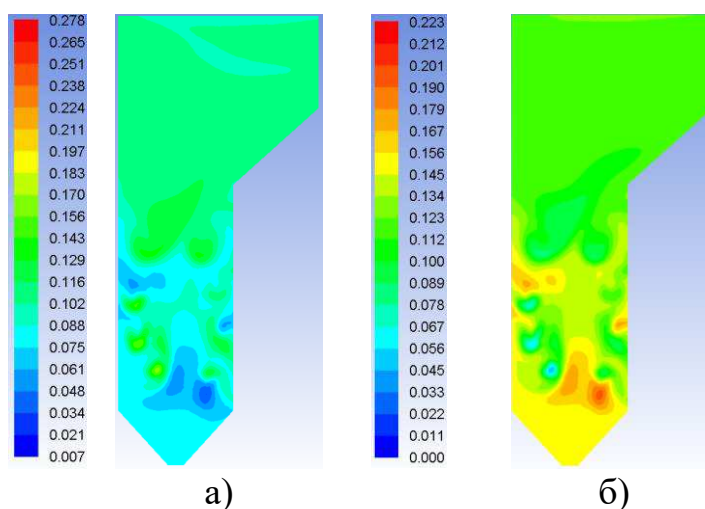
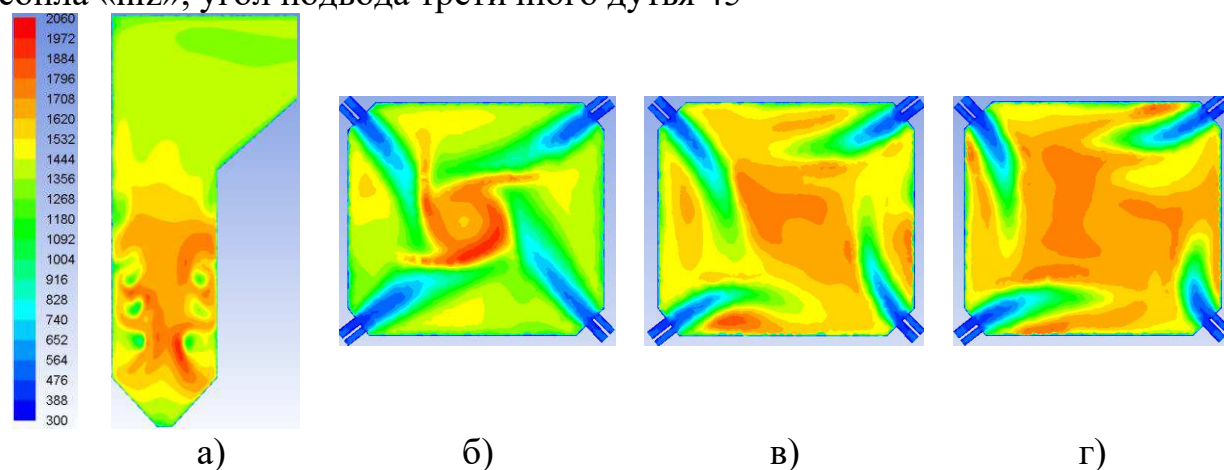


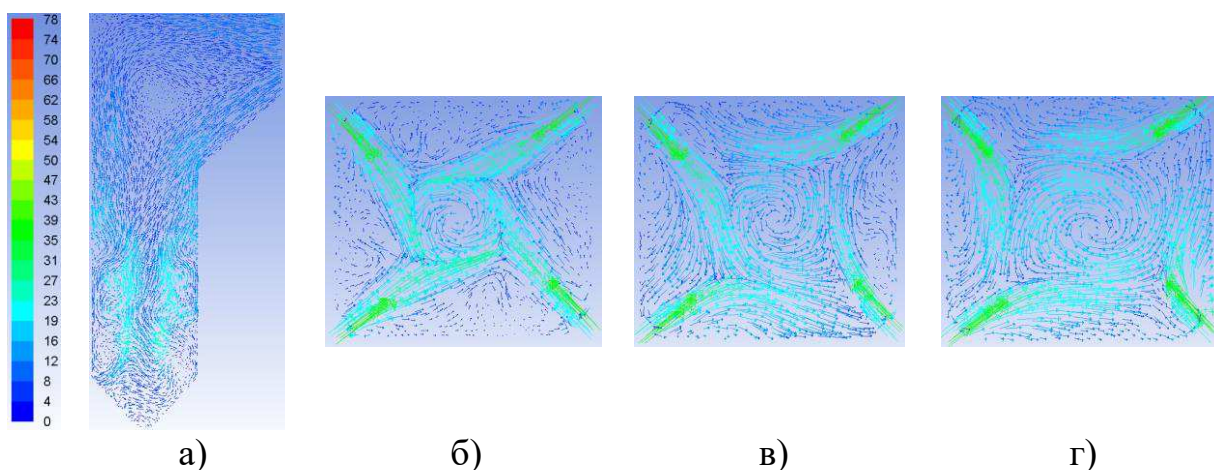
Рисунок А.36 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

13. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «niz», угол подвода третичного дутья 45°



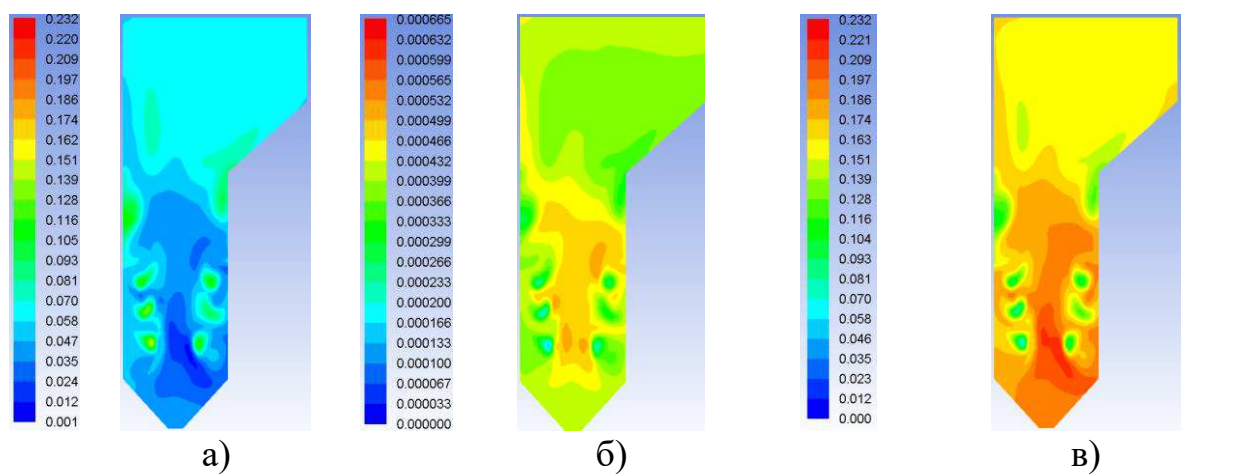
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.37 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

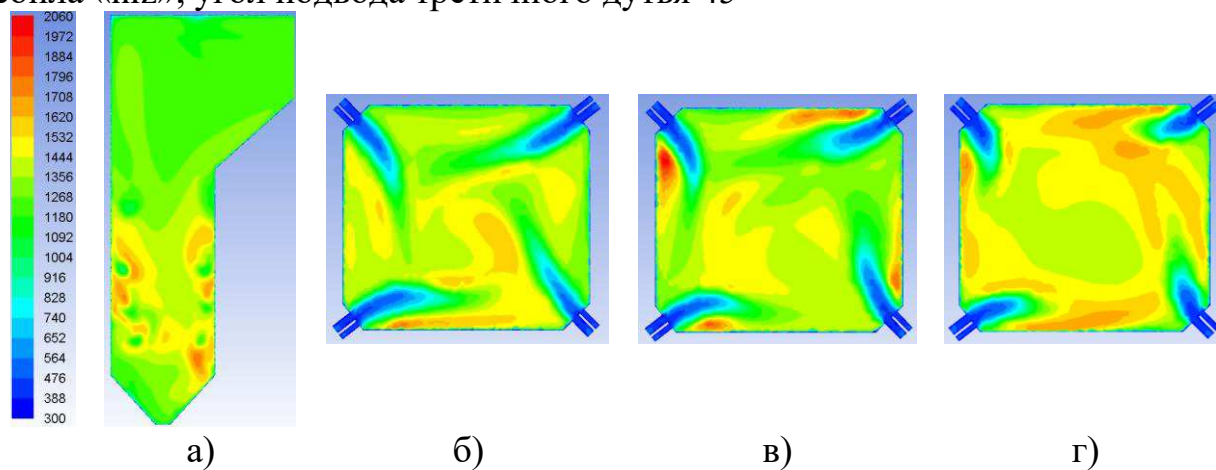
Рисунок А.38 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

