

А. С. Аскарова, С. А. Болегенова,
З. Х. Габитова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ ТЭЦ

Монография

Алматы
«Қазақ университеті»
2019

УДК
ББК

А 99

*Рекомендовано к изданию Ученым советом (протокол №2 от 20.12.2018)
и РИСО КазНУ им. аль-Фараби (протокол №3 от 26.11.2018)*

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор **А.Б. Устименко**
доктор физико-математических наук, профессор **М.Е. Абишев**

Аскарова А.С.

А 99 Моделирование процессов тепломассопереноса в топочных камерах ТЭЦ: монография / А.С. Аскарова, С.А. Болегенова, З.Х. Габитова. – Алматы: Казак университети, 2019. – 166 с.

ISBN 978-601-04-

Монография посвящена исследованию процессов тепломассопереноса, происходящих в топочной камере промышленного котла ПК-39 Аксуской ТЭС Казахстана при сжигании в ней высокозольного Экибастузского угля. В работе представлены результаты 3-D вычислительных экспериментов по исследованию тепловых, аэродинамических и концентрационных характеристик по всему объему топочной камеры с учетом влияния на них дисперсности угольной пыли и влажности сжигаемого угля, а также предложена современная технология «острого дутья» (Overfire air) для внедрения ее на котле ПК-39 с целью минимизации выбросов вредных веществ в атмосферу.

**УДК
ББК**

ISBN 978-601-04-

© Аскарова А.С., Болегенова С.А.,
Габитова З.Х., 2019

© КазНУ им. аль-Фараби, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Обозначения и сокращения	4
	Введение	7
1	Основные характеристики процесса горения	13
1.1	Теоретические основы горения топлива	14
1.2	Особенности горения твердых топлив	16
1.3	Методы исследования процессов горения	18
2	Физическая постановка задачи о горении пылеугольного факела	21
2.1	Паровой котел ПК-39. Общее устройство и определения	21
2.2	Горелочные устройства топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС	27
2.3	Приготовление и этапы сжигания пылевидного топлива	30
3	Основные уравнения математической и химической моделей горения топлива	33
3.1	Основные уравнения математической модели процессов переноса в турбулентных течениях с химическими реакциями	33
3.1.1	Обобщенное транспортное уравнение	33
3.1.2	Основные уравнения тепломассопереноса в реагирующих средах	34
3.1.3	Граничные условия	38
3.1.4	Моделирование теплообмена посредством излучения	41
3.2	Уравнения, описывающие формирование вредных веществ, которые образуются при сжигании пылеугольного топлива	46
3.2.1	Образование оксидов углерода	46
3.2.2	Образование оксидов серы	48
3.2.3	Образование оксидов азота	49
4	Исследование влияния дисперсности угольной пыли на процесс сжигания топлива	55
4.1	Влияние тонины помола	55

4.2	Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов по сжиганию моно- и полидисперсного пылеугольного факела	58
4.3	Результаты вычислительных экспериментов по сжиганию полидисперсного пылеугольного топлива	63
5	Исследование тепловых и концентрационных полей при сжигании угля различной влажности в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС	77
5.1	Влияние влажности топлива на процесс горения	77
5.2	Результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния влажности топлива на характеристики тепломассопереноса	79
6	Исследование влияния OFA-технологии при сжигании низкосортного Экибастузского угля	90
6.1	Использование OFA-технологии для снижения выбросов NO _x	90
6.2	Результаты вычислительных экспериментов по использованию OFA-технологии	94
	Заключение	105
	Список использованных источников	109

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- T_G – адиабатическая температура горения смеси, К;
 T_0 – начальная температура смеси, К;
 Q_G – удельная теплота сгорания смеси при температуре горения, Дж/кг;
 C – средняя в интервале температур удельная теплоемкость смеси, Дж/кг·К;
 ϕ – обобщенная транспортная переменная;
 G_ϕ – обобщенный коэффициент обмена переменной ϕ ;
 S_ϕ – источниковый член в уравнениях переноса;
 ρ – плотность, кг/м³;
 t – время, с;
 m – масса, кг;
 V – объём, м³;
 x, y, z – координаты;
 u, v, w – составляющие скорости, м/с;
 i, j – индексы для описания пространственного направления составляющих;
 l – индекс для суммирования;
 T – температура, К;
 $\Phi_{(K),j}$ – плотность конвективного потока;
 $\Phi_{(D),j}$ – плотность диффузионного потока;
 τ_{ij} – тензор вязких напряжений;
 p – давление, Па;
 f_i – объемные силы, Н;
 μ – динамическая вязкость, кг/м·с;
 δ_{ij} – символ Кронекера;
 E – полная энергия, кДж;
 e – удельная внутренняя энергия, кДж/кг;
 q_j – плотность теплового потока, кВт/м²;
 h – удельная энтальпия, кДж/кг;
 c_p – удельная изобарная теплоемкость, кДж/кг·К;
 Pr – число Прандтля;
 ρ_β – парциальная плотность, кг/м³;

