

Казахский национальный университет имени аль-Фараби

УДК 620.9:662.92+538.953-405

На правах рукописи

**НҰҒЫМАНОВА АЙЖАН ОЛЖАБЕКҚЫЗЫ**

**Процессы горения в топочных камерах казахстанских ТЭС,  
использующих высокозольный уголь**

6D072300 – Техническая физика

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:  
Аскарова А.С., профессор Казахского  
Национального университета имени  
аль-Фараби, г. Алматы

Зарубежный консультант:  
Шафаржик П, профессор Чешского  
технического университета, г. Прага

Республика Казахстан  
Алматы, 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	4
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1 ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ ТЭС</b> .....	11
1.1 Уголь основной вид топлива казахстанской теплоэнергетики .....	11
1.2 Применение различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках .....	13
1.3 Основные методы исследования процессов тепломассопереноса при сжигании угля в топочных камерах ТЭС .....	17
1.3.1 Экспериментальные методы исследования топочных процессов .....	17
1.3.2 Численное моделирование топочных процессов.....	20
<b>2 ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА</b> .....	25
2.1 Основные уравнения, описывающие процессы тепломассопереноса в топочной камере.....	25
2.2 Граничные условия .....	29
2.3 Теплообмен излучением.....	32
2.4 Химическая модель сжигания твердого топлива в топочной камере энергетического котла .....	35
<b>3 ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	41
3.1 Основные характеристики парового котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ	41
3.2 Описание топочной камеры для построения геометрической модели и проведения вычислительных экспериментов .....	44
<b>4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЛА БКЗ-75 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДАЧИ АЭРОСМЕСИ</b> .....	47
4.1 Исследование аэродинамики топочной камеры котла БКЗ-75 .....	48
4.2 Исследование температурных характеристик топочной камеры .....	51
4.3 Исследование концентрационных полей продуктов горения пылеугольного топлива в топочной камере .....	55
<b>5 ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОДАЧИ АЭРОСМЕСИ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ ПРИ Пониженной Нагрузке Котла БКЗ-75</b> .....	67
5.1 Особенности снижения нагрузки или останова котла (планового и аварийного).....	67
5.2 Результаты численного моделирования процессов тепломассопереноса при пониженной нагрузке котла.....	68
5.2.1 Исследование аэродинамических характеристик.....	69

5.2.2	Исследование температурных характеристик .....	72
5.2.3	Исследование концентрационных полей продуктов горения пылеугольного топлива .....	75
<b>6</b>	<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВНЕДРЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КОТЛЕ БКЗ-75 .....</b>	<b>87</b>
6.1	Уменьшение выбросов вредных веществ при сжигании пылеугольного топлива с применением технологии двухступенчатого сжигания топлива	87
6.2	Результаты вычислительных экспериментов по внедрению технологии двухступенчатого сжигания топлива .....	89
6.2.1	Исследование аэродинамики течения в топочной камере.....	91
6.2.2	Исследование температурных характеристик топочной камеры .....	94
6.2.3.	Исследование концентрационных полей продуктов реакции горения топлива в топочной камере .....	98
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>107</b>
	<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>110</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>123</b>

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

$\rho$  – плотность жидкости,  $кг/м^3$ ;  
 $u_i$  – скорость в направлении  $x_i$ ;  
 $i$  – представляет пространственные координаты  $x, y, z$  декартовой системы;  
 $p$  – давление,  $Па$ ;  
 $\tau_{ij}$  – тензор вязких напряжений;  
 $\rho g_i$  – гравитационная сила;  
 $F_i$  – внешние массовые силы;  
 $h$  – удельная энтальпия,  $кДж/кг$ ;  
 $j_i$  – среднемассовый поток;  
 $C_\beta$  – массовая концентрация компоненты  $\beta$ ,  $кг/кг$ ;  
 $\omega_T$  – скорость химической реакции;  
 $E_c$  – энергия активации,  $кДж/моль$ ;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентности,  $м^2/с^2$ ;  
 $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии,  $м^2/с^3$ ;  
 $c_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$  – эмпирические константы модели турбулентности;  
 $\phi$  – обобщенная транспортная переменная;  
 $\Gamma_\phi$  – обобщенный коэффициент обмена;  
 $S_\phi$  – источниковый член;  
 $u, v, w$  – составляющие скорости,  $м/с$ ;  
 $I_\nu$  – интенсивность излучения,  $кВт/м^2 \cdot рад$ ;  
 $\Omega$  – телесный угол,  $рад$ ;  
 $\Theta$  – плоский угол,  $град$ ;  
 $K_a$  и  $K_s$  – оптические коэффициенты поглощения и рассеивания;  
 $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $кВт/м^2 \cdot K^4$ ;  
 $D$  – коэффициент диффузии;  
 $\mu_{turb}$  – турбулентная вязкость,  $кг/м \cdot с$ ;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $\mu_{eff}$  – эффективная вязкость,  $кг/м \cdot с$ ;  
 $Sc$  – число Шмидта;  
 $R_{90}$  – тонина помола угля, %;  
 $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  
EDM – концепция турбулентной диссипации (Eddy-Dissipation Model);  
KEGOC – Казахстанская компания по управлению электрическими сетями (Kazakhstan Electricity Grid Operating Company);  
OFA – метод острого дутья (Over Fire Air).

## ВВЕДЕНИЕ

**Общая характеристика работы.** Диссертационная работа посвящена исследованию процессов тепломассопереноса и формирования вредных веществ при сжигании низкосортного топлива в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Разработаны физико-математическая, химическая и геометрическая модели, которые правильно описывают реальные топочные процессы. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию влияния внедрения технологии двухступенчатого сжигания высокозольного карагандинского угля, конструкционных параметров топочной камеры, различных компоновочных решений по горелочным устройствам и способа подачи топливной аэросмеси на основные характеристики процессов тепломассопереноса: аэродинамика течения, распределение температуры и концентрации продуктов горения. С помощью современных компьютерных технологий представлена высокоинформативная 3D визуализация полученных результатов и проведено их сравнение с экспериментальными данными, полученными непосредственно на казахстанской ТЭС.

**Актуальность темы.** Теплоэнергетика является ведущей отраслью мировой энергетики и играет важнейшую роль в развитии промышленности во многих странах мира, но превышает все другие отрасли по объёму выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (частицы золы, диоксид серы, оксиды азота и углерода и др.). В топках энергетических котлов применяется сжигание различных топлив и в особенности твердых: бурый, каменный уголь, кокс.

Экологическая обстановка в мире и стремление к чистому воздуху в городах заставили многие развитые страны закрывать угольные станции. В то же время в развивающихся странах традиционная дешёвая угольная энергетика успешно функционирует, создаются и внедряются новые экологически «чистые» угольные технологии.

Последние события в мире показали, что таких источников энергии, как ветер и солнце, для которых характерно непостоянство (безветренная и холодная погода), может не хватить для того, чтобы обеспечить мир электричеством и теплом. В настоящее время Европа, возглавляющая «зеленую» революцию, вынуждена увеличить потребление угля и переводить сегодня газовые станции на уголь. Таким образом, хотя в перспективе доля угольных станций в мире будет неуклонно снижаться, уголь пока останется одним из основных видов топлива в теплоэнергетике.

Казахстан обладает огромными запасами углеводородов: 33,600 млн. тонн угля – 3,8% мировых запасов, 30000 млн. баррелей нефти – 1,8% мировых запасов и 1,5 трлн. кубометров природного газа – 0,8% мировых запасов, которые оказывают существенное влияние на формирование и состояние мирового энергетического рынка. Основным топливом казахстанских тепловых электростанций, вырабатывающих до 85% электроэнергии, является уголь. Добыча угля осуществляется в основном открытым способом, что делает его самым дешёвым, но при этом низкосортным (высокое содержание золы)

источником энергии.

На казахстанских ТЭС сжигается более 80% угля (зольность до 40–50%), использование которого приводит к проблемам в стабилизации пламени, шлаковании конвективных поверхностей нагрева, загрязнении воздуха летучей золой, оксидами углерода, азота, углеводородами и другими продуктами сгорания.

В большинстве регионов Республики Казахстан (РК) экологическая ситуация не только неблагоприятная, но и катастрофическая. По последним данным, которые приведены энергетическим агентством, Казахстан осуществляет 43,7% выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух Центральной Азии, а выбросы CO<sub>2</sub> достигли 12,8 тонн на душу населения.

Для существенного экономического развития Казахстана и связанного с этим роста спроса на электроэнергию, необходима принципиальная модернизация существующих энергетических объектов и строительство новых. Конечно, по возможности нужно сменить тип основного топлива и перебраться с угля на газ, что позволит значительно снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. При сжигании газообразного топлива устраняются потери теплоты с механическим недожогом, уменьшается количество отложений в газоходах, исчезает проблема золошлаковых отходов, улучшаются условия труда в котельной и значительно уменьшаются выбросы вредных веществ.

Перевести угольную ТЭС на газ теоретически можно, но возникает ряд проблем, которые замедляют этот процесс:

- Казахстанский уголь (Экибастузский, Карагандинский, Тургайский угольные бассейны) обладает рядом преимуществ – малая сернистость и высокий выход летучих на сухую беззольную массу.
- Запасов недорогого угольного топлива достаточно и по оценкам его хватит на сотни лет, в то время как запасы нефти и газа ограничены.
- Стоимость угля по сравнению с мазутом и газом является самой низкой.
- При переходе с угля на газ потребуются строительство новых ТЭС или огромные капитальные затраты на модернизацию и переоборудование существующих энергетических котлов.
- Чтобы перевести угольные ТЭС на газ, необходимо газифицировать регион, построить сотни километров газопровода и множество газовых распределительных станций, что будет нелегко и недешево.

По предоставленным КЕГОС (системный оператор единой энергетической системы РК) данным производство электрической энергии в стране осуществляют 119 электростанций, и только небольшая часть из них работает на газе. Минэнерго Казахстана заверяет, что республиканская теплоэнергетика будет **постепенно** переходить с угля на газ, чтобы выбросы в атмосферу соответствовали показателям евро стандартов. Будет проведена модернизация и реконструкция старых угольных станций, будут построены новые ТЭС на газе, будут созданы магистральные газопроводы и соответствующая инфраструктура, но **постепенно**.

Хотя в перспективе доля угольных станций будет снижаться, уголь пока останется основным видом топлива для казахстанской теплоэнергетики. Для снижения зависимости энергетического баланса от сжигания угля будет разработан Национальный проект по развитию электроэнергетики, согласно которому Казахстан полностью откажется от использования угля к 2060 году. В этой связи в условиях ужесточения требований к окружающей среде одной из **актуальных задач** современной отечественной теплоэнергетики становится и внедрение на казахстанских угольных ТЭС энергоэффективных экологически «чистых» технологий, с помощью которых можно контролировать процессы образования вредных веществ и предлагать методы уменьшения их выбросов в атмосферу.

Залогом дальнейшего развития республиканского топливно-энергетического комплекса страны наряду с инновационными угольными разработками являются информационные технологии, применяемые в настоящее время в теплоэнергетике развитых стран. Внедрение современных энергетических технологий определяется уровнем разработки методов расчета соответствующих физико-химических процессов, протекающих при горении топлива в топочных камерах ТЭС, с расчетно-теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов движения и нагрева частиц топлива, их последующих превращений в топочном пространстве и процессов формирования вредных пылегазовых выбросов.

Прогресс в развитии современной вычислительной техники, разработка специализированных пакетов компьютерных программ, позволяющих адекватно моделировать процессы внутри топочного пространства и выполнить информативную визуализацию полученных результатов, существенно облегчают решение многих энергетических задач. В последнее время широкое распространение получили компьютерные технологии, основанные на моделировании процессов тепломассопереноса при горении топлива в топках энергетических котлов. Компьютерные технологии позволяют проводить вычислительные эксперименты и получать результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными, полученными непосредственно на действующем энергетическом объекте.

**Цель работы:** Для внедрения метода двухступенчатого сжигания высокозольного казахстанского угля, эффективных конструктивных и компоновочных решений по горелочным устройствам методами 3D компьютерного моделирования исследовать процессы тепломассопереноса и формирования вредных веществ в топочной камере котла БКЗ-75 действующей Шахтинской ТЭЦ и предложить оптимальные варианты минимизации выбросов оксидов углерода и азота в атмосферу.

**Задачи исследования.** В соответствии с поставленной целью основными задачами исследования являются:

- для проведения вычислительных экспериментов **разработать** физико-математическую, химическую и геометрическую модели, которые правильно описывают реально существующие технологические процессы сжигания

низкосортного угля в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ;

- **провести** вычислительные эксперименты по исследованию влияния различных способов ввода топлива (прямоточный и вихревой с углом закрутки пылеугольного потока) через горелочные устройства на топочные процессы и определить оптимальный вариант подачи аэросмеси в камеру сгорания;

- для оптимизации процесса горения **провести** вычислительные эксперименты по исследованию аэродинамических, тепловых и концентрационных полей в топочной камере котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла;

- **провести** вычислительные эксперименты по исследованию влияния технологии двухступенчатого сжигания высокозольного карагандинского угля на характеристики топочных процессов и определить оптимальный вариант подачи дополнительного воздуха для эффективного снижения уровня выбросов вредных веществ;

- **получить** с помощью современных компьютерных технологий высокоинформативную 3D визуализацию полученных результатов и провести их верификацию, сравнив их с имеющимися экспериментальными данными, полученными непосредственно на ТЭС.

**Объект исследования:** топочная камера котла БКЗ-75 действующей Шахтинской ТЭЦ (г. Шахтинск, Казахстан).

**Предметом исследования** являются процессы теплопереноса и формирования вредных веществ при сжигании высокозольного карагандинского угля (зольность 35,1%) в топочной камере котла казахстанской ТЭС.

#### **Методы исследования.**

Для исследования процессов теплопереноса в топочных камерах с целью разработки экологически «чистых» угольных технологий применялись численные методы и проводились вычислительные эксперименты. Их использование позволяет добиться геометрического и физического подобия исследуемых объектов, соблюдения всех основных параметров и режимных условий, адекватных технологической схеме сжигания топлива на реальном энергетическом объекте.

#### **Новизна диссертационного исследования**

- исследовано влияние закрутки пылеугольного потока на характеристики процессов теплопереноса (вектор полной скорости, распределение температуры, концентрации продуктов горения);

- исследованы основные характеристики топочных процессов при пониженной нагрузке котла;

- исследованы различные режимы подачи дополнительного воздуха в топочное пространство через ОФА-инжекторы: 0% (базовый вариант), 5%, 10%, 15%, 18%, 20%, 25% и 30% от общего объема воздуха.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- 1 При использовании вихревых горелок с закруткой потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла БКЗ-75 на 30 градусов средние значения



концентраций оксида углерода СО и диоксида азота NO<sub>2</sub> на выходе из топочной камеры уменьшаются на 15 и 20% соответственно.

2 Использование вихревых горелочных устройств в режиме снижения нагрузки котла приводит к уменьшению значений концентраций вредных веществ (оксида углерода СО и диоксида азота NO<sub>2</sub>) на выходе из топочного пространства соответственно на 34 и 8%.

3 При использовании технологии двухступенчатого сжигания топлива в котле БКЗ-75 оптимальным вариантом снижения концентрации оксида углерода СО на 36% и диоксида азота NO<sub>2</sub> на 25% на выходе из топки является использование OFA-инжекторов с подачей через них 18% от общего объема воздуха.

### **Практическая и теоретическая значимость результатов**

**Теоретическая значимость** исследований состоит в получении фундаментальных знаний, которые могут быть применены для построения современной теории горения различного вида топлива и рационального его использования. Разработанные методы моделирования для проведения вычислительных экспериментов и высокоинформативной 3D визуализации результатов исследования будут способствовать развитию вычислительной гидродинамики, математического, численного и компьютерного моделирования.

Результаты исследования топочных процессов с целью внедрения на угольных ТЭС экологически «чистых» энергетических технологий имеют **практическое значение** поскольку внесут вклад в решение актуальных проблем теплоэнергетики и экологии. Полученные результаты позволяют эффективно управлять процессами горения топлива в реальных энергетических установках с необходимым воздействием на различные его параметры и дают рекомендации по оптимизации процессов горения энергетических топлив и минимизации вредных пылегазовых выбросов. Заинтересованными могут быть действующие угольные ТЭС Казахстана и стран с традиционной угольной энергетикой (Россия, Китай, Индия, Польша, Индонезия, Монголия, Вьетнам и др.).

**Личный вклад автора.** Автор принимала участие во всех основных этапах исследовательской работы: постановка задачи исследования, выбор объекта исследования, разработка моделей процессов сжигания высокосолевого топлива и анализ результатов. Самостоятельно провела вычислительные эксперименты и использовала метод 3D визуализации для графической интерпретации полученных результатов.

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 27 научных работ (18 статей, 9 тезисов), в том числе 10 статей в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, и 8 – в изданиях, рекомендованных КОКСОН РК.

### **Апробация работы.**

Приведенные результаты исследований, в данной работе, обсуждались на следующих международных конференциях:

- 1 First International Alternative Energy Sources, Materials & Technologies

(AESMT'21), Virtually, Ruse, Bulgaria, 14–15 June 2021.

2 The International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 2021, Virtually, Prague, Czech Republic, 15–18 March 2021.

3 Международная научная конференция студентов и молодых ученых, «ФАРАБИ ЭЛЕМИ», Алматы, Казахстан, 6–9 апреля, 2020.

4 First International Alternative Energy Sources, Materials & Technologies (AESMT'20), Plovdiv, Bulgaria, 14–15 May 2020.

5 International Academic Conferences in Prague 2019: Engineering, Prague, Czech Republic, 8–10 August 2019.

6 X Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», Новосибирск, Россия, 06–09 ноября, 2018.

7 First Annual Meeting of Kazakh Physical Society Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan, 10–13 October 2018.

8 23rd International Congress of Chemical and Progress Engineering CHISA 2018 & 21st Conference on Process Integration, Modeling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2018, Prague, Czech Republic, 25–29 August 2018.

9 First International Alternative Energy Sources, Materials & Technologies (AESMT'18), Plovdiv, Bulgaria, 14–15 May 2018.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обеспечиваются использованием фундаментальных физических законов, тщательным анализом реализованных эмпирических моделей, применением современных численных методов, сопоставлением результатов с имеющимися расчетными и экспериментальными данными, полученными в ходе натурных измерений на действующем энергетическом объекте.

**Связь темы с планами научных работ.** Диссертационная работа выполнена в рамках научных проектов: «Оптимизация процессов сжигания высококалорийного угля в энергетических котлах ТЭС Казахстана для уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу» и «Внедрение OFA-Technology с целью минимизации вредных пылегазовых выбросов на казахстанских ТЭС, использующих высококалорийный уголь» по программе грантового финансирования научных и научно-технических проектов МОН РК по приоритетному направлению: 1. Энергетика и машиностроение. Специализированное научное направление: 1.1 Тепло- и электроэнергетика и влияние энергетического сектора на окружающую среду, энергосбережение.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из списка обозначений и сокращений, введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы. Объем диссертации составляет 123 страниц, включает в себя 67 рисунков, 14 таблиц и источников использованной литературы 188.

## 1 ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ ТЭС

### 1.1 Уголь основной вид топлива казахстанской теплоэнергетики

Основную структуру извлекаемых природных энергоресурсов Казахстана составляют запасы угля (46%) и урана (29%), на нефть и газ приходится в сумме не более 25% (рисунок 1.1). По предоставленным данным Всемирного банка Казахстан входит в двадцатку мировых лидеров по производству первичных энергоресурсов с суммарным годовым объемом порядка 157 млн. т.н.э. (тонна нефтяного эквивалента) [1–3].

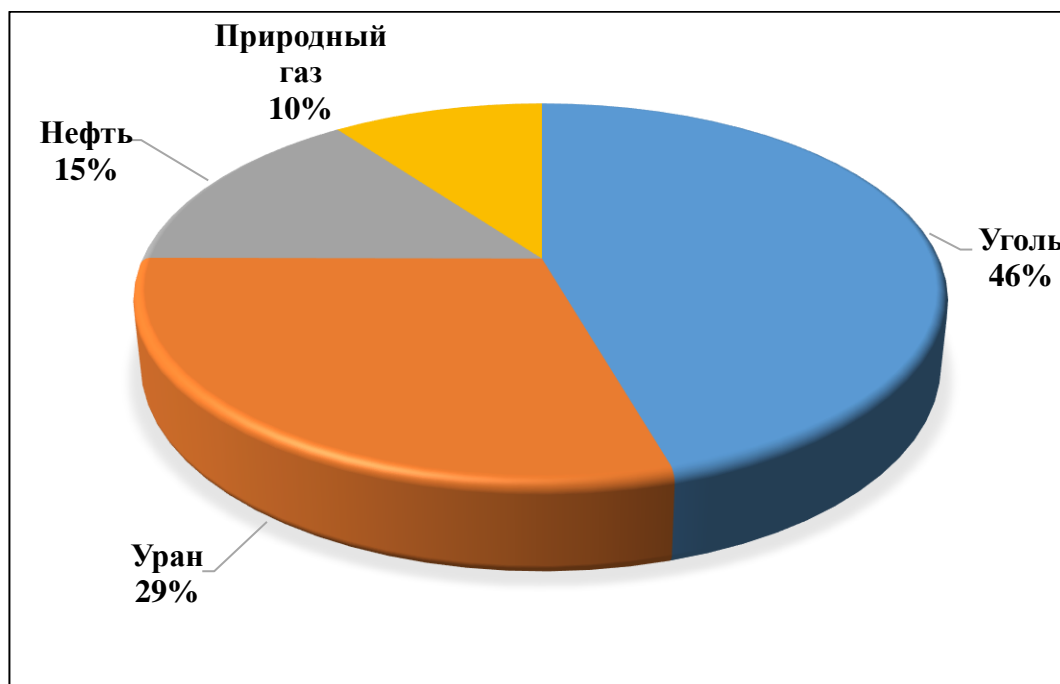


Рисунок 1.1 – Запасы ископаемых энергоресурсов в Казахстане, млрд. т.н.э. [2, с. 98]

Теплоэнергетика является ведущей отраслью мировой энергетики и играет важнейшую роль в развитии промышленности во многих странах мира. Однако, она превышает все другие отрасли по объёму выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду (частицы золы, диоксид серы, оксиды азота и углерода и др.). Основным топливом казахстанских тепловых электростанций, которые вырабатывают до 85% электроэнергии, является уголь.

Уголь является универсальным топливом, поскольку его можно сжечь, подвергнуть пиролизу и ожигению, газифицировать, удобен для добычи, транспортировки, складирования и использования, в том числе в виде пыли, а повсеместная доступность и значительные запасы угля делают его цену стабильной и привлекательной [4–6].

Залежи угля в Казахстане по доказанным запасам занимают восьмое место в мире. Казахский уголь поставляется во многие страны СНГ, а также дальнего зарубежья. Основная часть, более 9/10 запасов углей сосредоточена в

месторождения Центрального Казахстана, из которых изучены Карагандинский (9,3 млрд тонн), Экибастузский (12,5 млрд тонн), и Майкубенский (1,9 млрд тонн) угольные бассейны, Шубаркольское, Борлинское, Куу-Чекинское и Юбилейное (Каражыра) угольные месторождения (рисунок 1.2) [7–8].

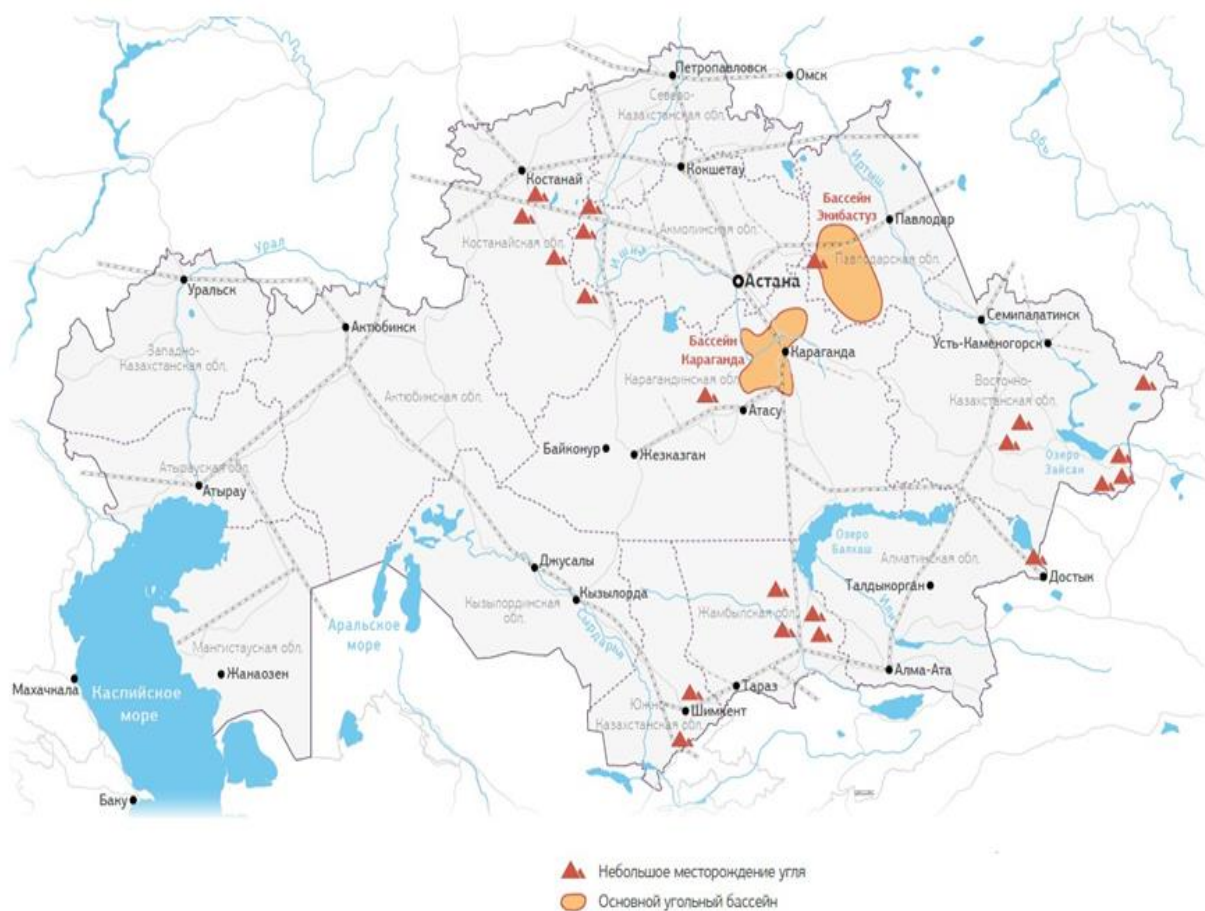


Рисунок 1.2 – Карта-схема расположения угольных бассейнов и угольных месторождений [9]

Добыча отечественного угля осуществляется в основном открытым способом, что делает его самым дешевым, но при этом низкосортным (высокое содержание влаги, относительно низкая теплотворная способность, высокое содержание золы и серы) источником энергии. В Казахстане тепловые электрические станции с использованием угля являются основным промышленным источником электроэнергии. На казахстанских ТЭС сжигается более 80% угля (зольность до 40–50%), использование которого приводит к проблемам в стабилизации пламени, шлаковании конвективных поверхностей нагрева, загрязнении воздуха летучей золой, оксидами углерода, азота, углеводородами и другими продуктами сгорания, что оказывает более серьезное воздействие на окружающую среду, чем во многих других регионах мира [10–12].

В Казахстане вопрос о повышении энергоэффективности промышленных котельных установок является в последнее время наиболее актуальным,

поскольку это связано, в первую очередь, с производством «дешевой» энергии, а также с соблюдением при этом строгих норм выброса вредных веществ в атмосферу. Для существенного экономического развития Казахстана необходима принципиальная модернизация существующих энергетических объектов, строительство новых и переход по возможности с угля на газ, что позволит значительно снизить выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. При переходе с угля на газ потребуются строительство новых ТЭС или огромные капитальные затраты на модернизацию и переоборудование существующих энергетических котлов.

В перспективе доля угольных станций будет снижаться, но уголь пока останется основным видом топлива для казахстанской теплоэнергетики, а развитие энергетики будет происходить преимущественно в направлении создания технологий, позволяющих снизить негативное воздействие на окружающую среду. В условиях ужесточения требований к окружающей среде актуальной задачей отечественной теплоэнергетики становится внедрение на казахстанских угольных ТЭС экологически «чистых» угольных технологий, позволяющих контролировать основные процессы формирования вредных пылегазовых выбросов.

В этой связи создание эффективных технологий, позволяющих оптимизировать основные процессы, происходящие в топочных камерах ТЭС при сжигании в них высокозольного угля, а также разработка рекомендаций по минимизации вредных пылегазовых выбросов является главной задачей отечественной теплоэнергетики. Для внедрения экологически «чистых» угольных технологий необходимо исследовать процессы теплопереноса и формирования вредных веществ в топочной камере котлов действующих ТЭС и предложить оптимальные варианты минимизации выбросов вредных веществ в атмосферу [13–14].

## **1.2 Применение различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках**

В мире наблюдается тенденция роста потребления твердого топлива в энергетических котельных установках. Низкое качество используемого топлива и имеющиеся ограничения применения топок традиционных конструкций, устаревшие технологии производства, неэффективные очистные сооружения, все выше перечисленное, требует разработки эффективного и экологичного способа сжигания твердого топлива [15].

Ниже приведены основные способы сжигания твердого топлива:

- а)* слоевой – в плотном фильтрующем слое;
- б)* в кипящем или псевдоожигенном слое;
- в)* факельный;
- г)* вихревой.

**Слоевое сжигание топлива.** При сжигании твердого топлива, загруженного слоем на распределительную колосниковую решетку,

необходимый воздух для горения подается под решетку (рисунок 1.3 а). Основное горение происходит в слое, образованном кусками топлива [16]. По высоте топочной камеры над слоем горят летучие вещества, которые выделяются из топлива в процессе его прогрева, затем догорают мелкие частицы, выносимые из слоя потоком воздуха и продуктами сгорания. Полидисперсное топливо, загруженное в слой, приводит к выносу большого количества малых частиц топлива, которые не успевают догореть в объеме топки, что вызывает увеличение потерь теплоты с механическим недожогом.

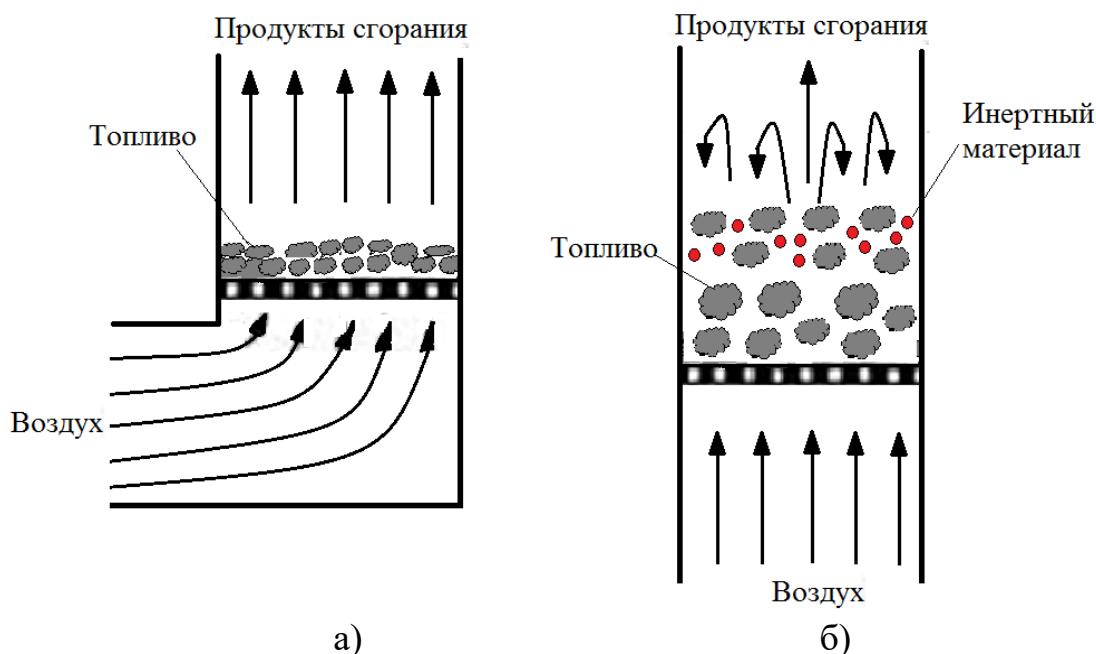


Рисунок 1.3 – Схема а) слоевого сжигания и б) сжигания в кипящем слое

Можно выделить следующие три класса топочных камер при слоевом сжигании [17–18]:

- а) с неподвижной колосниковой решеткой и неподвижным слоем топлива на ней – применяются в котлах малой мощности;
- б) с неподвижной колосниковой решеткой и перемещающимся по ней слоем топлива – используют для сжигания твердого кускового топлива;
- в) топки с движущейся колосниковой решеткой, перемещающей лежащий на ней слой топлива (механизированные топочные камеры прямого и обратного хода) – горение происходит в плотном слое топлива, неподвижном относительно движущейся решетки.

Преимуществами слоевых топок являются относительно низкая стоимость, за счет простой конструкции топочной камеры и их использования, минимальное время активации горения и возможность устойчивой эксплуатации в широком диапазоне нагрузок. Недостатком данного способа является невозможность его использования при сжигании спекающихся углей и углей с легкоплавкой золой и повышение потери тепла с механическим недожогом и с уходящими газами (из-за необходимости поддерживать высокий коэффициент избытка воздуха).

Этот способ позволяет сжигать только твердое топливо и не применим для топлива с очень высокой влажностью и зольностью [19].

В индустриально развитых странах применение углей высокого качества рассматривается как наиболее дешевый способ снижения выбросов в атмосферу, а в Казахстане больших ограничений на топливо для слоевого сжигания не существует.

**Сжигание в кипящем (псевдооживленном) слое.** При данном способе твердое мелкозернистое (0–20 мм) топливо, находящееся в слое определенной высоты, распределяется на колосниковой решетке, поджигается и продувается снизу вверх воздухом. При определенных скоростях и подаче воздуха под решетку плотный фильтруемый слой начинает расширяться, вследствие чего частицы приходят в движение (рисунок 1.3 б и 1.4 а). Частицы топлива, совершая возвратно-поступательное движение по высоте слоя, создают подобие бурно кипящей жидкости. Различают два основных вида слоя в одноступенчатых топочных камерах с кипящим слоем: стационарный и циркулирующий.

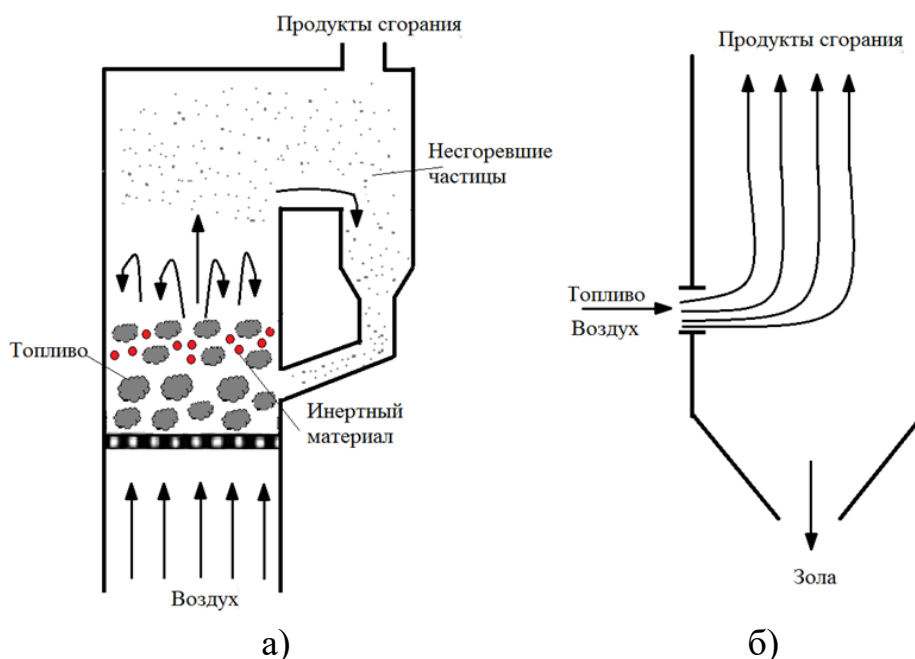


Рисунок 1.4 – Схема сжигания а) в циркулирующем кипящем слое и б) факельного сжигания

Способ сжигания в кипящем слое позволяет эффективно сжигать различные марки топлива, имеющие различную зольность, теплоту сгорания и влажность. При температурах слоя, находящихся в пределах 800–900°C, исключается образование термических оксидов азота, создаются благоприятные условия для связывания оксидов серы, реализуемые за счет добавления сорбента (обычно известняка). Это делает технологию сжигания твердых топлив в кипящем слое одной из наиболее экологически чистых. К основным недостаткам этого способа относятся [20–23]:

- установки с КС имеют сложную конструкцию и технологию

производства. С этим связаны высокие удельные капитальные затраты, вызванные необходимостью оснащения установки полноценными системами подготовки и подачи топлива, золошлакоудаления и автоматики;

- жесткие требования к фракционному составу топлива. Мелкодробленый уголь должен быть с гарантированным верхним пределом размера куска топлива, нарушение этого условия приводит к оседанию крупных кусков породы или топлива на газораспределительную решетку;

- для топок с КС количество мелких фракций должно быть сведено к минимуму, так как скорости газов для обеспечения устойчивого псевдооживления в слое рассчитаны на средний размер частиц, при этом более мелкие фракции уносятся из топки, а их наличие обуславливает главный недостаток топок с КС – повышенные потери с неполнотой сгорания.

**Факельное сжигание топлива.** В этом методе топливо (в основном используется уголь), предварительно измельченное в пыль, вдувается в камеру сгорания, представляющей собой призматическую вертикальную шахту, специальными пылевыми горелками вместе с необходимым для горения воздухом (рисунок 1.4 б). Факельный способ сжигания характеризуется непрерывным движением топлива вместе с воздухом и продуктами сгорания в топочной камере [24].

Процесс горения с образованием факела горящего топлива, который заполняет топочное пространство, происходит от входа до выхода из топочной камеры. В зоне активного горения температура варьируется в пределах 1300–1500 °С, а продолжительность нахождения частиц топлива в этой зоне составляет 0,5–2 с. Для того чтобы обеспечить полное выгорание топлива за такое короткое время твердое топливо перед поступлением в топочную камеру предварительно подсушивают и тщательно размалывают до пылевидного состояния [25].

Факельное сжигание позволяет экономично и эффективно использовать почти все сорта угля, включая низкосортные. Хорошее перемешивание топлива с воздухом позволяет работать с относительно небольшим избытком воздуха ( $\alpha=1,2-1,25$ ). Можно отметить относительную простоту регулирования режима работы и, возможность полной автоматизации топочного процесса [26].

Существенным недостатком этого способа сжигания является необходимость в специальной подготовке топлива, что значительно удорожает технологический процесс. На надежность зажигания пылеугольной смеси существенное влияние оказывают такие характеристики исходного топлива, как влажность и зольность. В топочных камерах с факельным сжиганием может быть увеличение избытка первичного воздуха, которое происходит из-за повышенных прососов холодного воздуха через уплотнительные узлы мельниц [27].

**Вихревое сжигание.** Данный способ позволяет сжигать пылевидное и мелкофракционное топливо. При осуществлении этого способа сжигания значительная часть топлива вращается в вихревом потоке дутьевого воздуха. Фактически сжигание топлива в вихревом способе поддерживаются во взвешенном состоянии за счет несущей силы мощного вихря (рисунок 1.5) [28].

Такой способ сжигания обеспечивает полное сгорание угольных частиц с



использованием механизмов внутренней стабилизации горения, присущих для вихревых топок, высокую степень улавливания золы в пределах котла. Вихревое движение и хорошее перемешивание горячих продуктов сгорания с вводимыми потоками, организовано благодаря тангенциальному вводу потоков дутья, что обеспечивает стабильность горения и наибольшую глубину выгорания топлива. За счет вихревой аэродинамике увеличивается время пребывания частиц топлива в зоне активного горения, что приводит к снижению вредных выбросов и обеспечивает полное сгорание топлива [29–31].

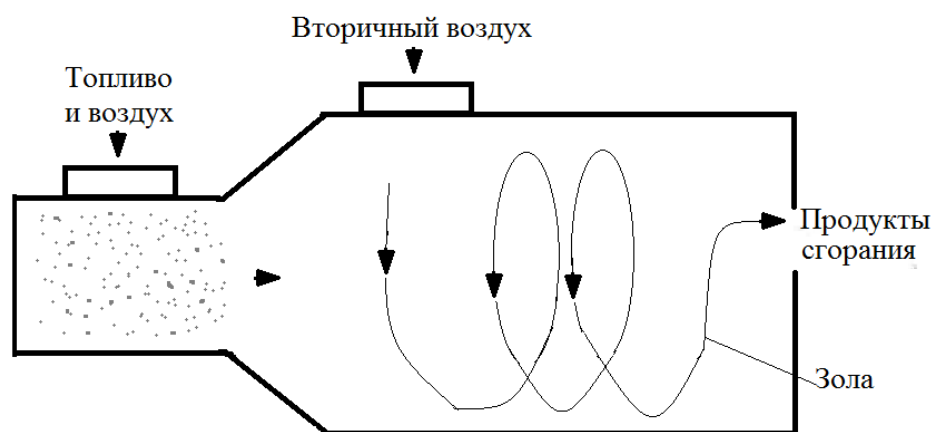


Рисунок 1.5 – Схема вихревого сжигания

Можно отметить следующие основные достоинства вихревого сжигания: упрощенная система подготовки топлива, увеличение ее производительности, обеспечение взрывобезопасности, возможность внедрения с минимальными переделками на действующих топочных камерах с факельным сжиганием или сжиганием в кипящем слое, самоочистка конвективных поверхностей нагрева, снижение затрат на подготовку топлива. Недостатком вихревого сжигания можно назвать плохую эффективность работы на топливах с высокой влажностью и зольностью ввиду покрытия внутренней конвективной поверхности топки спекающейся золой [32].

### 1.3 Основные методы исследования процессов тепломассопереноса при сжигании угля в топочных камерах ТЭС

#### 1.3.1 Экспериментальные методы исследования топочных процессов

Одной из сложных задач является исследование процессов тепломассопереноса при сжигании угля в топочной камере. Начиная еще с 50-х годов 20 столетия и по сегодняшний день многие, исследователи занимались экспериментальным исследованием кинетики сгорания углей, однако применяемые ими методики довольно сложны в техническом плане и требуют существенных финансовых затрат на создание лабораторных установок [33].

Все экспериментальные методы исследований сгорания одиночных угольных частиц можно условно разделить на 3 типа: оптический, пирометрический, термогравиметрический. Оптический метод состоит в визуальном наблюдении за горячей частицей с помощью оптики, и фиксации изображения на высокоскоростную киносъемку. Сущность пирометрического метода заключается в непрерывном измерении температуры горячей частицы с помощью оптического пирометра. Метод термогравиметрического анализа заключается в регистрации изменения массы образца во времени [34].

Вопросами экспериментального исследования сгорания одиночных угольных частиц занимались ученые: В. Бабий, Я. Левендис, С. Бухман, Р. Эссенхай, Д. Карабогдан, М. Шибаока, Л. Хитрин, Е. Головина и др. В последнее время все экспериментальные исследования в данной области посвящены изучению сгорания частиц угольной пыли, размером менее 100 мкм [33, с. 12].

Экспериментальные исследования горения угольных частиц во фракционном диапазоне 10–1000 мкм с высокой технической сложностью выполнения экспериментов были проведены в работе [35]. Угольные частицы вносили в реакционное пространство печи и обдували газом с заданной скоростью потока, а время их сгорания определяли методом микрокиносъемки (оптический метод) или пирометрическим методом. При этом крупные частицы (100–1000 мкм) наклеивали на кварцевую иглу, мелкие (10–100 мкм) – на кварцевые нити, диаметр которых составлял 10–20 мкм.

Аналогичные исследования проводил Р. Х. Эссенхай в диапазоне частиц 300–2000 мкм. Отличие состоит в том, что частицы приклеивали на плоскую подложку. Было отмечено, что процесс горения при условиях экспериментов протекает в диффузионном режиме [36].