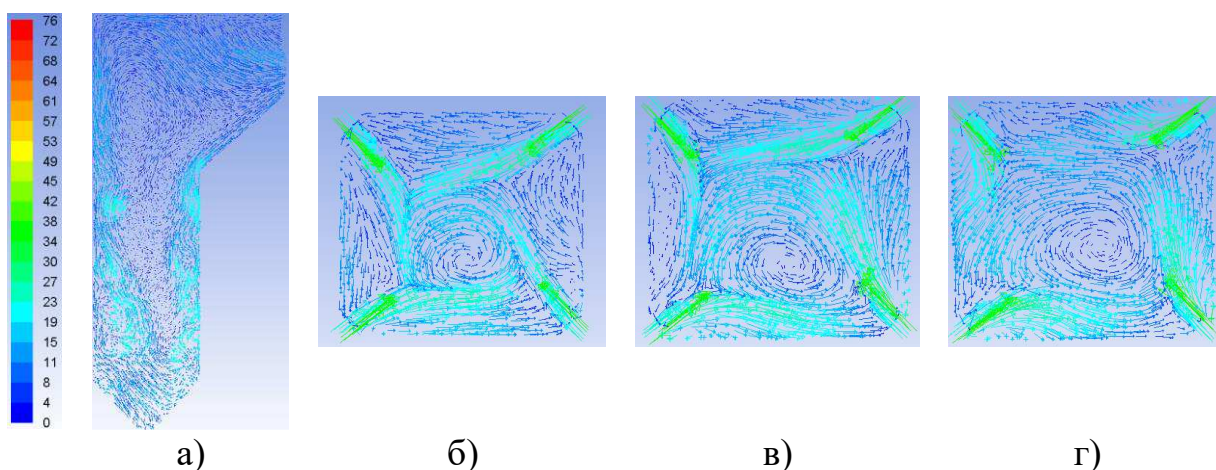
Рисунок А.39 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

14. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «пиз», угол подвода третичного дутья 45°



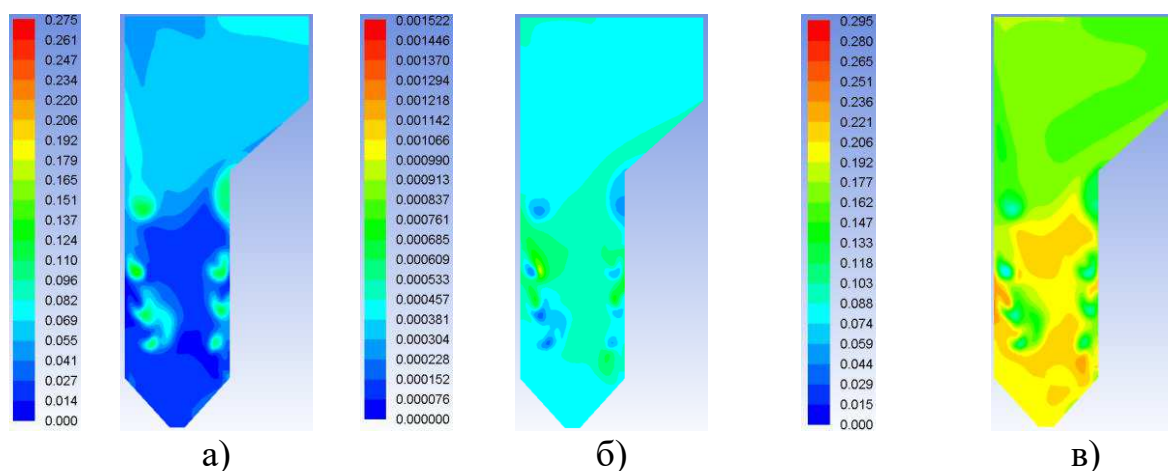
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.40 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

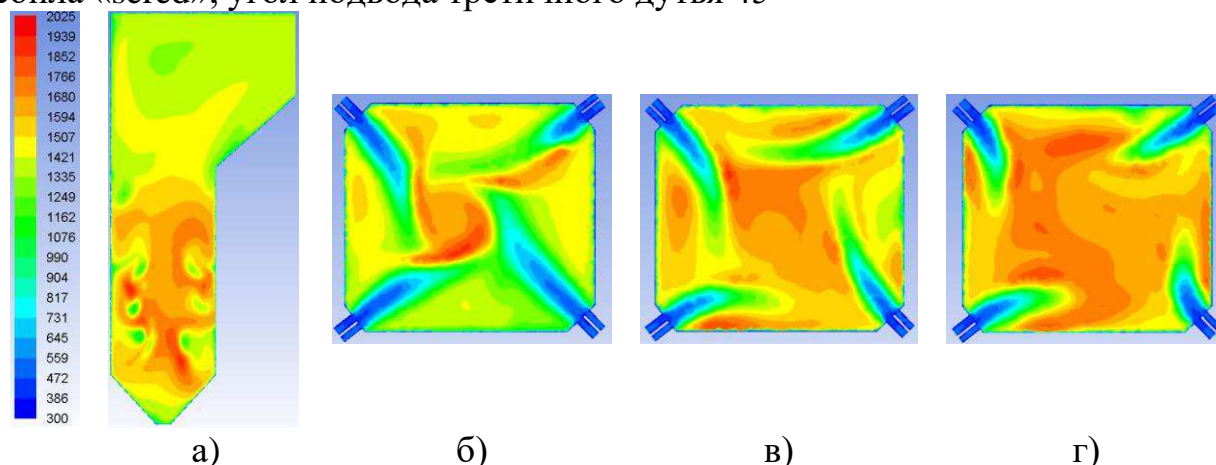
Рисунок А.4139 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