j_i – плотность диффузионного потока, кг/с·м;
 c_β – массовая концентрация компоненты β , кг/кг;
 D – коэффициент диффузии, м²/с;
 k – кинетическая энергия турбулентности на единицу массы, м²/с²;
 μ_{eff} – эффективная вязкость, кг/м·с;
 $\sigma_\kappa, \sigma_\varepsilon$ – эмпирические константы в модели турбулентности;
 ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии на единицу массы, м²/с³;
 μ_{turb} – турбулентная вязкость, кг/м·с;
 $C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, C_\mu$ – эмпирические константы;
 Ω – телесный угол, рад;
 Θ – плоский угол, град;
 ds – элемент длины, м;
 I_v – интенсивность излучения, кВт/м²·рад;
 c – скорость света, м/с;
 K_{abs} – оптический коэффициент поглощения, 1/м;
 K_{sca} – оптический коэффициент рассеивания, 1/м;
 σ – постоянная Стефана-Больцмана, кВт/м²·К⁴;
 λ – коэффициент теплопроводности, кВт/м·К;
 R_{90}, R_{200} – тонина помола угля, %;
 V_r – условная горючая масса топлива, %;
 q_4 – механический недожог, %;
 D_a – диаметр амбразуры, м;
 d_{cp} – средний диаметр частиц исследуемой полидисперсной пыли, мкм;
 α – коэффициент избытка воздуха;
 d_p – диаметр исследуемых частиц, мкм;
 kin – кинетический;
 $turb$ – турбулентный;
 lam – ламинарный;
 $diff$ – диффузионный;
 eff – эффективный;
 АРВ – аварийный регулятор впрыскивающий;
 БП – бункер пыли;
 БСУ – бункер сырого угля;
 БЭ – боковой экран;
 ВЗ – встроенная задвижка;
 ВП – воздухоподогреватель;

ВРЧ – верхняя радиационная часть;
ГПЗ – главная парозапорная задвижка;
ГППТО– газопаропаровой теплообменник;
ДВ – дутьевой вентилятор;
ДС – дымосос;
ЗБТ – зона большой теплоемкости;
ЗУ – золоуловитель;
ЗЭ – задний экран;
К – калорифер;
КПВД – конвективный перегреватель высокого давления;
КПНД – конвективный перегреватель низкого давления;
ММ – молотковая мельница;
Н – наддув;
НРЧ – нижняя радиационная часть;
ПВД – подогреватель высокого давления;
ПЗ – переходная зона;
ПМЗ – Подольский машиностроительный завод;
ППТО – паропаровой теплообменник;
ПРВ – пусковой регулятор впрыскивающий;
ПСУ – питатель сырого угля;
ПТ – подвесные трубы;
ПТЭ – потолочный экран;
ПУ – пылеуловитель;
ПЭ – подовый экран;
Р – разрежение;
РВ – регулятор впрыскивающий;
РВП – регенеративный воздухоподогреватель;
РПК – регулирующий питательный клапан;
РС – растопочный сепаратор;
С – сепаратор;
СКД – сверхкритическое давление;
СРЧ – средняя радиационная часть;
ТВП – трубчатый воздухоподогреватель;
ТКЗ – Таганрогский котлостроительный завод;
ТМО – тепломассообмен;
ТЭС – теплоэлектростанция;
ФБЭ – фестон бокового экрана;
ФЭ – фронтной экран;
Ц – циклон;
ЦВД – цилиндр высокого давления;
ЦКТИ – Центральный котлотурбинный институт;

ЦН – циркуляционный насос;
ЦСД – цилиндр среднего давления;
ШБМ – шаровая барабанная мельница;
ШПВД – ширмовый перегреватель высокого давления;
ШПНД – ширмовый перегреватель низкого давления;
Э – экономайзер;
ЭГХ – экран горизонтального газохода;
ЭКШ – экран конвективной шахты;
ЭПК – экран поворотной камеры;
ЭХВ – экран холодной воронки.

ВВЕДЕНИЕ

В связи бурным расширением сфер технической деятельности человека по всему миру увеличивается ежегодное мировое энергопотребление, т.е. можно говорить о том, что достаток и процветание любого государства в большей степени зависят от обеспеченности топливно-энергетическими ресурсами. Так, по данным статистического обзора мировой энергетики британской нефтегазовой компании «BP» [1], с 1990 г. до 2015 г. мировое потребление энергии возросло с 8133,3 до 12928,4 млн. т. н.э. За этот же период производство энергии увеличилось с 8211 до 13122,0 млн. тонн нефтяного эквивалента. На начало 2015 года доля Казахстана в мировом потреблении энергоресурсов составила 0,4% (54,3 млн. т. н.э.).