Исследование сгорания мелких угольных частиц (30–150 мкм) в свободном падении проведено в работе [37]. Время горения частицы определялось одновременно с помощью высокочастотной киносъемки и температурных кривых, снятых специально разработанным трехлучевым пирометром. К недостаткам данного метода следует отнести высокую нестабильность трехлучевых пирометров, а также сложность экспериментальной установки.

Впервые в работе [38] дана формула для определения времени выгорания углеродной частицы с учетом процесса диффузионного поступления газовых реагентов к поверхности частицы и протекания химических реакций на ней. В расчетах диффузии были использованы имеющиеся экспериментально определенные зависимости для интенсивности теплообмена частицы на основании аналогии между процессами массо- и теплообмена. Был сделан вывод о том, что при медленном окислении, предшествующем воспламенению, образуются оба окисла углерода:  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , а сгорание  $\text{CO}$  вблизи частицы способствует воспламенению частицы.

Горение неподвижно закрепленной частицы углерода с начальным диаметром 16 мкм в вынужденном потоке было исследовано в работе [39]. Показано, что при малых скоростях потока, не превышающих 0,3–0,4 м/с,

горение частицы проходило сравнительно равномерно и она окутана тонкой светящей пленкой. При скоростях выше 2,0 м/с выгорание частицы становилось все более несимметричным, практически только с лобовой стороны и очень мало с тыльной части, а от шарика вдоль по потоку тянулся светящийся хвостобразный след газового пламени.

Наличие газового пламени указывает на то, что в процессе реагирования на лобовой стороне частицы наряду с углекислотой образуется и окись углерода, которая сдувается потоком и, сгорая, препятствует подводу кислорода к тыльной части угольной частицы. Появление пламени за частицей, горящей в потоке, и голубоватого пламени вокруг частицы, реагирующей в неподвижной среде, авторами было объяснено образованием окиси углерода и углекислоты в процессе первичного реагирования углерода с кислородом и последующим горением СО.

В экспериментальных исследованиях горения частиц натуральных топлив были получены результаты по выходу летучих [40]. Показано, что по мере нагрева частица подогрывается, подсушивается, затем начинается возгонка топлива. Чем больше содержание летучих в топливе, тем интенсивнее происходит их выход. Из бурых углей выход летучих начинается при температуре около 170 °С, из газового угля – около 210 °С, из ПЖ – около 260 °С, из тощих углей – 320 °С, из антрацита – около 380 °С. Выход летучих начинается при температурах тем более высоких, чем старее топливо и продолжается вплоть до температур порядка 800–1000 °С.

При горении мелких частиц благодаря высокой интенсивности тепло и массообмена основная доля летучих выделяется и диффундирует в окружающую среду, где, образуя горючую газовую смесь, сгорает в газовом объеме. При горении крупных частиц размером более 0,5–1 мм вследствие недостаточно интенсивного диффузионного обмена летучие воспламеняются около поверхности в пределах пограничной пленки и выгорают за небольшой период времени, составляющий примерно 10% времени полного сгорания частицы. После выхода и сгорания основной массы летучих кокс оказывается достаточно нагретым и энергично соединяется с поступающим кислородом [41].

Экспериментальные исследования сложных топочных процессов при факельном сжигании твердого топлива в котельных агрегатах были проведены в работах [42–53], а результаты этих исследований легли в основу современных представлений о процессах тепломассопереноса, имеющих место в топочном пространстве энергетических установок.

В Казахстане существенный вклад в теорию горения внесли ученые Л. Вулис, Б. Устименко, Ш. Ершин, Б. Алияров, Е. Сакипов и др., которые провели глубокий анализ процесса горения топлива в топливосжигающих устройствах [54–57]. Л. Вулис, который является основоположником научной школы казахстанских теплофизиков и газодинамиков (В. Кашкаров, Н. Косов, С. Исатаев, Л. Артюх, Э. Закарин и др.), положил начало научным исследованиям сложных физико-химических процессов, протекающих при горении газообразных и твердых топлив.

В экспериментальных исследованиях сложно воспроизводить горение топлива в условиях, близких к топочным, также невозможно при ограниченном избытке воздуха осуществить горение отдельной частицы, в особенности угольной пылинки. Затруднительным является контролирование температуры частиц и концентрации газовых реагентов у поверхности, изменения массы и размеров пылинок в процессе выгорания.

Эксперименты, проводимые на существующих огневых моделях, не позволяют строго выполнять все условия, которые соответствуют технологическому процессу сжигания твердого топлива в топочных камерах действующих энергетических объектов, так как моделирование всех параллельно протекающих процессов в камере сгорания и в дымоходах на уменьшенных по масштабу установках принципиально невозможно. Исследования сжигания низкосортного топлива в натуральных экспериментах также затруднительны, так как их проведение является дорогостоящим мероприятием.

В этой связи в изучении процессов тепломассопереноса в топочных камерах с целью разработки экологически «чистых» угольных технологий возрастает роль численных методов и вычислительных экспериментов. Их использование позволяет добиться геометрического и физического подобия исследуемых объектов, соблюдения всех основных параметров и режимных условий, адекватных технологической схеме сжигания топлива на реальном энергетическом объекте [58–60].

### 1.3.2 Численное моделирование топочных процессов

Развитие современной вычислительной техники, разработка специализированных пакетов компьютерных программ, сочетание компьютерных технологий и экспериментальных исследований позволяют использовать результаты численных экспериментов при проектировании новых, модернизации существующих топочных камер и при внедрении «чистых» энергетических технологий на действующих ТЭС. Современные компьютерные технологии, основанные на моделировании процессов тепломассопереноса при горении топлива в топках энергетических котлов, адекватно описывают процессы внутри топочного пространства и существенно облегчают решение многих энергетических задач.

Так в работе [61] указано, что актуальными в настоящее время являются вопросы численного моделирования топочных процессов, создание математической модели процессов тепломассопереноса в камере сгорания котла, получение информации об аэродинамике и суммарном теплообмене и об образовании вредных веществ. Весьма значимым считается разработка процесса «чистого» сжигания угля с наименьшей степенью допустимым выбросом вредных веществ. Таким образом, должны быть оптимизированы все конструктивные и режимные характеристики подобного процесса.

Авторами работы [62] на основании численного исследования топочного процесса сделана оценка эффекта от внедрения рассматриваемой технологии в

паровой энергетический котел с технологией факельного сжигания. Согласно современным подходам диффузионно-кинетической теории горения разработаны алгоритм, математическая модель и компьютерная программа расчета процесса горения угольного топлива полифракционного состава с учетом ввода вторичного топлива. Указано, что модель описывает сложные физико-химические превращения, происходящие в процессе горения угля, и может быть использована как на стадии проектирования новых установок, так и при модернизации существующих котлоагрегатов.

В работе [63] представлена математическая модель процессов теплообмена и горения одиночной угольной частицы, которая позволяет корректно определить время стадий реагирования и температуру угольной частицы в процессе ее воспламенения и горения. Приведены результаты расчета горения одиночных угольных частиц антрацита и бурого назаровского угля при различных значениях концентраций кислорода и температуры окружающей среды. Результаты экспериментов, выполненных на огневом стенде при сжигании ирша-бородинского угля, хорошо согласуются с результатами численного моделирования факельного сжигания пылеугольного топлива.

Численное моделирование трехмерного турбулентного двухфазного реагирующего течения с учетом всех основных процессов тепломассопереноса при факельном сжигании распыленного березовского бурого угля Канско-Ачинского бассейна (КАБ) в вихревой горелке усовершенствованной конструкции выполнено в работе [64]. Получены распределения теплового потока, полей скорости, температуры и концентрации продуктов горения в различных сечениях вихревой топki и приведены ее основные теплотехнические и экологические характеристики.

Авторами работы [65] разработана методика использования программной системы Fluent для проведения численных исследований влияния характеристик топлива и режимных факторов на устойчивость зажигания и формирования пылеугольного факела. Результаты численных экспериментов позволили выяснить влияние расхода смеси механоактивированного угля микропомола с воздухом на протекание процесса горения топлива для растопочной горелки, установленной в центральной части основной прямоточной круглой горелки котла ПК-40–1 Беловской ГРЭС, и степени этого влияния на работоспособность растопочной горелки.

Технология проведения предпроектной проработки конструкторских решений по модернизации котельного оборудования на основе специализированного программного обеспечения изложена в монографии [66]. Особое внимание уделено математической постановке задачи о сжигании твердого топлива в топках котельных агрегатов, верификации и адекватности численных результатов. На основании полученных результатов выполнена оценка применения наиболее перспективной схемы сжигания для замещающих углей.

Авторы работы [67] считают, что моделирование с помощью CFD – является эффективным решением для определения влияния тонкости помола на

характеристики котла углесжигающих ТЭС. Моделирование осуществлялось для трех размеров тонкости помола топлива, а именно тех, которые проходят через 200 сито с 70%, 60% и 50%. Результаты, полученные в виде распределения температуры и скорости продуктов сгорания, позволяют определить зоны высокого уровня эрозии и интенсивного осаждения частиц, а также показать влияние размера частиц на несгоревший углерод.

Численные исследования анализа и оптимизации процесса сжигания угольной пыли представлены в работе [68]. Исследования проводились на пылеугольном котле с передним пламенем и специальной топочной установкой с низким уровнем выбросов  $\text{NO}_x$ . С помощью построенной комплексной CFD-модели пылеугольного котла выполнен численный расчет турбулентных, реактивных и тепловых потоков при различных режимах работы котла, извлеченных из системы оперативного мониторинга электростанции. Полученные результаты численного моделирования позволяют определить оптимальные условия работы котла.

В работе [69] проведено численное моделирование сжигания пылевидного угля в слое смешения и исследование поведения образования сажи с подробным механизмом химических реакций, который учитывает 158 уравнений и 1804 реакций. Показано, что пиковое значение массовой плотности сажи находится в области, где температура газа выше температуры несгоревшего газа смеси летучих веществ и воздуха (1026–1120 °С) и ниже температуры пламени (1730 °С) и оно распределено в области между пиковыми значениями температуры газа и функцией плотности вероятности числа частиц угля.

Коммерческое программное обеспечение CFXAnsys Europe Ltd. использовалось в работе [70] для исследования сжигания угля на коммерческой тепловой электростанции мощностью 160 МВт с целью моделирования условий эксплуатации и выявления факторов неэффективности. Модель, представленная в работе [71], объединяет уравнение теплопередачи с уравнениями химической кинетики и описывает процесс сжигание угля. Для решения уравнения теплопередачи здесь используется метод конечных объемов, а для уравнений химической кинетики – метод четвертого порядка Рунге-Кутты.

Для лучшего прогнозирования процесса тепломассопереноса учеными из университета Лидса (Англия) [72] на основе CFD разработана модель сжигания угля и проведены вычислительные эксперименты на испытательном котле мощностью 1 МВт, в топочной камере которого установлены трехступенчатые вихревые горелки с низким уровнем выбросов  $\text{NO}_x$ . Точность подмоделей проверялась с использованием данных для четырех хорошо изученных углей из Великобритании и США, а полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными.

В работе [73] дается развернутое определение понятия турбулентности, описывается активное влияние турбулентности на процесс горения в топочной камере газовой турбины и рассматриваются положительные стороны этого влияния. Автор приводит основные уравнения, раскрывающие влияние турбулентности на топочные процессы, рассматривает различные

существующие модели турбулентности для исследования процессов сжигания топлива и делает вывод о том, что наиболее подходящей моделью является модель  $k-\omega$  со сдвигом напряжения переноса.

Работы [74–76] посвящены математическому моделированию и компьютерным технологиям при проектировании энергетических паровых котлов с целью оптимизации будущей конструкции, более совершенной организации всего цикла проектирования без изготовления дорогостоящего образца, сокращения сроков разработки новых котлов и запуска их в производство. Авторы этих работ отмечают, что численное моделирование топочных устройств относится к классу сложных задач ввиду их единичного производства и при алгоритмизации такого вида задач возникают определенные трудности, которые могут быть решены при использовании современной вычислительной техники и компьютерных технологий.

Вопросам CFD-моделирования процессов сжигания топлива на энергетических объектах и использования результатов вычислительных экспериментов при проектировании новых и модернизации существующих электростанций посвящены работы [77–79]. Разработанные численные методы описывают топочные процессы с учетом выделения и связывания щелочных металлов, механизмов превращения твердых минеральных компонентов для трех моделей электростанций с разной тепловой мощностью и работой с разными углями. Особое внимание уделялось выделению и связыванию щелочных металлов, механизмам превращения твердых минеральных компонентов, их отложению на стенках и трубных пучках, а также химическим характеристикам угля, минерального вещества и месторождений.

В монографии [80] приведены основные уравнения тепломассопереноса, необходимые для численного моделирования процессов, происходящих в топочных камерах электростанций и подробно обсуждаются избранные численные методы для решения этих уравнений. Авторы рассматривают вопросы регулирования и контроля, упрощенные и гибридные модели, а также уделяют внимание проверке достоверности измеренных значений. Многочисленные проработанные примеры и иллюстрации должны помочь читателю понять связи между теорией и практикой.

Как было показано в приведенном выше обзоре зарубежных работ, посвященных исследованию процессов, происходящих в топочных камерах углесжигающих ТЭС, все они направлены на разработку численных моделей для правильного описания процессов горения твердого топлива с целью их оптимизации и на внедрение современных энергетических технологий, позволяющих минимизировать выбросы вредных веществ в атмосферу.

В своих исследованиях зарубежные коллеги как правило используют высококачественный уголь (например, зольность немецкого угля составляет менее 8%), сжигание которого не сопряжено с трудностями воспламенения, горения и высокими вредными выбросами в атмосферу. В отличие от них на казахстанских ТЭС сжигается в основном низкосортный высокозольный (более 40%) отечественный уголь. Это вызывает дополнительные трудности при

численном моделировании процессов сжигания такого угля в топочных камерах действующих энергетических объектов и внедрении экологически «чистых» угольных технологий на казахстанских ТЭС [81–88].

Ниже в следующих главах настоящей диссертационной работы представлены результаты численного моделирования процессов тепломассопереноса, происходящих при сжигании высокозольного карагандинского угля в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. На основании результатов вычислительных экспериментов предложены эффективные конструктивные и компоновочные решения для внедрения технологии двухступенчатого сжигания и определены оптимальные режимы и способы подачи аэросмеси и воздуха для максимального снижения концентрации вредных веществ на выходе из топочного пространства.



## 2 ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОТЛА

В настоящей главе приведены физико-математическая и химическая модели, которые адекватно описывают реальные технологические процессы сжигания высокозольного угля в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ и позволяют проводить вычислительные эксперименты по исследованию топочных процессов и внедрению современных энергетических технологий, способных минимизировать выбросы вредных веществ в атмосферу.

### 2.1 Основные уравнения, описывающие процессы теплопереноса в топочной камере

Для моделирования процессов теплопереноса при наличии физико-химических превращений используются фундаментальные законы сохранения таких физических величин, как масса, импульс, энергия. Поскольку в этом случае теплоперенос представляет собой взаимодействие турбулентных движений и химических процессов, то мы должны учитывать также закон сохранения компонентов реагирующей смеси, турбулентность, многофазность среды, выделение тепла за счет излучения нагретой среды и химических реакций [89–93]. Запишем основные уравнения, используемые для решения поставленной задачи:

*Закон сохранения массы:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $u_i$  – скорость в направлении  $x_i$ . Индекс  $i$  представляет пространственные координаты  $x, y, z$  декартовой системы. Первый член уравнения (2.1) характеризует скорость изменения массы в единице объема, второй член представляет собой конвективный перенос.

*Закон сохранения импульса:*

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i, \quad (2.2)$$

где  $u_i$  и  $u_j$  – скорость в направлении  $i, j$ ,  $p$  – давление,  $\tau_{ij}$  – тензор вязких напряжений,  $\rho g_i$  – гравитационная сила и  $F_i$  – внешние массовые силы (силы, возникающие в результате взаимодействия с дисперсной фазой) в  $i$  направлении. Первый член уравнения (2.2) представляет собой скорость изменения импульса на единицу объема, второй член конвективный перенос, третий член – это градиент нормальной силы на единицу площади за счет давления ( $p$ ), четвертый

член – градиент тангенциальной силы за счет вязких напряжений ( $\tau_{i,j}$ ).

*Закон сохранения энергии:*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) - \frac{\partial q_i^{res}}{\partial x_j} + \frac{\partial P}{\partial t} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + S_h, \quad (2.3)$$

где удельная энтальпия  $h = e + \frac{P}{\rho}$ ,  $S_h$  – источник энергии за счет химических реакций и теплообмена излучением. При малых числах Маха членом  $\frac{\partial P}{\partial t}$  в уравнении (2.3) можно пренебречь. Поток энергии  $q_i^{res}$  складывается из переноса энергии за счет теплопроводности  $q_i^T$ , переноса энергии за счет потока вещества  $q_i^c$  и диффузии  $q_i^D$ . Причем переносом энергии за счет потока вещества  $q_i^c$  и диффузии  $q_i^D$  можно пренебречь, поскольку они малы по сравнению с потоком тепла  $q_i^T$  за счет теплопроводности. В этом случае можно считать, что  $q_i^{res} \approx q_i^T$ . Для энтальпии смеси справедливо следующее соотношение:  $h = \sum_{\beta=1}^1 h_\beta$ , где  $h_\beta = C_{p\beta} T$ .

*Закон сохранения для компоненты вещества:*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_\beta) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho C_\beta u_i) + \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + S_\beta, \quad (2.4)$$

где  $j_i$  – среднемассовый поток в  $i$ -м направлении;  $i=1, 2, 3$ ;  $C_\beta$  – массовая концентрация, которая определяется следующими соотношениями:

$$C_\beta = \frac{\rho_\beta}{\rho}, \text{ где } \sum_{\beta=1}^n \rho_\beta = \rho, \quad \sum_{\beta=1}^n C_\beta = 1$$

В уравнении (2.4) среднемассовая скорость среды, состоящей из  $\beta$  компонент

$$(\beta=1, 2, 3, \dots, n), \text{ определяется как: } u_i = \frac{\sum_{\beta=1}^n \rho_\beta u_{i,\beta}}{\sum_{\beta=1}^n \rho_\beta}$$

$S_\beta$  – источниковое слагаемое, которое учитывает вклад химических реакций в изменение концентрации компоненты  $\beta$ . Для многокомпонентных смесей для источникового члена имеем:  $S_{c_n} = \sum \omega_n$ , где  $\omega_n$  – скорость химической реакции,

которая записывается следующим образом:  $\omega_{n,r} = \frac{dc_{AB}}{dt} = k(T)c_A c_B$ .

Скорость реакции зависит от температуры и концентраций, участвующих в реакции веществ А и В (исходных, промежуточных, конечных продуктов). Константа скорости реакции  $k(T)$  записывается в виде экспоненциальной зависимости от температуры и по закону Аррениуса она равна:  $k(T) = k_0 e^{-E/RT}$ , где  $k_0$  – константа, в первом приближении не зависящая от температуры,  $E$  [ккал/моль] – энергия активации,  $R=1.986$  [ккал/моль·К] – универсальная газовая постоянная.

#### *Стандартная k-ε модели турбулентности*

Течения в топочных камерах являются как правило турбулентными. Как показал опыт численного моделирования таких течений наиболее применимой в этом случае является стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель [77, с. 161; 93, с. 3041]. Это двухпараметрическая модель турбулентности предложена Б. Лаундером и Б. Сполдингом [94] и состоит из двух дополнительных дифференциальных уравнений для переноса кинетической энергии турбулентности  $k$  и для диссипации кинетической энергии турбулентности  $\varepsilon$ . Стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель удобна для численных расчетов технических пламен, устойчива, обладает достаточной точностью для широкого диапазона турбулентных потоков и экономична в плане использования машинного времени. Она является полуэмпирической, потому что постоянные коэффициенты для этой модели турбулентности получены опытным путем.

Стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель представлена уравнением переноса турбулентной кинетической энергии [95–97]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \rho \cdot \varepsilon, \quad (2.5)$$

и уравнением диссипации (преобразование кинетической энергии турбулентности во внутреннюю) турбулентной кинетической энергии  $\varepsilon$ :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon,1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{\varepsilon,2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \rho, \quad (2.6)$$

где производство кинетической энергии турбулентности определяется следующим соотношением:

$$P = \left[ \mu_{turb} \cdot \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot k \cdot \delta_{ij} \right] \cdot \frac{\partial u_j}{\partial x_j}. \quad (2.7)$$

а скорость диссипации турбулентной энергии как:

$$p\varepsilon = \mu_{turb} \cdot \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.8)$$

Здесь  $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$  – турбулентные числа Прандтля. Если  $k$  и  $\varepsilon$  известны, то турбулентная вязкость  $\mu_{turb}$  определяется соотношением Прандтля–Колмогорова [98]:

$$\mu_{turb} = c \mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.9)$$

а эффективная вязкость тогда по модели Колмогорова–Прандтля равна:

$$\mu_{eff} = \mu + c \mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \text{ где } \mu \text{ – физическая вязкость.} \quad (2.10)$$

Значения эмпирических констант  $c_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$  в уравнениях (2.5–2.6) и (2.9–2.10) определяются экспериментально и они приведены в работах [98, р. 56; 99]:

$$c_\mu = 0.09; \sigma_k = 1.00; \sigma_\varepsilon = 1.30; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad (2.11)$$

Пылеугольный факел – это двухфазная среда (газ и угольные частицы) и большое количество твердых частиц оказывает влияние на конвективный и диффузионный перенос. Однако в случае, когда объемная концентрация твердой фазы в пылеугольном потоке не превышает 1% (наличие твердых веществ в угарных газах из топочных камер незначительно за исключением области вблизи горелок), этим влиянием можно пренебречь и ограничиться следующей поправкой в выражениях для турбулентной вязкости, коэффициента турбулентного обмена и турбулентных чисел Прандтля и Шмидта [96, р. 110; 97, р. 1393; 98, с. 56; 99, р. 270; 100–101]:

$$\mu_{eff} = \mu_{G,eff} \left( 1 + \frac{\rho P}{\rho G} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad \partial_{P,eff} = \frac{\mu_{P,eff}}{\mu_{G,eff}}, \quad \partial_{P,eff} = 0,7 \quad (2.12)$$

Основные уравнения (2.1–2.6) представляют собой математическую модель, с помощью которой можно описать процессы тепломассопереноса в топочной камере энергетического котла, сжигающего уголь в пылевидном состоянии. Модель учитывает турбулентность и двухфазность среды, конвективный

перенос, источники тепла и вещества при физико-химических превращениях, происходящих в объеме топочного пространства при горении пылеугольного факела. Систему уравнений (2.1–2.6) можно записать в обобщенном виде следующим образом:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} = - \frac{\partial \rho u_i \phi}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi, \quad (2.13)$$

$\phi$  – это обобщенная транспортная переменная ( $u, v, w, T, C, k, \varepsilon$ ),  $\Gamma_\phi$  – обобщенный коэффициент обмена,  $S_\phi$  – источниковый член, который определяется химической кинетикой процесса, нелинейными эффектами теплового излучения, межфазного взаимодействия, а также многостадийностью химических реакций. Искомые величины в уравнении (2.13) приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Искомые величины в системе уравнений тепломассопереноса (2.13) для реагирующих течений при наличии горения

Наименование	Величина $\phi$	Коэффициент обмена $\Gamma_\phi$	Источник $S_\phi$
Масса	$I$	0	0
Импульс	$u$	$\mu_{eff}$	$-\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + S_{imP}$
Энергия	$h$	$\mu_{eff} / \sigma_h$	$S_h$
Компоненты $\beta$ ( $O_2, CO_2, H_2O, CO, C, C_xH_y, NO, NO_2, NH_3, HCN$ и др.)	$C_\beta$	$\mu_{eff} / \sigma_\beta$	$S_\beta$
Энергия турбулентности	$k$	$\mu_{eff} / \sigma_k$	$S_k - \rho \varepsilon$
Турбулентная диссипация	$\varepsilon$	$\mu_{eff} / \sigma_\varepsilon$	$\frac{\varepsilon}{k} (C_1)$
$S_{imP} = \left[ \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$			

## 2.2 Граничные условия

Система уравнений (2.13) – это система дифференциальных уравнений в частных производных, для решения которых необходимо задать начальные и

граничные условия. В нашем случае эти уравнения описывают реальные процессы сжигания топлива в топочных камерах действующих энергетических объектов. В этой связи необходимо задавать корректные начальные и граничные условия для искомых величин (скорость, температура, концентрация компонент смеси, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации), которые соответствуют реальному технологическому процессу сжигания топлива на ТЭС и геометрии выбранной топочной камеры [89, р. 158; 102–106].

В топочной камере энергетических котлов границами расчетной области являются ее твердые стенки и свободные поверхности. Вход (область подачи топлива и окислителя), выход из топочной камеры котла, а также плоскость симметрии считаются свободными поверхностями. Для начальных условий можно использовать ранее полученные сходящие решения или выбрать нулевые значения переменных:  $u = 0, v = 0, w = 0, P = 0, T = 0, C = 0, k = 0, \varepsilon = 0$  при  $t = 0$ . Для технических задач большие трудности вызывает задание реальных граничных условий на входе и выходе топочной камеры.

В таблицах 2.2–2.5 приведены граничные условия искомых величин (скорость, температура, концентрация компонент смеси, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации).

Таблица 2.2 – Граничные условия при решении уравнений для скорости

Краевые условия	Граничные условия
Вход:	$u_i$ – значения скорости;
Выход:	$\left. \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right _{normA} = 0$ – производная, нормальная к плоскости выхода;
Плоскость симметрии:	$u_i \Big _{normS} = 0$ – скорость, нормальная к плоскости симметрии; $\left. \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right _{normS} = 0$ – производная, нормальная к плоскости симметрии;
Твердая стенка:	$u_i \Big _{normW} = 0$ – скорость, нормальная к стенке, т.е. нет потока массы; $\left. \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right _{normW} = 0$ – производная, нормальная к стенкам; $u_i \Big _{tan g} = 0$ – скорость, тангенциальная к стенке, условия прилипания.

Таблица 2.3 – Граничные условия при решении уравнения для температуры

Краевые условия	Граничные условия
Вход:	$h=C_pT$ – задается температура потока на входе (эксперимент или расчет);
Выход:	$\left. \frac{\partial h_i}{\partial x_i} \right _{normA} = 0$ – производная, нормальная к плоскости Выхода;
Плоскость симметрии:	$\left. \frac{\partial h_i}{\partial x_i} \right _{normS} = 0$ – производная, нормальная к плоскости симметрии; $\left. \frac{\partial h_i}{\partial x_i} \right _{tan gS} = 0$ – производная, тангенциальная к плоскости симметрии;
Твердая стенка:	Для температуры на твердых стенках могут задаваться различные виды граничных условий. Можно задать температуру стенки $T_w$ или тепловой поток $q_w = \alpha(T_{wp} - T_w)$ в случае теплообмена между стенкой и жидкостью, а для адиабатических стенок $q_w = 0$ .

Таблица 2.4 – Граничные условия при решении уравнений для концентрации

Краевые условия	Граничные условия
Вход:	$C_\beta$ – начальная концентрация компонента $\beta$ на входе;
Выход:	$\left. \frac{\partial C_\beta}{\partial x_i} \right _{normA} = 0$ – производная, нормальная к плоскости Выхода;
Плоскость симметрии:	$\left. \frac{\partial C_\beta}{\partial x_i} \right _{normS} = 0$ – производная, нормальная к плоскости симметрии;
Твердая стенка:	$\left. \frac{\partial C_\beta}{\partial x_i} \right _{normW} = 0$ – производная, нормальная к твердой поверхности.

Таблица 2.5 – Граничные условия для решения уравнений стандартной k-ε модели турбулентности

Краевые условия	Граничные условия
Вход:	$k_{\text{вход}} = \frac{2}{3} (u_{i,\text{вход}} Tu)^2$ – значение кинетической энергии турбулентности на входе, для технических приложений $Tu = \left( \frac{u_{i2}}{\bar{u}} \right)^{1/2} = 0.05 \dots 0.2$ – степень турбулентности;
Вход:	$\varepsilon_{\text{вход}} = C_{\mu}^{0.75} \frac{k^{3/2}}{L_m}$ – значение скорости диссипации на входе, где $L_m = 0.03 \cdot (4S/P)$ , $P$ – периметр контрольного объема на входе, $S$ – его площадь;
Выход:	$\left. \frac{\partial k}{\partial x_i} \right _{\text{normA}} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right _{\text{normA}} = 0$ – производная, нормальная к плоскости выхода;
Плоскость симметрии:	$u_i \Big _{\text{tang}} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right _{\text{normS}} = 0$ – производная, нормальная к плоскости симметрии;
Твердая стенка:	$k_i \Big _{\text{normW}} \text{ – значение на стенках;}$ $\varepsilon_i \Big _{\text{normW}} \text{ – значение на стенках.}$

### 2.3 Теплообмен излучением

При сжигании пылеугольного топлива передача теплоты в топочной камере энергетического котла происходит благодаря излучению, которое в зоне пламени может составлять около 90% и более от общего количества выделяющейся теплоты. Излучение пылеугольного факела является главным в этом процессе и его интенсивность в основном определяется составом продуктов сгорания и температурным уровнем процесса горения. При моделировании теплового излучения конвективной составляющей теплового потока в радиационном газоходе обычно пренебрегают ввиду малой скорости продуктов сгорания [79, р. 301; 80, р. 110; 89, р. 150; 102, р. 121].

В центральной области пламени, которая образуется вблизи поверхности угольных частиц топлива источниками излучения являются частицы кокса и золы, а также продукты сгорания. Основное влияние на теплообмен излучением в топочной камере котла оказывают водяной пар, углекислый и сернистые газы,



обладающие высокой концентрацией в топочном пространстве. Азот и кислород прозрачны для теплового излучения, они не излучают и не поглощают теплоту.

При моделировании сжигания пылеугольного топлива необходимо учитывать основную величину – спектральную интенсивность, характеризующую теплоперенос излучением (поглощение и испускание излучения в инфракрасной и видимой области), которая определяется следующим соотношением:

$$I_{\nu} = \lim_{\Delta A, \Delta \Omega \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta E_{\nu, \Theta}}{\Delta A \cdot \Delta \Omega \cdot \cos \Theta} \right), \quad (2.14)$$

Спектральная интенсивность  $I_{\nu}$  определяет поток энергии излучения с частотой  $\nu$ , испускаемой от элемента площади  $\Delta A$ , в телесном угле  $\Delta \Omega$  в направлении, которое определено конусом угла  $\Theta$ , образованном нормалью к излучающей плоскости и пучком излучения. Если в качестве транспортной переменной взять интенсивность излучения  $I_{\nu}$ , то уравнение баланса энергии излучения примет следующий вид [80, p. 118; 89, p. 148]:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} = -\frac{\partial I_{\nu}}{\partial s} - (K_{a,\nu} + K_{s,\nu}) I_{\nu} + K_{a,\nu} I_{b,\nu} + \frac{K_{s,\nu}}{4\pi} \int_{\Omega^*} P_{\nu}(\Omega^* \rightarrow \Omega) I_{\nu}(\Omega) d\Omega^* \quad (2.15)$$

Здесь  $K_a$  и  $K_s$  – оптические коэффициенты поглощения и рассеивания. Уравнение (2.15) будем решать при следующих допущениях:

а) т.к. значение скорости света велико, то изменение интенсивности во времени:

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} \rightarrow 0,$$

б) при термодинамическом равновесии коэффициенты поглощения и излучения равны:

$$K_a = \int_0^{\infty} K_{a,\nu} d\nu, \quad K_s = \int_0^{\infty} K_{s,\nu} d\nu,$$

в)  $I_b = \int_0^{\infty} I_{b,\nu} d\nu = \frac{\sigma}{\pi} \cdot T^4$  – интенсивность черного излучения (закон Планка), где  $T$  – температура,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана.

В этом случае уравнение (2.16) примет следующий вид:

$$\frac{\partial I_v}{\partial s} = -(K_a + K_s)I_v + K_a \frac{\sigma}{\pi} T^4 + \frac{K_s}{4\pi} \int [P(\Omega_i \rightarrow \Omega)I_v(\Omega_i)] d\Omega_i, \quad (2.16)$$

Для решения уравнения (2.16) и описания лучистого теплообмена в диссертационной работе применяется шестипоточная модель в декартовых координатах, предложенная Де Марко и Локвудом, которая учитывает распределение лучистой энергии на соответствующих участках и аппроксимируется с помощью степенных рядов Тэйлора по телесному углу в различных направлениях. Запишем два первых члена этого ряда [107, p. 184]:

$$I = A_i (\vec{n}_i \cdot \Omega) + B_i (\vec{n}_i \cdot \Omega)^2, \quad (2.17)$$

где коэффициенты  $A_i$  и  $B_i$ , связанные с интенсивностью в положительном  $I_i^+$  и отрицательном  $I_i^-$  направлениях ( $\pm x$ ,  $\pm y$  и  $\pm z$ ) можно записать в виде:

$$A_i = \frac{1}{2}(I_i^+ - I_i^-), \quad B_i = \frac{1}{2}(I_i^+ + I_i^-) \quad (2.18)$$

В уравнение переноса энергии излучения (2.16) подставим соотношения (2.17–2.18) и проинтегрируем его по телесному углу  $\Omega_i = 2\pi$  по всем направлениям координат. В результате получим систему дифференциальных уравнений, которая состоит из трех уравнений с шестью неизвестными:

$$\frac{\partial B_i(b_{i,j})}{\partial x_i} = -K_a A_i \quad (2.19)$$

После интегрирования уравнения (2.16) с учетом (2.17–2.19) по бесконечно малым углам в положительном и отрицательном направлении осей координат получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial A_i}{\partial x_i} = -K_a B_i + \frac{K_a}{\pi} \sigma T^4 \quad (2.20)$$

Объединяя уравнения (2.19) и (2.20), получим систему дифференциальных уравнений по шестипоточной модели Де Марко и Локвуда, которая имеет следующий вид [107, p. 185]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{1}{K_a} \frac{\partial}{\partial x_i} b_{i,j} B_i \right) = K_a B_i - \frac{K_a}{\pi} \sigma T^4, \quad (2.21)$$

где  $b_{ij}$  – коэффициент, имеющий вид матрицы:

$$b_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 + x_i''^2 & \frac{1 - x_i''^2}{2} & \frac{1 - x_i''^2}{2} \\ \frac{1 - x_i''^2}{2} & 1 + x_i''^2 & \frac{1 - x_i''^2}{2} \\ \frac{1 - x_i''^2}{2} & \frac{1 - x_i''^2}{2} & 1 + x_i''^2 \end{pmatrix}, \quad (2.22)$$

а параметры  $x_i''$ , которые зависят от интенсивности направляющего излучения, можно определить из следующего уравнения :

$$x_i''^2 = \gamma \frac{B_i}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}}, \text{ здесь } \gamma=0.1 \quad (2.23)$$

В уравнении баланса энергии (2.13) источниковый член, учитывающий лучистый теплоперенос, можно получить путем интегрирования суммарной интенсивности по телесному углу  $\Omega=4\pi$  и определяется он следующим соотношением:

$$S_h = \frac{4\pi}{3} \cdot K_a (B_1 + B_2 + B_3) - 4 \cdot K_a \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.24)$$

#### 2.4 Химическая модель сжигания твердого топлива в топочной камере энергетического котла

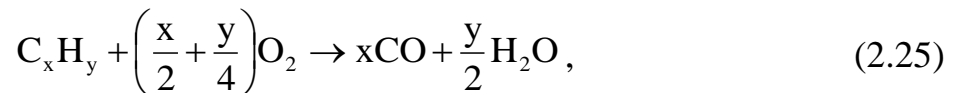
В уравнениях для энергии и компоненты вещества (Таблица 2.1) присутствуют источниковые члены  $S_h$  и  $S_\beta$ , которые определяются химической моделью сжигания твердого топлива и связаны со скоростью химической реакции  $\dot{\omega}_\beta$ . Для исследования процессов тепломассопереноса в топочной камере при горении в ней пылеугольного топлива в диссертационной работе была выбрана упрощенная химическая модель [89, р. 151]. Согласно этой модели, рассматривались только интегральные реакции ключевых компонентов и реакции их окисления до стабильных конечных продуктов, а промежуточные реакции с образованием неустойчивых продуктов не учитывались.

Горение – это сложный физико-химический процесс, который включает в себя ряд последовательно и параллельно протекающих физических и химических стадий. Основу процесса горения составляет химическое взаимодействие между горючими веществами и окислителем и изучению химического фактора при горении топлива следует уделить большое внимание [108, с. 70]. При моделировании процессов, протекающих в камере сгорания

исследуемого котла, в диссертационной работе учитывались модели горения в виде следующих этапов: пиролиз с выходом летучих веществ и образованием коксового остатка, горение летучих продуктов и оксида углерода и горение коксового остатка.

При выборе моделей пиролиза и сгорания не применялись громоздкие системы с большим количеством компонент. В диссертационной работе была использована одноэтапная модель пиролиза, описанная в работах [89, р. 157; 109–114]. В этом случае стехиометрические коэффициенты реакции пиролиза можно вывести из данных экспресс-анализа, а сама модель достаточно точно работает во многих случаях и не требует больших вычислительных затрат.

Летучие вещества, полученные в процессе пиролиза, образуют реакционно-способную смесь, которая в дальнейшем взаимодействует с кислородом воздуха. Это взаимодействие может быть представлено в виде двухступенчатой реакции, согласно которой на первом этапе происходит окисление основных летучих веществ до CO и H<sub>2</sub>O [115–117]:



а окисление до CO<sub>2</sub> происходит на втором этапе:



Для определения скорости сгорания продуктов пиролиза в диссертационной работе с учетом реакций (25) и (26) используется концепция турбулентной диссипации (Eddy-Dissipation Model, EDM), предложенная и подробно рассмотренная в работе [117, р. 719]. Скорость сгорания летучих  $\dot{\omega}_{FL}$  связана с энергией турбулентности  $k$  и ее диссипацией  $\varepsilon$ . Для областей с небольшим количеством топлива и достаточным содержанием кислорода имеем:

$$\dot{\omega}_{1FL} = c_1 \bar{c}_{FL} \frac{\varepsilon}{k}, \quad \text{где} \quad c_1 = 4.0 \quad (2.27)$$

В случае достаточного количества топлива скорость реакции зависит от коэффициента стехиометрии и определяется соотношением:

$$\dot{\omega}_{2FL} = C_2 \frac{\bar{c}_{O_2}}{v_{O_2FL}} \frac{\varepsilon}{k}, \quad \text{где} \quad c_2 = 4.0 \quad (2.28)$$

Если количество топлива и окислителя достаточно, то в этом случае

скорость сгорания летучих определяется как:

$$\dot{\omega}_{3FL} = C_{3FL} \frac{\bar{c}_{CO_2} + \bar{c}_{H_2O}}{\nu_{O_2FL} + 1} \frac{\varepsilon}{k}, \text{ где } c_3 = 2.0 \quad (2.29)$$

Горение коксового остатка является самой продолжительной стадией, которая составляет около 90% всего времени процесса горения угля, а теплота сгорания коксового остатка составляет основную часть теплоты сгорания горючей массы. Изменение концентрации углерода коксового остатка  $\xi_C$  определяется уравнением:

$$\frac{d\xi_C}{dt} = -k_C A_{sp} \xi_C, \quad (2.30)$$

где  $k_C$  – константа скорости окисления углерода коксового остатка, а  $A_{sp}$  – удельная поверхность частицы, отнесенная к ее массе. Реакция горения твердого углерода на поверхности частиц кокса определяется диффузией кислорода из окружающей среды в пограничный слой и в пористую среду частицы, а также реакцией между углеродом и кислородом. В этой связи для  $k_C$  справедливо следующее выражение [89, p. 156; 99, p. 269; 103, p. 253; 104, p. 1251; 105, p. 700; 106, p. 206; 118–121]:

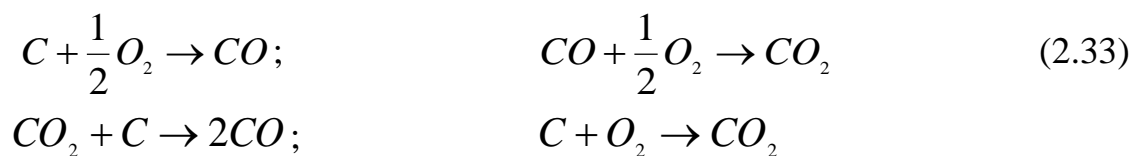
$$k_C = \frac{k_C^{(D)} k_C^{(chem)}}{k_C^{(D)} + k_C^{(chem)}} \quad (2.31)$$

Вклад диффузии кислорода определяется выражением:

$$k_C^{(D)} = \frac{2\nu_c D M_c}{RT_m d_p}, \quad (2.32)$$

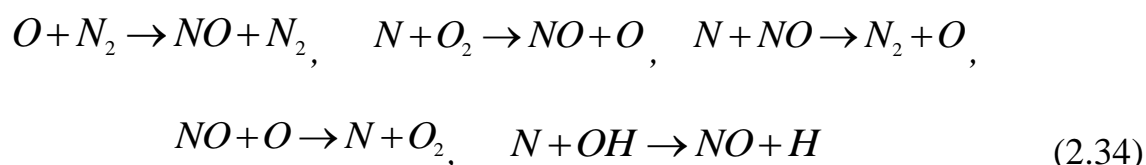
а константа скорости химической реакции как:  $k_C^{chem} = k_{oc} \exp(-E_c/RT_x)$ .

При написании соотношений (2.30–2.32) введены следующие обозначения:  $D = D_0(T_m/T_0)^{1.75}$  – коэффициент диффузии;  $T_m = (T_r + T_q)/2$  – средняя температура;  $E_c = 79.4$  [kJ/mol] – энергия активации;  $k_{oc} = 204 \left[ \frac{kg}{m^2 s \cdot bar^n} \right]$ ;  $T_0 = 1600$  K;  $D_0 = 3.49 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. При выгорании кокса в зависимости от диаметра и температуры частиц образуется оксид и диоксид углерода. Окись углерода CO образуется при высоких температурах, а двуокись углерода CO<sub>2</sub> при низких температурах процесса [35, с. 108; 38, с. 200; 55, с. 119; 122]:



Выбросы оксидов азота ( $NO_x = NO + NO_2$ ), которые образуются при сжигании топлива на угольных ТЭС, являясь самыми токсичными загрязнителями атмосферы вызывают окисление атмосферных осадков, фотохимическое загрязнение воздуха и истощение озонового слоя. Окись азота NO, составляющая более 90% от общего количества его оксидов, выбрасываемых топочными устройствами, окисляется далее в атмосфере до  $NO_2$ . Одной из важнейших задач организации процесса «чистого» сжигания угля в топочной камере ТЭС и его оптимизации является снижение выбросов оксидов азота  $NO_x$  в окружающую среду.

Образование оксидов азота зависит от конструктивных параметров топочной камеры, температуры и интенсивности пылеугольного факела, содержания азота в топливе и окислителе, времени нахождения газообразных продуктов сгорания в зоне высоких температур, избыточной подачи воздуха в топочное пространство. При горении пылеугольного топлива оксиды азота образуются за счет окисления молекулярного азота воздуха (термические  $NO_x$ ), азота топлива (топливные  $NO_x$ ), в результате реакций между молекулярным азотом и углеводородными радикалами (быстрые  $NO_x$ ). При сжигании угольной пыли доля быстрых  $NO_x$  не превышает 5%, поэтому мы ее и не учитываем. Механизм образования термических  $NO_x$ , которые составляют от 20 до 50% от общего количества оксидов азота, предложен Я.Б. Зельдовичем в виде химических реакций [123]:



Основная реакция образования топливных  $NO_x$  – это реакция окисления азота топлива, связанного в комплексные азотсодержащие органические соединения, которые выделяются в процессе выхода летучих. Они быстро превращаются в синильную кислоту HCN или аммиак  $NH_3$ , азот из которых может покинуть их при восстановлении NO до  $N_2$  или при окислении до NO. Разложение происходит также при дожигании NO с углеводородами, с образованием HCN снова. Разработаны различные обобщенные и упрощенные модели формирования топливных  $NO_x$ . Так, например, Де Соте разработал следующие схемы с двумя составляющими конкуренцию реакциями формирования и разложения NO [124]. Первая схема основывается на синильной кислоте HCN:

$$\frac{dY_{NO}}{dt} = 1 \cdot 10^{10} Y_{HCN} Y_{O_2}^b \exp(-33700/T), \quad (2.35)$$

$$\frac{dY_{N_2}}{dt} = 3 \cdot 10^{12} Y_{HCN} Y_{NO}^b \exp(-30100/T), \quad (2.36)$$

где  $Y$  – мольная доля;  $b$  – частичный порядок реакции относительно концентрации кислорода представляет собой энергию активации, выраженную в кал/моль.