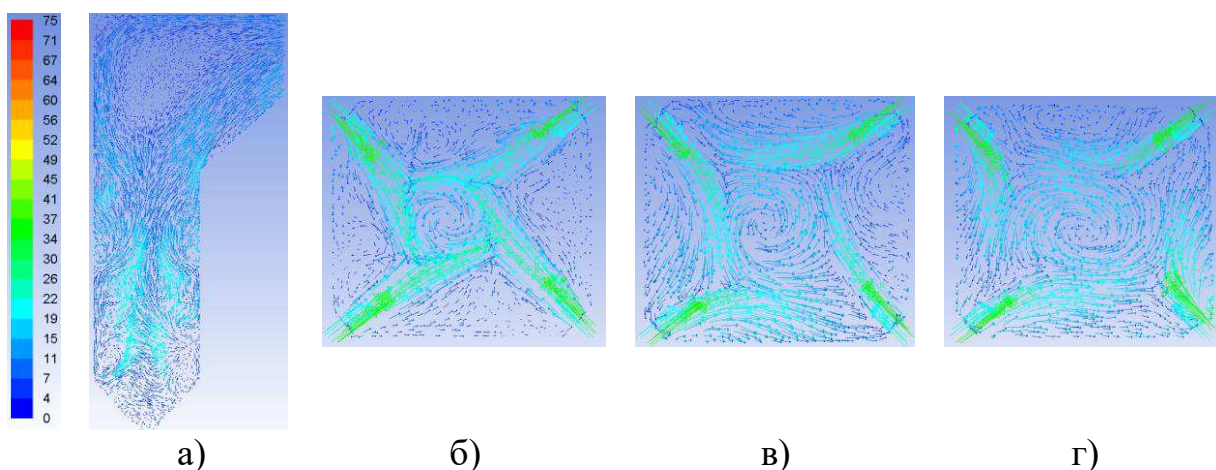
Рисунок А.42 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

15. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «sered», угол подвода третичного дутья 45°



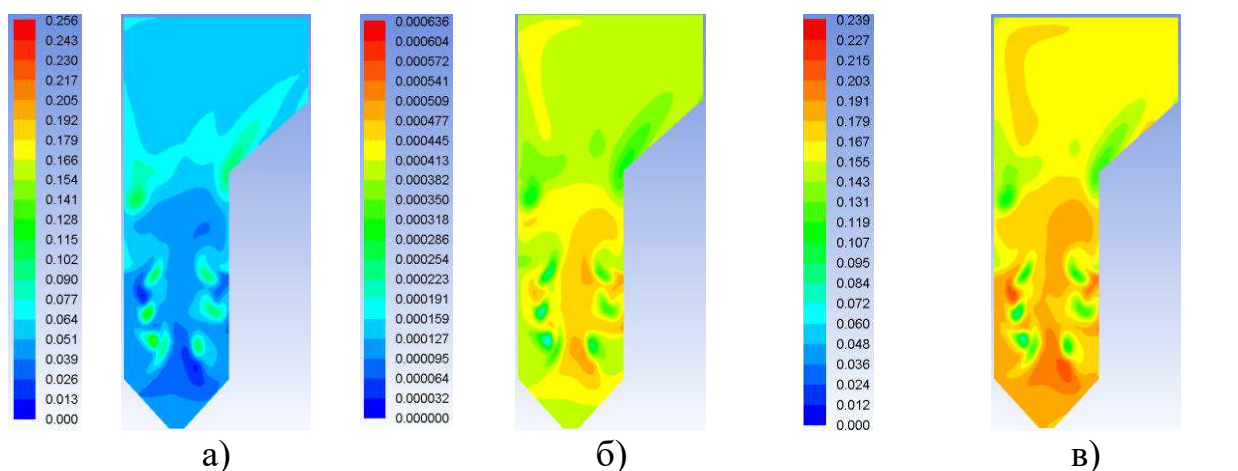
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.43 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.44 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

Рисунок А.45 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

16. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «sered», угол подвода третичного дутья 45°

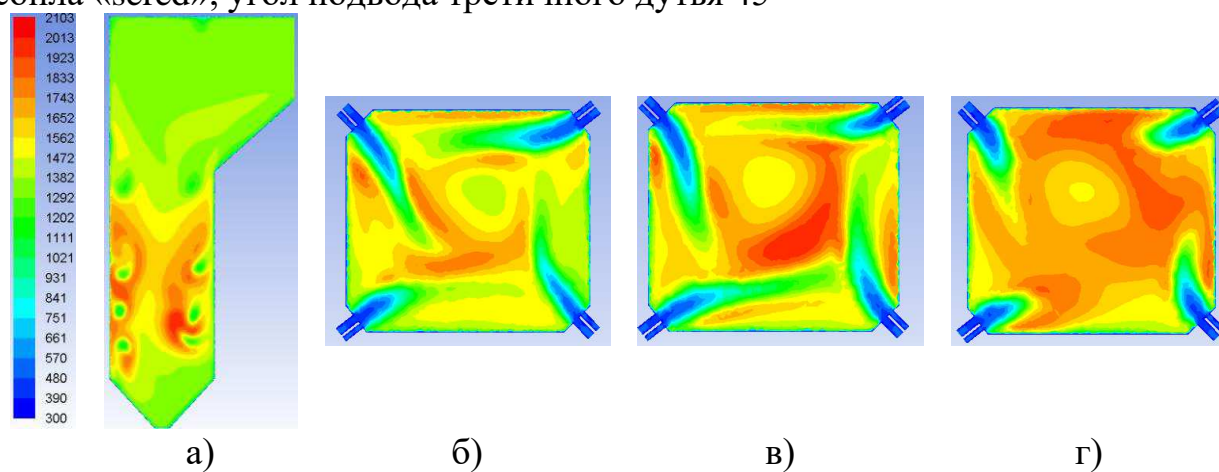


Рисунок А.46 - Температурные поля

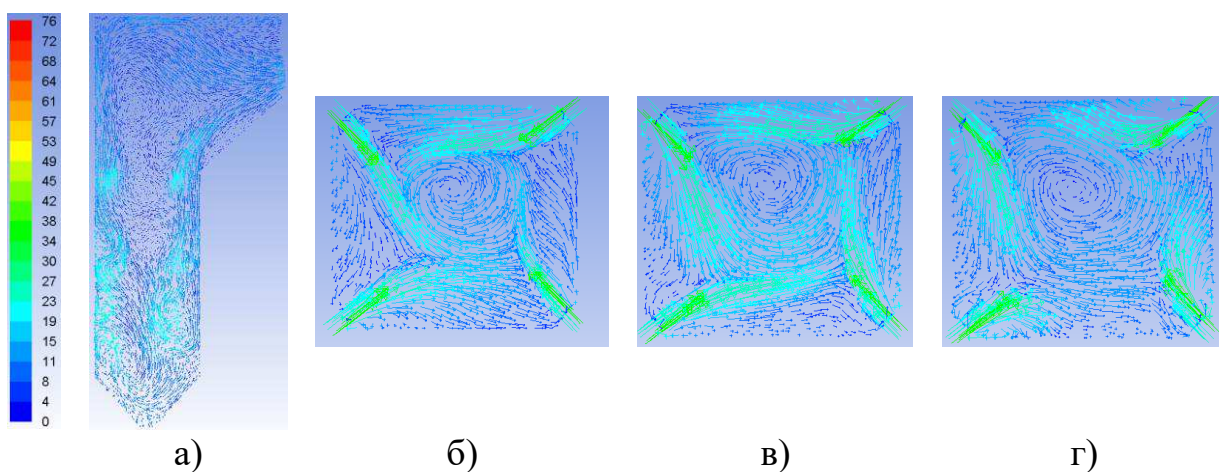


Рисунок А.47 – Векторные скорости

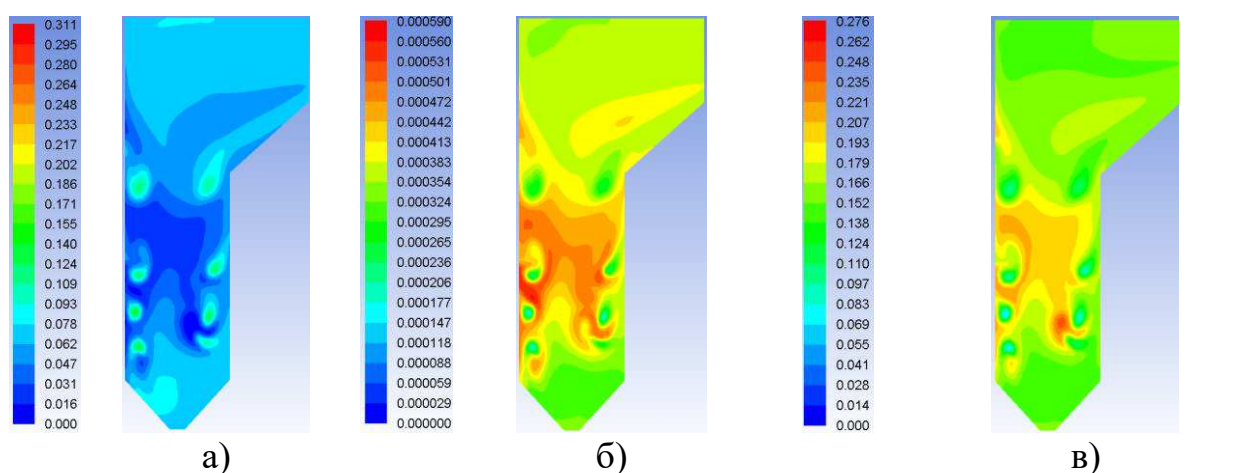
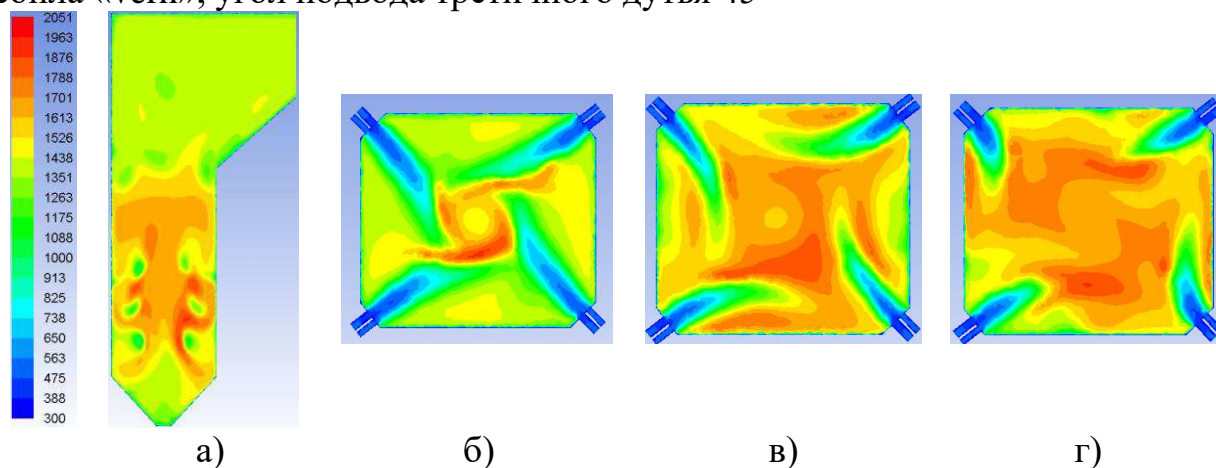