Согласно другой схеме автор предлагает учитывать аммиак  $NH_3$ :

$$\frac{dY_{NO}}{dt} = 4 \cdot 10^6 Y_{NH_3} Y_{O_2}^b \exp(-16100/T), \quad (2.37)$$

$$\frac{dY_{N_2}}{dt} = 1.8 \cdot 10^8 Y_{NH_3} Y_{NO}^b \exp(-13600/T) \quad (2.38)$$

Разработано множество кинетических моделей образования оксидов азота для численного моделирования и самой распространенной среди них является модель Митчелла и Тарбелла [111, р. 302]. Авторами был предложен глобальный механизм реакций с участием азота и азотсодержащих компонентов, таких как аммиак  $NH_3$ , синильная кислота  $HCN$ , окись азота  $NO$  и молекулярный азот  $N_2$ . При соединении с окислителем (кислород) происходит преобразование  $HCN$  в  $NH_3$  и скорость этой реакции определяется из уравнения:

$$\frac{dY_{HCN}}{dt} = -1.94 \cdot 10^{15} Y_{HCN} Y_{O_2} \exp(-39500/T) \quad (2.39)$$

Далее аммиак  $NH_3$  участвует в образовании и деструкции окиси азота  $NO$  в двух составляющих конкуренцию, но параллельно протекающих реакциях, со скоростями, которые описываются следующими уравнениями:

$$\frac{dY_{NO}}{dt} = \frac{3.48 \cdot 10^{20} Y_{NH_3} Y_{O_2} \exp(-50325/T)}{1 + 6.90 \cdot 10^{-6} \exp(21140/T)}, \quad (2.40)$$

$$\frac{dY_{NH_3}}{dt} = -6.22 \cdot 10^{14} Y_{NH_3} Y_{NO} \exp(-27680/T) \quad (2.41)$$

Митчелл и Тарбелл в своей модели предлагают при взаимодействии с углеводородами учитывать также реакцию рециркуляции окиси азота  $NO$  в синильную кислоту  $HCN$ , скорость которой можно определить из соотношения:

$$\frac{dY_{NO}}{dt} = -1.0 \cdot 10^4 Y_{NO} Y_{CxHy} \quad (2.42)$$

Уравнения, представленные в главе 2, составляют основу физико-математической и химической моделей, которые описывают процессы тепломассопереноса в топочной камере энергетического котла, сжигающего твердое топливо в пылевидном состоянии. В следующей главе настоящей диссертации определены необходимые технические и геометрические данные (размеры топочной камеры и используемых горелочных устройств, производительность, коэффициент избытка воздуха, количество горелок и дополнительных сопел и высота их расположения, способ, объем и скорость подачи аэросмеси и воздуха, состав топлива и окислителя и мн.др.) и создана геометрическая модель, правильно описывающие реальные технологические процессы сжигания отечественного высокозольного угля (карагандинский уголь, зольность 35,1%) в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.



### 3 ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Основные характеристики парового котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ

В качестве исследуемого объекта была выбрана топочная камера котла БКЗ-75 действующей Шахтинской ТЭЦ (г. Шахтинск, Казахстан). Котел БКЗ-75 – однобарабанный, с естественной циркуляцией, вертикально-водотрубный, выполнен по П-образной компоновке, работающий на твердом топливе. Производительность топочной камеры 75 т/ч (51,45 Гкал/ч), давление перегретого пара 39 кгс/см<sup>2</sup>, температура перегретого пара 450 °С. Стены топочной камеры полностью экранированы трубами диаметром 60 и толщиной стенки 3 мм, расположенными с шагами 75 и 90 мм, объемом 454 м<sup>3</sup>. На рисунке 3.1 приведена общая схема исследуемого парового котла БКЗ-75 [125].

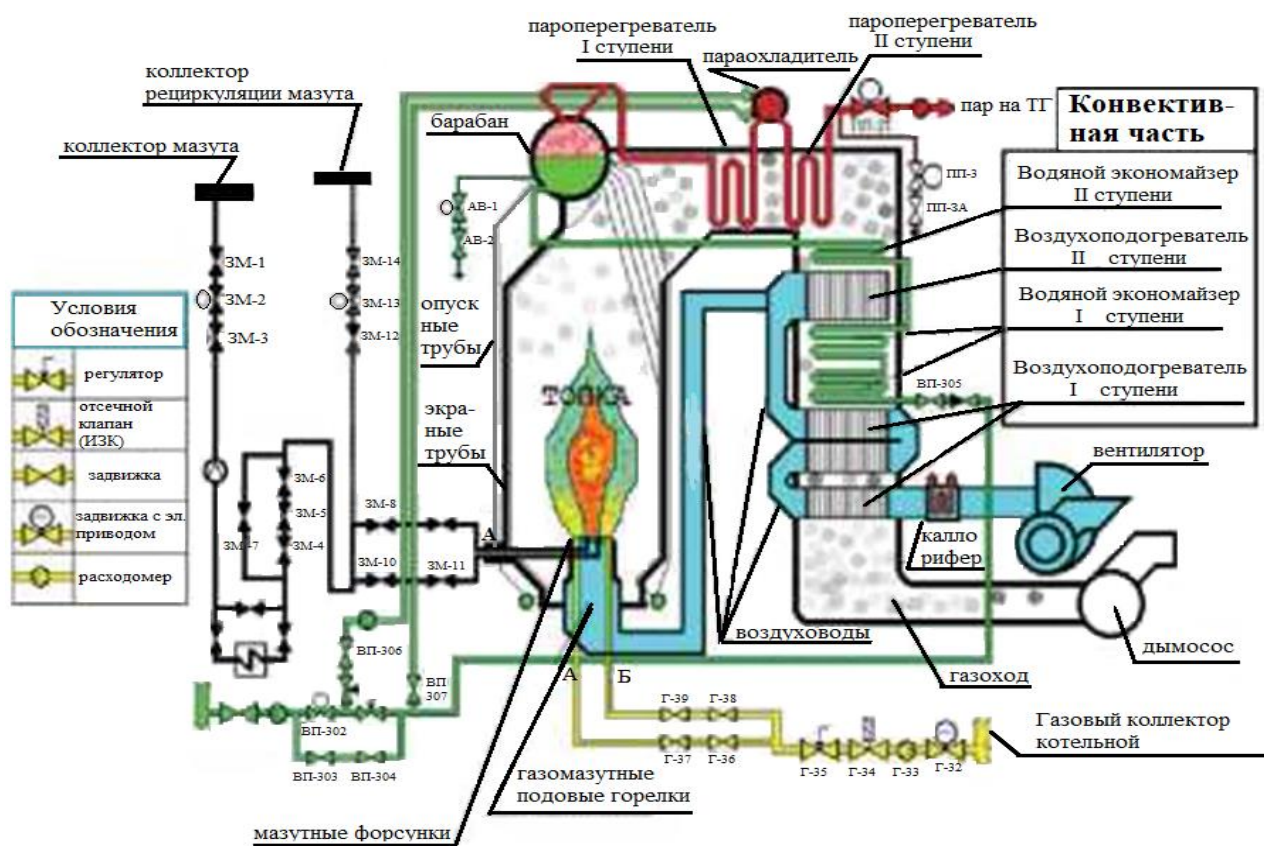


Рисунок 3.1 – Общая схема парового котла БКЗ-75 [125, с. 242]

Схема испарения – трехступенчатая. Котел имеет один барабан, предназначенный для разделения пароводяной смеси и барботажной (пропускание через жидкость газа или пара под давлением) промывки насыщенного пара питательной водой. Пароперегреватель – конвективный, вертикального исполнения, змеевиковый с коридорным расположением труб, выполнен из двух блоков, расположенных в поворотном газоходе между топкой

и опускным газоходом. Температура перегрева регулируется поверхностным пароохладителем [126].

Экономайзер стальной трубчатый с шахматным расположением труб кипящего типа, гладкотрубный, предназначен для нагрева питательной воды до температуры близкой к температуре насыщения пара. Воздухоподогреватель стальной трубчатый вертикального типа с шахматным расположением труб, предназначен для подогрева воздуха, подаваемого в топку котла и необходимого для обеспечения процесса горения топлива [127].

Топочная камера котла БКЗ-75 оборудована четырьмя пылеугольными горелками, расположенными на фронтальной и задней стенках топочной камеры в один ярус по две горелки. В подобной конструкции используется индивидуальная замкнутая система пылеприготовления с прямым вдуванием пыли и индивидуальная система пылеприготовления, состоящая из двух молотковых мельниц. Горелка обеспечивается угольной пылью от обеих мельниц, производительность одной горелки по карагандинскому углю 3,2 т/ч. Горелки имеют конструкцию, как указано на рисунке 3.2, где 1 – мазутопровод, 2 – воздух для сжигания мазута, 3 – короб аэросмеси, 4 – короб вторичного воздуха, 5 – лопаточный аппарат, 6 – мазутная форсунка, 7 – топочное пространство.

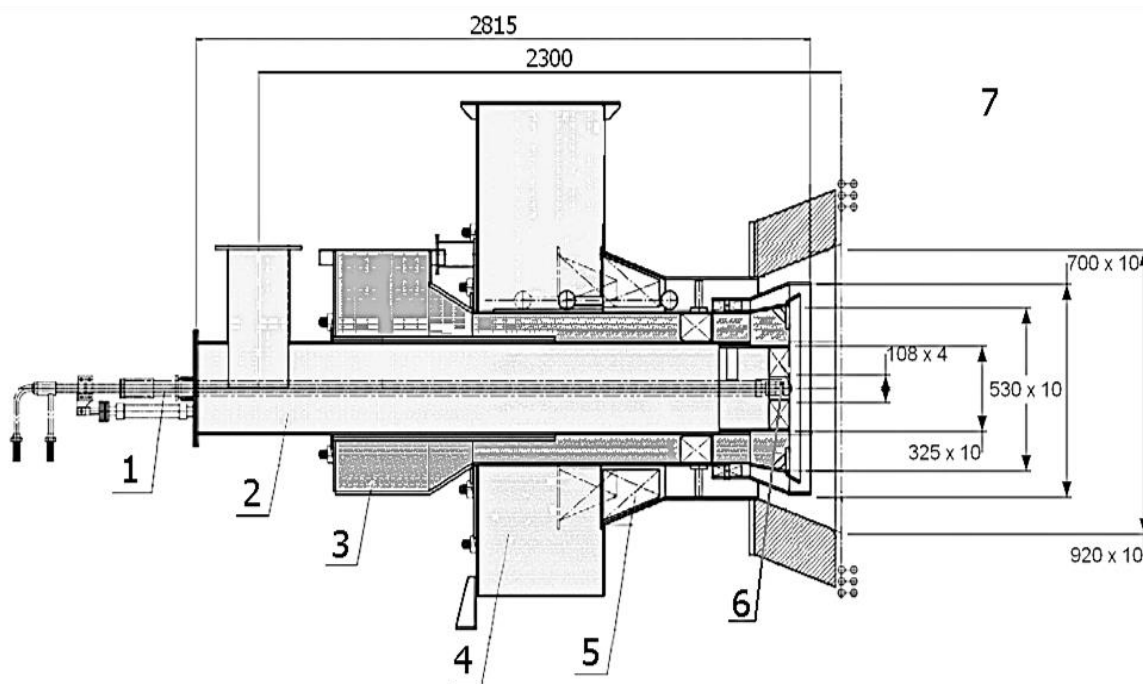


Рисунок 3.2 – Схема пылеугольной горелки в продольном разрезе, используемой в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ

В топочной камере котла БКЗ-75 сжигается пыль карагандинского угля, зольность которого составляет 35,1%. Основные технические характеристики котельной установки, расчетные показатели ее работы, а также состав используемого топлива приведены в таблицах 3.1–3.3.

Таблица 3.1 – Расчетные показатели работы топочной камеры котла БКЗ-75

№	Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
1	Номинальная паропроизводительность	$D$	т/ч	75
2	КПД котла	$\eta$	%	80,88
3	Количество горелочных устройств на котле	$N_G$	шт.	4
4	Производительность одной горелки по топливу	$B_G$	т/ч	3,2
5	Расход первичного воздуха на котел	$V_{ПВ}$	нм <sup>3</sup> /ч	31797
6	Расход вторичного воздуха на котел	$V_{ВТ.В}$	нм <sup>3</sup> /ч	46459
7	Давление перегретого пара	$P_{ПП}$	кгс/см <sup>2</sup>	38,72
8	Температура перегретого пара	$T_{ПП}$	°С	438,1
9	Давление питательной воды	$P_{ПВ}$	кгс/см <sup>2</sup>	60
10	Температура питательной воды	$t_{ПВ}$	°С	105,34
11	Температура уходящих газов	$t_{УГ}$	°С	128,85
12	Коэффициент избытка воздуха в топочной камере котла	$\alpha$	-	1,2
13	Температура горячего воздуха	$t_{ГВ}$	°С	290
14	Присосы в топочной камере котла	$\Delta\alpha_T$	-	0,10
15	Присосы в пароперегревателе	$\Delta\alpha_{ПП}$	-	0,03
16	Присосы в экономайзере	$\Delta\alpha_{ЭК}$	-	0,02
17	Присосы в воздухоподогревателе	$\Delta\alpha_{ВП}$	-	0,03
18	Расчетный расход топлива на котёл	$B_P$	т/ч	12,49
19	Температура холодного воздуха	$t_{ХВ}$	°С	30
20	Давление на входе	$P$	мбар	$1,013 \cdot 10^3$
21	Гидродинамическое сопротивление канала аэросмеси горелки	$\Delta P$	мм.в.ст.	67,1
22	Температура аэросмеси	$t_{АС}$	°С	140
23	Температура стенки	$t_{СТ}$	°С	430,15
24	Высота топочной камеры	$h$	м	16,75
25	Ширина топочной камеры	$w$	м	6
26	Глубина топочной камеры	$d$	м	6,6
27	Площадь фронтальной и задней стенки	$F_{ФР}, F_{ЗД}$	м <sup>2</sup>	90,675
28	Площадь правой боковой стенки	$F_{Б1}$	м <sup>2</sup>	92,4
29	Площадь левой боковой стенки	$F_{Б2}$	м <sup>2</sup>	110,55
30	Площадь потолочной стенки	$F_{ПОТ}$	м <sup>2</sup>	27,72
31	Площадь подовой стенки	$F_{ПОД}$	м <sup>2</sup>	7,26

Таблица 3.2 – Состав и исходные данные карагандинского угля

Состав исходной угольной пыли, %		Исходные данные карагандинского угля			
		Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение
$W^P$	10,60	Тип угля	КР-200	-	-
$A^c$	35,10	Тонина помола	$R_{90}$	%	20
$S_2$	1,04	Плотность угля	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	1300
$C$	43,21				
$H_2$	3,60	Теплота сгорания угля	$Q_H^P$	ккал/кг	4433
$O_2$	5,24				
$N_2$	1,21				
$V^T$	22,00				

Таблица 3.3 – Дисперсионный состав топлива

Фракции	Размер частиц, мкм	Содержание фракции, %
1	10	10
2	30	20
3	60	40
4	100	30

### 3.2 Описание топочной камеры для построения геометрической модели и проведения вычислительных экспериментов

В полном соответствии с рабочими характеристиками котла БКЗ-75 и топлива нами создана геометрическая компьютерная модель топочной камеры для проведения вычислительных экспериментов. При ее создании были использованы необходимые технические данные и геометрические параметры (размеры камеры и используемых горелочных устройств, производительность, коэффициент избытка воздуха, количество горелок и дополнительных сопел и высота их расположения, способ, объем и скорость подачи аэросмеси и воздуха, состав топлива и окислителя и мн. др.), которые соответствуют реальным технологическим процессам сжигания высокозольного карагандинского угля в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. На рисунке 3.3 представлена геометрия топочной камеры и компоновка горелок.

В диссертационной работе для проведения вычислительных экспериментов по исследованию процессов тепломассопереноса в топочной камере котла ТЭС в качестве стартовой использовалась немецкая компьютерная программная система FLOREAN [89, p. 148; 113, p. 565; 128–131]. Эта программная система позволяет проводить сложные вычислительные эксперименты по моделированию реагирующих многофазных течений в областях реальной геометрии и широко используется в Германии для исследований процессов

теплопереноса в камерах сгорания многих теплоэнергетических объектов. Немецкие коллеги провели многочисленные вычислительные эксперименты по сжиганию пылеугольного топлива в топочных камерах ТЭС в различных странах (Германия, Англия, Хорватия, Греция, Румыния и др.). Полученные результаты были успешно верифицированы с помощью результатов натурных экспериментов, проведенных непосредственно на действующих ТЭС.

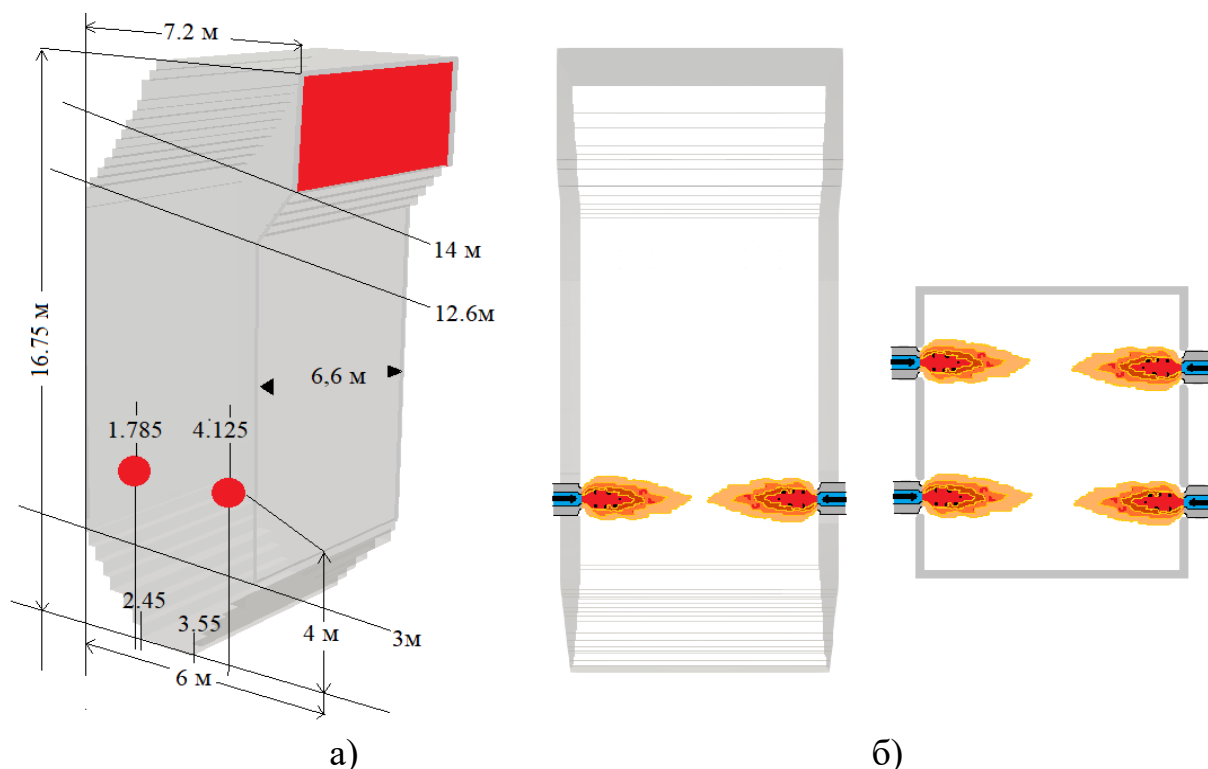


Рисунок 3.3 – Геометрия а) и компоновка горелками б) топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ

При выполнении диссертационной работы нами была разработана методика использования программной системы FLOREAN. Дело в том, что казахстанский уголь (зольность до 50%) значительно отличается от немецкого (зольность около 8%), а геометрия отечественных топочных камер, способ подачи топлива и окислителя в нее также абсолютно разные. Для этого нам пришлось дополнить, расширить, протестировать стартовую программную систему FLOREAN, чтобы можно было его использовать для проведения вычислительных экспериментов по сжиганию высокозольного казахстанского угля на ТЭС Республики Казахстан.

Как было сказано выше в данной диссертационной работе был использован метод контрольных объемов, который применяется для численного решения дифференциальных уравнений, описывающих теплоперенос в топочной камере, и подробно описан в следующих работах [89, р. 141; 132–136]. Метод контрольного объема основан на разбиении топочной камеры исследуемого котла на малые объемы, по которым интегрируются дифференциальные

уравнения математической модели. Количество контрольных объемов зависит от геометрии топочной камеры, ее размеров, расположения горелочных устройств.

Создание конечно-разностной сетки – один из наиболее трудоемких этапов подготовки CFD-задачи. В процессе создания окончательного варианта расчетной области конечно-разностная сетка для проведения численного моделирования неоднократно тестируется и редактируется. Это в свою очередь позволило улучшить геометрическую модель, численные расчеты и графическую интерпретацию результатов. В соответствии с заданной геометрией котла БКЗ-75 была создана конечно-разностная сетка для численного моделирования, которая для исследуемой камеры сгорания БКЗ-75 имеет шаги по осям X, Y, Z:  $59 \times 32 \times 67$ , что составляет 138 355 контрольных объемов (рисунок 3.4). Расчеты по численной модели выполнены для условий, принятых при организации реального технологического процесса сжигания топлива на ТЭС.

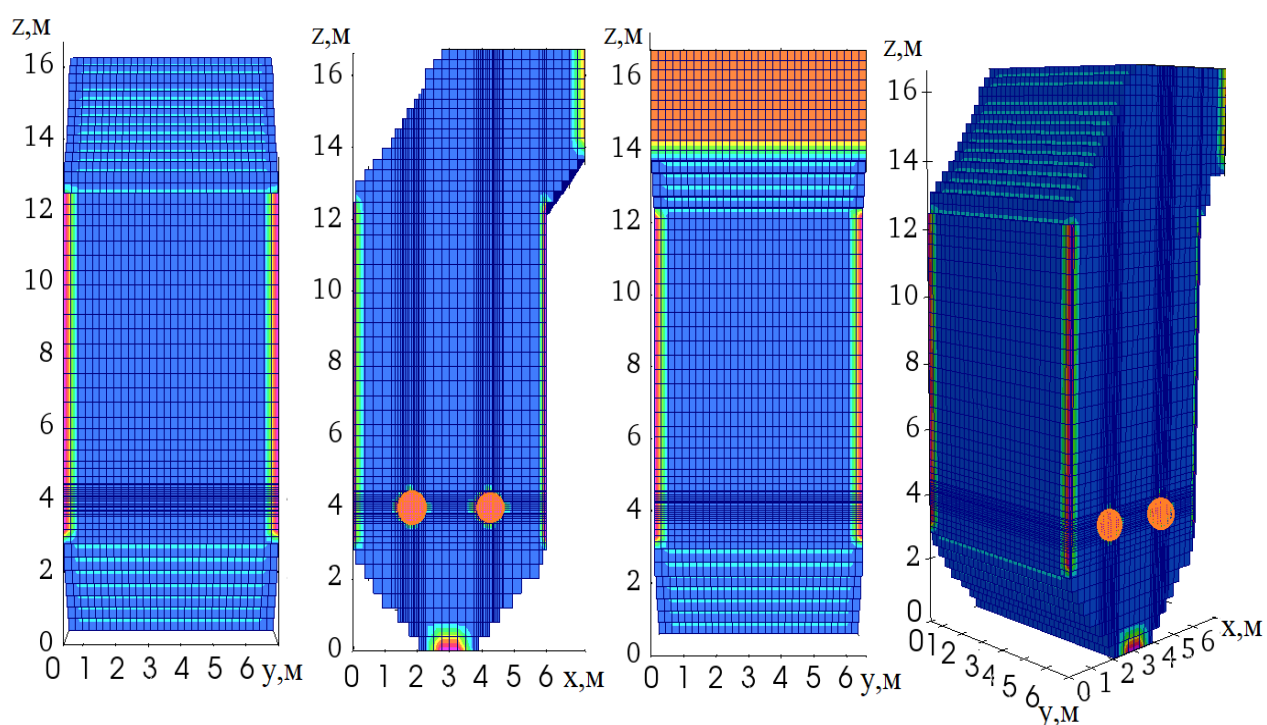


Рисунок 3.4 – Конечно-разностная сетка для проведения численного моделирования процессов сжигания твердого топлива в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ

В следующей главе настоящей диссертации приведены результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния различных способов ввода топлива (прямоточный и вихревой с углом закрутки пылеугольного потока) через горелочные устройства на характеристики процессов тепломассопереноса (вектор полной скорости, распределение температуры и концентрации продуктов горения) в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ при сжигании в ней высокозольного карагандинского угля.

#### **4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЛА БКЗ-75 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДАЧИ АЭРОСМЕСИ**

В данном разделе диссертации рассмотрены различные способы подачи твердого топлива (прямоточный и вихревой) при его сжигании в топочной камере котла, действующей казахстанской ТЭС. Вычислительные эксперименты выполнены на примере котла БКЗ-75 (г. Шахтинск, Карагандинская область), в топке которого сжигается высокозольный карагандинский уголь (зольность 35,1%).

Для сжигания пылеугольного топлива используются прямоточные либо вихревые горелки. Прямоточными называют горелки, в которой потоки топлива и воздуха вводятся в топку без закрутки. В этом случае перемешивание струй определяется главным образом взаимным расположением горелок на стенах топки и созданием необходимой аэродинамики струй в её объеме. Ввиду сниженной турбулизации потока прямоточные горелки создают дальнобойные струи с малым углом расширения и с вялым перемешиванием первичного и вторичного потоков.

Поэтому успешное сжигание топлива достигается взаимодействием струй разных горелок в объеме топочной камеры. Они могут быть установлены неподвижно или выполнены как поворотные, что облегчает наладку топочного режима. Прямоточные горелки имеют, как правило, относительно небольшую производительность, поэтому в мощных паровых котлах их набирают в блоки. Прямоточные горелки применяются в основном для сжигания высокореакционного топлива: бурых углей, торфа, сланцев и каменных углей с высоким выходом летучих веществ [137].

Вихревыми называют горелки, у которых первичный или вторичный воздух закручиваются специальными завихрителями. Закручивание потоков достигается при помощи улиток, устанавливаемых на входе в горелку, или лопаток, устанавливаемых в горелке аксиально или тангенциально в потоке первичного или вторичного воздуха. Так, в вихревой пылеугольной горелке, выполненной по типу прямоточно-улиточной, первичный воздух с пылью подается через центральную трубу прямоточно без закручивания, а вторичный воздух, подаваемый в топку через горелку, закручивается улиткой.

Аэросмесь поступает в топку через центральную трубу, имеющую на конце чугунный наконечник в виде конуса-рассекателя, который может перемещаться и тем самым обеспечивает хорошее «раскрытие» пылевоздушной смеси, а также подсос горячих топочных газов к корню факела, что интенсифицирует воспламенение топлива. Вторичный воздух, подаваемый через улитку, выходит в топку завихренным через кольцевое пространство, образуемое наконечником и обмуровкой [138].

В настоящей главе диссертации проведено исследование двух вариантов поступления топлива через горелочные устройства: 1) прямоточный способ подачи аэросмеси – горелки расположены на противоположных боковых стенках

(рисунок 4.1 а); 2) вихревой способ подачи аэросмеси – горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов (рисунок 4.1 б). По результатам проведенных исследований приведено сравнение характеристик процессов тепломассопереноса [139–140].

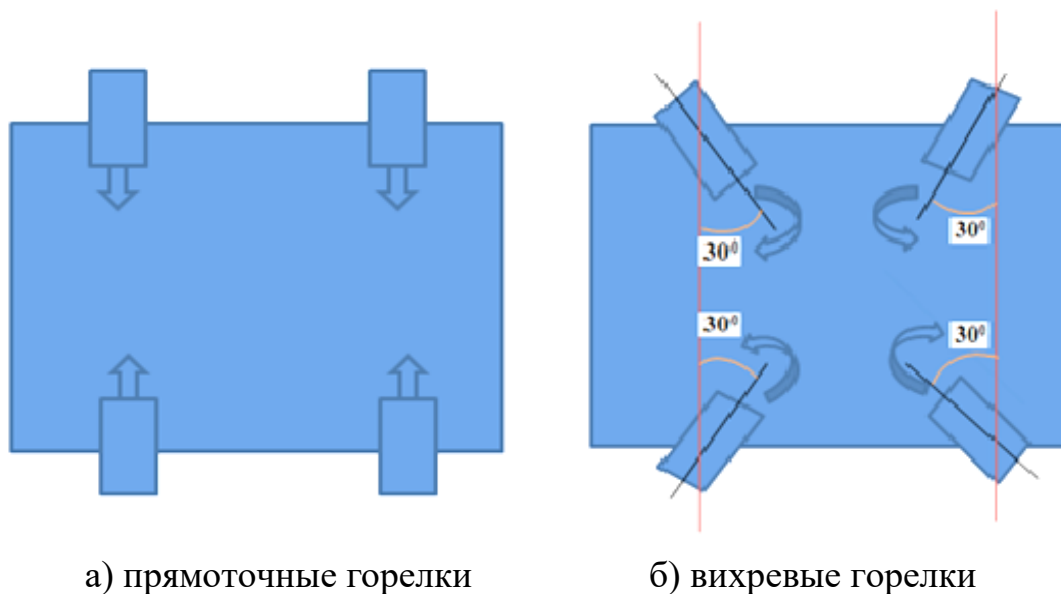


Рисунок 4.1 – Схема расположения горелочных устройств в топочной камере котла БКЗ-75

На рисунке 4.1 приведена схема расположения различных горелочных устройств (прямоточные и вихревые) в топочной камере котла БКЗ-75. Ниже представлены результаты исследования тепловых процессов, аэродинамических и концентрационных характеристик топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ (Казахстан) для указанных двух режимов подачи пылеугольного топлива.

#### 4.1 Исследование аэродинамики топочной камеры котла БКЗ-75

На рисунках 4.2–4.5 представлена аэродинамика топочной камеры котла БКЗ-75, а именно распределения вектора полной скорости  $v = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$  в различных ее сечениях. Вектор полной скорости обозначен на приведенных рисунках в виде стрелок различных цветов. Направление стрелки указывает на направление скорости среды, а с помощью цветной шкалы можно определить ее численное значение. Полученные поля вектора полной скорости позволяют проанализировать движение реагирующих потоков в топочном пространстве в различных его сечениях, которые указаны здесь же на рисунках.

На рисунке 4.2 приведено распределение вектора полной скорости в поперечном сечении в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 для двух исследуемых режимов (прямоточный и вихревой). Анализ рисунка показывает, что при прямоточном способе подачи аэросмеси потоки, направленные из горелок, сталкиваясь соударяются в центре топочной камеры



(рисунок 4.2 а). При вихревом способе картина течения изменена, потоки аэросмеси и воздуха, направленные из вихревых горелок под углом 30 градусов закручиваются и образуют завихрение в центре топочной камеры (рисунок 4.2б). Сравнивая рисунки 4.2 а и 4.2 б, можно заметить, что при вихревом способе подачи аэросмеси увеличивается турбулентность течения.

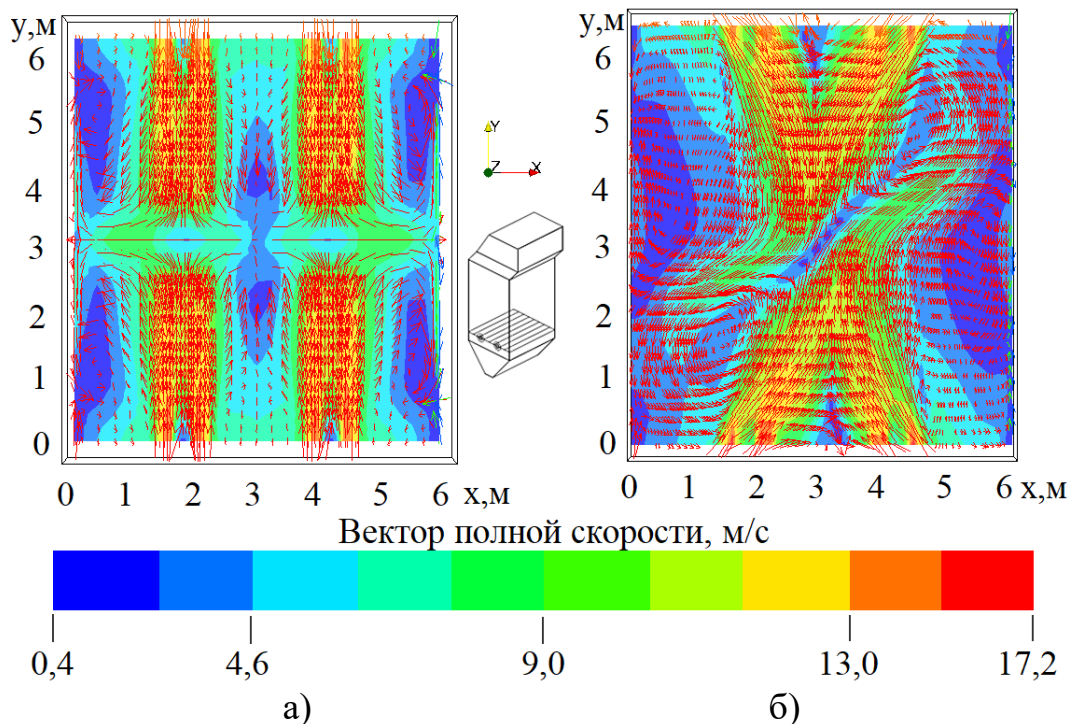


Рисунок 4.2 – Распределение вектора полной скорости в поперечном сечении топочной камеры (область пояса горелок,  $h=4.0$  м) котла БКЗ-75 при:  
а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

Рисунки 4.3–4.4 иллюстрируют картину распределения вектора полной скорости в центральном ( $y=3.3$  м) и в продольном сечениях ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при различных способах сжигания твердого топлива (прямоточный и вихревой). Анализ рисунков показывает, что при прямоточном способе подачи аэросмеси потоки, соударяясь в центре под прямым углом, рассекаются и, объединившись в два основных потока направляются к выходу из камеры сгорания (рисунки 4.3 а, 4.4 а).

А при вихревом способе четыре закрученных потока, направляющиеся из вихревых горелок, соударяются между собой в центральной части под углом 30 градусов, а затем, объединившись, направляются к выходу из топочного пространства, с образованием вихревого течения большей интенсивности (рисунки 4.3 б, 4.4 б).

Как известно, угольные частицы в топочной камере сгорают не полностью, часть уносится дымовыми газами в виде летучей золы, а другая выпадает в шлак через холодную воронку, это в свою очередь приводит к потере тепла, связанной с механическим недожогом топлива.

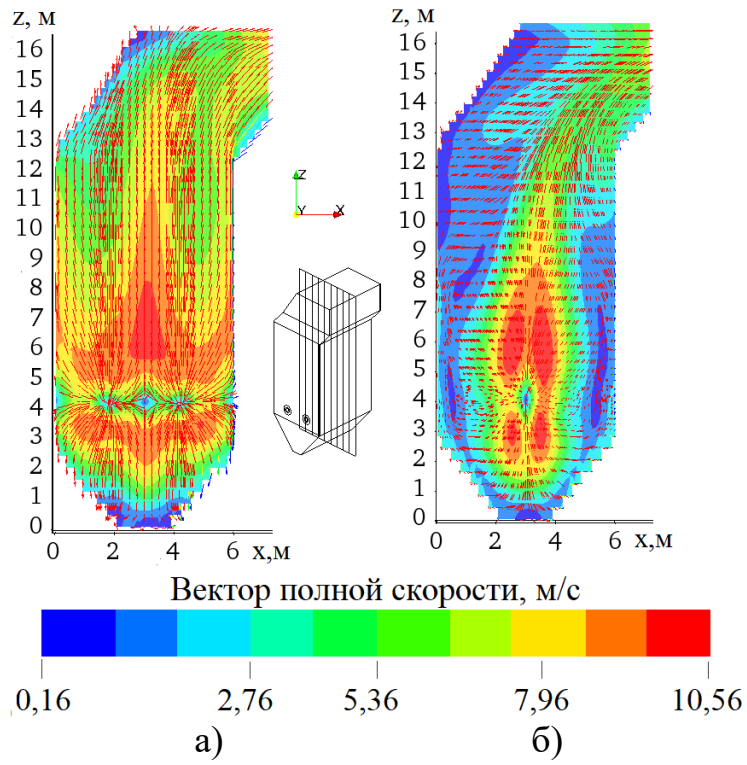


Рисунок 4.3 – Распределение вектора полной скорости в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при:  
 а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

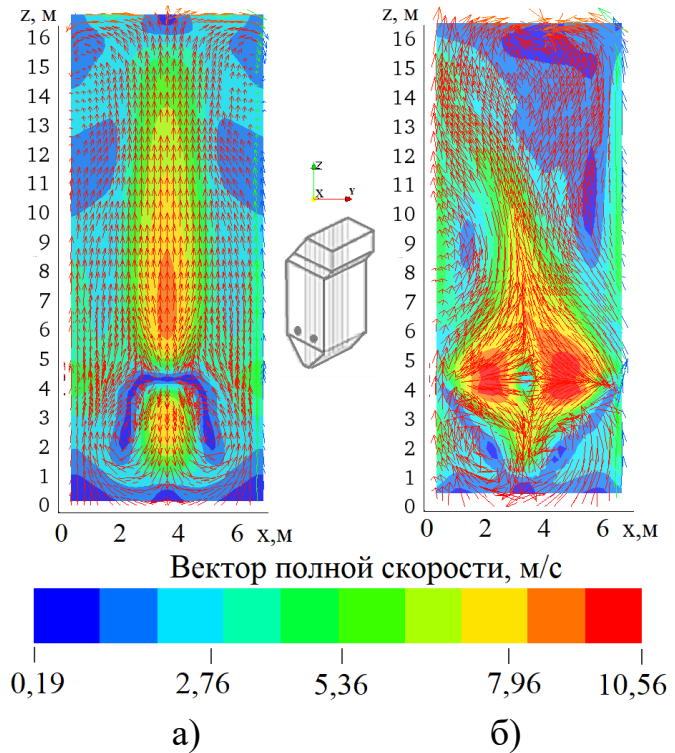


Рисунок 4.4 – Распределение вектора полной скорости в продольном сечении ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при:  
 а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

Анализируя картину течения, представленную на рисунках 4.3–4.4, можно сделать вывод о том, что вихревой способ подачи аэросмеси способствует более интенсивному вихревому движению пылегазовых потоков внутри топочной камеры. Это увеличивает время пребывания угольной пыли в зоне горения, уменьшает механическую неполноту сгорания, что позволит оптимизировать процесс сжигания пылеугольного топлива в топочной камере котла БКЗ-75.

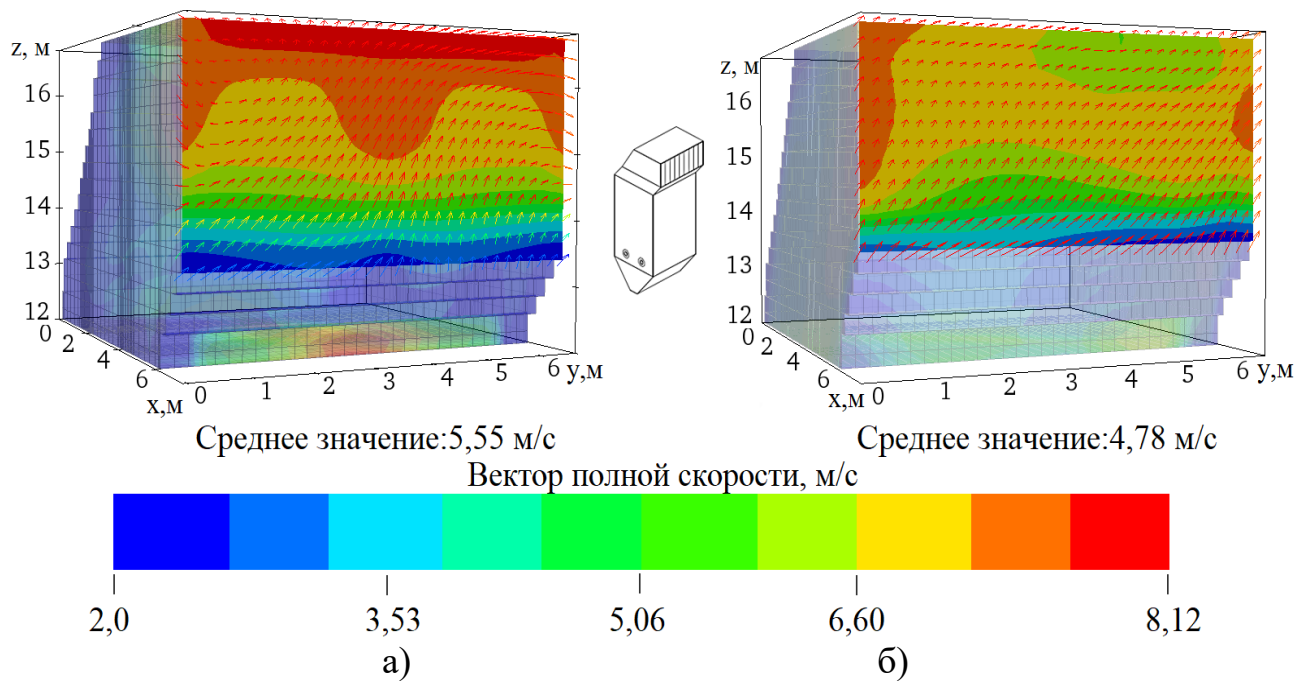


Рисунок 4.5 – Распределение вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе ( $h=16.75$  м) из топочной камеры котла БКЗ-75 при:  
а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

Распределение вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе ( $h=16.75$  м) из топочной камеры котла БКЗ-75 для двух исследуемых режимов представлено на рисунке 4.5. Мы видим, что по мере удаления от области распространения струй из горелок вектор полной скорости выравнивается, вихревой характер течения ослабевает, поток расширяется и на выходе равномерно распределяется по всему сечению. Среднее по сечению значение вектора полной скорости при вихревом способе подачи аэросмеси на выходе из топочного пространства меньше ( $4,78$  м/с), чем при прямоточном способе ( $5,55$  м/с).

#### 4.2 Исследование температурных характеристик топочной камеры

Методами компьютерного моделирования были получены температурные поля в различных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75 для двух исследуемых режимов подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой), которые приведены на рисунках 4.6–4.9. Трехмерные графики и шкала температур

позволяют определить значение температуры в любой точке топочной камеры.

График распределения температуры в поперечном сечении камеры сгорания котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при прямоточном и вихревом способе подачи аэросмеси представлен на рисунке 4.6. Мы видим существенное качественное различие в температурных полях для двух рассматриваемых случаев. Что касается количественного соотношения, то среднее значение температуры в выбранном сечении ( $h=4.0$  м) для прямоточного способа подачи аэросмеси равно  $620,56$  °С, в то время как для вихревых горелок оно составляет  $854,52$  °С.