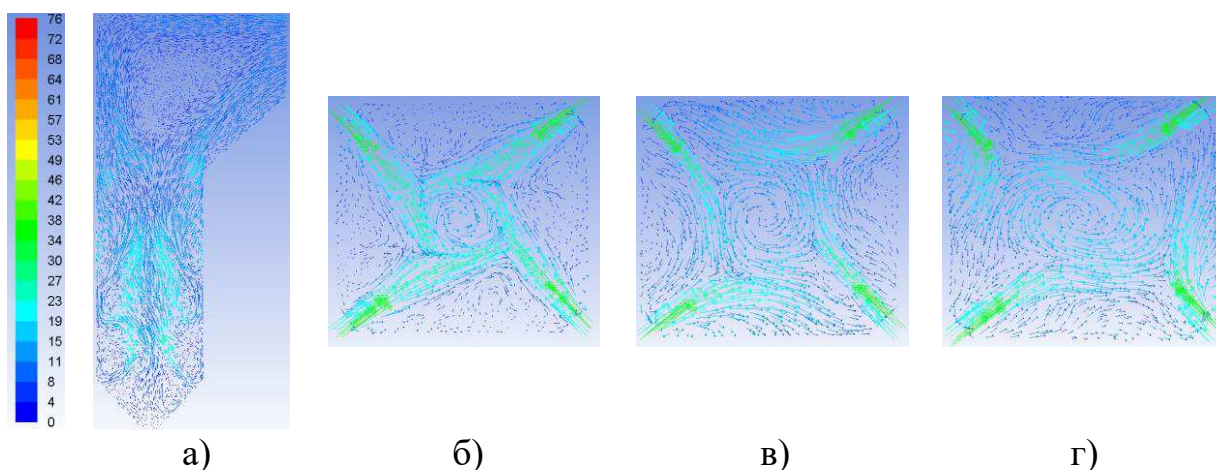
Рисунок А.48 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

17. Численное моделирование сжигания угля, 10% подача воздуха в сопла «verh», угол подвода третичного дутья 45°



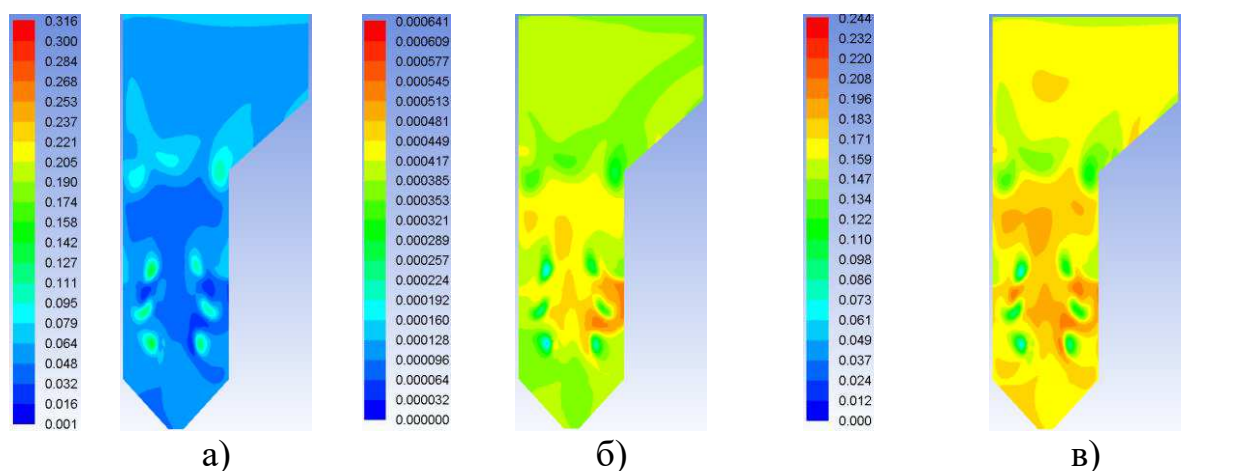
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.49 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

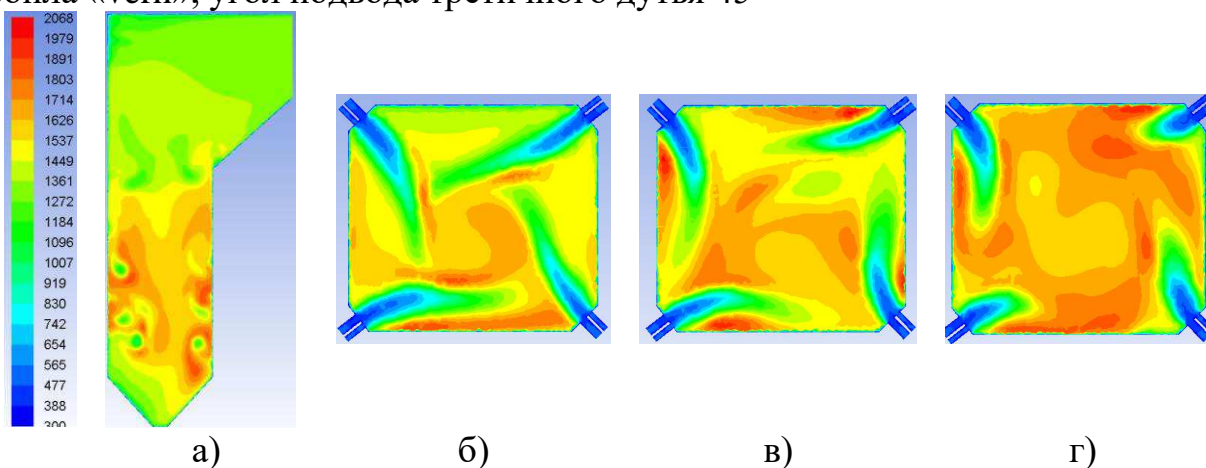
Рисунок А.50 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

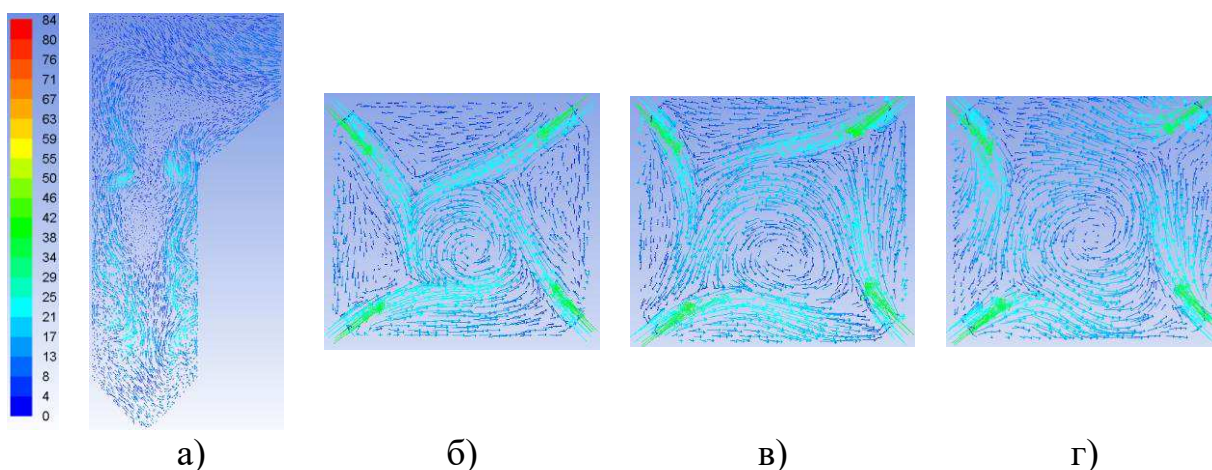
Рисунок А.51 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