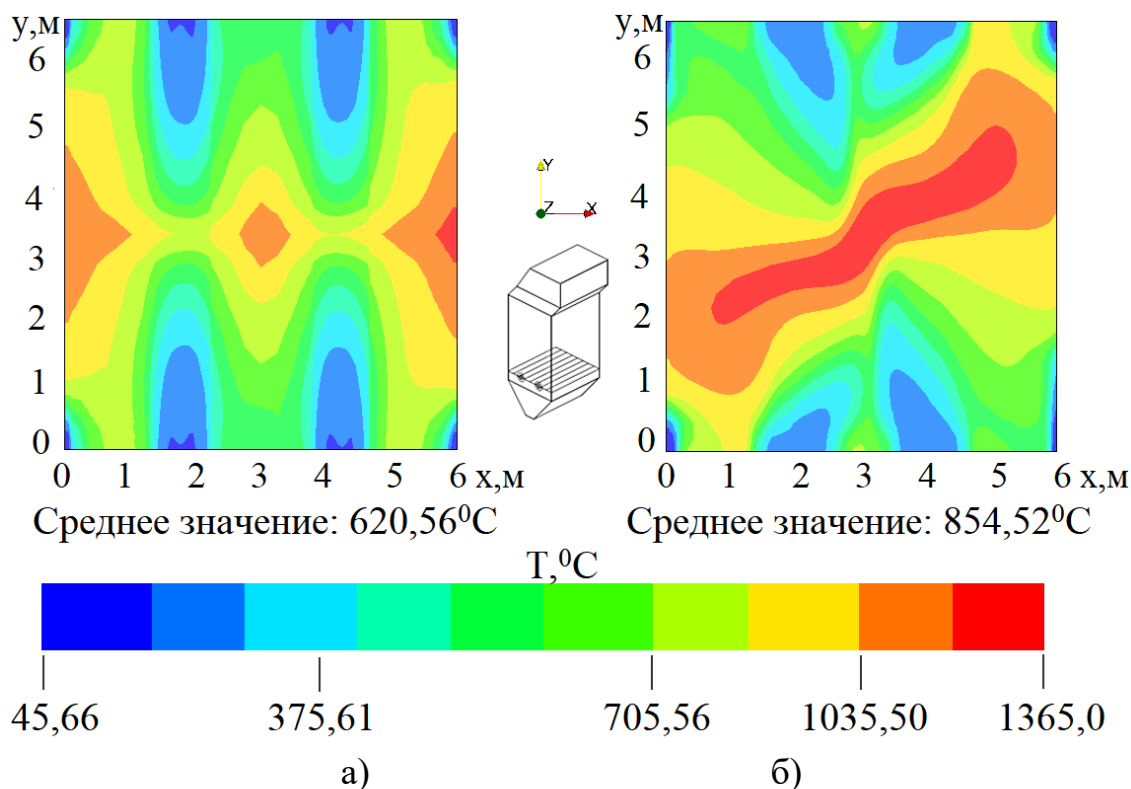


Рисунок 4.6 – Распределение температуры в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при:  
а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

Распределения температуры в центральном ( $y=3.3$  м) и в продольном сечениях ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 приведены на рисунках 4.7–4.8. Анализируя поля температур, представленные на этих рисунках, можно сделать вывод о том, что для двух рассматриваемых случаев подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой) температура имеет максимальные значения в области, близкой к центру топочного пространства.

В то же время область максимальных значений температуры при использовании прямоточных горелочных устройств располагается вблизи стенок камеры сгорания, что вызывает их дополнительную тепловую нагрузку (рисунок 4.7 а). Иным образом распределяется среднее значение температуры в случае использования вихревых горелок с углом закрутки  $30$  градусов.

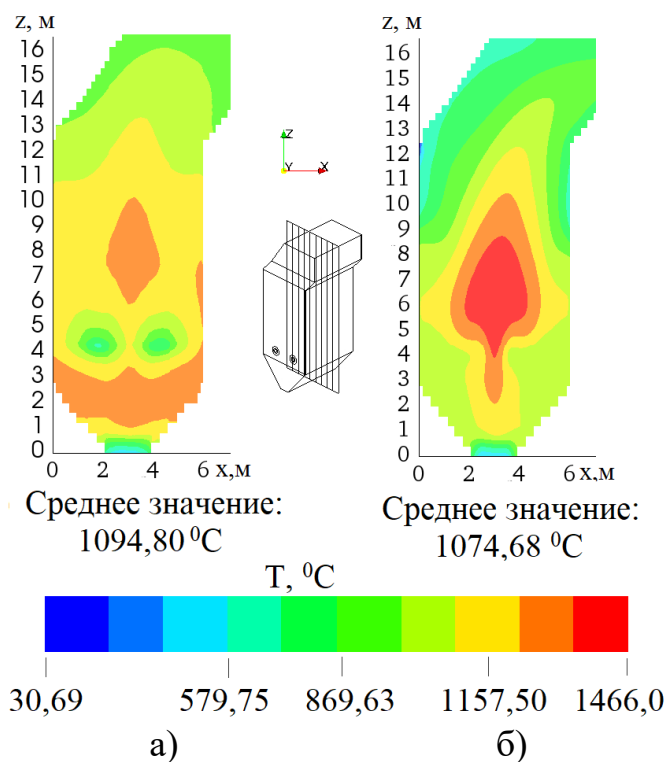


Рисунок 4.7 – Распределение температуры в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при:  
а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

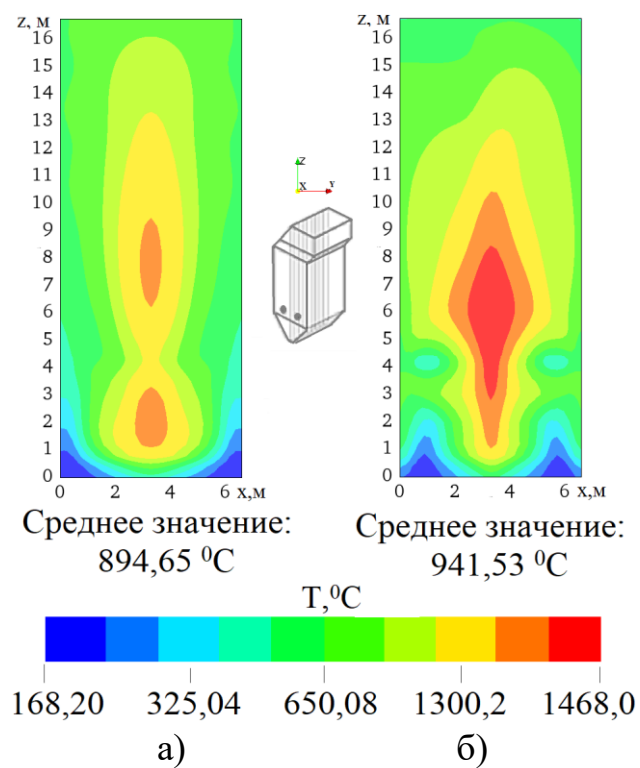


Рисунок 4.8 – Распределение температуры в продольном сечении ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при:  
а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

Здесь ядро факела располагается в центре топочной камеры сгорания (рисунок 4.7 б и рисунок 4.8 б), тем самым снижая тепловую нагрузку на ее стенки. Это связано с более интенсивным характером вихревого течения, обеспечивающим максимальный конвективный перенос и увеличение времени пребывания угольных частиц в топочной камере котла.

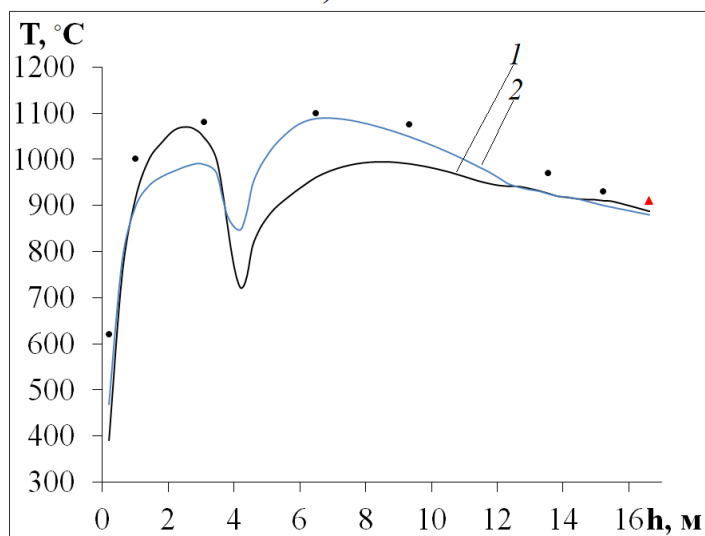
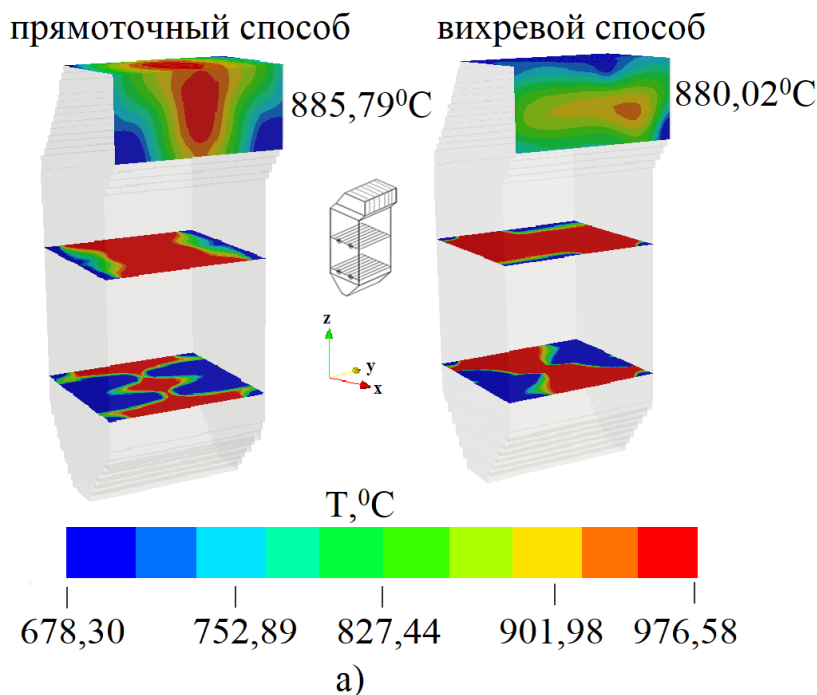


Рисунок 4.9 – Трехмерное а) и двумерное б) распределения температуры  $T$  по высоте топочной камеры  $h$  котла БКЗ-75 при:  
 кривая 1– прямоточном и кривая 2 – вихревом способе подачи аэросмеси;  
 • – экспериментальные значения [56, с. 112, 141];  
 ▲ – теоретическое значение, полученное по методу ЦКТИ [142–143]

Сказанное выше подтверждается трехмерным (рисунок 4.9 а) и двумерным (рисунок 4.9 б) графиком распределения температуры  $T$  по высоте топочной

камеры котла БКЗ-75 для двух исследуемых режимов подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой). На графике приведены кривые, распределения средней температуры  $T$  в каждом сечении по высоте топочной камеры. При вихревом способе подачи аэросмеси наблюдается увеличение протяженности зоны максимальных температур. Минимумы на кривых, связаны с низкой температурой аэросмеси, поступающей в топочную камеру через горелки.

Увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения.

На выходе из топочной камеры среднее значение температуры при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет  $885,79\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 4.9 а и 4.9 б кривая 1), а при использовании вихревых горелочных устройств –  $880,02\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рисунок 4.9 а и 4.9 б кривая 2). Здесь же нанесены экспериментальные точки [56, с.112; 141, с.238], которые указывают на хорошее согласие численного моделирования с натурным экспериментом. Температура на выходе из топочной камеры подтверждается ее теоретическим значением, рассчитанным по методике ЦКТИ для прямоточной подачи аэросмеси через горелочные устройства [142, с. 280; 143, с.130].

### **4.3 Исследование концентрационных полей продуктов горения пылеугольного топлива в топочной камере**

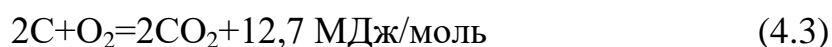
Изменения в распределении температуры внутри топочного пространства, связанные с переходом от прямоточной подачи пылеугольного топлива к вихревому способу, когда используются горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на  $30$  градусов, скажутся на концентрационных полях продуктов горения.

Ниже на рисунках 4.10–4.13 представлены результаты вычислительных экспериментов по определению концентрационных полей оксидов углерода  $\text{CO}$  в различных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75 для двух исследуемых режимов подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой).

При горении углерода возможны две первичные реакции прямого гетерогенного окисления:



В результате образования  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  могут протекать две вторичные реакции:







прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси в центральном ( $y=3.3$  м) и в продольном сечениях ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 представлены на рисунках 4.11–4.12.

Можно отметить, что, как и в случае прямоточной так и вихревой подачи пылеугольного топлива максимальных значений концентрации оксида углерода СО достигают в центре камеры сгорания, в области расположения горелочных устройств. Именно здесь, в зоне столкновения струй топлива и окислителя из противогорелок наблюдается область интенсивного горения аэросмеси и высоких температур ( $1400$  °С), где собственно и происходит образование окиси углерода в процессе химических реакций между топливом и окислителем.

Сравнивая рисунки 4.11–4.12 можно сделать вывод о том, что при вихревом способе подачи аэросмеси концентрация оксида углерода СО по указанным сечениям больше в центре камеры сгорания в области расположения горелок, чем при прямоточном способе. Это увеличение концентрации оксида углерода СО можно объяснить более высокими значениями температуры  $T$  в этой области, более полным сгоранием углерода.

В тоже время это приводит к тому, что в этих условиях происходит дальнейшее более интенсивное преобразование СО в углекислый газ  $CO_2$  и на выходе из топочного пространства при использовании вихревых горелок концентрация оксида углерода уменьшается.

Такое уменьшение концентрации оксида углерода СО при вихревой подаче топлива подтверждается рисунком 4.13, где представлено трехмерное а) и двумерное б) распределение средних значений концентрации оксида углерода СО по высоте  $h$  топочной камеры для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси.

Для прямоточного способа подачи аэросмеси среднее значение концентрации оксида углерода СО на выходе из топочной камеры составляет –  $7,4 \cdot 10^{-4}$  кг/кг (рисунок 4.13 а и 4.13 б кривая 1), а для вихревого способа подачи аэросмеси –  $6,1 \cdot 10^{-4}$  кг/кг (рисунок 4.13 а и 4.13 б кривая 2).

Анализ полученных результатов и их графической интерпретации позволяет сделать вывод о том, что вихревой способ подачи аэросмеси обеспечивает уменьшение концентрации оксида углерода СО на выходе из камеры сгорания примерно до 15%.

Образование окиси углерода зависит от значений температуры и концентрации кислорода в зоне реакции и связано с незавершенной реакцией окисления углерода шлака и испаряющихся летучих частиц угля. Образование окиси углерода можно снизить увеличением коэффициента избытка воздуха в топочной камере и высокими значениями температуры в ней.

Процесс образования оксидов углерода СО зависит не только от явлений переноса, но и от кинетики процесса. Тот факт, что углерод может реагировать с кислородом разными способами, чрезвычайно важен при проектировании топочных камер. Любые технологии сжигания должны обеспечивать по возможности полное смешивание топлива с кислородом до полного его сгорания с образованием  $CO_2$ .

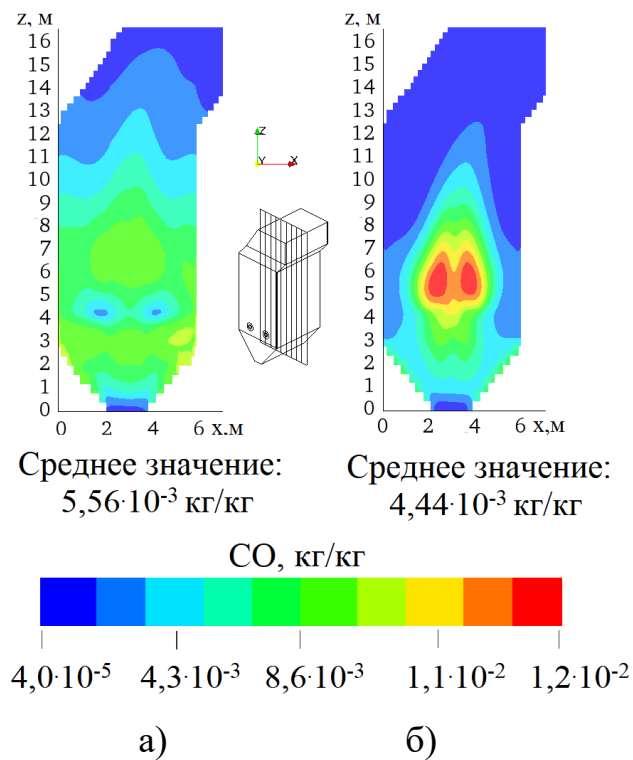


Рисунок 4.11 – Распределение концентрации оксида углерода CO в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при: а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

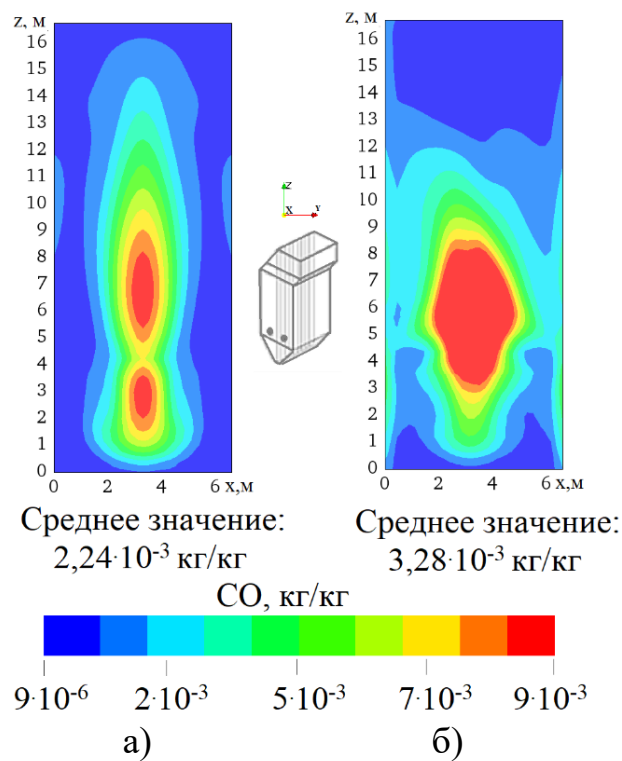


Рисунок 4.12 – Распределение концентрации оксида углерода CO в продольном сечении ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при: а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

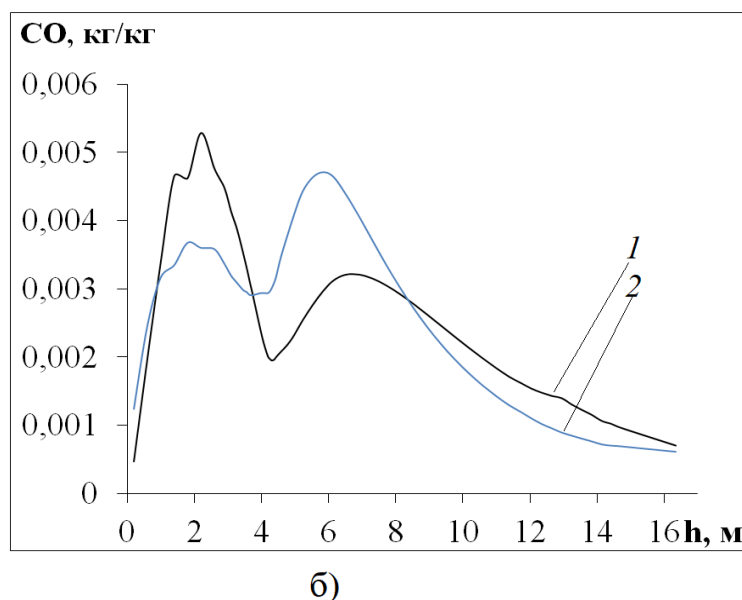
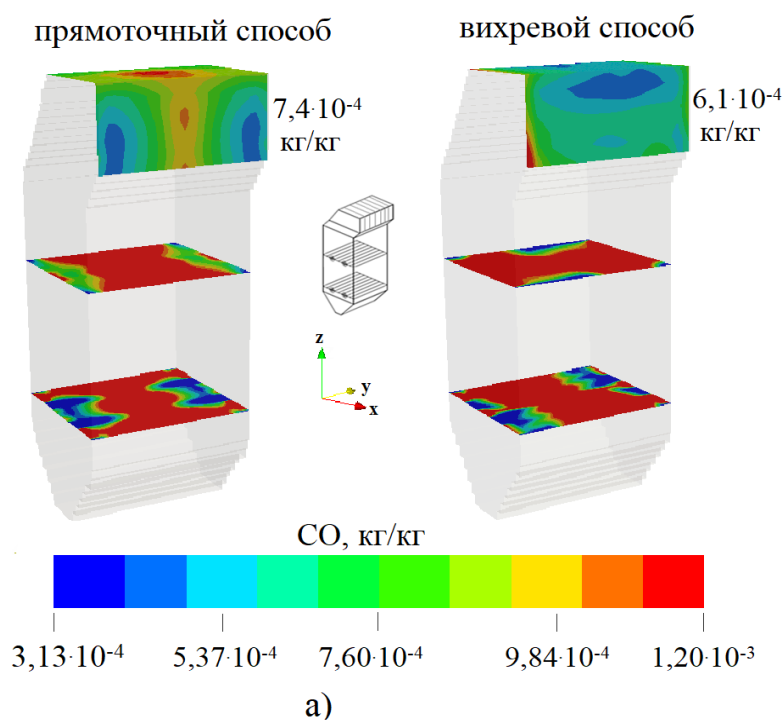


Рисунок 4.13 – Трехмерное а) и двумерное б) распределения концентраций оксида углерода CO по высоте топочной камеры  $h$  котла БКЗ-75 при: кривая 1– прямоточном и кривая 2 – вихревом способе подачи аэросмеси

В результате проведения вычислительных экспериментов были получены концентрационные поля диоксида углерода  $\text{CO}_2$  во всем объеме топочного пространства и на выходе из него для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси. Ниже на рисунках 4.14–4.17 представлены эти поля для некоторых характерных сечений топочной камеры.

На рисунке 4.14 приведено распределение средней концентрации диоксида углерода  $\text{CO}_2$  в поперечных сечениях, приходящихся на область пояса горелок ( $h=4.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75.



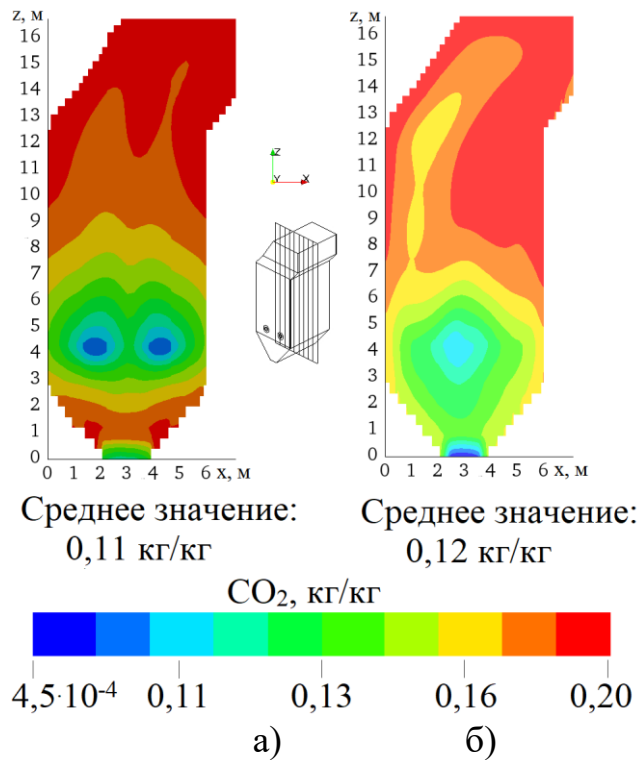


Рисунок 4.15 – Распределение концентрации диоксида углерода CO<sub>2</sub> в центральных сечениях ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при: а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

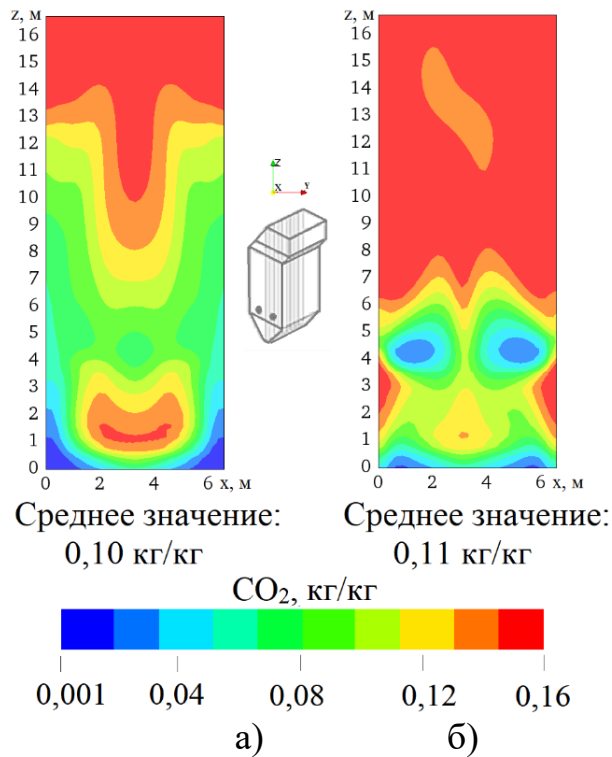


Рисунок 4.16 – Распределение концентрации диоксида углерода CO<sub>2</sub> в продольных сечениях ( $x=3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при: а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

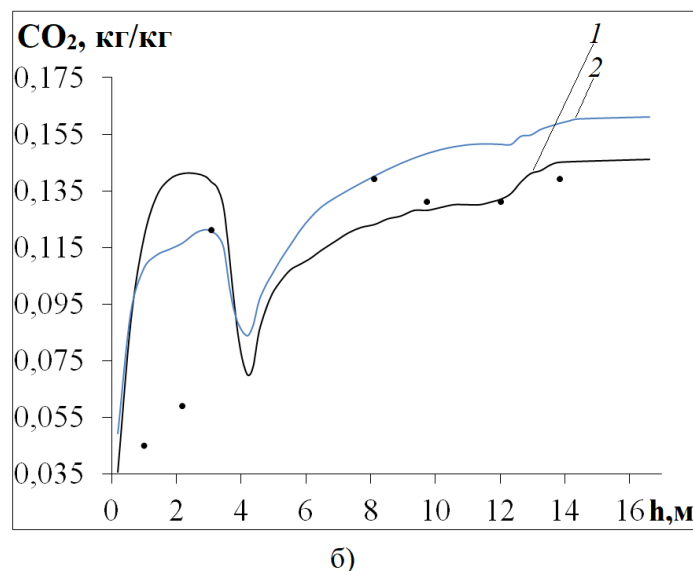
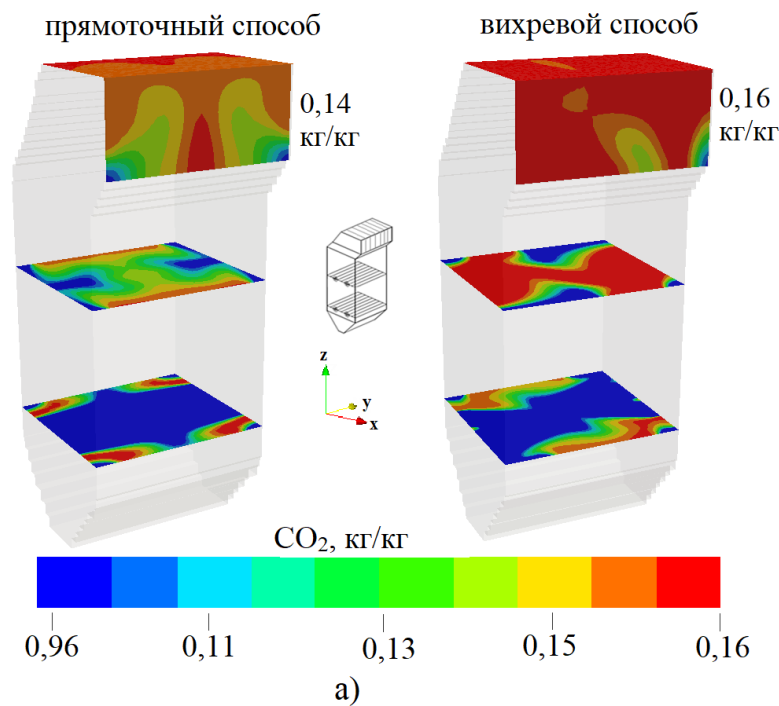


Рисунок 4.17 – Трехмерное а) и двумерное б) распределения концентраций диоксида углерода  $\text{CO}_2$  по высоте топочной камеры  $h$  котла БКЗ-75 при: кривая 1 – прямоточном и кривая 2 – вихревом способе подачи аэросмеси; • – экспериментальные значения [56, с.112; 141, с. 238]

В случае неполного сгорания в составе уходящих из топки газов дополнительно появляются горючие газы: углеводороды, окись углерода  $\text{CO}$ , метан  $\text{CH}_4$ , а иногда и чистый водород  $\text{H}$ , а при чрезмерном избытке воздуха из топки уносятся несгоревшие летучие горючие вещества и частички твердого топлива. Поэтому при сжигании топлива необходимо сводить неполноту сгорания к минимуму.

В нашем случае на выходе из топки (рисунок 4.17 а и 4.17 б) максимальное среднее по сечению значение концентрации диоксида углерода  $\text{CO}_2$  при

вихревом способе подачи аэросмеси хоть и увеличивается по сравнению с прямоточным, но составляет 0,16 кг/кг, что соответствует предельно допустимым значениям, принятым на действующих ТЭС.

Если максимума концентрации оксида углерода CO достигают в области горелок (рисунок 4.13), где встречается топливо и окислитель, то образование двуокси углерода CO<sub>2</sub> происходит по мере удаления от этой области, где наблюдается догорание окиси углерода с дополнительным образованием диоксида углерода CO<sub>2</sub> по реакции (4.3), кроме основного его образования по реакции (4.1).

Мы видим, что концентрация диоксида углерода CO<sub>2</sub> в случае вихревого способа подачи аэросмеси внутри топочной камеры и на выходе из нее больше, чем для прямоточного способа подачи аэросмеси, но все же остается в пределах предельно-допустимой концентрации (ПДК) РК. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными [56, с.112; 141, с. 238], полученными непосредственно на ТЭС.

Из азота воздуха и азотсодержащих компонентов топлива в топке образуется некоторое количество оксида азота NO. Следует отметить, что образование оксидов азота NO<sub>x</sub> (NO + NO<sub>2</sub>) происходит при сжигании всех видов органического топлива. До выхода из топочной камеры часть оксида азота NO переходит в диоксид азота NO<sub>2</sub>. Эмиссия оксидов азота NO<sub>x</sub> определяется не только характером сжигаемого топлива (как в случае SO<sub>2</sub> или золы частиц), но также конструкцией горелочных устройств. Образование окиси углерода CO зависит от температуры и концентрации кислорода в зоне реакции и поэтому может быть снижено повышенным избытком воздуха и высокими температурами. Однако, это в свою очередь приводит к увеличению образования окислов азота NO<sub>x</sub>.

По результатам вычислительных экспериментов были построены распределения концентраций диоксида азота NO<sub>2</sub> для двух случаев подачи аэросмеси в следующих областях топочной камеры котла БКЗ-75: поперечные сечения в области пояса горелок h=4.0 м (рисунок 4.18), центральные сечения y=3.3 м (рисунок 4.19), продольные сечения x=3.0 м (рисунок 4.20) и на выходе из камеры сгорания (рисунок 4.21). Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что зоной максимального образования NO<sub>2</sub>, является область высоких температур и интенсивного вихревого течения.

Для исследуемой топочной камеры такая область находится в зоне расположения горелочных устройств на высоте h=4.0 м. Более интенсивное перемешивание топлива и окислителя, создаваемое турбулентными потоками впрыскиваемой аэросмеси из вихревых горелок (рисунок 4.18 б), а также высокая температура в ядре факела, создают благоприятные условия для повышенного образования NO<sub>2</sub>, когда его средняя по сечению концентрация достигает 943,60 мг/м<sup>3</sup>, против 492,48 мг/м<sup>3</sup> для прямоточной подачи топлива (рисунок 4.18 а).

Равномерное снижение концентрации NO<sub>2</sub> наблюдается по мере удаления к выходу из топочной камеры (рисунки 4.19–4.20), поскольку эта область содержит в себе меньше кислорода и компонент топлива.

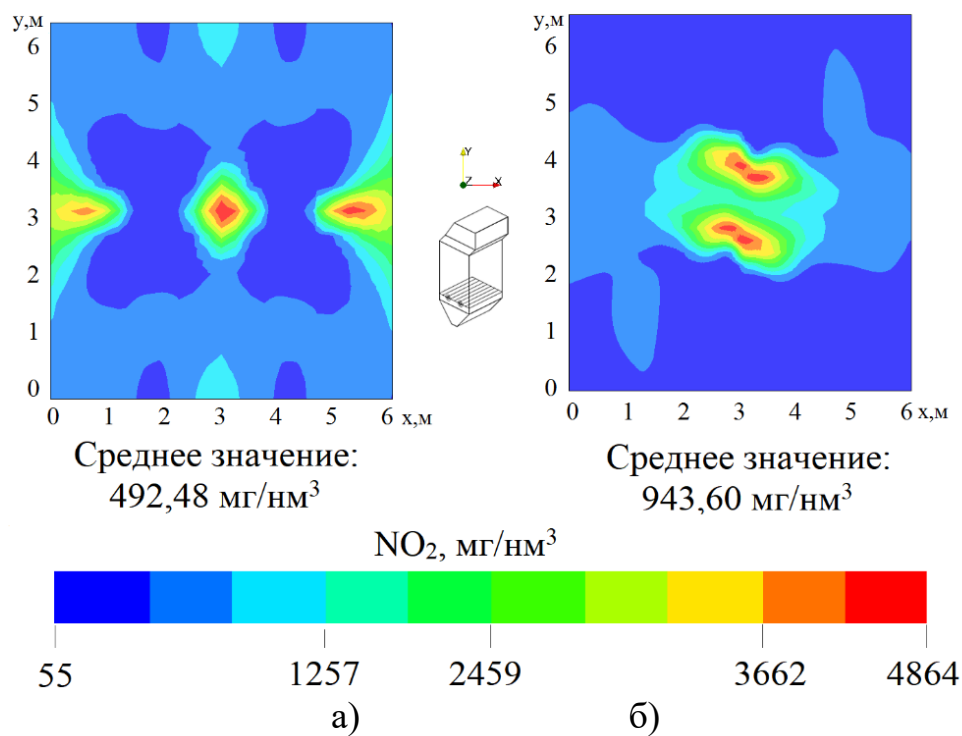


Рисунок 4.18 – Распределение концентрации диоксида азота NO<sub>2</sub> в поперечных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75 (область пояса горелок, h=4.0 м) при: а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси

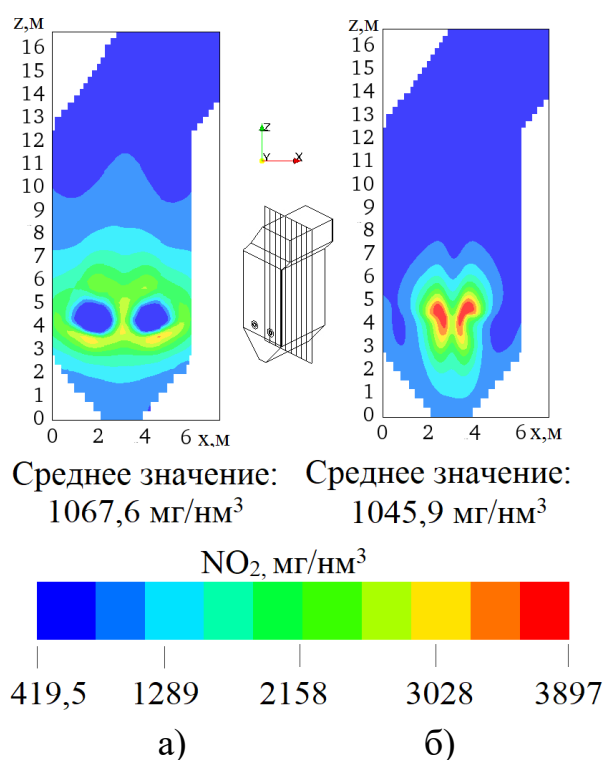


Рисунок 4.19 – Распределение диоксида азота NO<sub>2</sub> в центральном сечении (y=3.3 м) топочной камеры котла БКЗ-75 при: а) прямоточном и б) вихревом способе подачи аэросмеси





В случае использования вихревых горелочных устройств, монотонное снижение температуры по высоте топочной камеры ускоряется (рисунок 4.9), в результате чего уменьшается и скорость образования  $\text{NO}_2$ .

Среднее значение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет  $564,34 \text{ мг/нм}^3$  (рисунок 4.21 а и 4.21 б, кривая 1), а при использовании вихревого способа подачи топлива –  $439,35 \text{ мг/нм}^3$  (рисунок 4.21 а и 4.21 б, кривая 2), что на  $125 \text{ мг/нм}^3$  меньше (более 20%).

Полученные результаты вычислительных экспериментов для основных характеристик топочной камеры котла БКЗ-75: температура  $T$ , концентрация оксида углерода  $\text{CO}$ , диоксида углерода  $\text{CO}_2$  и диоксида азота  $\text{NO}_2$  в различных сечениях топочного пространства для двух способов подачи аэросмеси через горелочные устройства приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Средние по сечению значения основных характеристик тепломассопереноса ( $T$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ) на различных высотах  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 (зона пояса горелок,  $h=4 \text{ м}$ ; на выходе из топки,  $h=16,75 \text{ м}$ ) при сжигании в ней карагандинского угля (зольность 35,1%)

Высота $h$ , м	Способы подачи аэросмеси							
	Прямоточный способ подачи аэросмеси				Вихревой способ подачи аэросмеси			
	Величина				Величина			
	$T$ , °C	$\text{CO}$ , кг/кг	$\text{CO}_2$ , кг/кг	$\text{NO}_2$ , мг/нм <sup>3</sup>	$T$ , °C	$\text{CO}$ , кг/кг	$\text{CO}_2$ , кг/кг	$\text{NO}_2$ , мг/нм <sup>3</sup>
4	620,56	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	492,48	854,52	$3,1 \cdot 10^{-3}$	$8,8 \cdot 10^{-2}$	943,60
16,75	885,79	$7,4 \cdot 10^{-4}$	0,14	564,34	880,02	$6,1 \cdot 10^{-4}$	0,16	439,35

Анализируя данные, приведенные в таблице 4.1, можно сделать вывод о том, что средние значения концентраций вредных веществ ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ) при использовании горелочных устройств с закруткой потока аэросмеси уменьшаются на выходе из топочной камеры и соответствуют нормам ПДК для действующего энергетического котла БКЗ-75, использующего высокозольный карагандинский уголь.

При вихревом способе подачи аэросмеси среднее значение концентрации диоксида углерода  $\text{CO}_2$  на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 хоть и увеличивается по сравнению с прямоточными горелками, но все же соответствует предельно допустимым значениям, принятым на действующих ТЭС. Полученные результаты указывают на преимущества выбора вихревых горелок для оптимизации процесса сжигания высокозольного угля в топках энергетических установок и минимизации вредных пылегазовых выбросов в окружающую среду ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ).

## **5 ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ПОДАЧИ АЭРОСМЕСИ НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ ПРИ ПОНИЖЕННОЙ НАГРУЗКЕ КОТЛА БКЗ-75**

### **5.1 Особенности снижения нагрузки или останова котла (планового и аварийного)**

В котельном агрегате в процессе эксплуатации могут происходить повреждения, возникать неполадки, создающие опасные ситуации, чреватые выходом из строя оборудования или котельного агрегата в целом, разрушениями с большими материальными потерями и человеческими жертвами. Устранение обнаруженных нарушений и дефектов возможно с учетом повреждений без остановки котельного агрегата или с обязательным немедленным его останом. Остановку котла можно разделить на три группы: плановая, кратковременная и аварийная в зависимости от сложившихся обстоятельств [147–149].

**Плановую (полную) остановку котельного агрегата** производят по подготовленному и утверждённому графику в определенной последовательности. При плановой остановке в первую очередь при работе котла за 20-30 минут прекращают подачу свежего топлива в установку, дают возможность дожечь остаткам топлива в топке, после чего выключают вентилятор и подачу воздуха. Отключённый котел отсоединяют от других котлов установкой металлических заглушек между фланцами на паровых, питательных, спускных и продувочных линиях. Затем тщательнейшим образом осматривают топку, котел, вспомогательное оборудование; о всех замеченных неисправностях делают записи в журнале, и в период остановки котла эти неисправности ликвидируют [150–152].

**Кратковременная остановка котельного агрегата** может быть вызвана нарушением его нормальной работы вследствие неисправности оборудования или по другим причинам, которые могут вызвать аварию. При непродолжительных остановках циркуляция воды в котле может быть сохранена. Наиболее экономичной в данном случае считается температура воды примерно от +100 до +120<sup>0</sup>С. Все люки и задвижки должны быть закрыты для предотвращения попадания воздуха в котел [153–154].

**Аварийная остановка котельного агрегата** определяется видом аварии и моментом установления ее причин. В течении 10 минут остановка котельного агрегата ведется с минимально возможным расхолаживанием оборудования сначала, до момента установления причины аварии. В случае повреждения основных элементов котла задержка остановки котельного агрегата может представить большую опасность для обслуживающего персонала и привести к большим повреждениям. Основной причиной немедленной остановки котельной является погасание факела при нарушении устойчивости режима горения в топочной камере [155–157].

Частичное отключение подачи угольной пыли через горелочные устройства используется при снижении нагрузки котла до 60% от номинальной его нагрузки.

## 5.2 Результаты численного моделирования процессов тепломассопереноса при пониженной нагрузке котла

В данном разделе диссертации методами численного моделирования проведено исследование основных характеристик процессов тепломассопереноса в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ при снижении его нагрузки. С помощью методов компьютерного моделирования были проведены вычислительные эксперименты по изучению различных режимов подачи пылеугольного топлива в топочную камеру для работы котла при пониженной нагрузке [158–159]:

1. Прямоточный способ подачи аэросмеси, когда из четырех горелок работают только две прямоточные горелки, а две отключены (рисунок 5.1 а).

2. Вихревой способ подачи аэросмеси, когда из четырех горелок работают только две вихревые горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов, а две отключены (рисунок 5.1 б).

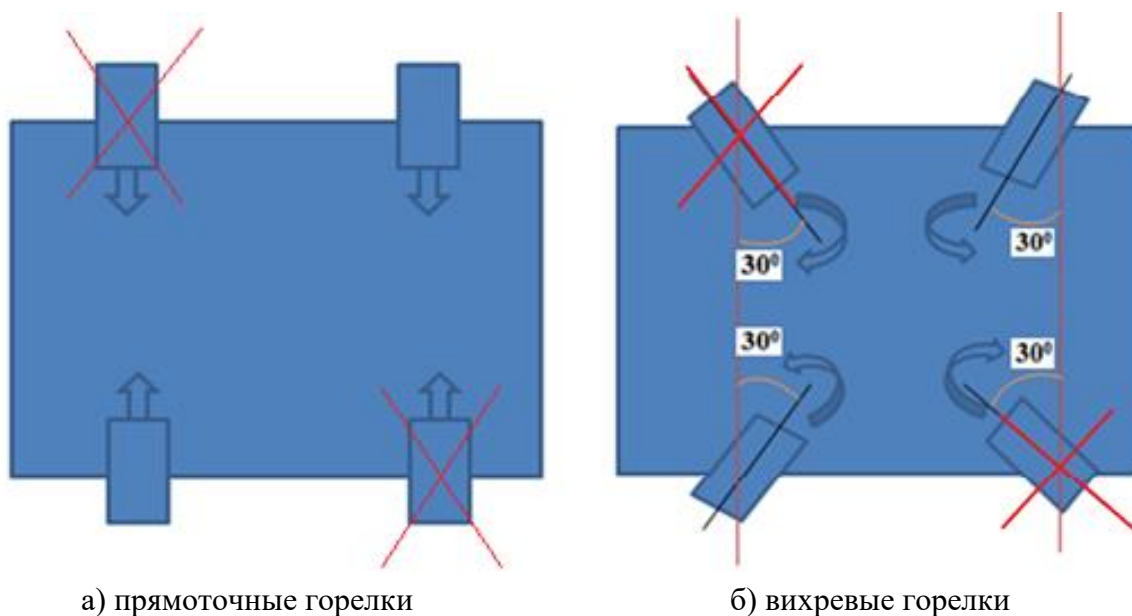


Рисунок 5.1 – Схема расположения горелочных устройств в топочной камере котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла

На рисунке 5.1 приведена схема расположения различных горелочных устройств в топочной камере котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла (две выключенные горелки отмечены крестиком красного цвета) для прямоточного и вихревого способа подачи пылеугольного топлива.