18. Численное моделирование сжигания угля, 15% подача воздуха в сопла «verh», угол подвода третичного дутья 45°



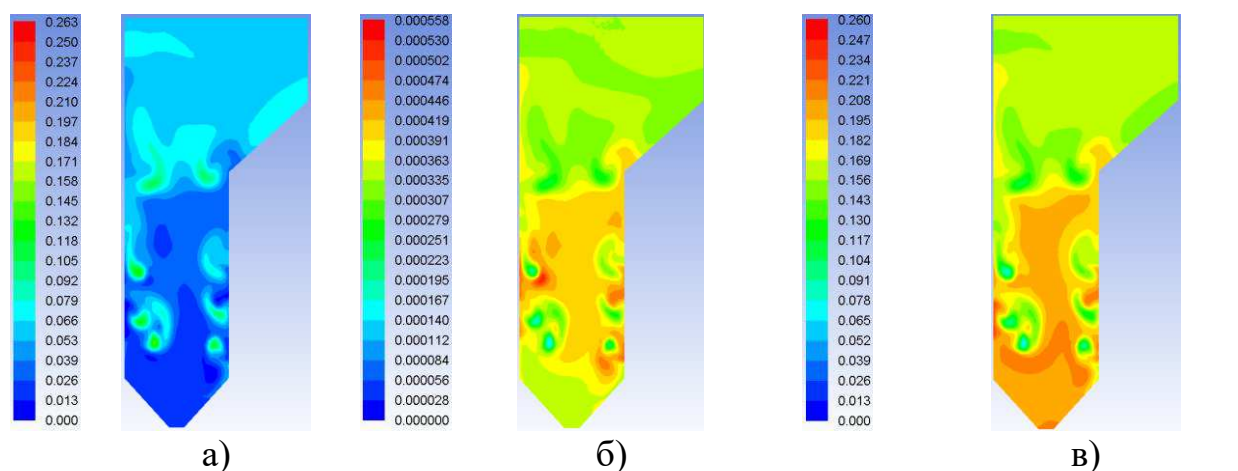
а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.52 - Температурные поля



а) продольное сечение; б) сечение 1 яруса горелок; в) сечение 2 яруса горелок; г) сечение 3 яруса горелок;

Рисунок А.53 – Векторные скорости



а) концентрация кислорода O_2 , m^3/m^3 ; б) концентрация монооксида азота NO , m^3/m^3 ; в) концентрация CO_2 , m^3/m^3 ;

Рисунок А.5440 – Концентрации газовых компонентов в объеме топки

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е. А. Бойко

подпись

Инициалы, фамилия

«30»

ИЮНЯ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка технических решений по снижению выбросов
оксидов азота на котельных агрегатах БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2

тема

13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.02 – Энергоэффективные технологии производства тепловой и
электрической энергии

код и наименование магистерской программы

Научный руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

Е. А. Бойко

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

Е. С. Кашеева

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

Главный инженер

АО «Енисейская
ТГК (ТГК-13)» ф-л
«Красноярская
ТЭЦ-2»

должность, ученая степень

А. Е. Зубарев

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

30.06.2020

П. В. Шишмарев

инициалы, фамилия

Красноярск 2020

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е. А. Бойко

подпись

Инициалы, фамилия

« 30 »

июня

2020 г.

ЗАДАНИЕ

НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ

в форме магистерской диссертации

бакалаврской работы, дипломного проекта, дипломной работы, магистерской диссертации

Студенту Кашеевой Евгении Сергеевне

фамилия, имя, отчество

Группа ФЭ18-06М

номер

Направление(специальность) 13.04.01.02

код

Эффективные технологии производства электрической и тепловой энергии

наименование

Тема выпускной квалификационной работы Разработка технических

решений по снижению выбросов оксидов азота на котельных агрегатах

БКЗ-500-140 Красноярской ТЭЦ-2

Утверждена приказом по университету №16699/с от 17.11.2017

Руководитель ВКР профессор, д.т.н. Е. А. Бойко

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР Котлоагрегат БКЗ-500-140 ст. №6

Перечень разделов ВКР:

- 1) Обзорная часть
- 2) Основная часть
- 3) Техничко-экономическая часть
- 4) Список использованных источников
- 5) Приложения

Руководитель ВКР


подпись

Задание принял к исполнению


подпись

Е. А. Бойко

инициалы и фамилия

Е. С. Кашеева

инициалы и фамилия студента

«17» ноября 2017 г.