Выполненные вычислительные эксперименты позволили получить основные характеристики процесса тепломассопереноса: распределение вектора полной скорости, поля температуры и концентраций вредных веществ (оксид углерода  $\text{CO}$ , диоксид углерода  $\text{CO}_2$  и азота  $\text{NO}_2$ ) в объеме топочной камеры и на выходе из нее для указанных двух случаев подачи пылеугольного топлива при пониженной нагрузке котла.

### 5.2.1 Исследование аэродинамических характеристик

На рисунках 5.2–5.5 представлено распределение аэродинамических потоков, в поперечных, продольных сечениях и на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла (отключены по топливу две из четырех горелок) для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси. Полученные скоростные поля позволяют наглядно проанализировать движение реагирующих потоков в топочном пространстве в различных сечениях, которые указаны здесь же на рисунках. Отчетливо видны области подачи топливной смеси через горелки.

Распределение вектора полной скорости в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при пониженной нагрузке котла для двух исследуемых способов подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой) показано на рисунке 5.2. Мы видим, что при прямоточном способе подачи аэросмеси потоки, направленные из двух рабочих горелок, которые расположены друг против друга, ударяются в противоположную стенку (рисунок 5.2 а), а при вихревом способе потоки образуют вихрь с горизонтальной осью (рисунок 5.2 б).

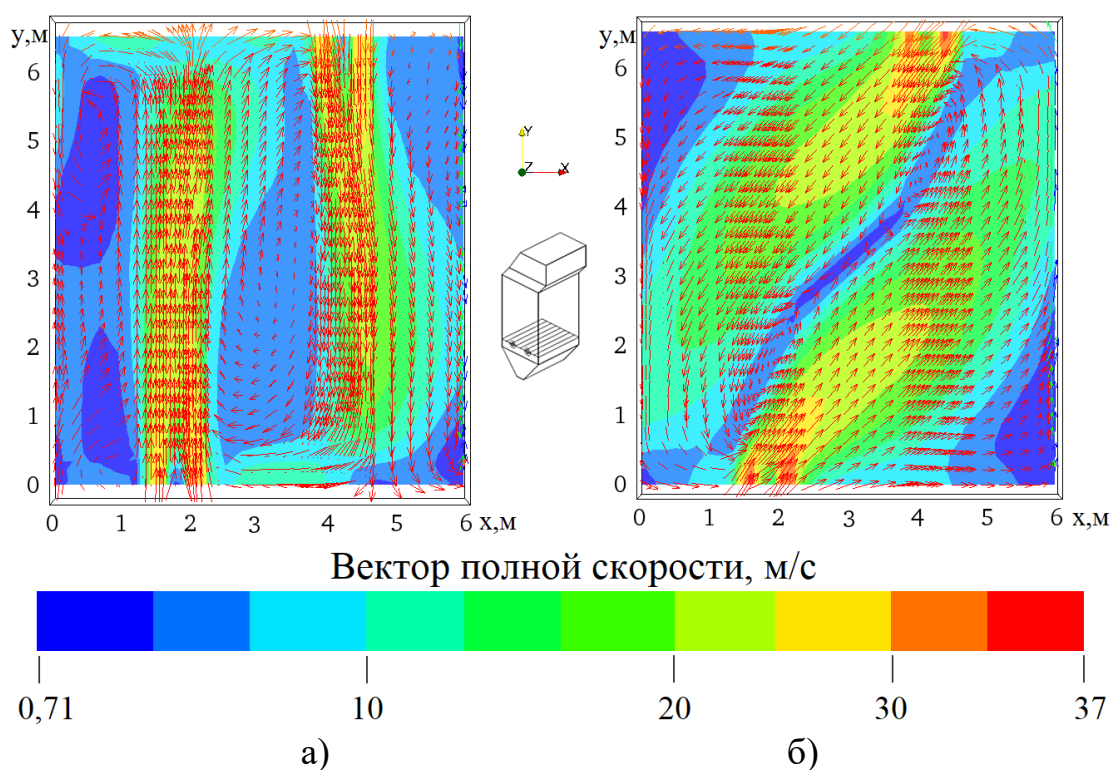


Рисунок 5.2 – Распределение вектора полной скорости в поперечном сечении топочной камеры (область пояса горелок,  $h=4.0$  м) котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

На рисунках 5.3–5.4 приведено распределение вектора полной скорости в центральном ( $y=3.3$  м) и в продольном сечениях ( $x=3.0$  м) топочной камеры при

пониженной нагрузке котла для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси.

Сравнивая полученные рисунки, можно сделать вывод о том, что скорость для двух исследуемых случаев имеет максимальные значения в так называемой «зоне активного горения», расположенной в области пояса горелочных устройств. Далее часть потоков опускается вниз в область холодной воронки, образуя вихревые течения, а другая часть направляется вверх к выходу из топочной камеры. Анализ рисунков 5.3–5.4 показывает, что главным достоинством вихревого способа подачи аэросмеси является обеспечение интенсивного теплообмена в реагирующей двухфазной смеси благодаря устойчивому высоко турбулентному вихревому течению.

Рисунок 5.5 иллюстрирует картину распределения вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе ( $h=16.75$  м) из топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла для двух рассматриваемых случаев. Анализ рисунка показывает, что по мере продвижения турбулентного потока в направлении к выходу из топочного пространства поле скоростей выравнивается, вихревой характер течения ослабевает, и к выходу скорость газов снижается. На выходе из топочной камеры среднее по сечению значение скорости потока при пониженной нагрузке котла для прямоточного способа подачи аэросмеси составляет 5,14 м/с, а для вихревых горелок – 4,21 м/с.

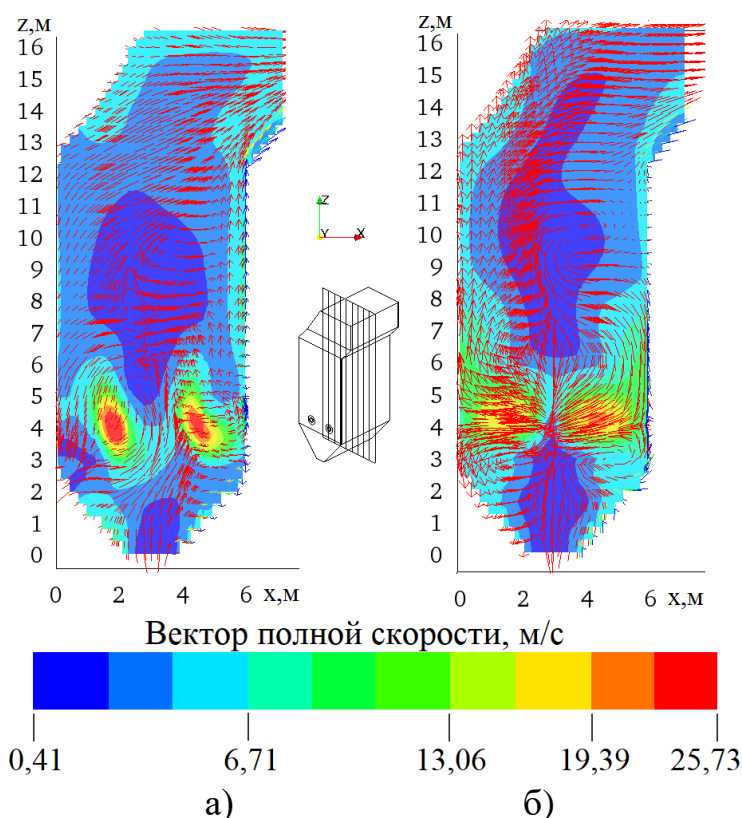


Рисунок 5.3 – Распределение вектора полной скорости в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла: а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси



### 5.2.2 Исследование температурных характеристик

Трехмерные распределения температуры, характеризующие тепловое поведение пылеугольного потока в топочной камере котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси, представлено на рисунках 5.6–5.9.

Температурные условия, в которых протекает горение угольной пыли в топочной камере, создаются в турбулентных струях и определяются интенсивностью теплообмена в них и характером распространения их в топочных газах. Физические условия горения в турбулентных струях определяются закономерностями распределения температуры и полями скоростей [160].

На рисунке 5.6 показано распределение температуры  $T$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при пониженной нагрузке котла для двух способов подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой).

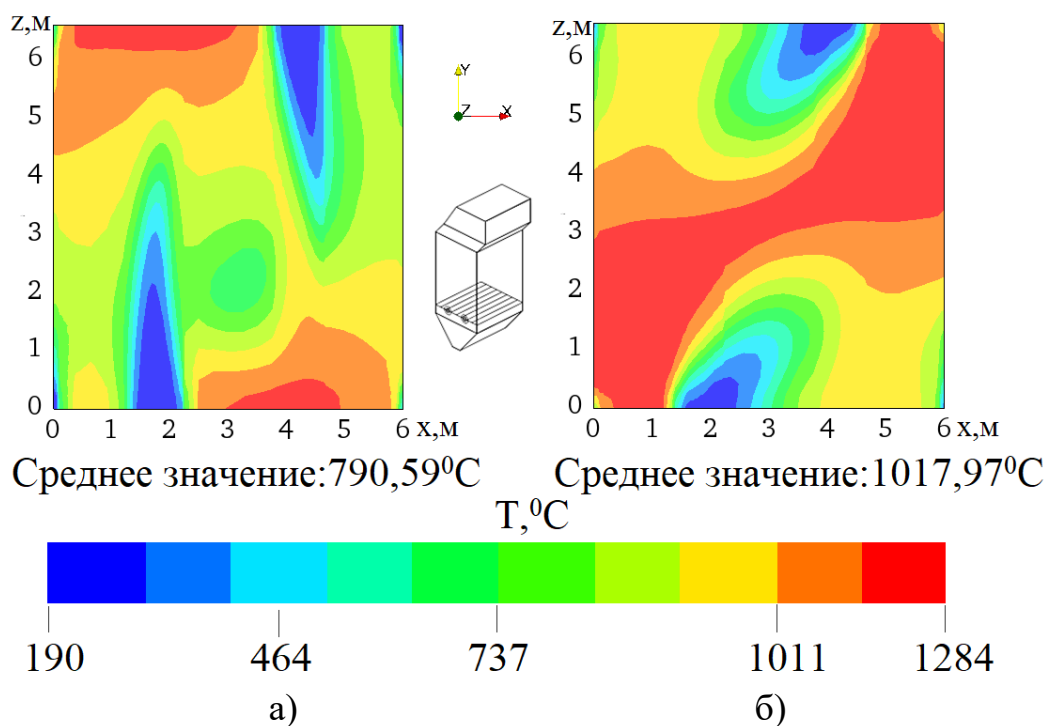


Рисунок 5.6 – Распределение температуры  $T$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м)

при пониженной нагрузке котла:

а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

Анализируя поля температур, представленные на этих рисунках, можно сделать вывод о том, что максимальное среднее по сечению значение температуры наблюдается при вихревом способе подачи аэросмеси. Это можно объяснить тем, что высокий уровень турбулентности течения в этом случае и наличие высоких скоростей встречного тангенциального движения



реагирующих потоков обеспечивают тщательное перемешивание аэросмеси, что в свою очередь увеличивает время пребывания угольной пыли в зоне горения, уменьшает механическую неполноту сгорания и увеличивает температуру.

Распределение температуры в центральном ( $y=3.3$  м) и в продольном сечениях ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла для двух рассматриваемых случаев представлены на рисунках 5.7–5.8.

Анализируя поля температур, представленные на этих рисунках, можно сделать вывод о том, что по сравнению с использованием прямоточного способа подачи аэросмеси (рисунок 5.7 а и 5.8 а) среднее по сечениям топочной камеры котла значение температуры  $T$  при вихревом способе подачи аэросмеси увеличивается, как в области пояса горелочных устройств, так и в продольном и центральном сечениях (рисунок 5.7 б и 5.8 б). А это, как было уже отмечено выше, связано с вихревым характером течения, обеспечивающим максимальный конвективный перенос и увеличение времени пребывания угольных частиц в зоне активного горения в топочной камере котла.

К выходу из топочной камеры в том и другом случае температура плавно снижается, что наглядно демонстрируется рисунком 5.9, где представлено трехмерное (рисунок 5.9 а) и двумерное (рисунок 5.9 б) распределение температуры  $T$  по высоте топочной камеры  $h$  котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла для двух исследуемых способов подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой).

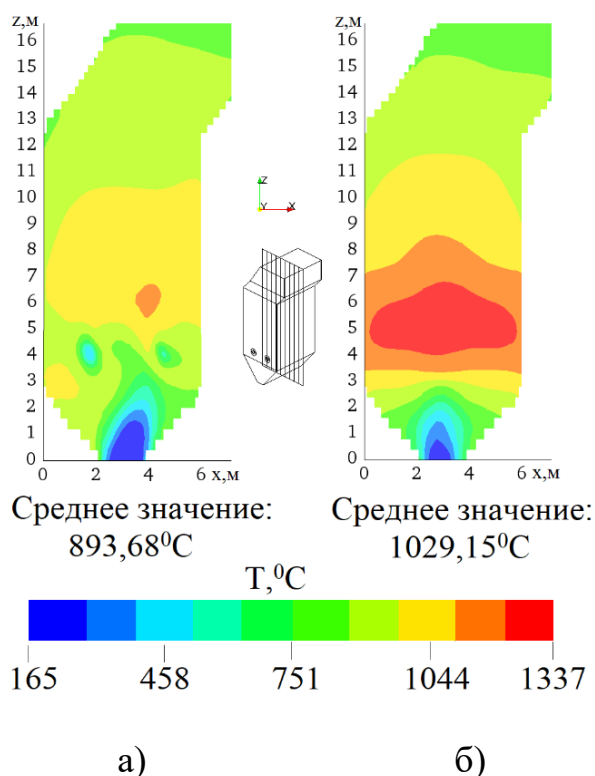


Рисунок 5.7 – Распределение температуры  $T$  в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

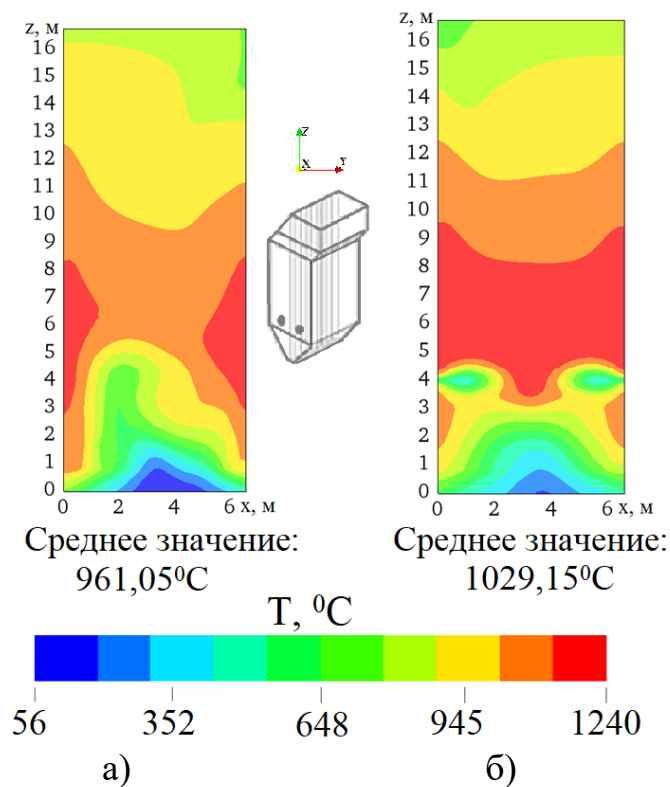


Рисунок 5.8 – Распределение температуры  $T$  в продольном сечении ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
 а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

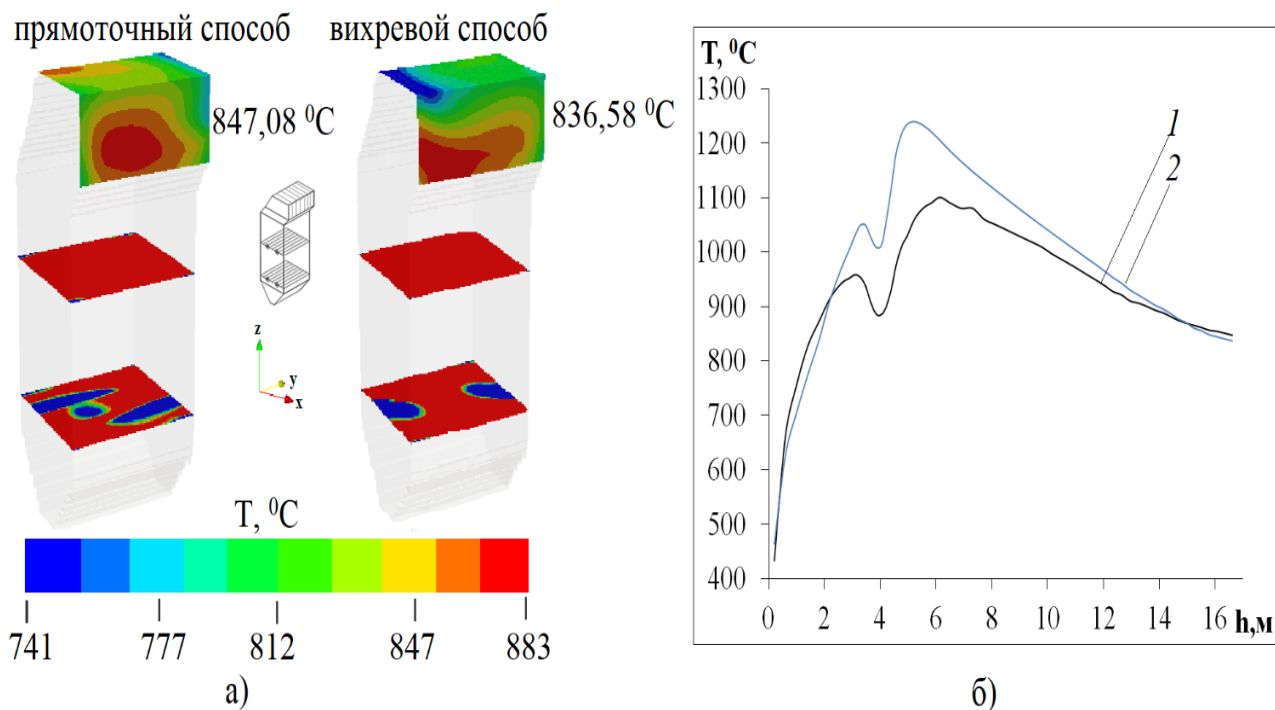


Рисунок 5.9 – Трехмерное а) и двумерное б) распределения температуры  $T$  по высоте топочной камеры  $h$  котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
 кривая 1 – прямоточный и кривая 2 – вихревой способ подачи аэросмеси

Сравнивая результаты, можно заметить увеличение зоны максимальных температур (рисунок 5.9 а и рисунок 5.9 б, кривая 2) при вихревом способе подачи аэросмеси. В то же время значение температуры на выходе из топочного пространства в данном случае меньше  $T=836,58$  °С, чем при прямоточном способе подачи аэросмеси, когда оно равно  $847,08$  °С (рисунок 5.9 а и 5.9 б, кривая 1).

### 5.2.3 Исследование концентрационных полей продуктов горения пылеугольного топлива

О химической и механической полноте сгорания можно судить по полям концентраций продуктов химических реакций, протекающих в камере сгорания между топливом (уголь) и окислителем (кислород воздуха), которые могут осуществляться по схеме описанной выше химической модели. Оксиды углерода ( $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ) и диоксиды азота ( $\text{NO}_2$ ) являются основными загрязнителями окружающей среды [161].

Ниже на рисунках 5.10–5.21 представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию концентрационных полей вредных продуктов сжигания ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{NO}_2$ ) высокозольного карагандинского угля в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ. Полученные концентрационные поля позволяют описать процесс образования оксида углерода во всем объеме топочной камеры, определить области наиболее высоких концентраций  $\text{CO}$ , а также их значения на выходе из топочного пространства.

Распределение концентрации оксида углерода  $\text{CO}$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при пониженной нагрузке котла для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси показано на рисунке 5.10. Мы видим, что для двух исследуемых случаев высокие значения концентраций оксида углерода  $\text{CO}$  в основном сосредоточены в зоне столкновения струй аэросмеси из противогорелок, т.е. там, где присутствует углерод топлива. Можно отметить, что при вихревом способе подачи аэросмеси увеличивается среднее по сечению значение концентрации оксида углерода  $\text{CO}$ . Так при прямоточном способе подачи аэросмеси среднее по выбранному сечению значение концентрации оксида углерода  $\text{CO}$  составляет  $2,8 \cdot 10^{-3}$  кг/кг (рисунок 5.10 а), а при вихревом –  $4,0 \cdot 10^{-3}$  кг/кг (рисунок 5.10 б).

На рисунках 5.11–5.12 представлено распределение концентрации оксида углерода  $\text{CO}$  в центральном ( $y=3.3$  м) и в продольном сечениях ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла для двух рассматриваемых случаев. Анализируя полученные рисунки можно заметить, что максимальные значения по сечению концентрации  $\text{CO}$  наблюдаются в зоне активного горения, расположенной в области горелочных устройств для двух исследуемых режимов подачи пылеугольного топлива (прямоточный и вихревой). Это объясняется тем, что основные реакции реагирования углерода происходят в этой части топочной камеры, что вызывает здесь большое выделение тепла за счет химических реакций между компонентами топлива и окислителя и сильное повышение температуры (см. рисунки 5.6–5.9).



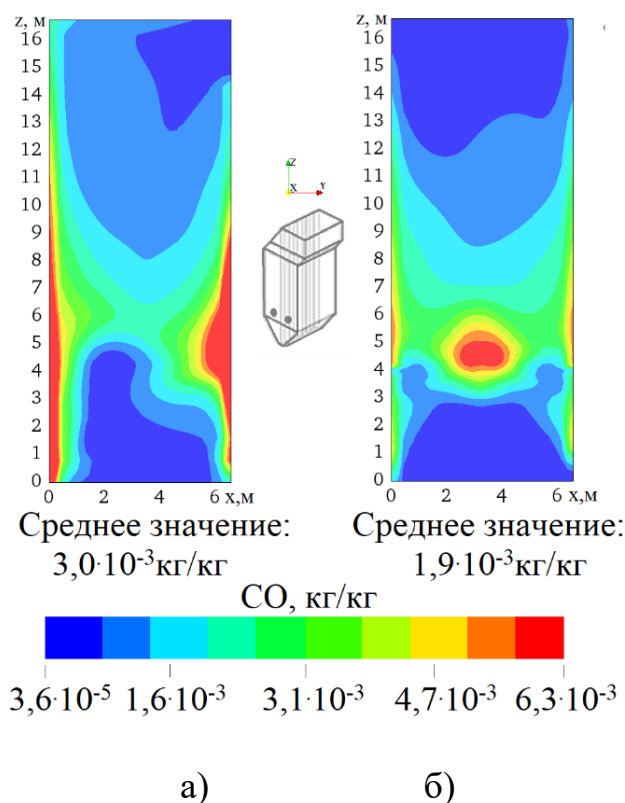


Рисунок 5.12 – Распределение концентрации оксида углерода CO в продольном сечении ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
 а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

Рисунок 5.13 иллюстрирует трехмерное а) и двумерное б) распределение средней концентрации оксида углерода CO по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси.

На выходе из камеры сгорания среднее по сечению значение концентрации CO при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет  $5,3 \cdot 10^{-4}$  кг/кг (рисунок 5.13 а и 5.13 б, кривая 1), а при использовании вихревого способа подачи –  $3,4 \cdot 10^{-4}$  кг/кг (рисунок 5.13 а и 5.13 б, кривая 2), что на 34% меньше. В области, где подается топливо через горелочные устройства, концентрации оксида углерода CO в том и другом случае достигает максимальных значений.

Можно отметить, что на выходе из камеры сгорания, где топочное пространство обеднено кислородом, температура меньше по сравнению зоной активного горения, химические процессы, которые связаны с интенсивным образованием CO, здесь угасают и его концентрация уменьшается.

Но в тоже время на выходе из топки она имеет меньшее значение для вихревого способа подачи аэросмеси (рисунок 5.13 б, кривая 2). Полученные значения концентрации оксида углерода CO находятся в допустимых пределах, принятых на действующих ТЭС Казахстана, и свидетельствует о химической полноте выгорания топлива.

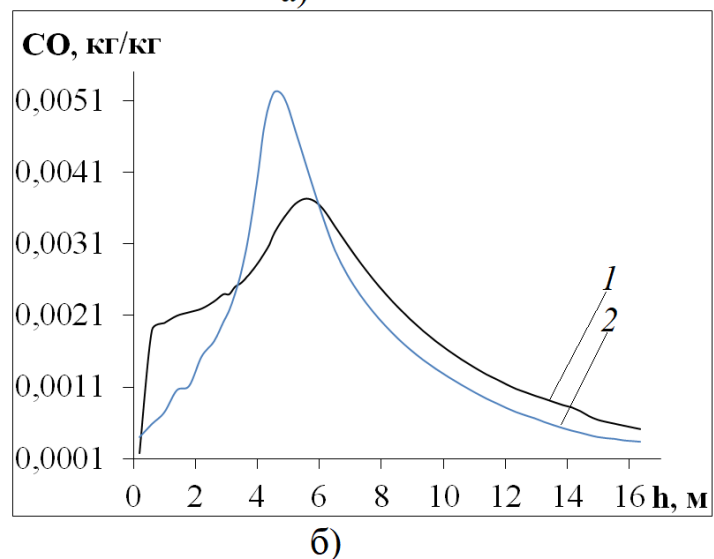
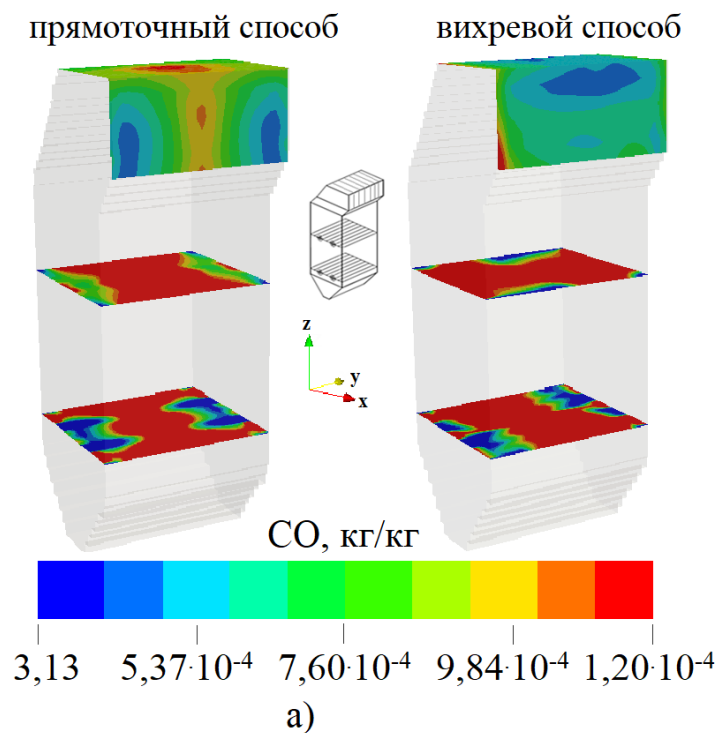


Рисунок 5.13 – Трехмерное а) и двумерное б) распределения концентраций оксида углерода CO по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
кривая 1 – прямоточный и кривая 2 – вихревой способ подачи аэросмеси

На рисунках 5.14–5.17 представлено трехмерное распределение концентрации диоксида углерода CO<sub>2</sub> в следующих областях топочной камеры котла БКЗ-75: в поперечном сечении области пояса горелок  $h=4.0$  м (рисунок 5.14), в центральном сечении  $y=3.3$  м (рисунок 5.15), в продольном сечении  $x=3.0$  м (рисунок 5.16) при пониженной нагрузке котла для прямоточного и вихревого способа подачи аэросмеси.

Сравнивая полученные результаты можно сделать вывод о том, что распределение концентрации диоксида углерода CO<sub>2</sub> в топочном пространстве

имеет иной характер, чем распределение концентрации оксида углерода СО. Так, например, из рисунка 5.14 видно, что в области пояса горелочных устройств на высоте 4 метров среднее по сечению значение концентрации диоксида углерода СО<sub>2</sub> минимально и при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет 0,06 кг/кг (рисунок 5.14 а), а при вихревом – 0,08 кг/кг (рисунок 5.14 б), тогда как концентрация оксида углерода СО в этой области максимальна (см. рисунки 5.10–5.13).

Анализируя рисунки 5.15–5.16 можно заметить, что как в случае прямоточного, так и вихревого способа подачи аэросмеси значения концентраций диоксида углерода СО<sub>2</sub> возрастают по высоте топочной камеры. Это можно объяснить тем, что в камере сгорания частицы топлива воспламеняются из-за высокой температуры и в процессе горения выделяется оксид углерода СО. Затем он взаимодействует далее с кислородом (реакция 2.33, Глава 2) и по мере продвижения к выходу из топочной камеры дополнительно образуется диоксид углерода СО<sub>2</sub>, что и приводит к дальнейшему увеличению его концентрации, которая при использовании вихревых горелок остается более высокой (рисунки 5.14 б, 5.15 б, 5.16 б).

Вместе с тем, в топочном пространстве возможны реакции типа:  $2\text{NO} + 2\text{CO} = 2\text{CO}_2 + \text{N}_2$ , которые также приводят к увеличению концентрации диоксида углерода СО<sub>2</sub> на выходе из камеры сгорания.

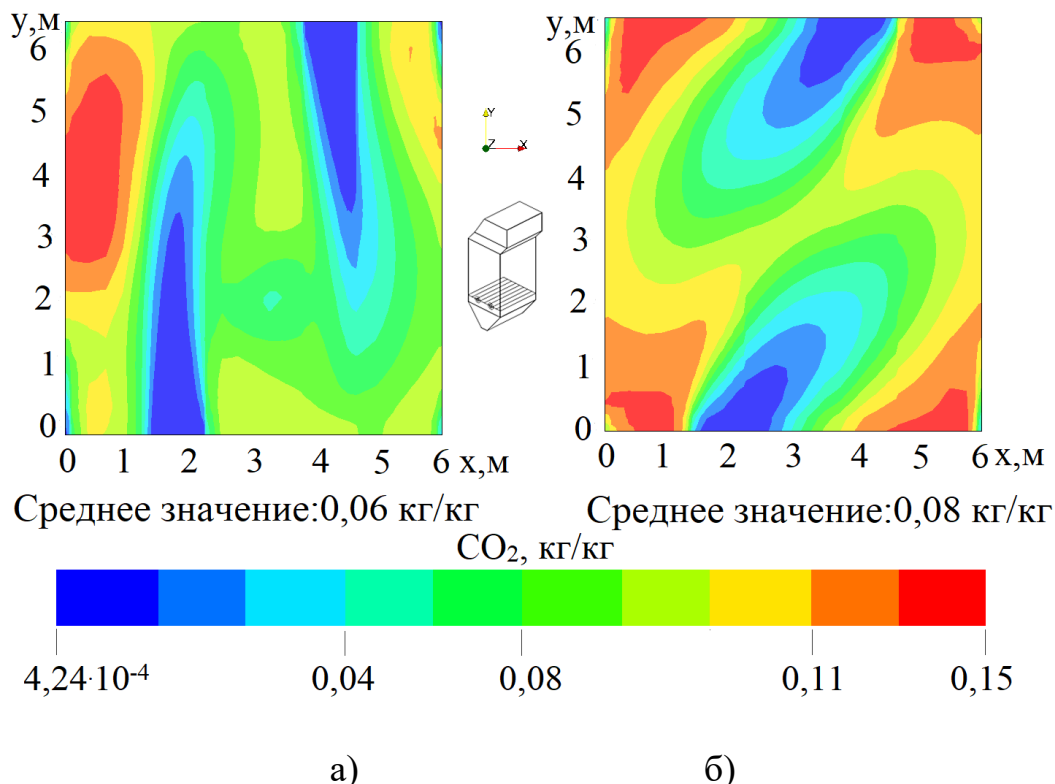


Рисунок 5.14 – Распределение концентрации диоксида углерода СО<sub>2</sub> в поперечных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75 (область пояса горелок, h=4.0 м) при пониженной нагрузке котла: а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

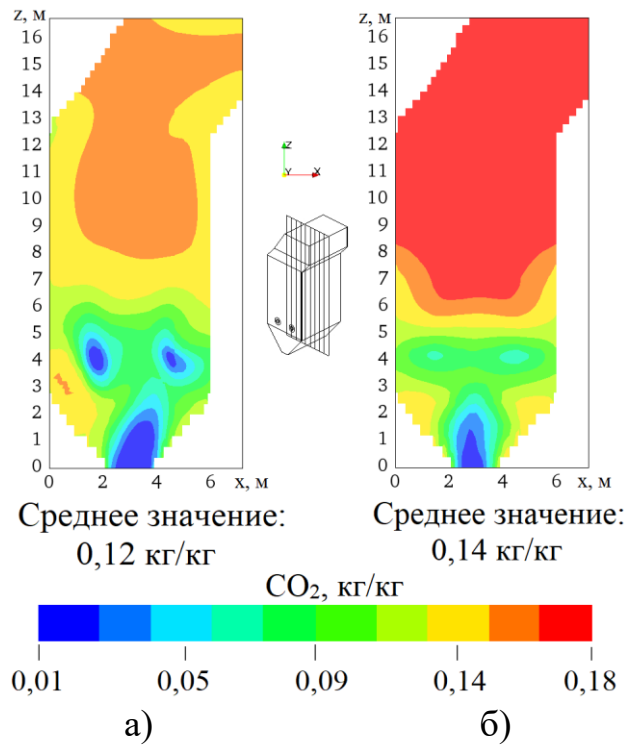


Рисунок 5.15 – Распределение концентрации диоксида углерода CO<sub>2</sub> в центральных сечениях ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

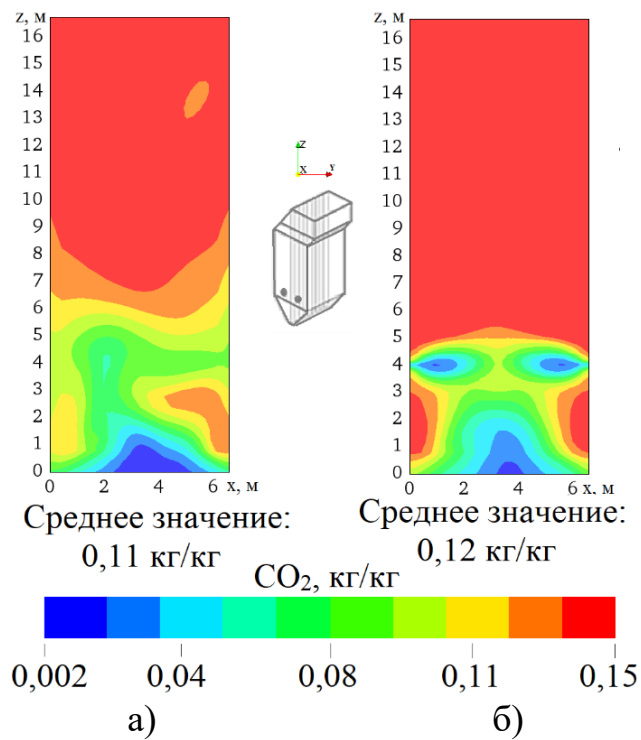


Рисунок 5.16 – Распределение концентрации диоксида углерода CO<sub>2</sub> в продольных сечениях ( $x=3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла: а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси



На рисунке 5.17 представлено трехмерное (рисунок 5.17 а) и двумерное (рисунок 5.17 б) распределение средних значений концентраций диоксида углерода  $\text{CO}_2$  по высоте  $h$  топочной камеры при пониженной нагрузке котла для двух исследуемых случаев (прямоточный и вихревой).

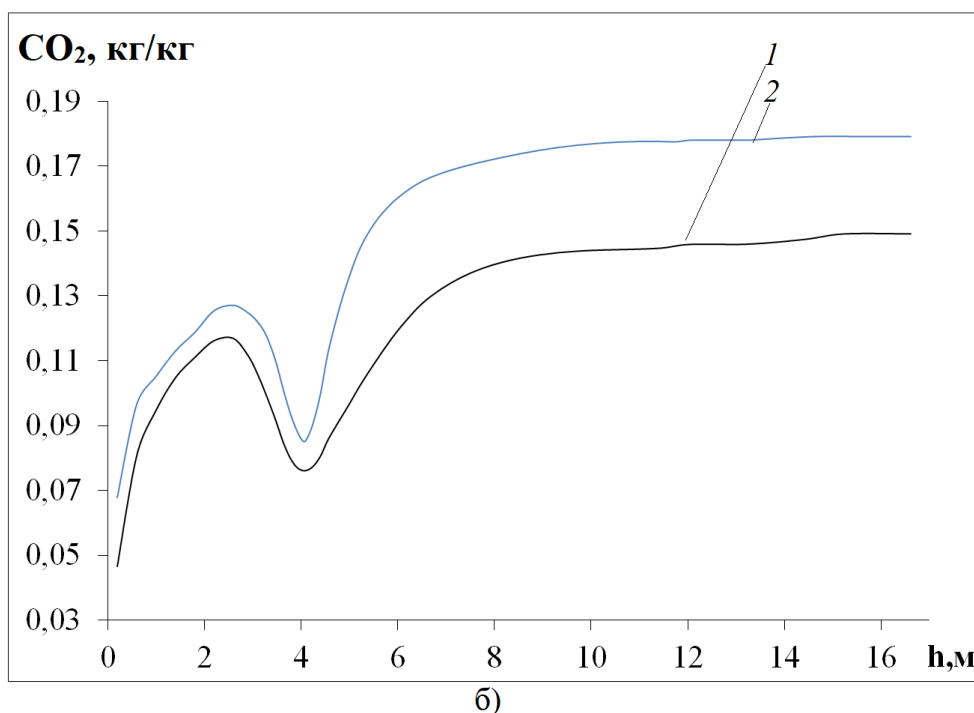
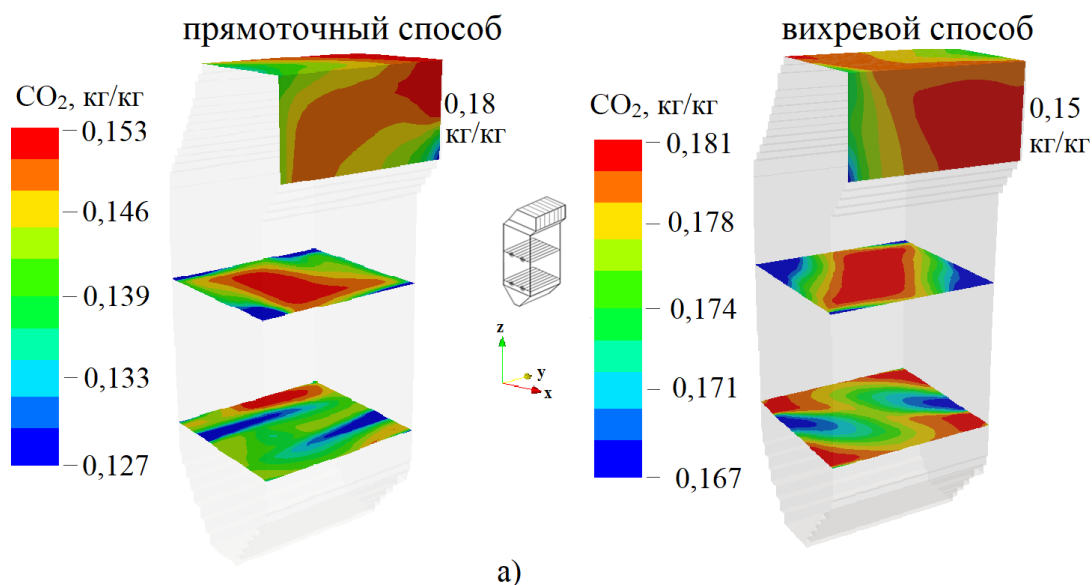


Рисунок 5.17 – Трехмерное а) и двумерное б) распределения концентраций диоксида углерода  $\text{CO}_2$  по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
кривая 1 – прямоточный и кривая 2 – вихревой способ подачи аэросмеси

Мы видим, что средняя по сечению концентрация диоксида углерода  $\text{CO}_2$  при вихревом способе подачи аэросмеси на выходе из камеры сгорания больше

(0,18 кг/кг), чем при прямоточном способе (0,15 кг/кг). Разница для этих двух режимов на выходе из топочной камеры составляет 0,03 кг/кг, но все же концентрация диоксида углерода  $\text{CO}_2$  не превышает ПДК, принятых в РК.

Анализ рисунка 5.17 а и 5.17 б показывает, что в области подачи пылеугольного топлива и окислителя ( $h=4.0$  м) мы имеем минимальные концентрации диоксида углерода  $\text{CO}_2$ . Далее по мере удаления от области расположения горелочных устройств значения концентраций  $\text{CO}_2$  увеличиваются и на выходе из топочной камеры достигают максимальных значений. Тот факт, что при вихревой подаче пылеугольного топлива значения концентрации диоксида углерода  $\text{CO}_2$  всюду выше (рисунок 5.17 б, кривая 2), говорит о том, что в этом случае создаются более благоприятные условия для его образования, в частности для догорания  $\text{CO}$  с образованием  $\text{CO}_2$ .

Основное образование концентрации диоксида углерода происходит по мере удаления от центра топки, т.е. от области столкновения струй топлива и окислителя из противоположных горелок. Это свидетельствует о том, что процесс образования оксидов углерода зависит не только от явлений переноса, но и от кинетики процесса.

Углерод может реагировать с кислородом разными способами и это чрезвычайно важно при проектировании топочных камер. Технология сжигания должна обеспечивать полное смешение топлива с кислородом и полное его выгорание с образованием  $\text{CO}_2$ , а не  $\text{CO}$ . В противном случае тепловыделение резко снизится, поскольку при образовании  $\text{CO}$  выделяется лишь 28% от энергии, выделяющейся при образовании  $\text{CO}_2$  [162].

Выполненные вычислительные эксперименты позволили определить основные закономерности образования диоксида азота  $\text{NO}_2$ , распределение его концентрации в топочном пространстве и количественные значения концентраций  $\text{NO}_2$  в различных сечениях камеры сгорания (рисунки 5.18–5.21).

На рисунке 5.18 представлено распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при пониженной нагрузке котла для двух рассматриваемых случаев подачи топлива в топочную камеру.

Мы видим, что при вихревом способе подачи аэросмеси (рисунок 5.18 б) наблюдаются более высокие значения концентрации  $\text{NO}_2$ , чем при прямоточном (рисунок 5.18 а). Увеличение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  можно объяснить тем, что при вихревом способе подачи аэросмеси (рисунок 5.18 б) происходит более интенсивное перемешивание топлива и окислителя.

В этом случае образуется вихревое течение большей интенсивности, что увеличивает время пребывания угольной пыли в зоне горения, уменьшает механическую неполноту сгорания и приводит к росту температуры в этой области.

Высокая температура в ядре факела в случае вихревых горелок создает благоприятные условия для повышенного образования диоксида азота  $\text{NO}_2$ . Так при прямоточной подаче пылеугольного топлива средняя по сечению концентрация  $\text{NO}_2$  равна 824,0 мг/м<sup>3</sup>, а при вихревой – 1216,3 мг/м<sup>3</sup>.

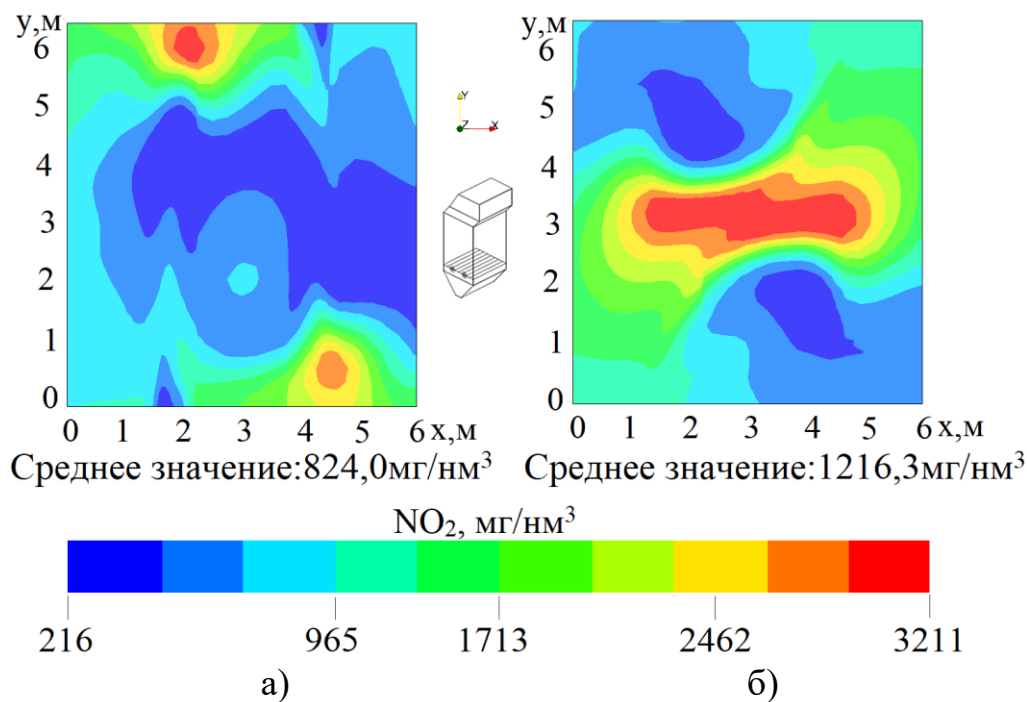


Рисунок 5.18 – Распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  в поперечных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75 (область пояса горелок,  $h=4.0$  м) при пониженной нагрузке котла:  
 а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

Распределения концентраций диоксида азота  $\text{NO}_2$  при пониженной нагрузке котла в центральном ( $y=3.3$  м) и продольном сечениях ( $x=3.0$  м) для двух исследуемых способов подачи аэросмеси (прямоточный и вихревой) представлены на рисунках 5.19–5.20. Анализируя полученные рисунки, можно сделать вывод о том, что основное образование диоксида азота  $\text{NO}_2$  для двух способов подачи аэросмеси происходит в области расположения горелочных устройств. Именно в этой области имеется максимальная концентрация топлива и окислителя и наблюдается высокий уровень температуры. При направлении выше к выходу из топочной камеры химические реакции окисления азота ослабевают и на этом участке наблюдается снижение концентрации  $\text{NO}_2$  (рисунки 5.18–5.20).

На рисунке 5.21 представлено трехмерное и двумерное распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла для двух рассматриваемых случаев. Мы видим, что максимальное среднее по сечению значение концентрации  $\text{NO}_2$  достигается в области пояса горелок (в зоне активного горения), характеризующейся высоким значением температуры двухфазного потока (около  $1200$  °С). Далее, по мере удаления от области расположения горелок среднее значение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  уменьшается и на выходе из топочной камеры имеет минимальные значения (рисунок 5.21 б кривые 1–2). Это связано с уменьшением в верхних слоях газовой смеси температуры и концентраций азота топлива и окислителя, который уже химически прореагировал внизу в области горелок.

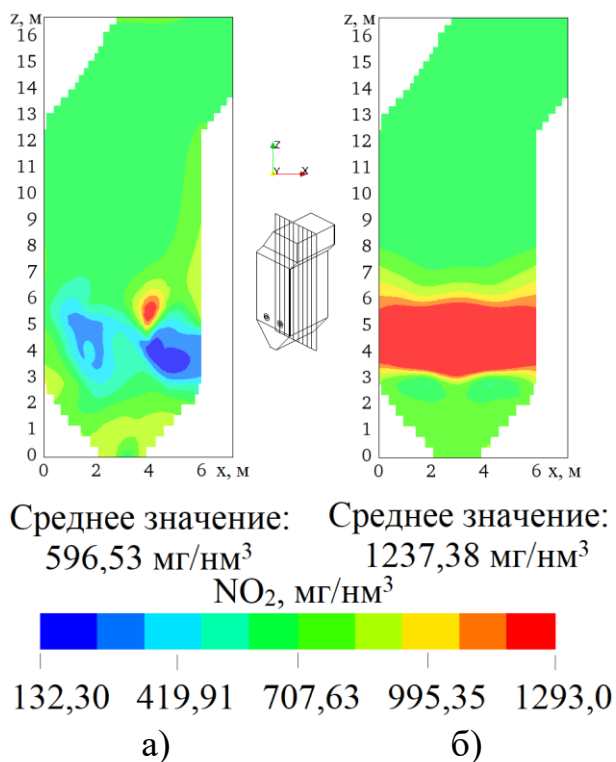


Рисунок 5.19 – Распределение концентрации диоксида азота NO<sub>2</sub> в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла: а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

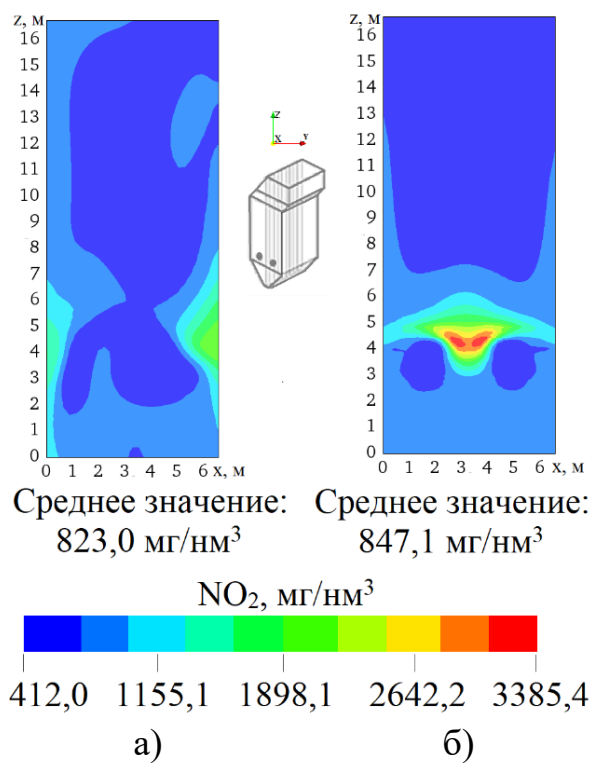


Рисунок 5.20 – Распределение концентрации диоксида азота NO<sub>2</sub> в продольном сечении ( $x=3.0$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла: а) прямоточный и б) вихревой способ подачи аэросмеси

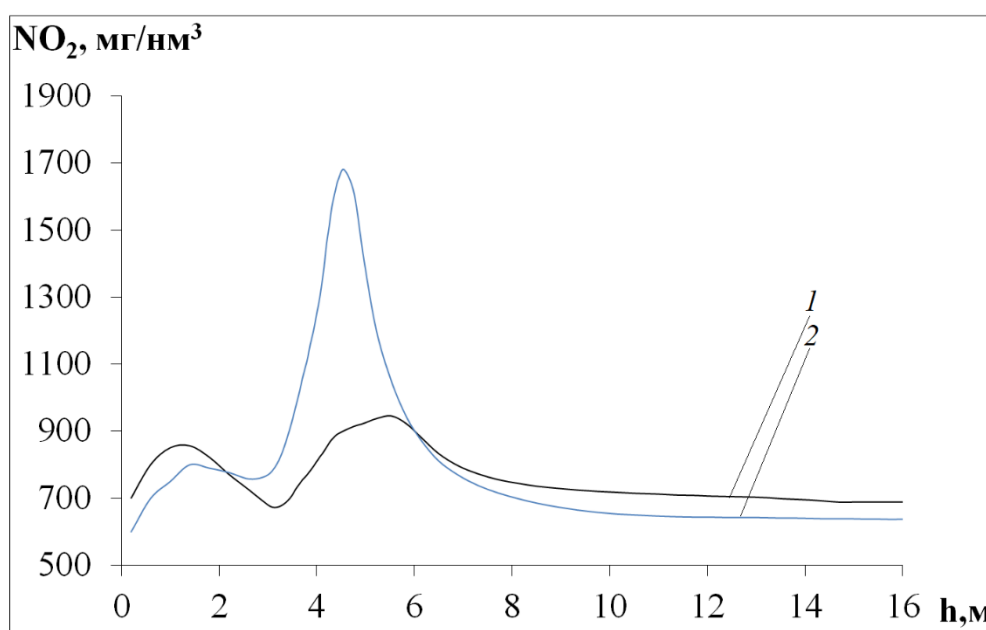
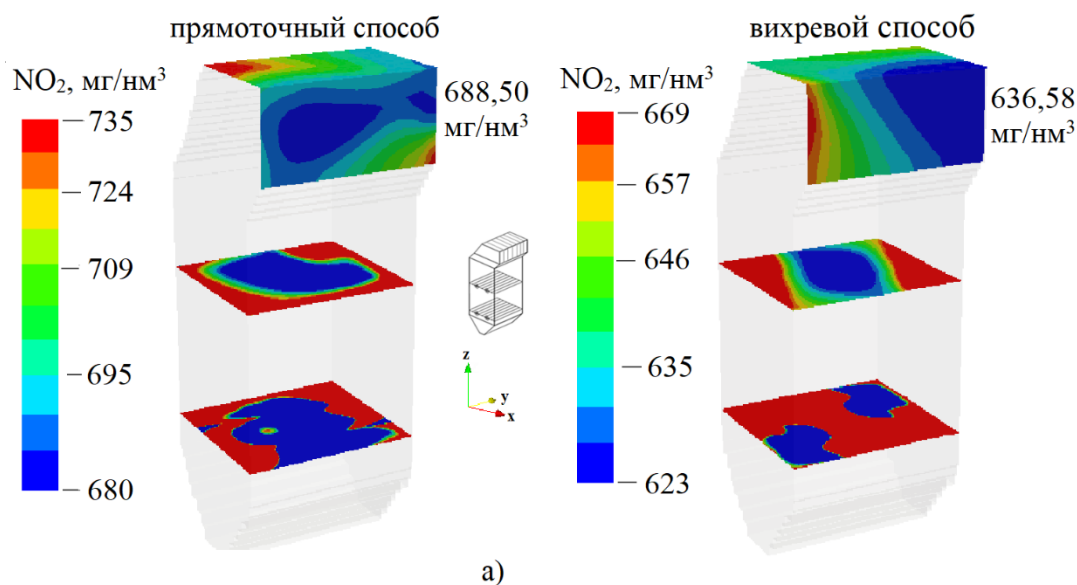


Рисунок 5.21 – Трехмерное а) и двумерное б) распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 при пониженной нагрузке котла:  
 кривая 1 – прямоточный и кривая 2 – вихревой способ подачи аэросмеси

На выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 среднее по сечению значение концентрации  $\text{NO}_2$  при прямоточном способе подачи аэросмеси составляет  $688,50 \text{ мг/м}^3$  (рисунок 5.21 а и 5.21 б, кривая 1), а при использовании вихревого способа подачи топлива –  $636,58 \text{ мг/м}^3$  (рисунок 5.21 а и 5.21 б, кривая 2). Концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  на выходе из топки при вихревом способе подачи топливной смеси уменьшились на 8% по сравнению с прямоточным способом ее подачи.

В таблице 5.1 приведены результаты вычислительных экспериментов для

основных характеристик топочной камеры котла БКЗ-75: температура  $T$ , концентрация оксида углерода  $CO$ , диоксида углерода  $CO_2$  и диоксида азота  $NO_2$  в различных сечениях топочного пространства при пониженной нагрузке котла для двух способов подачи аэросмеси через горелочные устройства.

Таблица 5.1 – Средние по сечению значения основных характеристик тепломассопереноса ( $T$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ ) на различных высотах  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 (зона пояса горелок,  $h=4$  м; на выходе из топки,  $h=16,75$  м) при сжигании в ней карагандинского угля (зольность 35,1%)

Высота $h$ , м	Способы подачи аэросмеси							
	Прямоточный способ подачи аэросмеси				Вихревой способ подачи аэросмеси			
	Величина				Величина			
	$T$ , °C	$CO$ , кг/кг	$CO_2$ , кг/кг	$NO_2$ , мг/м <sup>3</sup>	$T$ , °C	$CO$ , кг/кг	$CO_2$ , кг/кг	$NO_2$ , мг/м <sup>3</sup>
4	790,59	$2,8 \cdot 10^{-3}$	0,06	824,05	1017,97	$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,08	1216,31
16,75	847,08	$5,3 \cdot 10^{-4}$	0,15	688,50	836,58	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,18	636,58

Анализируя данные, приведенные в таблице 5.1, можно сделать вывод о том, что если топочная камера работает в режиме снижения нагрузки котла, то на выходе из нее значения концентраций вредных веществ ( $CO$ ,  $NO_2$ ) при использовании вихревых горелочных устройств с закруткой потока аэросмеси уменьшаются. В тоже время значения концентрации диоксида углерода  $CO_2$  всюду выше при вихревой подаче пылеугольного топлива. Это говорит о том, что в этом случае создаются более благоприятные условия для его образования, в частности для догорания  $CO$  с образованием  $CO_2$ .

Расчетные значения концентраций вредных веществ ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ ) на выходе из топочной камеры соответствуют нормам ПДК, для действующего энергетического котла БКЗ-75, использующего высокосольный карагандинский уголь. Таким образом, можно утверждать, что вихревой способ подачи аэросмеси в топочных камерах энергетических котлов как при базовом, так и при понижении нагрузки котла их работы создает благоприятные условия для интенсификации процесса горения и значительно улучшает экологические показатели ТЭС.

## **6 ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ВНЕДРЕНИИ ТЕХНОЛОГИИ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА В КОТЛЕ БКЗ-75**

### **6.1 Уменьшение выбросов вредных веществ при сжигании пылеугольного топлива с применением технологии двухступенчатого сжигания топлива**

В последнее время в теплоэнергетике, начиная от крупнейших действующих тепловых электростанций и заканчивая мелкими котельными, повсеместно внедряются «чистые» технологии. Как было сказано выше наиболее вредными загрязнителями атмосферы при сжигании топлива на ТЭС являются оксиды азота  $\text{NO}_x$ . В настоящее время применяются множество приемов минимизации вредных пылегазовых выбросов на угольных ТЭС, основными из которых являются: изменение технологии сжигания и очистка газов после сжигания [163–165].

К изменениям технологии сжигания относятся: применение модифицированных горелок, дожигание топлива, рециркуляция отходящих газов, ступенчатое сжигание топлива, подготовка низкосортных углей к сжиганию, радиационные технологии, внесение влаги в зону активного горения и другие. В таблице 6.1 приведены сравнительные данные по эффективности применения различных технологических способов снижения выбросов оксидов азота  $\text{NO}$  по данным [166–167].

Технология двухступенчатого сжигания топлива, или как ее еще называют технология OFA, является одним из эффективных методов снижения концентрации вредных выбросов и в первую очередь, самых опасных из них – оксидов азота. Эта технология связана с системой глубокого двухступенчатого сгорания топлива с подачей вторичного или третичного воздуха в топку котла с целью сокращения выбросов  $\text{NO}_x$ . Такая система помогает обеспечить улучшенное смешивание топлива с окислителем и создать правильные условия для оптимальной производительности котла, а также сократить количество выбросов оксидов азота в атмосферу [168–177].

Системы с дополнительным воздушным потоком являются общей характеристикой многих современных электростанций за рубежом, работающих на твердом топливе. Эти системы вводятся для достижения нового уровня соответствия сокращения выбросов оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ), который не мог быть достигнут только с помощью модификаций горелок. Так, например, данная технология была успешно применена в США сама по себе или в сочетании с модификацией горелки с низким выбросом  $\text{NO}_x$  на пылевидных угольных котлах для выполнения требований «Закона о чистом воздухе» для этих агрегатов [178].

Метод двухступенчатого сжигания топлива включает в себя подачу всего объема воздуха для горения (первичного и вторичного) в два этапа. На первом этапе – сжигается основная масса топлива (примерно 70–90% воздуха подается в горелки) при небольшом избытке воздуха. При смешивании в горелке топлива

с контролируемым потоком воздуха создается относительно низкотемпературная обедненная кислородом и обогащенная топливом зона горения в нижней части топочного устройства, что позволяет снизить образование  $\text{NO}_x$  из азота топлива (топливные  $\text{NO}_x$ ).

На втором этапе оставшаяся часть воздуха (10–30%) подается в топочное пространство над горелочным устройством через OFA-инжекторы для обеспечения догорания топлива. Относительно низкая температура в обогащенной кислородом зоне инжекторов приводит к минимизации образования  $\text{NO}_x$  из воздуха (термические  $\text{NO}_x$ ) [179–181].

Таблица 6.1 – Технологические методы снижения образования оксидов азота  $\text{NO}_x$  в топочных камерах при сжигании различных видов топлива [166, с. 2; 167, с. 227]

Методы	Реализация	Эффективность	Недостатки
Рециркуляция дымовых газов	Подачи части дымовых газов с выхлопа дымососом на всас дутьевого вентилятора	30–60%	Снижение КПД котла, требуется запас по тяге и дутью, увеличивается собственные нужды
Впрыск влаги	Установка форсунок	15–20%	Снижение КПД котла
Снижение избытка воздуха	Снижение общего избытка воздуха	10–30%	Возможность повышенного химического недожога
Нестехиометрическое сжигание	Рассогласование отношения топливо-воздух в горелках или по ярусам	35–55%	Снижение эффективности на пониженных нагрузках
Двухступенчатое сжигание	Установка инжекторов	30–40%	Сложность реализации на котлах с малым количеством горелок

Основными преимуществами технологии ступенчатого сжигания являются ее универсальность по топливу, возможность внедрения на котлах даже при сжигании высокосернистых топлив и высокая эффективность снижения выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$ . В целом при правильной организации ступенчатого сжигания обеспечивается снижение содержания оксидов азота на 30–40%.



Уменьшение в образовании оксидов азота объясняется образованием в топочной камере зон горения, отличающихся избытком воздуха и уровнем температур [182–184].

Различные варианты компоновок дополнительных OFA-инжекторов для двухступенчатого сжигания топлива представлены на рисунке 6.1 [109, p. 1236].

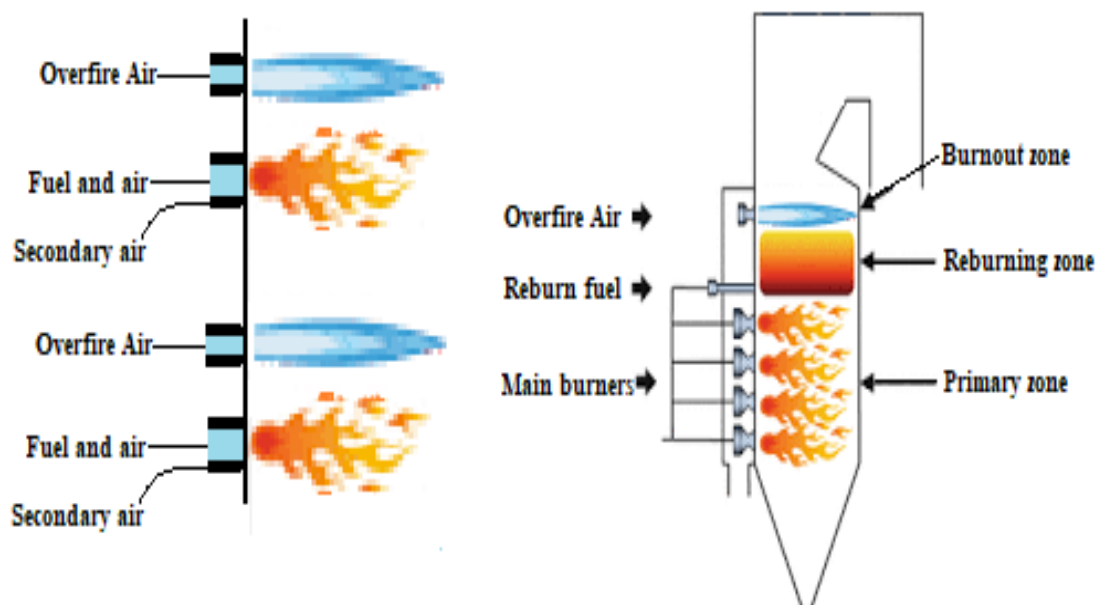


Рисунок 6.1 – Различные варианты компоновки OFA-инжекторов [109, p. 1236]

Основная трудность реализации двухступенчатого сжигания состоит в правильном определении места подвода воздуха второй ступени через инжекторы и его количества, которые для разных конструкций котельных агрегатов не являются тождественными. Воздух должен быть введен таким образом, чтобы обеспечить полное смешение с продуктами реакции первой ступени для завершения догорания. В то же время эта зона должна быть достаточно удалена от устья горелки с тем, чтобы начальное выгорание у первой ступени достигло достаточной полноты.

Недостаточно интенсивное смешение во второй ступени может привести к значительному увеличению выбросов продуктов неполного сгорания. Одной из причин образования восстановительной атмосферы в топке может быть образование продуктов химического и механического недожога, как результат неравномерного распределения угольной пыли и воздуха по месту и времени в топочной камере и неэффективного смесеобразования между ними [109, p. 1237; 185–188].

## 6.2 Результаты вычислительных экспериментов по внедрению технологии двухступенчатого сжигания топлива

В данном разделе диссертационной работы представлены результаты численных экспериментов по внедрению технологии двухступенчатого

сжигания на казахстанских углесжигающих ТЭС с целью уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу. Вычислительные эксперименты проведены на примере топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ, сжигающей высокозольный карагандинский уголь (зольность 35,1%). Проведено сравнение с базовым (традиционным) режимом горения пылеугольного топлива, когда подача дополнительного воздуха через OFA-инжекторы отсутствует (OFA=0%).

Для реализации двухступенчатого сжигания необходимо в верхней части котла расположить дополнительные инжекторы и изменить конечно-разностную сетку. На рисунке 6.2 представлен общий вид камеры сгорания котла БКЗ-75 (рисунок 6.2 а), разбивка ее на контрольные объемы для проведения численного моделирования (рисунок 6.2 б), компоновка горелочных устройств и инжекторов для внедрения технологии двухступенчатого сжигания топлива (рисунок 6.2 в). Конечно-разностная сетка имеет шаги по осям X, Y, Z:  $90 \times 32 \times 158$ , что составляет 455 040 контрольных объемов. Основные характеристики топочной камеры котла БКЗ-75 для организации двухступенчатого сжигания приведены в таблице 6.2.

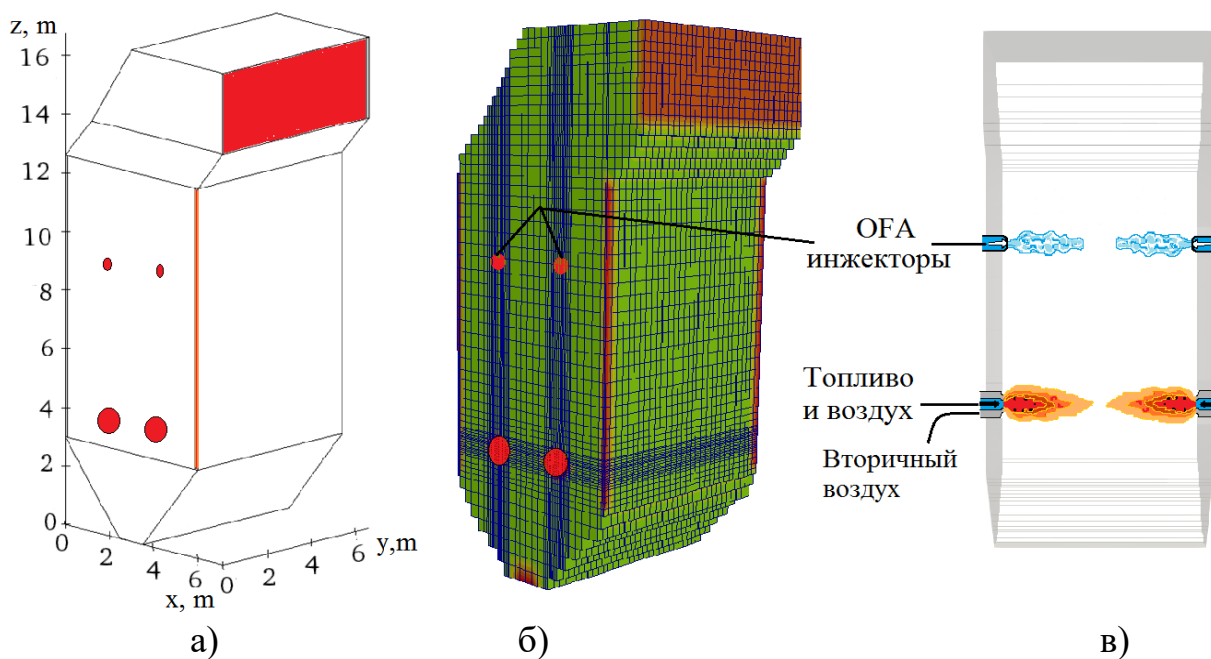


Рисунок 6.2 – Общий вид топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ а), разбивка ее на контрольные объемы б), компоновка горелочных устройств и OFA-инжекторов в)

Для реализации технологии двухступенчатого сжигания топлива были выбраны различные режимы подачи дополнительного воздуха через OFA-инжекторы: OFA равно 0% (базовый вариант) и когда 5%, 10%, 15%, 18%, 20%, 25% и 30% от общего объема воздуха подается через инжекторы в верхней части камеры сгорания. В таблице 6.3 представлены рассчитанные расход и скорости вторичного воздуха, подаваемые через OFA-инжекторы, для выше указанных режимов.

Таблица 6.2 – Технические характеристики котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ при организации двухступенчатого сжигания топлива

Характеристика	Величина
Количество OFA-инжекторов, шт.	4
Высота расположения горелочных устройств $h(z)$ , м	4
Высота расположения яруса OFA-инжекторов $h(z)$ , м	9,4
Диаметр OFA-инжекторов, м	0,325

Таблица 6.3 – Аэродинамические характеристики для организации двухступенчатого сжигания

% OFA	Массовый расход воздуха через инжекторы, кг/с	Объемный расход воздуха через инжекторы, м <sup>3</sup> /с	Скорость подачи воздуха через инжекторы, м/с
0	-	-	-
5	0,186	0,144	1,737
10	0,461	0,357	4,306
15	0,692	0,536	6,465
18	0,830	0,643	7,756
20	0,922	0,714	8,612
25	1,152	0,894	10,784
30	1,383	1,072	12,931

В результате проведенных численных экспериментов по внедрению двухступенчатого сжигания высокозольного карагандинского угля были получены аэродинамическая картина течения (распределение вектора полной скорости, температурные и концентрационные поля оксида углерода СО диоксида азота NO<sub>2</sub> по всему объему и на выходе топочной камеры котла БКЗ-75. Проведен сравнительный анализ основных характеристик процесса тепломассопереноса в топочной камере для исследуемых режимов подачи дополнительного воздуха через инжекторы.

#### 6.2.1 Исследование аэродинамики течения в топочной камере

В результате проведения вычислительных экспериментов по аэродинамике процесса были построены распределения вектора полной скорости в различных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75, которые показаны на рисунках 6.3–6.4.

На рисунке 6.3 представлены распределения вектора полной скорости в поперечных сечениях топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м, рисунок 6.3 а), в зоне расположения инжекторов ( $h=9.4$  м, рисунок 6.3б), и в центральном сечении ( $y=3.3$  м, рисунок 6.3 в) топочной камеры котла БКЗ-75 для базового случая (OFA=0%) и с применением технологии двухступенчатого сжигания (OFA=18%).

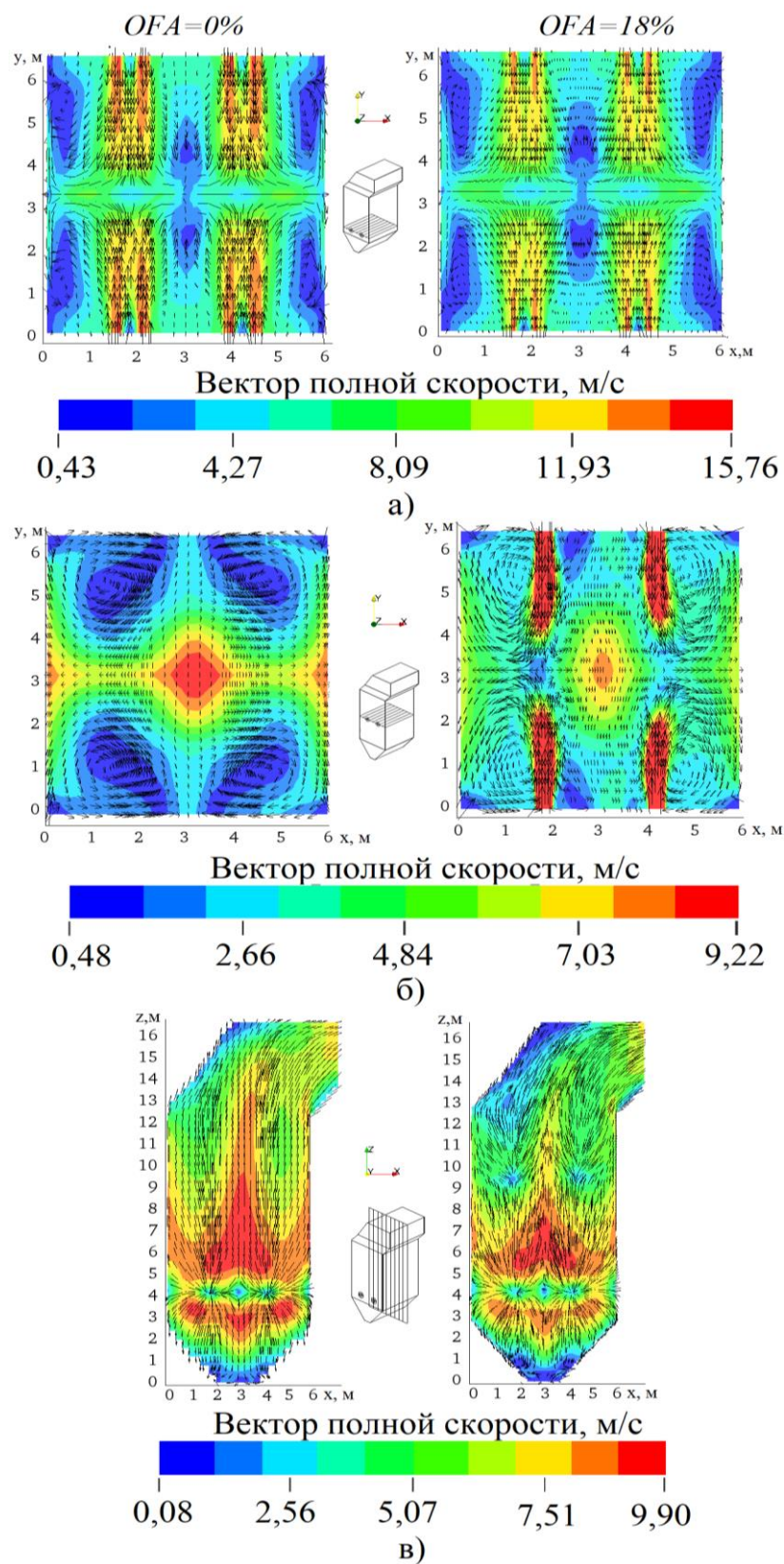


Рисунок 6.3 – Распределение вектора полной скорости в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области ( $h=4.0\text{ м}$ ) пояса горелок а), в зоне расположения ( $h=9.4\text{ м}$ ) инжекторов б) и в центральном ( $y=3.3\text{ м}$ ) сечении в) топочной камеры при разных объемах воздуха через инжекторы:  $OFA=0\%$  и  $OFA=18\%$

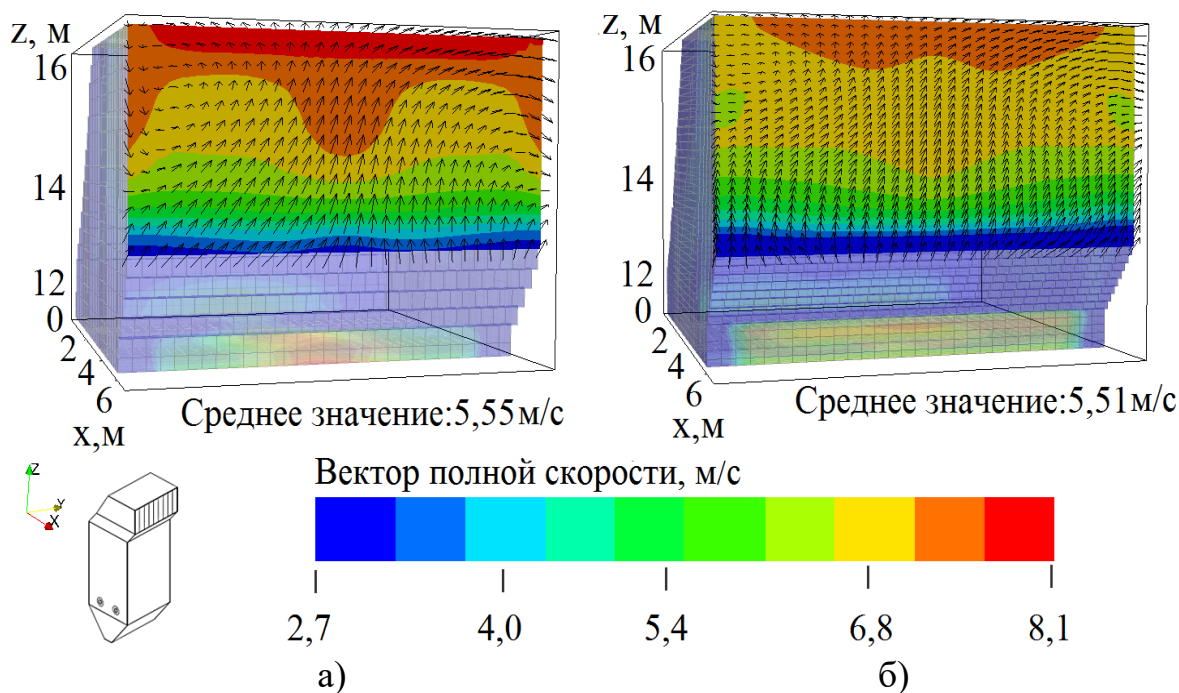


Рисунок 6.4 – Поле вектора полной скорости в поперечных сечениях на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы: а) OFA=0% и б) OFA=18%

Мы видим, что для этих двух исследуемых режимов подачи воздуха через инжекторы ядро факела расположено в центре топочной камеры и определяется областью столкновения потоков из противогорелок. Сравнивая рисунки 6.3 а в области пояса горелок ( $h=4.0$  м), можно заметить, как в том, так и в другом случае соударяются потоки, направленные из прямоточных горелок, которые расположены друг против друга.

Однако в целом картина течения меняется при дополнительной подаче воздуха через инжекторы и аэродинамические характеристики горения пылеугольного факела при внедрении двухступенчатого сжигания отличаются от базового случая. Так, на рисунке 6.3 б отчетливо видна подача дополнительного воздуха через инжекторы по сравнению со случаем отсутствия такой подачи (базовый режим, рисунок 6.3 а).

Для случая OFA=18% потоки, направленные из инжекторов, после соударения дополнительно рассекаются на два вертикальных вихря выше области установки горелок (рисунок 6.3 б), ближе к центру камеры сгорания, что благоприятно влияет на перемешивание топлива и окислителя и, соответственно, на полноту сгорания пылеугольного топлива.

При движении отходящих газов к выходу из топочной камеры скорость уменьшается. В отличие от традиционного сжигания пылеугольного топлива (OFA=0%) вихревой характер течения на выходе из топки при использовании технологии двухступенчатого сжигания ослабевает (OFA=18%), что приводит к уменьшению скорости (рисунок 6.3 в).

Это можно заметить, анализируя рисунок 6.4 распределения вектора полной

скорости в поперечных сечениях на выходе ( $h=16,75$  м) из топочной камеры для базового случая ( $OFA=0\%$ ) и с применением технологии двухступенчатого сжигания ( $OFA=18\%$ ).

Видно, что в отличие от традиционного сжигания пылеугольного топлива ( $OFA=0\%$ , рисунок 6.4 а), вихревой характер течения на выходе из топки при использовании технологии двухступенчатого сжигания немного ослабевает ( $OFA=18\%$ , рисунок 6.4 б), что приводит к уменьшению скорости. Здесь среднее значение вектора полной скорости для базового случая равно  $5,55$  м/с (рисунок 6.4 а), а при дополнительной подаче воздуха через инжекторы составляет  $5,51$  м/с (рисунок 6.4 б).

### 6.2.2 Исследование температурных характеристик топочной камеры

Результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния  $OFA$ -инжекторов на температурные характеристики топочной камеры котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ при горении в ней пылеугольного топлива (высокозольный карагандинский уголь) представлены на рисунках 6.5–6.8.

Распределения температуры  $T$  в поперечном сечении топочной камеры в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) и в зоне расположения  $OFA$ -инжекторов ( $h=9.4$  м) для базового случая ( $OFA=0\%$ ) и с применением технологии двухступенчатого сжигания ( $OFA=10\%$  и  $OFA=18\%$ ) показаны на рисунках 6.5–6.6.

Сравнительный анализ рисунков 6.5 а, 6.5 б и 6.5 в показывает, что при увеличении объема воздуха, подаваемого через  $OFA$ -инжекторы, температура в области расположения горелочных устройств увеличивается:  $OFA=10\%$  –  $750,35$  °С;  $OFA=18\%$  –  $744,08$  °С по сравнению с базовым вариантом:  $OFA=0\%$  –  $620,56$  °С.

Это связано с тем, что применение технологии двухступенчатого сжигания вызывает снижение концентрации кислорода в области наиболее интенсивного горения (пояс горелок), что приводит к снижению общего коэффициента избытка воздуха в этой области и к повышению температуры пламени в этой зоне (рисунок 6.5).

В области расположения  $OFA$ -инжекторов воздуха подается больше, химические реакции происходят интенсивнее, температура растет по сравнению с температурой в области пояса горелок (рисунок 6.6 а, б и в). Однако, чем больше мы подаем дополнительного холодного воздуха через  $OFA$ -инжекторы, тем меньше становится среднее значение температуры в этой зоне: для  $OFA=0\%$  –  $987,30$  °С;  $OFA=10\%$  –  $918,56$  °С;  $OFA=18\%$  –  $879,17$  °С.

Рисунок 6.7 иллюстрирует распределение температуры в центральном ( $y=3.3$  м) сечении топочной камеры котла БКЗ-75 для базового случая ( $OFA=0\%$ ) и с применением технологии двухступенчатого сжигания ( $OFA=10\%$ ,  $OFA=18\%$ ). Как было сказано выше, при увеличении объема воздуха, подаваемого через  $OFA$ -инжекторы, температура в центре топочной камеры увеличивается (рисунок 6.5), а в области расположения  $OFA$ -инжекторов уменьшается (рисунок 6.6).

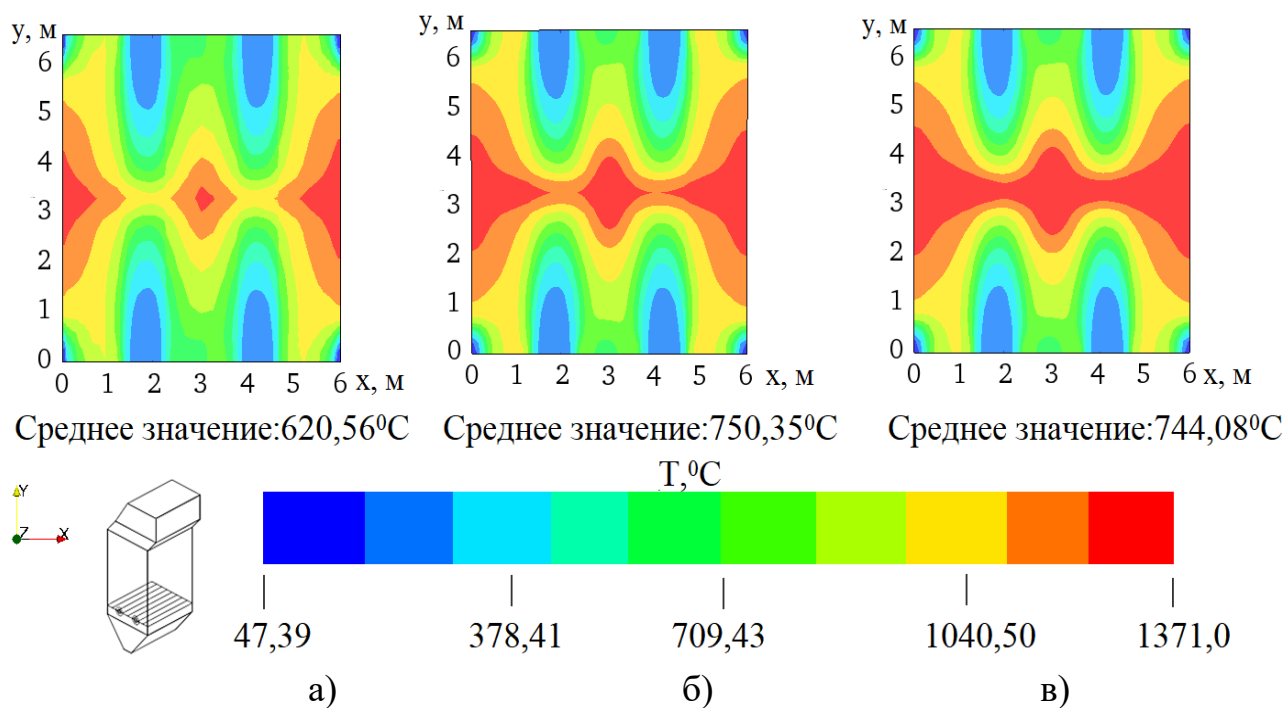


Рисунок 6.5 – Распределение температуры  $T$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы:  
а) OFA=0%, б) OFA=10%, в) OFA=18%

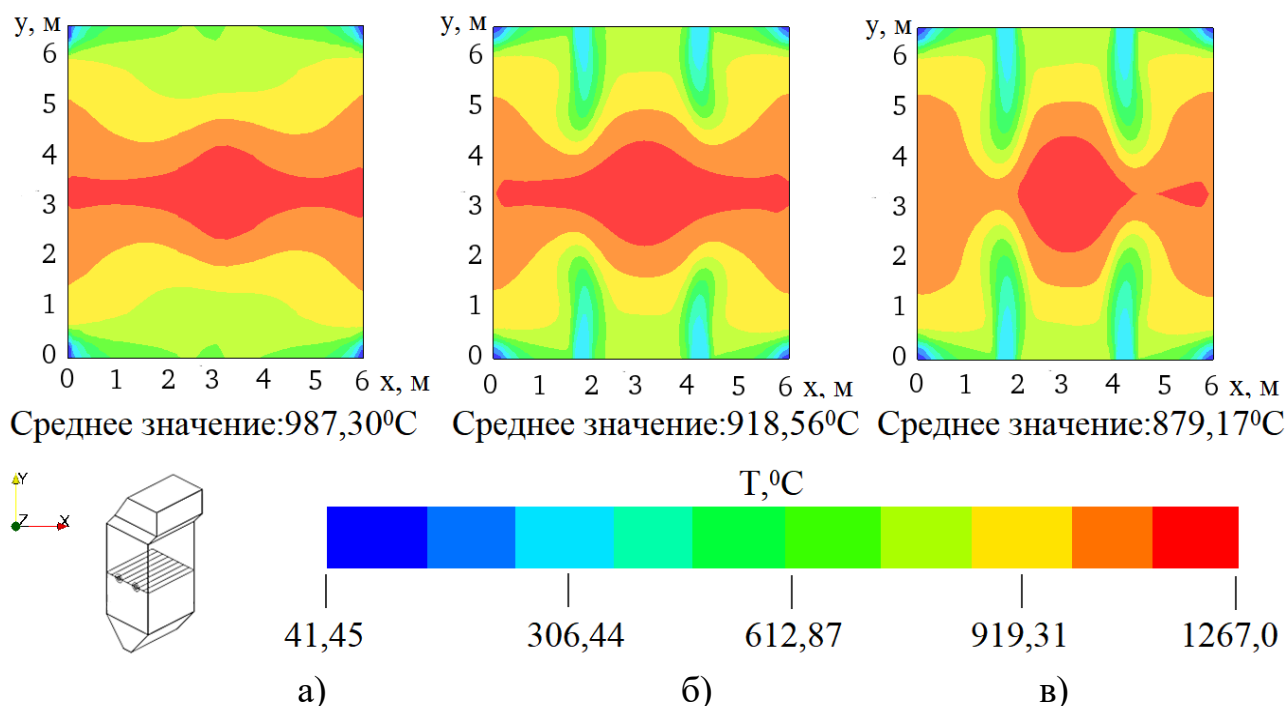


Рисунок 6.6 – Распределение температуры  $T$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в зоне расположения OFA-инжекторов ( $h=9.4$  м) при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы:  
а) OFA=0%, б) OFA=10%, в) OFA=18%

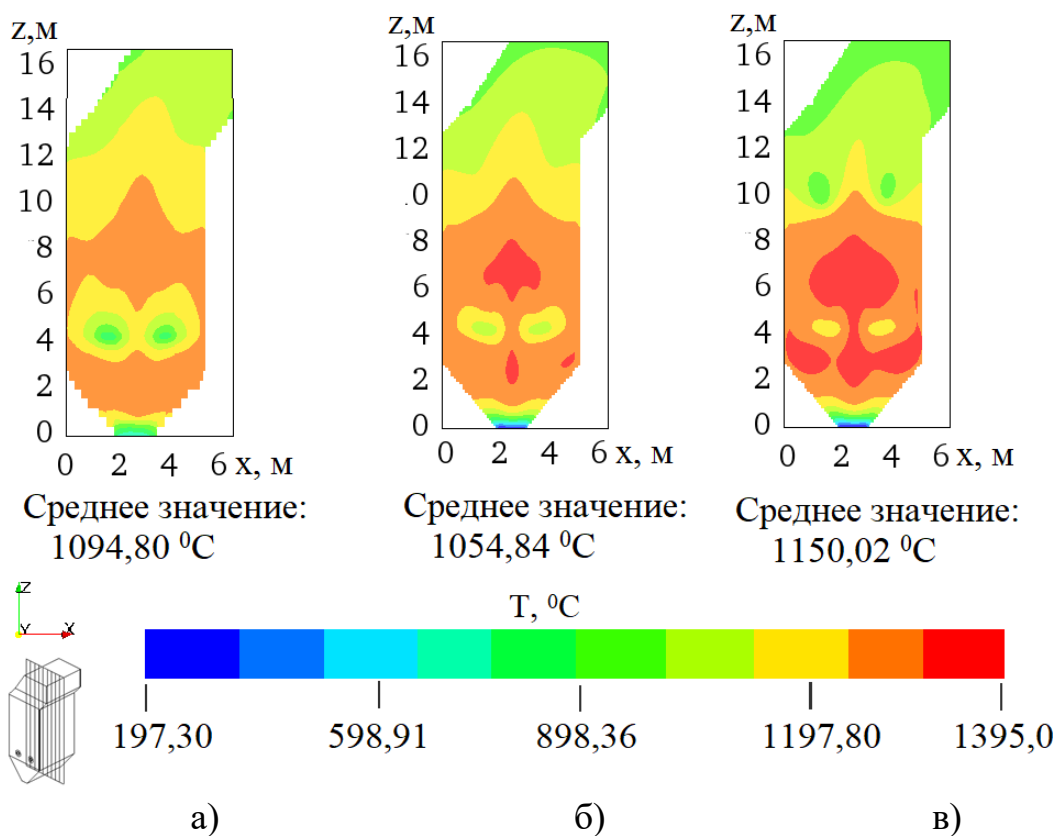


Рисунок 6.7 – Распределение температуры  $T$  в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы: а)  $OFA=0\%$ , б)  $OFA=10\%$ , в)  $OFA=18\%$

Это приводит к тому, что средние значения температуры  $T$  по центральному сечению топочной камеры котла БКЗ-75 для всех трех случаев отличаются незначительно: для базового случая  $OFA=0\%$  она составляет  $1094,80$  °С;  $OFA=10\%$  –  $1154,84$  °С и для  $OFA=18\%$  –  $1150,02$  °С (рисунок 6.7).

По мере продвижения к выходу из топки, поле температуры выравнивается и различия в значениях средней температуры для разных случаев  $OFA$ -режимов уменьшаются.

Сказанное выше подтверждается трехмерным (рисунок 6.8 а) и двумерным графиками (рисунок 6.8 б) распределения температуры  $T$  по высоте топочной камеры  $h$  для исследуемых режимов. Так среднее значение температуры  $T$  на выходе равно для:  $OFA=0\%$  –  $885,79$  °С;  $OFA=10\%$  –  $865,90$  °С и  $OFA=18\%$  –  $856,26$  °С.

Температура на выходе из топочной камеры подтверждается экспериментальными данными (рисунок 6.8 б), полученными непосредственно на действующей Шахтинской ТЭЦ [56, с.112; 141, с. 238] и ее теоретическим значением, рассчитанным по методике ЦКТИ для базового варианта ( $OFA=0\%$ ) [142, с. 280; 143, с. 130]. Сравнивая результаты, можно заметить, что при увеличении объема воздуха, подаваемого через  $OFA$ -инжекторы, наблюдается смещение местоположения ядра факела и увеличение протяженности зоны максимальных температур (рисунок 6.8 б, кривая 2, 3).



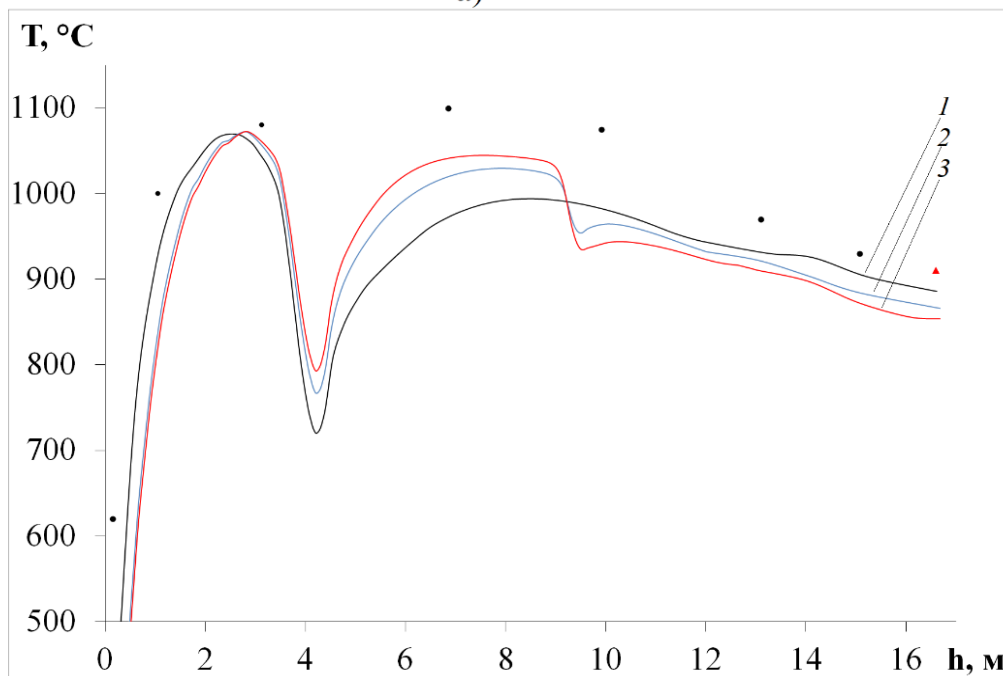
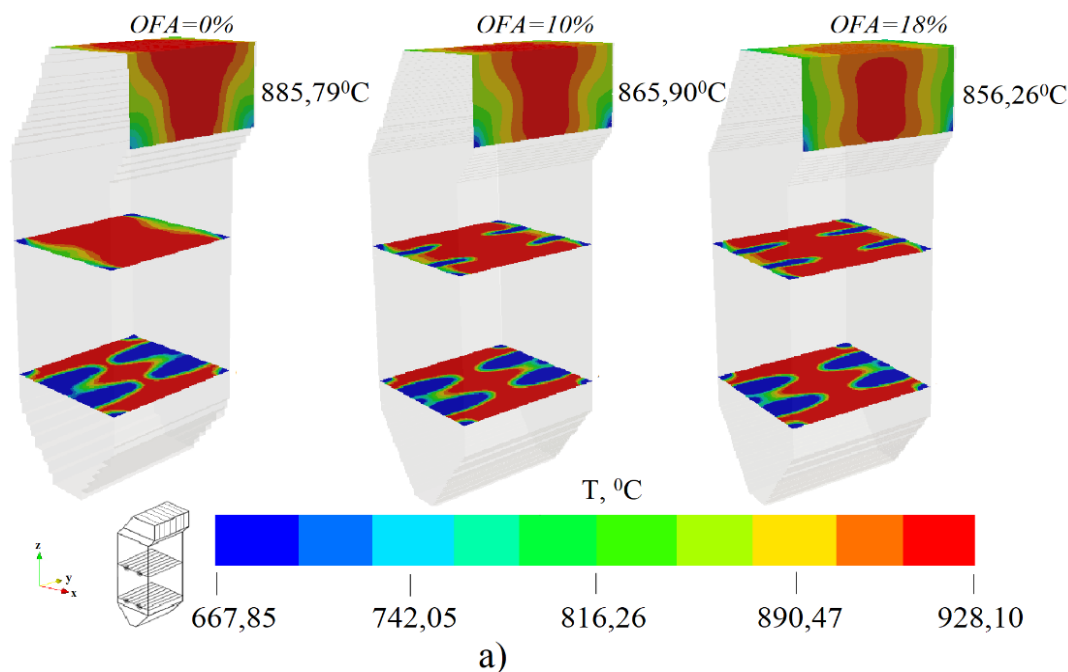


Рисунок 6.8 – Трехмерное а) и двумерное б) распределение температуры  $T$  по высоте топочной камеры  $h$  котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы: кривая 1 – OFA=0%; кривая 2 – OFA=10%; кривая 3 – OFA=18%; • – эксперимент на ТЭС [56, с.112; 141, с. 238], ▲ – теоретическое значение, полученное по методу ЦКТИ [142, с. 280; 143, с.130]

Увеличение температуры в ядре факела и снижение ее на выходе оказывает существенное влияние на химические процессы образования продуктов горения, поскольку температура является основным фактором при определении скорости реакции горения компонентов топливной смеси. При повышении температуры,

увеличивается скорость элементарных реакций, повышается качество смешения топливной аэроsmеси и вторичного воздуха и снижается уровень выбросов от неполного сгорания.

Однако, это не приводит к автоматическому снижению уровня выбросов вредных веществ, таких как оксид углерода CO и оксиды азота NO<sub>x</sub>. Их эффективное снижение может быть обеспечено на следующей стадии сжигания пылеугольного топлива, когда дополнительный воздух подается в топочную камеру через OFA-инжекторы, т.е. при организации двухступенчатого сжигания топлива.

В следующем разделе настоящей главы диссертации представлены результаты исследования концентрационных полей продуктов реакции горения топлива в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

### 6.2.3. Исследование концентрационных полей продуктов реакции горения топлива в топочной камере

На рисунках 6.9–6.16 представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния технологии двухступенчатого сжигания на распределение концентраций оксида углерода CO и диоксида азота NO<sub>2</sub> в топочном пространстве камеры сгорания котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ и на выходе из нее.

Трехмерное распределение концентрации диоксида азота NO<sub>2</sub> в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) и в зоне расположения OFA-инжекторов ( $h=9.4$  м) для трех вариантов подачи дополнительного воздуха через инжекторы: а) OFA=0% (базовый вариант), б) OFA=10% и в) OFA=18% показано на рисунках 6.9–6.10.

Мы видим, что с увеличением объема воздуха, подаваемого через OFA-инжекторы, повышается количество диоксида азота, образующегося в области расположения горелочных устройств по сравнению с базовым вариантом. Так концентрация диоксида азота NO<sub>2</sub> составляет при: OFA=0% – 492,48 мг/м<sup>3</sup> (рисунок 6.9 а), OFA=18% – 819,13 мг/м<sup>3</sup> (рисунок 6.9 б) и OFA=18% – 714,51 мг/м<sup>3</sup> (рисунок 6.9 в).

Анализ рисунка 6.10 показывает, что в зоне расположения OFA-инжекторов на высоте  $h=9.4$  м наблюдается равномерное снижение концентрации диоксида азота NO<sub>2</sub>. Здесь средние значения концентрации диоксида азота NO<sub>2</sub> для всех трех случаев значительно отличаются: для базового варианта OFA=0% концентрация равна 613,06 мг/м<sup>3</sup>, при OFA=10% – 541,28 мг/м<sup>3</sup> и при OFA=18% – 454,46 мг/м<sup>3</sup>.

Сравнивая базовый режим работы с режимом, когда включаются дополнительные OFA-инжекторы, можно отметить, что наиболее высокие концентрации NO<sub>x</sub> наблюдаются в более низкой части топочной камеры (рисунок 6.9), что характерно для всех видов топок. Однако, в отличие от базового режима, когда имеют место высокие концентрации NO<sub>x</sub> на выходе из топки, при организации метода двухступенчатого сжигания отмечается существенное снижение NO<sub>2</sub> по мере приближения к выходу (рисунок 6.10).

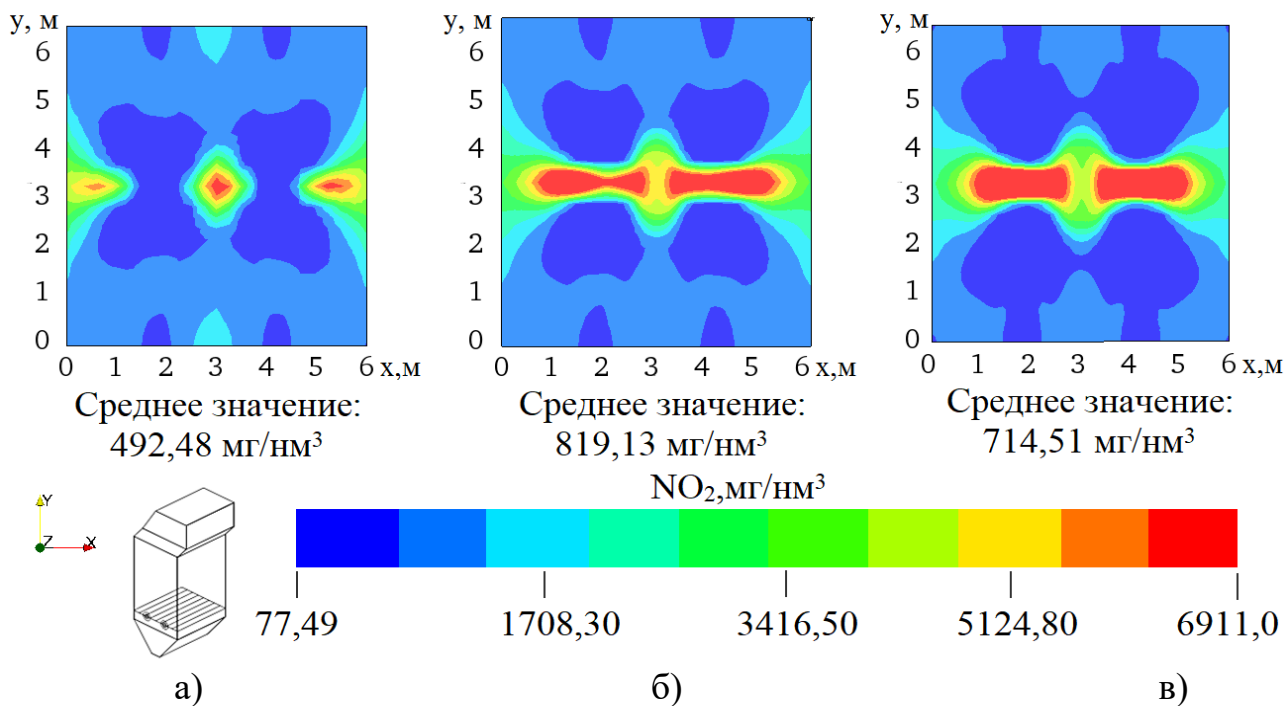


Рисунок 6.9 – Распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в области пояса горелок ( $h=4.0$  м) при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы:  
 а) OFA=0%, б) OFA=10%, в) OFA=18%

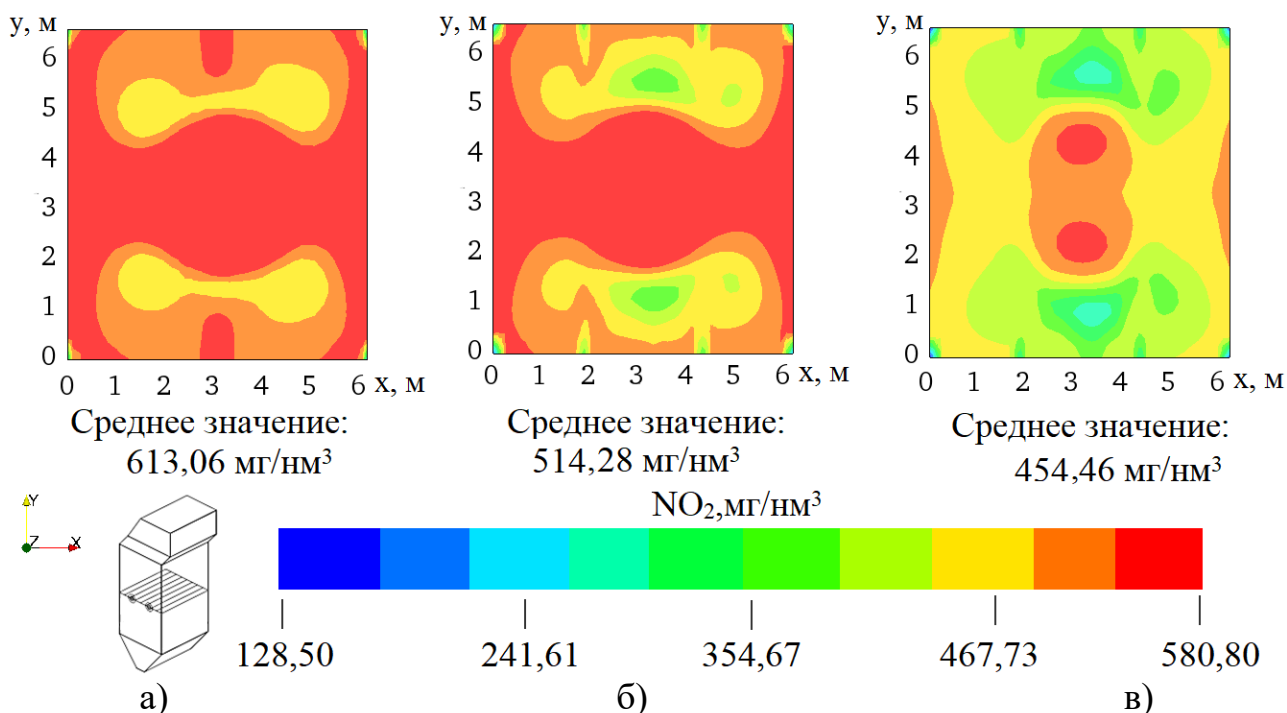


Рисунок 6.10 – Распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  в поперечном сечении топочной камеры котла БКЗ-75 в зоне расположения OFA-инжекторов ( $h=9.4$  м) при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы:  
 а) OFA=0%, б) OFA=10%, в) OFA=18%

При смешивании в горелке топлива с контролируемым потоком воздуха создается относительно обедненная кислородом и обогащенная топливом зона горения в нижней части топочного устройства, которая помогает снизить образование  $\text{NO}_x$  из азота, содержащегося в топливе (топливные  $\text{NO}_x$ ).

В области расположения OFA-инжекторов имеют место процессы дожигания аэросмеси и летучих веществ. Вследствие подачи дополнительного воздуха через OFA-инжекторы в этой области топочной камеры ( $h=9.4$  м) создается зона, обогащенная кислородом с относительно низкой температурой, что приводит к пониженному образованию  $\text{NO}_x$  из воздуха (термические  $\text{NO}_x$ ).

Ниже на рисунке 6.11 представлена графическая интерпретация распределения концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  в центральном ( $y=3.3$  м) сечении топочной камеры котла БКЗ-75 для трех вариантов подачи дополнительного воздуха через OFA-инжекторы: а) OFA=0% (базовый вариант), б) OFA=10%, в) OFA=18%. Анализ рисунков 6.11 а, 6.11 б и 6.11 в показывает, что большая часть диоксида азота  $\text{NO}_2$  образуется в зоне активного горения, расположенной в области горелочных устройств. Именно эта область характеризуется высокими значениями температуры двухфазного потока (см. рисунки 6.5–6.8) и концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$ , которая снижается по высоте топочной камеры.

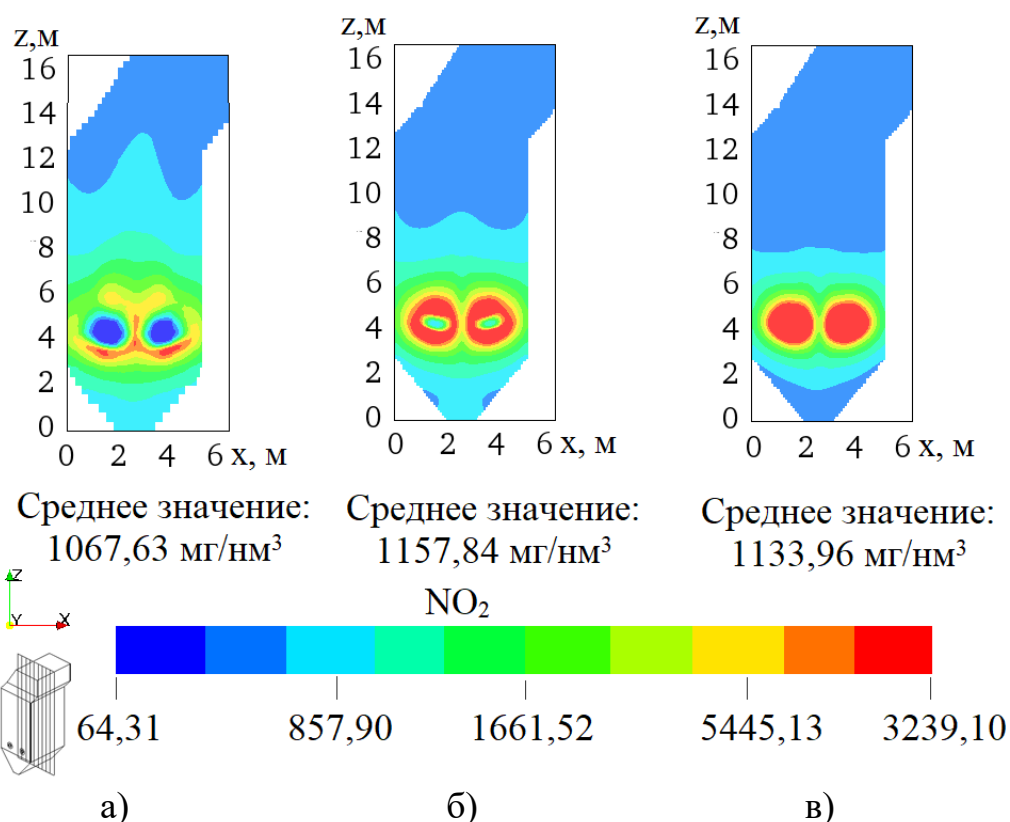
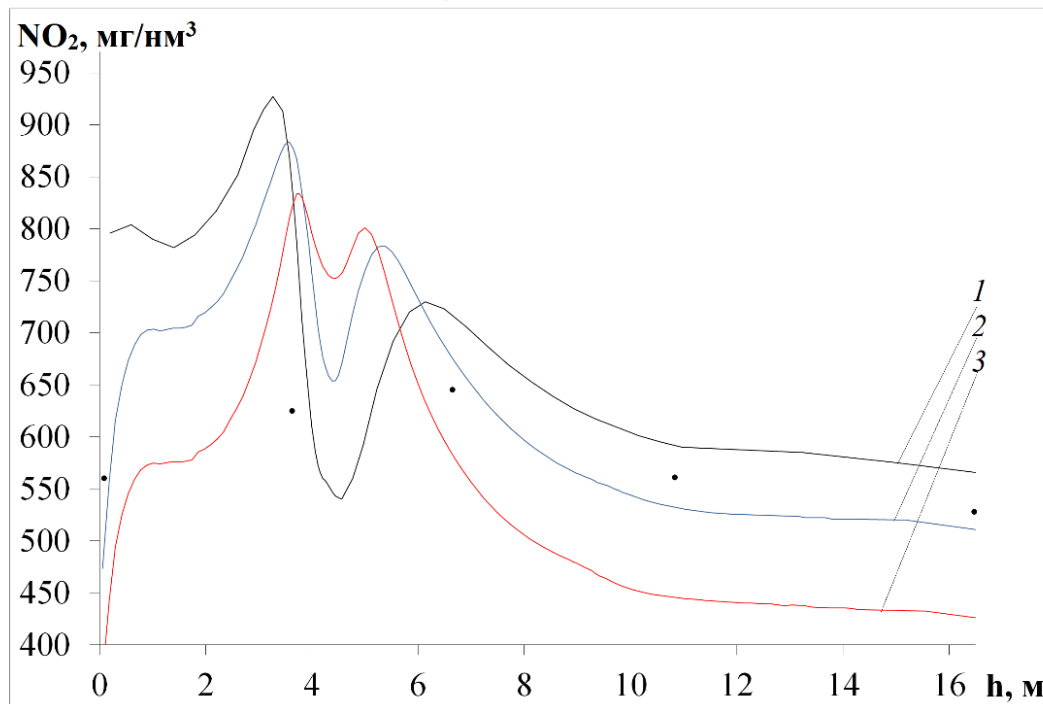
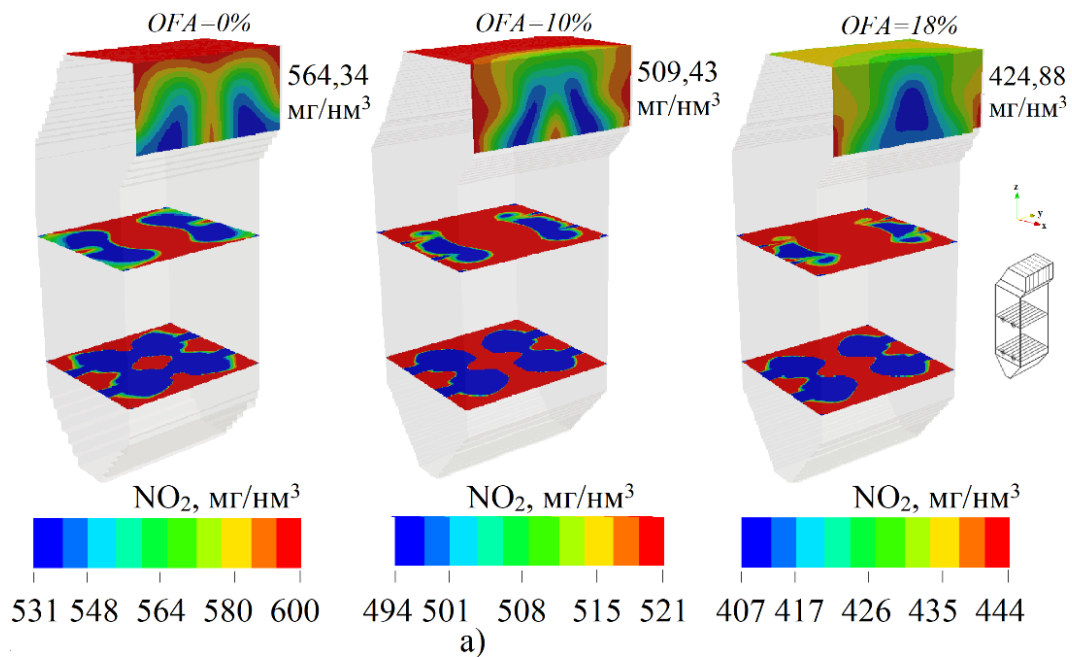


Рисунок 6.11 – Распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  в центральном сечении ( $y=3.3$  м) топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы: а) OFA=0%, б) OFA=10%, в) OFA=18%

Рисунок 6.12 демонстрирует трехмерное а) и двумерное б) распределение концентраций диоксида азота  $\text{NO}_2$  по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 для исследуемых для трех вариантов подачи дополнительного воздуха через инжекторы: а)  $\text{OFA}=0\%$  (базовый вариант), б)  $\text{OFA}=10\%$  и в)  $\text{OFA}=18\%$ .



б)

Рисунок 6.12 – Трехмерное а) и двумерное б) распределение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы:

кривая 1 –  $\text{OFA}=0\%$ ; кривая 2 –  $\text{OFA}=10\%$ ; кривая 3 –  $\text{OFA}=18\%$ ;

• – эксперимент на ТЭС [56, с. 112; 141, с. 238, 146, с. 19]

Анализ этого рисунка подтверждает сказанное выше о том, что основное образование  $\text{NO}_x$  происходит в области распространения потоков из горелок. Характер распределения кривых на этом участке неоднозначен (рисунок 6.12 б), что говорит о сложном процессе образования диоксидов азота  $\text{NO}_2$  в этой области и о влиянии технологии двухступенчатого сжигания топлива подавления оксидов азота на процесс формирования этих компонентов.

На выходе из топочной камеры при увеличении объема воздуха, подаваемого через OFA инжекторы, происходит значительное уменьшение концентрации диоксида азота  $\text{NO}_2$  по сравнению с базовым режимом: при OFA=0% – 564,4 мг/нм<sup>3</sup> (рисунок 6.12 а и 6.12 б, кривая 1), при OFA=10% – 509,44 мг/нм<sup>3</sup> (рисунок 6.12 а и 6.12 б, кривая 2), при OFA=18% – 424,88 мг/нм<sup>3</sup> (рисунок 6.12 а и 6.12 б, кривая 3), что в первую очередь связано с уменьшением температуры в этой области топочной камеры.

Это говорит о существенном влиянии технологии двухступенчатого сжигания на распределение концентрации этого вредного продукта горения угольного топлива.

На основе анализа рисунков 6.9–6.12 можно сделать вывод о том, что технология двухступенчатого сжигания является эффективным методом снижения концентрации оксидов азота в топочном пространстве и позволяет создать правильные аэродинамические и температурные условия для сокращения одних из самых опасных выбросов ( $\text{NO}_x$ ) в окружающую среду.

Рисунки 6.13–6.14 иллюстрируют трехмерные распределения концентрации оксида углерода CO в области расположения горелочных устройств и OFA-инжекторов для трех вариантов подачи дополнительного воздуха: а) OFA=0% (базовый вариант), б) OFA=10%, в) OFA=18%.

На рисунке 6.15 представлено трехмерное а) и двумерное б) распределение средних значений концентрации оксида углерода CO по высоте  $h$  топочной камеры для трех исследуемых случаев внедрения OFA – технологии в топке котла БКЗ-75: а) OFA=0% (базовый вариант), б) OFA=10%, в) OFA=18%.

Можно отметить, что оксид углерода сконцентрирован преимущественно в зоне основного распространения топливного потока и окислителя (воздух) из горелок, т.е. там, где в большом количестве присутствует углерод топлива. Использование метода двухступенчатого сжигания топлива в топочной камере, когда OFA-инжекторы расположены в области, находящейся выше основной зоны горения, позволяет интенсифицировать смешивание OFA-воздуха с CO в общем потоке горючих газов и максимально возможно преобразовать оксид углерода CO в диоксид углерода  $\text{CO}_2$  прежде, чем существенная часть CO выйдет из топочной камеры.

Действительно, при увеличении объема воздуха, подаваемого через OFA-инжекторы, происходит дальнейшее окисление окиси углерода CO до диоксида углерода  $\text{CO}_2$ , что приводит к уменьшению концентрации CO в отходящих газах и на выходе из топочного пространства (рисунок 6.15).



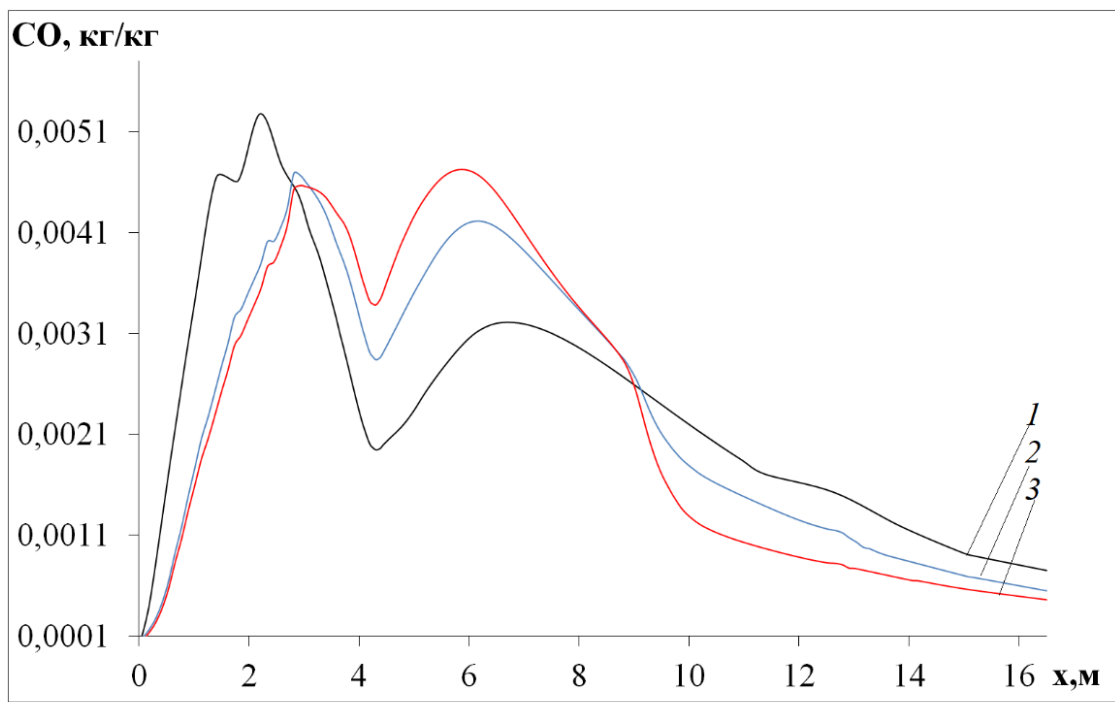
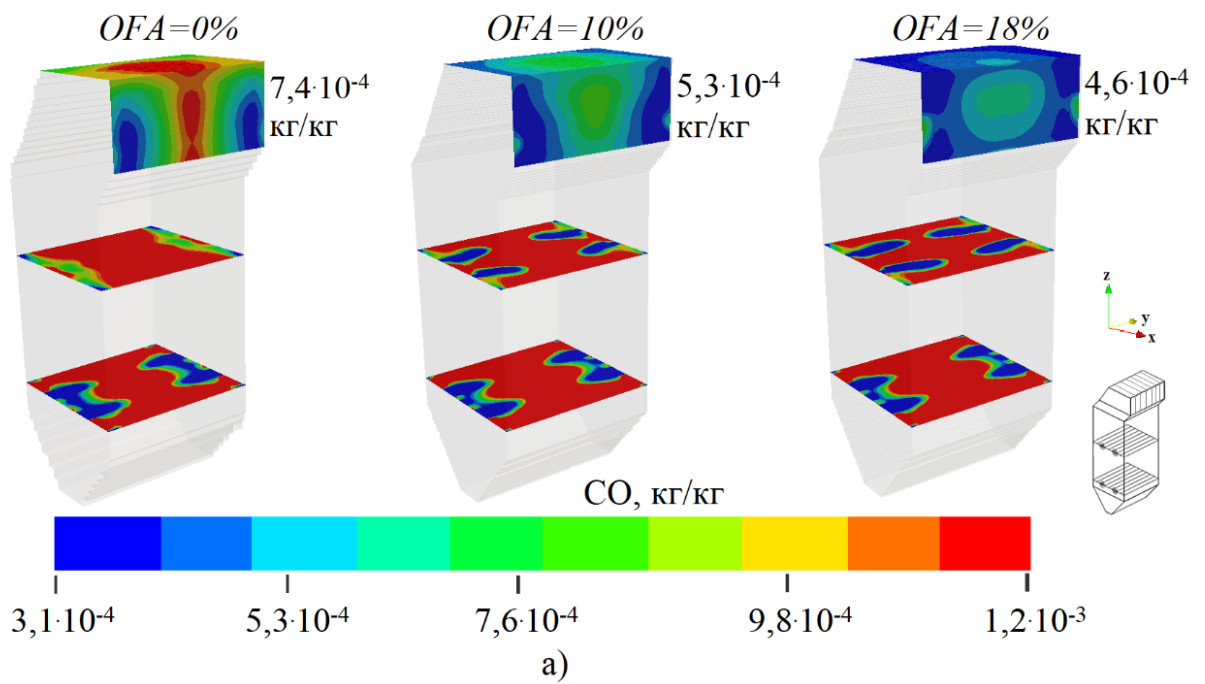


Рисунок 6.15 – Трехмерное а) и двумерное б) распределение концентрации оксида углерода CO по высоте  $h$  топочной камеры котла БКЗ-75 при различных объемах воздуха, подаваемого через инжекторы:  
 кривая 1 – OFA=0%; кривая 2 – OFA=10%; кривая 3 – OFA=18%

Анализ рисунка 6.15 показывает, что увеличение объема инжектируемого воздуха, позволяет существенно снизить концентрацию оксида углерода CO на выходе из топочной камеры с  $7,4 \cdot 10^{-4}$  кг/кг (при OFA=0%) до  $4,6 \cdot 10^{-4}$  кг/кг (при OFA=18%).

На рисунке 6.16 приведены зависимости значений температуры  $T$ ,



концентраций оксида углерода CO и диоксида азота NO<sub>2</sub> на выходе из топочной камеры от различных режимов подачи воздуха через инжекторы: OFA равно 0% (базовый вариант), 5%, 10%, 15%, 18%, 20%, 25% и 30% от общего объема воздуха, необходимого для сжигания топлива.

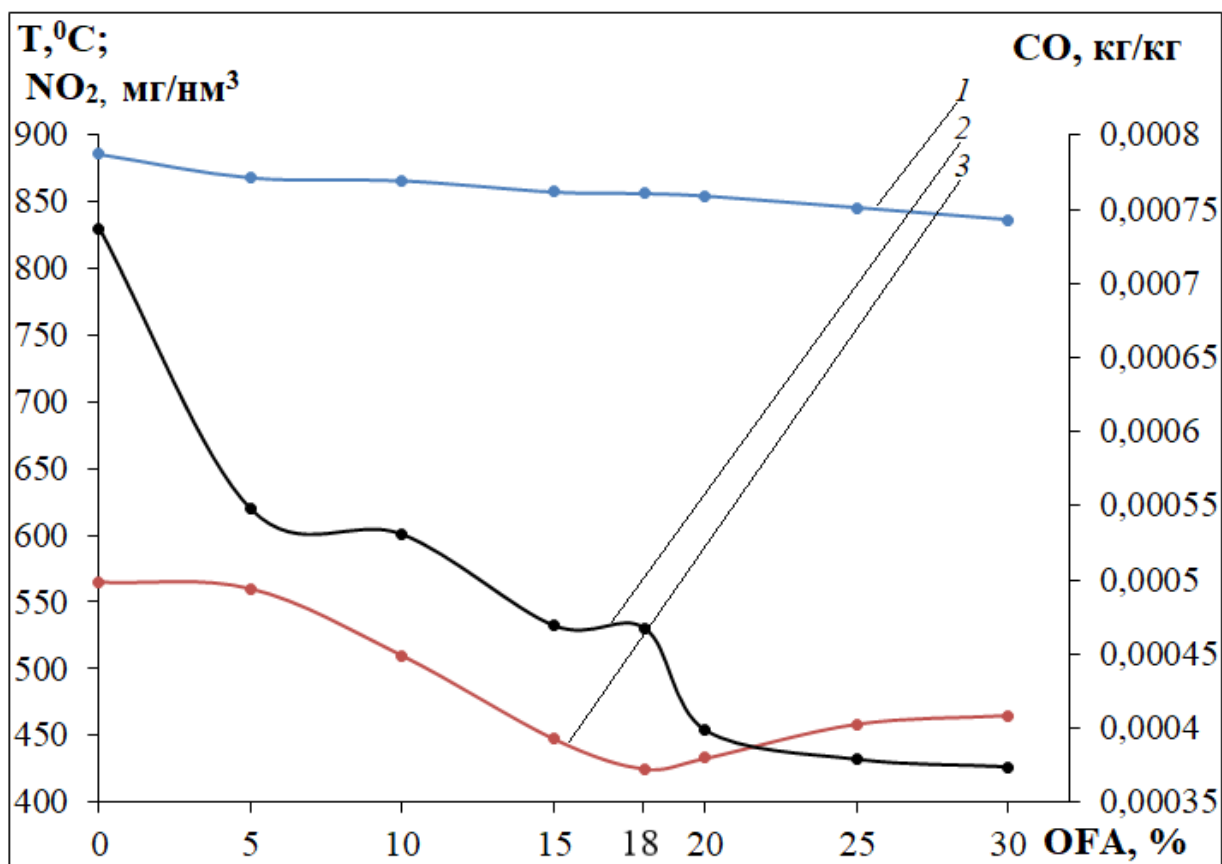


Рисунок 6.16 – Зависимость температуры T, концентраций оксида углерода CO и диоксида азота NO<sub>2</sub> на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75 от объема дополнительного воздуха через OFA-инжекторы:  
кривая 1 – T; кривая 2 – CO; кривая 3 – NO<sub>2</sub>

Анализируя результаты исследуемых режимов (рисунок 6.16), можно заметить тенденцию уменьшения температуры T (кривая 1), концентраций оксида углерода CO (кривая 2) и диоксида азота NO<sub>2</sub> (кривая 3) в топочном пространстве по мере увеличения объема дополнительного воздуха через OFA-инжекторы.

Что касается диоксида азота (рисунок 6.16, кривая 3), то мы видим, что при внедрении технологии двухступенчатого сжигания топлива на котле БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ оптимальным вариантом снижения (почти на 25%) концентрации NO<sub>2</sub> на выходе из топочной камеры является использование инжекторов при OFA=18%. Дальнейшее увеличение объема дополнительного воздуха приводит к росту концентрации диоксида азота NO<sub>2</sub> на выходе из топки.

Изменение основных характеристик топочного процесса (температура T, концентрации оксида углерода CO и диоксида азота NO<sub>2</sub>) по высоте h топочной

камеры котла БКЗ-75 при различных режимах подачи дополнительного воздуха через инжекторы: OFA равно 0% (базовый вариант), 5%, 10%, 15%, 18%, 20%, 25% и 30% показано в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Средние по сечению значения основных характеристик теплопереноса (Т, СО, NO<sub>2</sub>) на различных высотах h топочной камеры котла БКЗ-75 (зона пояса горелок, h=4 м; зона инжекторов, h=9,4 м; на выходе из топки, h=16,75 м) при сжигании в ней карагандинского угля (зольность 35,1%) с использованием технологии двухступенчатого сжигания

Высота h, м	% OFA							
	0	5	10	15	18	20	25	30
Температура T, °C								
4	620,56	736,14	750,35	754,74	744,08	791,64	820,06	843,59
9,4	987,30	945,64	918,56	949,45	879,17	937,54	922,58	902,60
16,75	885,79	868,09	865,90	857,39	856,26	854,36	845,72	836,65
Концентрация диоксида азота NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>								
4	492,48	635,83	819,13	738,51	714,51	1002,31	1836,58	3248,56
9,4	613,06	596,53	541,28	498,69	454,46	484,73	524,86	547,79
16,75	564,34	559,48	509,43	447,35	424,88	432,96	458,50	464,95
Концентрация оксида углерода СО, кг/кг								
4	2,0·10 <sup>-3</sup>	2,5·10 <sup>-3</sup>	3,2·10 <sup>-3</sup>	3,3·10 <sup>-3</sup>	3,4·10 <sup>-3</sup>	3,7·10 <sup>-3</sup>	4,3·10 <sup>-3</sup>	4,7·10 <sup>-3</sup>
9,4	2,4·10 <sup>-3</sup>	2,3·10 <sup>-3</sup>	1,9·10 <sup>-3</sup>	2,1·10 <sup>-3</sup>	1,5·10 <sup>-3</sup>	1,6·10 <sup>-3</sup>	1,4·10 <sup>-3</sup>	1,1·10 <sup>-3</sup>
16,75	7,4·10 <sup>-4</sup>	5,5·10 <sup>-4</sup>	5,3·10 <sup>-4</sup>	4,7·10 <sup>-4</sup>	4,6·10 <sup>-4</sup>	4,0·10 <sup>-4</sup>	3,8·10 <sup>-4</sup>	3,7·10 <sup>-4</sup>

Анализируя результаты, приведенные в таблице 6.4, можно сделать вывод о том, что использование технологии двухступенчатого сжигания в котле БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ позволяет значительно уменьшить концентрации оксида углерода СО и диоксида азота NO<sub>2</sub> на выходе из топочной камеры. Показано, что увеличение объема дополнительного воздуха, подаваемого через OFA-инжекторы, до 18% приводит к уменьшению концентраций оксида углерода СО примерно на 36%, а оксида азота NO на 25% по сравнению с базовым случаем (OFA=0%).

Полученные результаты позволяют оптимизировать процесс сжигания низкосортного топлива в топочной камере котла БКЗ-75, повысить эффективность выгорания топлива, уменьшить вредные выбросы и внедрить технологию двухступенчатого сжигания на других углесжигающих ТЭС. Мы сможем эффективно управлять процессами горения топлива в реальных энергетических установках с необходимым воздействием на различные его параметры, отыскивать наилучшие конструктивные решения по горелочным устройствам, создавать оптимальные способы сжигания высокозольного угля, минимизировать вредные пылегазовые выбросы в атмосферу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена исследованию процессов тепломассопереноса при сжигании низкосортного топлива в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ с целью внедрения оптимальных методов минимизации выбросов вредных веществ в атмосферу. По результатам исследований, можно сформулировать следующие выводы:

1 Для проведения вычислительных экспериментов разработаны физико-математическая, химическая и геометрическая модели, адекватно отражающие реальные технологические процессы сжигания низкосортного угля в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ.

2 Проведены вычислительные эксперименты по внедрению технологии двухступенчатого сжигания топлива при различных режимах подачи дополнительного воздуха через OFA-инжекторы: 0% (базовый вариант, традиционное сжигание), 5%, 10%, 15%, 18%, 20%, 25% и 30% от необходимого общего объема воздуха.

3 Показано, что увеличение объема дополнительного воздуха приводит к росту температуры в центре топочной камеры и к ее снижению в области расположения OFA-инжекторов. По мере продвижения к выходу из топки поле температуры выравнивается, а различия в значениях температуры при разных режимах подачи дополнительного воздуха через инжекторы уменьшаются.

4 Распределение температуры по высоте топочной камеры подтверждается экспериментальными данными, полученными непосредственно на действующей Шахтинской ТЭЦ, а на выходе из топочного пространства с ее теоретическим значением, рассчитанным по методике ЦКТИ для базового варианта (OFA=0%).

5 Показано, что использование технологии двухступенчатого сжигания в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ приводит к значительному сокращению выбросов оксида углерода CO и диоксида азота NO<sub>2</sub> из топочного пространства. Увеличение процентного содержания воздуха, подаваемого через инжекторы, до 18% приводит к уменьшению концентраций на выходе из топочной камеры оксида углерода CO примерно на 36%, а диоксида азота NO<sub>2</sub> на 25% по сравнению с базовым случаем.

6 Исследовано влияние закрутки пылеугольного потока на характеристики процессов тепломассопереноса (вектор полной скорости, распределение температуры, концентрации продуктов горения). Приведено сравнение характеристик топочных процессов для двух случаев: прямоточный способ подачи аэросмеси – горелки расположены на противоположных боковых стенках и вихревой способ подачи аэросмеси – горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов.

7 Установлено, что при вихревой подаче топливной аэросмеси наблюдается увеличение протяженности зоны максимальных температур, рост температуры в ядре факела и снижение ее на выходе из топочной камеры, что оказывает существенное влияние на химические процессы образования

продуктов горения. Это связано с более интенсивным характером вихревого течения, обеспечивающим максимальный конвективный перенос и увеличение времени пребывания угольных частиц в топочной камере котла.

8 Показано, что на выходе из топочной камеры средние значения концентраций оксида углерода CO и диоксида азота NO<sub>2</sub> при использовании вихревых горелочных устройств уменьшаются и соответствуют нормам ПДК для действующего энергетического котла БКЗ-75, использующего высокозольный карагандинский уголь.

9 Исследованы топочные процессы при пониженной нагрузке котла (часть горелок отключена). Приведено сравнение характеристик топочных процессов для двух случаев: прямоточный способ подачи аэросмеси, когда из четырех горелок работают только две прямоточные горелки, а две отключены и вихревой способ подачи аэросмеси, когда из четырех горелок работают две вихревые горелки с углом закрутки потока аэросмеси и наклоном их к центру симметрии котла на 30 градусов, а две отключены.

10 Использование вихревых горелок при пониженной нагрузке котла значительный уровень турбулентности течения и наличие высоких скоростей встречного тангенциального движения реагирующих потоков обеспечивают тщательное перемешивание аэросмеси. Это в свою очередь увеличивает время пребывания угольной пыли в зоне горения, уменьшает механическую неполноту сгорания и приводит к росту температуры в топочном пространстве и к незначительному ее увеличению на выходе из топки.

11 Показано, что использование вихревых горелочных устройств с закруткой потока аэросмеси приводит к уменьшению концентраций оксида углерода CO (на 34%) и диоксида азота NO<sub>2</sub> (на 8%) по сравнению с прямоточным способом подачи топливной смеси. В то же время при вихревой подаче пылеугольного топлива значения концентрации диоксида углерода CO<sub>2</sub> всюду выше, но не превышают ПДК, принятых в РК. Это говорит о том, что в этом случае создаются более благоприятные условия для его образования, в частности для догорания CO с образованием CO<sub>2</sub>.

#### ***Оценка полноты решений поставленных задач.***

Задачи, поставленные в диссертационной работе, решены в полном объеме. Проведены вычислительные эксперименты по исследованию влияния внедрения технологии двухступенчатого сжигания высокозольного карагандинского угля, конструкционных параметров камеры сгорания, различных компоновочных решений по горелочным устройствам и способа подачи топливной аэросмеси на основные характеристики процессов тепломассопереноса: аэродинамика течения, распределение температуры и концентрации продуктов горения. С помощью современных компьютерных технологий получена высокоинформативная 3D визуализация полученных результатов и проведено их сравнение с экспериментальными данными, полученными непосредственно на казахстанской ТЭС.

***Разработка рекомендаций и исходных данных по конкретному использованию результатов.***

Представленные в диссертационной работе современные методы физического, математического и 3D компьютерного моделирования позволяют исследовать процессы турбулентного теплопереноса и формирования вредных веществ при горении твердого топлива в камерах сгорания реальных энергетических объектов и выработать рекомендации по практическому применению результатов диссертации.

Полученные результаты влияния конструкционных параметров топочной камеры, различных компоновок горелочных устройств и способа подачи топливной аэросмеси на основные характеристики процесса теплопереноса (аэродинамика течения, распределение температуры и концентрации продуктов горения) позволят оптимизировать процесс сжигания низкосортного топлива не только в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ, но на других углесжигающих ТЭС РК.

Результаты, полученные в диссертационной работе, позволяют:

- управлять процессом горения топлива в топочных камерах реальных энергетических установок с необходимым воздействием на различные его параметры,
- разработать рекомендации по внедрению на действующих углесжигающих ТЭС энергоэффективной экологически «чистой» технологии двухступенчатого сжигания топлива,
- отыскивать наилучшие конструктивные решения по горелочным устройствам, создавать оптимальные способы сжигания высокозольного угля и минимизировать вредные пылегазовые выбросы в атмосферу, что несомненно способствует решению актуальных проблем теплоэнергетики.

#### ***Оценка технико-экономической эффективности внедрения.***

Методы физического, математического и 3D компьютерного моделирования, используемые в диссертационной работе, позволяют провести анализ всех параметров, существующих и будущих новых котлов, что обеспечит экономию времени и средств в отличие от строительства действующей модели. Технико-экономическая эффективность предложенных методов исследования и полученных результатов обусловлена возможностью отрабатывать новые технические решения и внедрять современные экологически «чистые» технологии не только для котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ, но на других углесжигающих ТЭС.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Левинзон С.В. Энергоресурсы: прогнозы и реальность. – Академия Естествознания, 2008. – 65 с.
- 2 Karatayev M., Clarke M.L. Current energy resources in Kazakhstan and the future potential of renewables: A review // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 59. – P. 97–104.
- 3 Всемирный банк. Обзор по Казахстану // [www.vsemirnyjbank.org/ru/country/kazakhstan/overview](http://www.vsemirnyjbank.org/ru/country/kazakhstan/overview). World Bank Group. Kazakhstan Partnership Programme Snapshot Report. – 2014. – 33 p.
- 4 Smoot L.D. Role of combustion research in the fossil energy industry // Energy & Fuels. – 1993. – Vol. 7, № 6. – P. 689–699.
- 5 Williams A., Pourkashanian M., Jones J.M., Skorupska T. Combustion and Gasification of Coal. – Taylor & Francis, New York, USA, 2000. – 336 p.
- 6 Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменное воспламенение и горение твердого топлива. Научно-технические основы. – Palmarium Academic Publishing, 2012. – 367 с.
- 7 Vorotnikov V. Kazakhstan prepares to grow coal production // Coal age. – 2013. – Vol. 118, № 9. – P. 40–43.
- 8 Ермеков Т.М., Жалгасулы Н., Галиц В.И. Комплексная переработка угля месторождений Казахстана // Сборник докладов 1-ой Международной научно-практической конференции «Горное дело в Казахстане. Состояние и перспективы. Центрально-Азиатский горнопромышленный союз». – Алматы, 2000. – С. 171.
- 9 Калмыков Д.Е., Маликова А.Д. Загнанные в уголь. Обзор угледобыча и угольная энергогенерация в Казахстане. Состояние и перспективы. – Караганда, 2017. – 70 с.
- 10 Дукенбаев К.Д. Энергетика Казахстана. Том 4. Технический аспект. – Алматы: Наука, 2000. – 350 с.
- 11 Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Казахстан: Энергетическая безопасность, энергетическая эффективность и устойчивость развития энергетики (состояние и перспективы). – Алматы: Наука, 2010. – 276 с.
- 12 Алияров Б.К. Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых станциях. – Алматы: Наука, 1996. – 271 с.
- 13 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Шафарик П., Максимов В.Ю., Болегенова С.А., Нугыманова А.О. Процессы тепломассопереноса в топочных камерах при горении термохимически активированного топлива // Теплофизика и Аэромеханика. – 2019. – Т. 26, № 6. – С. 977-989.
- 14 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Бекетаева М. Формирование вредных пылегазовых компонентов в процессе горения // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. – 2015. – Т. 1, № 299. – С. 32-38.
- 15 Башкова М.Н., Казимиров С.А., Темлянцев М.В., Багрянцев В.И., Рыбушкин А.А., Слажнева К.С. Практика и перспективы применения различных способов сжигания твердого топлива в теплоэнергетических установках //

Энергетика и электротехника. – 2014. – С. 24-32.

16 Каменецкий Б.Я. Расчет теплообмена в топках котлов при слоевом сжигании топлива // Теплоэнергетика. – 2008. – Т. 5. – С. 75-77.

17 Белусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.1. Топливо: учебное пособие. – СПбГТУРП, 2011. – 84 с.

18 Mahallawy F.E., Habik S.E. Fundamentals and Technology of Combustion 1st Edition. – Elsevier Science, 2002. – 862 p.

19 Rossiter A.P., Jones B.P. Energy Management and Efficiency for the Process Industries. – American Institute of Chemical Engineers, 2015. – 400 p.

20 Лейкин В.З. Создание оборудования и отработка технологии подготовки топлива для сжигания и газификации в циркулирующем и стационарном кипящем слое // Теплоэнергетика. – 2008. – Т. 1. – С. 71-80.

21 Sarkar D.K. Chapter 5 - Fluidized-Bed Combustion Boilers // Thermal Power Plant Design and Operation. – 2015. – P. 159–187.

22 Basu P., Cheng L. Heat transfer in a pressurized circulating fluidized bed // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 1996. – Vol. 39, № 13. – P. 2711–2722.

23 Salamatov V.V. Combustion in circulating fluidized bed: competitive technology for the coal-fired power industry // Journal of Engineering Thermophysics. – 2019. – Vol. 28. – P. 199–210.

24 Lunbo D., Li L., Daoyin L., Zhao Ch. Fundamental study on fuel-staged oxy-fuel fluidized bed combustion // Combustion and Flame. – 2019. – Vol. 206. – P. 227–238.

25 Архипов А.М., Путилов В.Я. Ступенчатое факельное сжигание кузнецких углей на ТЭС // Теплоэнергетика. – 2009. – Т. 8. – С. 52-57.

26 Гореликов Е.Ю., Литвинов И.В., Шторк С.И. Факельное сжигание угольного топлива // X Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». – Новосибирск, Россия, 2018. – С. 34.

27 Осинцев В.В. Особенности и организация факельного процесса в топке с многофункциональными горелками // Электрические станции. – 2002. – №11. – С. 14-19.

28 Katalambula H., Gupta R. Low-Grade Coals: A Review of Some Prospective Upgrading Technologies // Energy Fuels. – 2009. – Vol. 23, № 7. – P. 3392–3405.

29 Zhang J., Nieh S. Comprehensive modelling of pulverized coal combustion in a vortex combustor // Fuel. – 1997. – Vol. 76, № 2. – P. 123–131.

30 Рундыгин Ю.А., Григорьев К.А., Скудицкий В.Е. Низкотемпературная вихревая технология сжигания твердых топлив: опыт внедрения, перспективы использования // Всероссийский научно-технический семинар “Новые технологии сжигания твердого топлива: их текущее состояние и использование в будущем” Сб. докл. - М.: ВТИ. – Москва, 2001. – С. 286-295.

31 Жуйков А.В. Совершенствование процесса вихревого сжигания канско-ачинских углей с учетом снижения оксидов азота // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 6. – С. 71-73.

- 32 Анохина Е.С., Шторк С.И., Алексеенко С.В. Экспериментальное и численное моделирование стационарных вихревых структур // Современная наука сборник научных статей. – 2012. – Т. 10, № 2. – С. 68-72.
- 33 Хаджинов Е.А. Экспериментальное исследование кинетики горения одиночных частиц пылеугольного топлива // Металл и литье Украины. – 2013. – Т. 11, № 246. – С.12-19.
- 34 Худякова Г.И., Рыжков А.Ф., Силин В.Е., Осипов П.В., Зорин М.В., Стуков М.И. Экспериментальные исследования сжигания местных топлив // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СОРАН. – Новосибирск, Россия, 2012. – С. 101.1-101.8.
- 35 Бабий В.И., Куваев Ю.Ф. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. – М: Энергоатомиздат. – 1986. – 208 с.
- 36 Essenhigh R.H., Beeston G. Kinetics of coal combustion: The influence of oxygen concentration on the burning-out time of single particles // Physical Chemistry – 1963. – Vol. 67. – P. 1349.
- 37 Levendis Y.A., Bejarano P.A. Single coal particle combustion in O<sub>2</sub> /N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> environments // Combustion and Flame. – 2008. – Vol. 156. – P. 270–287.
- 38 Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. – М.: «Энергия», 1976 – 484 с.
- 39 Померанцева В.В. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 240 с.
- 40 Wilfrid F., Martin C.P. Fuels and Technology. Second Edition. – Pergamon, 1980. – 732 p.
- 41 Мухиддин М.П., Назаров С.М., Иброхимов А.З. Исследование физико-химического процесса горения угольной и древесной частицы // Политехнический Вестник. Серия: инженерные исследования. – 2018. – Т. 1, № 41. – С. 227-234.
- 42 Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива: монография. – Изд-во академии наук СССР, 1958. – 601 с.
- 43 Маршак Ю.Л., Козлов С.Г. Исследование пристенной области топочных камер // Тезисы докл. III Всесоюзной «Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов». – Таллин, 1980. – С. 116-124.
- 44 Митор В.В., Кузнецов Н.В. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – М.: Энергия, 1973. – 297 с.
- 45 Наджасаров М.А. Высокофорсированные огневые процессы. – М.: Энергия, 1967. – 294 с.
- 46 Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 265 с.
- 47 Эпик И.П. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. – Таллин: ЭГИ, 1961. – 249 с.
- 48 Отс А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей. – М.: Энергия, 1977. – 312 с.



- 49 Кузнецов Н.В. Рабочие процессы и вопросы усовершенствования конвективных поверхностей котельных агрегатов. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 171 с.
- 50 Устименко Б.П. Высокотемпературные энерготехнологические процессы и аппараты. – Москва, 1980. – 189 с.
- 51 Singer S. Pulverized coal combustion: recent developments. – USA: Noyes Publications, 1984. – 184 p.
- 52 Smoot L.D. Pulverized coal diffusion flames: a perspective through the modeling // Works of 18<sup>th</sup> Symposium on Combustion. – Oxford, 1981. – P. 1185–1202.
- 53 Zinser W. Sur Entwicklung mathematischer Flammenmodelle fur die Verbrennung technischer Brennstoffe: Fortschiritt-Berichte VDI-Verlag. – 1984. – Vol. 6, № 171. – P. 191.
- 54 Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. – М.: Наука, 1965. – 431 с.
- 55 Вулис Л.А., Ершин Ш.А., Ярин Л.П. Основы теории газового факела. –Л.: Изд-во «Энергия», 1968. – 205 с.
- 56 Устименко Б.П., Алияров Б.К., Абубакиров Е.К. Огневое моделирование пылеугольных топок. – Алма-Ата: Наука, 1982. – 212 с.
- 57 Сакипов З.Б., Мессерле В.Е., Ибраев Ш.Ш. Электротермохимическая подготовка углей к сжиганию. – Алматы: Гылым, 1993. – 259 с.
- 58 Устименко Б.П., Джакупов К.Б., Кроль В.О. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 224 с.
- 59 Аскарова А.С. Тепломассоперенос при сжигании твердого топлива в промышленных котлах на примере Павлодарской ТЭЦ // Теплофизика и Аэромеханика. – 2000. – Т.7, №2. – С. 293–300.
- 60 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Лаврищева Е.И., Локтионова И.В. Численное моделирование топочных процессов при горении высокозольного экибастузского угля // Теплофизика и Аэромеханика. – 2002. – Т. 9, № 4. – С. 585-596.
- 61 Пономарев В.Б., Лошкарев А.Б. Математическое моделирование технологических процессов. – Екатеринбург. – 2006. – 114 с.
- 62 Хабарова М.А., Тринчеко А.А. Численное исследование выгорания топливных частиц при факельном сжигании с вводом вторичного топлива // Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019» подсекция Математическое моделирование. – Москва, 2019. – Т. 4. – С. 1940702.1-1940702.8.
- 63 Чернецкий М.Ю., Дектеров А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании: научное издание // Физика горения и взрыва. – Т. 47, № 3. – С. 37-46.
- 64 Красинский Д.В. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке усовершенствованной конструкции // Теплоэнергетика. – 2015. – Т. 3. – С. 54-61.

- 65 Двойнишников В.А., Хохлов Д.А. Конструкция пылеугольной растопочной вихревой горелки и численное исследование ее работоспособности // Теплоэнергетика. – 2013. – № 6. – С.12-18.
- 66 Гиль А.В., Старченко А.В., Заворин А.С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо: монография. – Томск: STT, 2011. – 184 с.
- 67 Heri P., Bambang S. Numerical simulation of coal particle size (fineness) effect to combustion characteristics of sub-critical pulverized coal boiler 600 MW capacity AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2187, № 1. – P. 20–33.
- 68 Madejski P., Janda T., Modlinski N., Nabaglo D.A Combustion process optimization and numerical analysis for the low emission operation of pulverized coal-fired boiler // Developments in Combustion Technology. – 2016. – P. 33–71.
- 69 Koheib M.M., Kurose Y.R. Numerical simulation of soot formation in pulverized coal combustion with detailed chemical reaction mechanism // Advanced Powder Technology. – 2018. – Vol. 29, № 5. – P. 1119–1127.
- 70 Silva C.V., Indrusiak M.L.S., Beskow A.B. CFD Analysis of the pulverized coal combustion processes in a 160 MWe tangentially-fired-boiler of a thermal power plant // Journal of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. – 2010. – Vol. XXXII, № 4. – P. 427–436.
- 71 Samale A. Mathematical modeling for coal combustion: Phenomenological modeling, Finite Volume Method, Single coal particle combustion // LAP Lambert Academic Publishing. – 2010. – P. 84.
- 72 Backreedy R.I., Fletcher L.M., Ma L., Pourkashanian M., Williams A. Modelling pulverized coal combustion using a detailed coal combustion model // Combustion Science and Technology. – 2010. – Vol. 178, № 4. – P. 763–787.
- 73 Садыкова С.Б. Подходы к моделированию турбулентного горения // XI Международная научно-техническая конференция «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование». – Кокшетау, 2020. – С. 44.
- 74 Беднаржевский В.С. Комплекс пакетов прикладных программ для автоматизированного проектирования котлоагрегата на АРМ-М // Тяжелое машиностроение. – 1992. – Т. 12. – С. 33-35.
- 75 Беднаржевский В. С. Математическое моделирование и компьютерные технологии в задачах проектирования энергетических паровых котлов Вычислительные технологии. – 2002. – Т. 7, № 6. – С. 13-23.
- 76 Горностаева Т.Н., Горностаев О.М. Математическое и компьютерное моделирование. Учебное пособие. – М.: Мир науки, 2019. – 123 с.
- 77 Walter H., Epple B. Numerical simulation of power plants and firing systems. – Springer-Verlag Vienna, 2017. – 815 p.
- 78 Scheffknecht G., Lemp O., Leithner R., Strelow M., Epple B., Muller M. Prediction of slagging and fouling of furnaces and heat exchanger surfaces in boilers by simulation // VGB PowerTech. – 2012. – Vol. 92, № 11. – P. 44–49.
- 79 Magda A., Magda S.I., Strelow M., Muller H., Leithner R. CFD modelling of ash deposits in coal-fired power plants // Proceedings of International Conference

on Heat Exchanger Fouling and Cleaning. – Crete Island, Greece, 2011. – P. 301–308.

80 Epple B., Leithner R., Linzer W., Walter H. Simulation von Kraftwerken und Feuerungen. – Springer-Verlag Vienna. – 2012. – 810 p.

81 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Georgiev A., Nugymanova A.O., Baizhuma Zh.T. The use of a new “clean” technology for burning low-grade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs // Bulgarian Chemical Communications. – 2018. – Vol. 50. – P. 53–60.

82 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V., Nugymanova A. 3D-modelling of Kazakhstan low-grade coal burning in power boilers of thermal power plant with application of plasma gasification and stabilization technologies // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1261, № 1. – P.12–22.

83 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Nugymanova A. Simulation of the aerodynamics and combustion of a turbulent pulverized-coal flame // Proceedings of 4th International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI 2017). – Corfu Island, Greece, 2017. – P. 92–97.

84 Askarova A.S., Maximov V., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T. Numerical experimenting of combustion in the real boiler of CHP // International Journal of Mechanics. – 2013. – Vol. 7, № 13. – P. 343–352.

85 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Ospanova S., Gabitova Z.K. Using 3D modeling technology for investigation of conventional combustion mode of BKZ-420-140-7C combustion chamber // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9, № 1. – P. 24–28.

86 Askarova A.S., Maximov V.Yu., Bolegenova S.A., Bekmuhamet A. Mathematical simulation of pulverized coal in combustion chamber // Procedia Engineering. – 2012. – Vol. 42. – P. 1150–1156.

87 Askarova A., Buchmann M. Structure of the flame of fluidized-bed burners and combustion processes of high-ash coal // Proceedings of 18th Dutch-German Conference on Flames, VDI Berichte. – German. – 1997. – Vol. 1313. – P. 241–244.

88 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Shortanbaeva Z.K. On the effect of the temperature boundary conditions on the walls for the processes of heat and mass transfer // International Journal of Mechanics. – 2016. – Vol. 10. – P. 349–355.

89 Muller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reaktionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag. – 1992. – Vol. 6, № 268. – P. 158. (in German).

90 Askarova A.S., Safarik P., Bolegenova S.A., Maximov V.U., Beketayeva M.T. Numerical modeling of pulverized coal combustion at thermal power plant boilers // Journal of Thermal Science. – 2015. – Vol. 24, № 3. – P. 275–282.

91 Mohamad A.A., Bennacer R. Double diffusion, natural convection in an enclosure filled with saturated porous medium subjected to cross gradients; stably stratified fluid // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2002. – Vol. 45. – P. 3725–3740.

92 Chakraborty S., Dutta P. Three-dimensional double-diffusive convection

and macrosegregation during non-equilibrium solidification of binary mixtures // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2003. – Vol. 46. – P. 2115–2134.

93 Abbas T., Costen P.G., Lockwood F.C. Solid fuel utilization: from coal to biomass // *Symposium (International) on Combustion*. – 1996. – Vol. 26, № 2. – P. 3041–3058.

94 Launder B.E., Spalding D.B. *Lectures in mathematical models of turbulence*. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.

95 Richter W. Anwendungen von Berechnungsmodellen für Feuerräume // *VGB Kraftwerkstechnik*. – 1982. – Vol. 62, № 10. – P. 845–852. (in German).

96 Zinser W. Zur Entwicklung mathematischer Flammenmodelle für die Verbrennung technischer Brennstoffe // *Fortschritt-Berichte VDI-Verlag*. – 1984. – Vol. 6, № 171. – P. 191. (in German).

97 Westeuberd A.A., Fristrom R.M. Methane–oxygen flame structure. II. Conservation of matter and energy in the one-tenth atmosphere flame // *Journal of Physical Chemistry* – 1960. – Vol. 64, № 10. – P. 1393–1398.

98 Колмогоров А.Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // *Известия АН СССР*. – 1942. – Т. 6, № 1. – С. 56–66.

99 Launder B., Spalding D. The numerical computation of turbulent flows // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 1974. – Vol. 3. – P. 269–289.

100 Smoot L.D. Pulverized Coal Diffusion Flames: A perspective through the modeling // *Works 18<sup>th</sup> Symposium on Combustion*. Oxford, 1981. – P. 1185–1202.

101 Устименко Б.П., Джакупов К.Б., Кроль В.О. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических устройствах. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 222 с.

102 Leithner R., Winter F., Agarwal R.A., Hrdlicka J., Varjani S. Energy conversion processes with CO<sub>2</sub>-separation not reducing efficiency. *Handbook of Combustion*. – Wiley VCH Verlag GmbH & Co, 2010. – 184 p.

103 Askarova A.S., Beketayeva, M., Gabitova Z., Maximov V. Control of harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic // *Proceedings of the International conference on Future Information Engineering*. – Beijing, Peoples China. – 2014. – Vol. 10. – P. 252–258.

104 Askarova A., Bolegenova S., Maksimov V., Bekmuhamet A. Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 42. – P. 1250–1259.

105 Askarova A., Bolegenova S., Beketayeva M., Bolegenova S., Ergalieva A. 3D modeling of heat and mass transfer during combustion of solid fuel in BKZ-420-140-7C combustion chamber of Kazakhstan // *Journal Applied Fluid Mechanics*. – 2016. – P. 699–709.

106 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Bolegenova S., Beketayeva M., Gabitova Z. Computational experiment on the effect of the boundary conditions for the temperature on the walls of the combustion chamber on the processes of heat and mass transfer // *Recent Advances in Energy, Environment and Financial Science*. – 2015. – P. 205–214.

- 107 De Marco A., Lockwood F. A new flux model for the calculation of radiation furnaces // *La Rivista dei combustibili*. – 1975. – Vol. 29. – P. 184–196.
- 108 Белоусов В.Н., Смородин С.Н. Топливо и теория горения. Часть II. Теория горения. Учебное пособие. – Санкт-Петербург, 2011. – 84 с.
- 109 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Bolegenova S., Askarov N., Nugymanova A. Computer technologies of 3D modeling by combustion processes to create effective methods of burning solid fuel and reduce harmful dust and gas emissions into the atmosphere // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, № 5. – P. 1236–1258.
- 110 Hamor R.J., Smith I.W., Tyler R.J. Kinetics of combustion of pulverized brown coal char // *Combustion and flame*. – 1973. – Vol. 21. – P. 153–162.
- 111 Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during pulverized coal combustion // *AIChE Journal*. – 1982. – Vol. 28. – P. 302–320.
- 112 Walker P.L., Rusinko F., Austin L.G. Gas reactions of carbon, advances in catalysis and related subjects. – New York: Academic Press, 1959. – 350 p.
- 113 Vockrodt S., Muller H., Hoppe A., Leithner R. Einsatz von CFD-Simulationen zur Optimierung von Braunkohlefeuerungen // *Proceedings of 9th conference on boiler technology*. – German, 2002. – P. 565–569.
- 114 Betkowitz N. An Introduction to Coal Technology. – New York: Academic Press, 1979. – 359 p.
- 115 Schnell U. Berechnung der stickoxidemissionen von kohlenstaubfeuerungen // *Fortschritt-Berichte VDI-Verlag*. – 1991. – Vol. 6, № 271. – P. 193–198. (in German).
- 116 Edelman R.B., Fortune O.F. A quasi-global chemical kinetic model for the finite rate combustion of hydrocarbon fuels with application to turbulent burning and mixing in hypersonic engines and nozzles // *Proceedings of AIAA 7th Aerospace Sciences Meeting*. – New York, 1969. – P. 69–86.
- 117 Magnussen B.F. On the Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion // *Works 16th Int. Symp. on Combustion*. – Pittsburgh, 1976. – P. 719–729.
- 118 Gibb J., Jenner R. Preliminary Note on the Radiant Heat Transfer Program FURDEC // *Central Electricity Generating Board Report MS/C/N646*. – 1974. – 20 p.
- 119 Hemsath K.H. Zur Berechnung der flammenstrahlung: Dissertation universitat Stuttgart. – Stuttgart, 1996. – 225 p. (in German).
- 120 Badzioch S., Hawksley P.G., Peter C.W. Kinetics of thermal decomposition of pulverized coal particles of high temperatures // *Industrial Engineering Chemistry Research*. – 1970. – Vol. 9. – P. 521–530.
- 121 Gorner K. Technische verbrennungssysteme - Grundlagen, Modell Bildung, Simulation. – Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 1991. – 198 p. (in German).
- 122 Wendt J.O.L. Fundamental coal combustion mechanisms and pollutant formation in furnaces // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1980. – Vol. 6, № 2. – P. 201–222.

- 123 Зельдович Я.Б., Франк-Каменецкий Д.А., Садовников П.Я. Окисление азота при горении. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 317 с.
- 124 De Soete G.G. Overall reaction rates of NO and N<sub>2</sub> formation from fuel nitrogen // Symposium (International) on Combustion. – 1975. – Vol. 15, № 1. – P. 1093–1102.
- 125 Матюшевская, Н. А. Модернизация парового котла ТЭЦ // 68-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов. – Минск, 2017. – С. 241–242.
- 126 Медведев Д.А., Немчинов Д.В. Анализ парового котла БКЗ 75-39 как объекта управления // IV Международная научно-практическая конференция Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения. – Пенза, 2017. – С. 152–154.
- 127 Саматова Ш.Ю. Изменение гидродинамики парового котла БКЗ - 75/39 и реконструкция хвостовых поверхностей нагрева // Молодой ученый. – 2017. – Т. 3, № 137. – С. 156–158.
- 128 Askarova A., Leithner R., Muller H., Heierle Ye. CFD code Florean for industrial boilers simulations // WSEAS transactions on heat and mass transfer. – 2009. – Vol. 4, № 4. – P. 98–107.
- 129 Askarova A.S., Leithner R., Bolegenova S.A, Maximov V.Yu., Aitbayeva A. Using CFD code FLOREAN for simulations of industrial boiler // International Journal of mathematics and physics. – 2014. – Vol. 5, № 1. – P. 60–69.
- 130 Аскарова А.С., Нагибин А.О. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // Теплофизика и Аэромеханика. – 2010. – Т. 17, № 3. – С. 467-476.
- 131 Pauker W. Creating data sets for FLOREAN using the tool PREPROZ, TU // Braunschweig: IWBT. – 1997. – P. 3–24.
- 132 Leithner R. Energy conversion processes with CO<sub>2</sub>-separation not reducing efficiency. – Wiley VCH Verlag GmbH & Co, 2010. – 142 p.
- 133 Eppele B., Leithner R., Linzer W., Walter H. Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen. – Springer-Verlag: Vienna, 2009. – 702 p.
- 134 Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – 197 p.
- 135 Leschziner M.A. Practical evaluation of three finite difference schemes for the computation of steady state recirculation flows // Computer Methods and Applied Mechanics an Engineering. – 1980. – Vol. 23. – P. 293–312.
- 136 Muller H., Schiller A. Prediction of Combustion and Pollutant Formation in Coal Fired Furnaces // Proceeding of 6<sup>th</sup> International Conference on Combustion and Heat Technics. – Ungarn, 1994. – P. 45–52.
- 137 Юренев В.Н., Сидельковский Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 528 с.
- 138 Шульман В.Л., Рыжков А.Ф., Богатова Т.Ф., Микула В.А. Общая энергетика: развитие топочных технологий часть 2: учебное пособие. – Общество с ограниченной ответственностью "Издательство ЮРАЙТ", 2020. – 290 с.

- 139 Askarova A.S., Safarik P., Bolegenova S.A., Nugymanova A., Maximov V.Yu., Bolegenova S.A. 3-D modeling of the aerodynamics and heat transfer process during the combustion of solid fuel in a swirl furnace // *Acta Polytechnica*. – 2019. – Vol. 59, № 6. – P. 543–553.
- 140 Askarova A.S., Safarik P., Bolegenova S.A., Nugymanova A.O., Maximov V.Yu., Bolegenova S.A. Optimization of the solid fuel combustion process in combustion chambers in order to reduce harmful emissions // *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series physico-mathematical*. – 2019. – Vol. 6, № 328. – P. 34–42.
- 141 Алияров Б.К., Алиярова М.Б. Сжигание Казахстанских углей на ТЭС и на крупных котельных. – Алматы: Гылым, 2012. – 304 с.
- 142 Кузнецов Н.В., Митор В.В., Дубовский И.Е. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод). – Энергия. Москва, 1973. – 296 с.
- 143 Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. – НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256 с.
- 144 Померанцев В.В. Основы практической теории горения. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
- 145 Howard J.B., Williams G.C., Fine D.H. Kinetics of carbon monoxide oxidation in Postflame gases // *Works of 14<sup>th</sup> Int. Symposium on Combustion*. – Pennsylvania, 1973. – P. 975–986.
- 146 Мессерле В.Е., Нагибин А.О., Устименко А.Б. Математическое моделирование горения пылеугольного факела в топке котла БКЗ-75, оснащенного плазменно-топливными системами // *Доклады Национальной Академии Наук Республики Казахстан. Физика*. – 2009. – Т. 2. – С. 16-23.
- 147 Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки. Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
- 148 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Утверждены приказом Министра энергетики Республики Казахстан от 30 марта 2015 года № 247.
- 149 Кибарин А.А. Режимы работы и эксплуатация котельных установок: учебное пособие. – Алматы, 2008. – 83 с.
- 150 Мобли Р.К. Справочник инженера промышленного предприятия Том 1. – М.: ЗАО Премиум Инжиниринг, 2007. – 838 с.
- 151 Технический Регламент Республики Казахстан «Требования к безопасности зданий и сооружений, строительных материалов и изделий» (утвержден постановлением Правительства Республики Казахстан от 17 ноября 2010 года № 1202) (с изменениями по состоянию на 23.07.2013 год).
- 152 «Правила устройства электроустановок» (утверждены постановлением Правительства Республики Казахстан № 1355 от 24 октября 2012 года).
- 153 Технический регламент «Требования к безопасности водогрейных и паровых котлов» (утвержден постановлением Правительства Республики Казахстан от 15 декабря 2009 года № 2126).
- 154 Прокопенко А.Д., Мысак И.С. Стационарные, переменные и пусковые

режимы энергоблоков ТЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 317 с.

155 Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 129 с.

156 «Правила пожарной безопасности для энергетических предприятий» (утверждены постановлением Правительства Республики Казахстан № 1319 от 16 октября 2012 года).

157 «Правила взрывобезопасности топливоподачи для приготовления и сжигания пылевидного топлива» (утвержден постановлением Правительства Республики Казахстан от 24 октября 2012 года №1348).

158 Askarova A., Safarik P., Bolegenova S., Maximov V., Nugymanova A. 3D modelling of heat and mass transfer during combustion of low-grade coal // Thermal Science. – 2020. – Vol. 24, № 5(A). – P. 2823–2832.

159 Askarova A.S., Safarik P., Bolegenova S., Maximov V., Bolegenova S., Nugymanova A. Numerical simulation of heat and mass transfer at the partial stop of fuel supplying in the chamber of TPP. News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan-series Physico-mathematical. – 2020. – Vol. 2, № 330. – P. 88–95.

160 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Шортанбаева Ж.К. Численное моделирование процессов сжигания пылеугольного топлива в топочной камере котла ПК 39 // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. – 2017. – Т. 2, № 312. – С. 58-63.

161 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х., Численное моделирование горения пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического котла // Теплофизика высоких температур. – 2015. – Т. 53, № 3. – С. 467-474.

162 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А., Бекетаева М.Т. Исследование физико-химических процессов, происходящих при горении пылеугольного топлива // Физико-математические науки. – 2012. – Т. 5, № 5. – С. 9-11.

163 Мунц В. А. Образование оксидов азота при сжигании твердых топлив // Теплоэнергетика. – 1997. – Т. 12. – С. 26-30.

164 Stanmore B. R., Visona S.P. Prediction of NO emissions from a number of coal-fired power station boilers // Fuel Processing Technology. – 2000. – Vol. 64, № 1. – P. 25–46.

165 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Nugymanova A.O., Tagaibek A.S. Influence of thermochemical activation of fuel on the combustion process in furnace chambers of thermal power plants // Proceeding of Alternative Energy Sources, Materials & Technologies (AESMT'21), Alternative technologies, Low-Carbon Technologies. Ruse, Bulgaria, 2021. – Vol. 3. – P. 105–106.

166 Котлер В.Р. Реализация и эффективность технологических методов подавления оксидов азота на ТЭС // Теплоэнергетика. – 1994. – Т. 6. – С. 2–9.

167 Росляков П.В., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е., Плешанов К.А. Реализация мало затратных технологий снижения вредных выбросов при сжигании органических топлив в котлах ТЭС // Повышение надежности и



эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем: ЭНЕРГО-2010: всероссийская научно-практическая конференция. – Москва, 2010. – С. 227-238.

168 Bukovsky I., Kolovratnik M. A Neural Network Model for Predicting  $\text{NO}_x$  at the Melnik 1 // Acta Polytechnica. – 2012. – Vol. 52, № 2. – P. 17–22.

169 Hyunbin J., Kiseop K., Jongkeun P., Changkook R., Hyunsoo A., Younggun G. Optimization of air distribution to reduce  $\text{NO}_x$  emission and unburned carbon for the retrofit of a 500 MWe tangential-firing coal boiler // Energies. – 2019. – Vol. 12, № 17. – P. 3281.

170 Fan W., Lin Zh, Li Y. Experimental flow field characteristics of OFA for large-angle counter flow of fuel-rich jet combustion technology// Applied Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 2737–2745.

171 Zhou J., Zhao Ch., Xu J. Application of Air-staged and Low  $\text{NO}_x$  Emission Combustion Technology in Plant Boiler // Proceedings of the CSEE. – 2010. – Vol. 30, № 23. – P. 19–23.

172 Серант Ф.А., Гордеев В.В., Саломасов Ю.М., Коняшкин В.Ф., Квривишвили А.Р., Барташук Е.Г., Шихотинов А.В. Двухступенчатое сжигание высокочольного экибастузского угля на модернизированном котле ПК-39-2М энергоблока 325 МВт (Ст. № 2) электростанции АО «ЕЭК» Г. Аксу (Казахстан) // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СОРАН. – Новосибирск, Россия, 2012. – С. 92.1-92.9.

173 Kuang M., Li Zh., Jing X., Zeng X. Characterization of combustion and  $\text{NO}_x$  emissions with respect to over fire air damper opening in a down-fired pulverized-coal furnace // Energy Fuels. – 2013. – Vol. 27, № 9. – P. 5518–5526.

174 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maksimov V.Yu., Bolegenova S.A., Ergalieva A.B. Reduction of noxious substance emissions at the pulverized fuel combustion in the combustor of the BKZ-160 boiler of the Almaty heat electropower station using the “Overfire Air” technology // Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – Vol. 23, № 1. – P. 125–134.

175 Bowman C.T. Control of combustion-generated nitrogen oxide emissions: Technology driven by regulation // Symposium (International) on Combustion. – 1992. – Vol. 24, № 1. – P. 859–878.

176 Xiang J., Li M., Sun L.S. Comparison of nitrogen oxide emissions from boiler for a wide range of coal qualities // International Journal Thermal Science. – 2003. – Vol. 39, № 8. – P. 833–841.

177 Pershing D.W., Wendt J.O.L. Pulverized coal combustion: The influence of flame temperature and coal composition on thermal and fuel  $\text{NO}_x$  // Symposium (International) on Combustion. – 1977. – Vol. 16, № 1. – P. 389–399.

178 Lyman J. Boiler control systems engineering. – USA: Np., 2005. – 175 p.

179 Alfonso R., Dusatko G.C., Pohl J.H. Measurements of  $\text{NO}_x$  emissions from coal boilers // Combustion Science and Technology. – 1993. – Vol. 93, № 1. – P. 41–51.

180 Stefanica J., Hrdlicka J.  $\text{NO}_x$  prediction for FBC boilers using empirical

models // *Acta Polytechnica*. – 2014. – Vol. 54, №1. – P. 68–73.

181 Man C.K., Gibbins J.R., Witkamp J.G., Zhang J. Coal characterization for NO<sub>x</sub> prediction in air–staged combustion of pulverized coals // *Fuel*. – 2005. – Vol. 84, № 17. – P. 2190–2195.

182 Li Z., Fan S., Liu G., Yang X., Chen Z., Su, W., Wang L. Influence of staged-air on combustion characteristics and NO<sub>x</sub> emissions of a 300 MWe down–fired boiler with swirl burners // *Energy Fuels*. – 2010. – Vol. 24, № 1. – P. 38–45.

183 Yang W., Wang B., Combustion optimization and NO<sub>x</sub> reduction of a 600 MWe down-fired boiler by rearrangement of swirl burner and introduction of separated over-fire air // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – Vol. 210. – P. 1120–1130.

184 Bartłomiej H., Wiesław Z.I, Olgierd Z., Grzegorz L. Numerical research on the impact of changes in the configuration and the location of the over fire air nozzles on the combustion process in the ultra-supercritical BP 680 boiler // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Vol.125. – P. 129–142.

185 Аскарова А.С., Локтионова И.В. Моделирование образования оксидов азота при сжигании твердого топлива в топочных камерах // *Теплоэнергетика*. – 2003. – № 8. – С. 22-26.

186 Askarova A., Safarik P., Bolegenova S., Maximov V., Nugymanova A. Minimization of toxic emissions during burning low-grade fuel at Kazakhstan thermal power plant // *Acta Polytechnica*. – 2020. – Vol. 60, № 3. – P. 206–213.

187 Askarova A.S., Safarik P., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Nugymanova A.O. Use of two-stage fuel combustion technology to minimize hazardous emissions at Kazakhstan TPP // *News of the national academy of sciences of the Republic of Kazakhstan physico-mathematical series*. – 2021. – Vol. 1, № 335. – P. 74–80.

188 Askarova A.S., Messerle V.E., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Nugymanova A.O. 3D simulation of heat and mass transfer for testing of “clean energy” production technologies // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2021. – Vol. 28, № 2. – P. 291–301.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Акт внедрения



#### АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Нұғымановой Айжан Олжабекқызы «Процессы горения в топочных камерах казахстанских ТЭС, использующих высокочольный уголь», представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) в области физики по специальности «6D072300–Техническая физика», отечественный научный консультант – д.ф.-м.н., профессор Аскарова А.С.

Настоящий Акт составлен о том, что результаты диссертационной работы «Процессы горения в топочных камерах казахстанских ТЭС, использующих высокочольный уголь» были использованы при оптимизации процессов сжигания высокочольных углей в топочной камере котла БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ для уменьшения вредных пылегазовых выбросов.

Заслуженный энергетик Республики Казахстан

Директор ТОО «КазЭнерго-05»



А.Г. Скуйбеда