На сегодняшний день Казахстан является одним из государств, обладающих огромным запасом углеводородов, которые оказывают существенное влияние на формирование и состояние мирового энергетического рынка. В частности, на территории Республики расположены залежи порядка 33600 млн. тонн угля (3,8% от мировых запасов угля), 30 тыс. млн. баррелей нефти (1,8% от мировых запасов), 1,5 трлн. куб.м. природного газа (0,8% от мировых запасов).

Вследствие большого потребления и увеличения цен на такие природные ресурсы как нефть и природный газ особое внимание уделяется твердому топливу – углю. В Республике Казахстан около 80 % энергообеспечения страны происходит за счет производства электроэнергии 69 электростанциями, основным источником которых является казахстанский уголь Экибастузского, Карагандинского, Тургайского угольных бассейнов.

Добыча угля в Республике осуществляется в основном открытым способом, что делает данный вид твердого топлива самым дешевым, но при этом низкосортным (высокое содержание зольности в его составе) в нашей стране источником энергии. При этом каменные угли Казахстана обладают рядом преимуществ –

малая сернистость углей и высокий выход летучих на сухую беззольную массу.

Использование в теплоэнергетике такого топлива приводит к проблемам в стабилизации пламени и горении в целом, в зашлакованности конвективных поверхностей нагрева (топочных экранов), а также в загрязнении атмосферы летучей золой, оксидами углерода (CO , CO_2), азота (NO_x), серы (SO_x), углеводородами (C_nH_m) и другими продуктами горения.

В ближайшее время для устойчивого развития теплоэнергетики страны необходимо проводить оптимизацию процессов сжигания традиционного энергетического топлива (казахстанского угля), разработку и внедрение «чистых» технологий получения энергии с целью защиты окружающей среды от вредных пылегазовых выбросов и обеспечения эффективности энергетических установок. В этой связи исследования процессов тепломассопереноса, имеющих место в топках промышленных котлов при сжигании в них углей высокой зольности являются актуальными на сегодняшний день.

Для исследования процессов тепломассопереноса, происходящих в топочной камере, то есть непосредственно в области физико-химических превращений молекул топлива и окислителя в продукты сгорания, вследствие затруднительности и дороговизны проведения натурных экспериментов, а также в связи с недостаточной точностью и сложностью построения огневых моделей наиболее актуальными, и в большинстве случаев оптимальными, являются методы компьютерного моделирования и проведение на их основе вычислительных экспериментов.

Компьютерное моделирование в настоящее время получило широкое применение в различных отраслях науки и техники вследствие развития информационных технологий. Развиваются численные методы решения систем дифференциальных уравнений, описывающих сложные технологические процессы, создаются мощные вычислительные машины и эффективные вычислительные алгоритмы и проблемно-ориентированные пакеты программ, которые позволяют решать множество задач, имеющих огромное практическое приложение для различных отраслей промышленности. Проведение вычислительных экспериментов с помощью компьютерной техники в настоящее время позволяет с

высокой точностью предсказывать поведение сложных для аналитического расчета физико-химических систем.

Таким образом, исследования в области передовых технологий по совершенствованию энергетических установок и использованию альтернативных методов организации процесса сжигания пылеугольного топлива с помощью эффективных вычислительных алгоритмов и новых расчетных моделей, позволяющих как можно точнее описать реальные физические процессы, происходящие в топочных камерах действующих энергетических объектов, являются в настоящее время наиболее актуальными для всего энергетического комплекса Республики Казахстан.

1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Горение – сложный физико-химический процесс, при котором превращение исходного вещества в продукты сгорания сопровождается интенсивным выделением энергии и тепломассообменом с окружающей средой. Практическое применение процесса горения развивается по двум направлениям – энергетическому, в котором горение используется для выделения энергии топлива, и технологическому, в котором назначение горения – получение целевого продукта.

Первое направление составляют теплоэнергетика, моторостроение, ракетная техника, разработка МГД-генераторов и другие; второе – доменный процесс, металлотермия, неполное сжигание углеводородов в производстве сажи, ацетилен, этилена, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, разработка нефтяных месторождений путем внутрипластового горения и другие [2]. В теплоэнергетике важной отраслью, использующей горение, является сжигание топлива в теплоэлектростанциях и двигателях внутреннего сгорания.

Топливо представляет из себя механическую смесь горючего и окислителя, в качестве которого, как правило, выступает кислород, содержащийся в воздухе. Наиболее распространенными горючими материалами являются органические соединения, в состав которых входят углерод, водород и кислород. К ним относятся природные топлива, такие как бурый и каменный угли, торф, древесина, антрацит, нефть, природный газ, а также их твердые, жидкие и газообразные продукты. По типу (агрегатному состоянию) используемого топлива горение разделяют на гомогенное, в котором топливо и окислитель находятся в одной фазе (сжигание природного газа), и гетерогенное, при котором топливо находится в жидком или твердом состоянии.

Для увеличения площади реагирующей поверхности и, соответственно, наиболее продуктивного сжигания твёрдое топливо

измельчают до пылевидного состояния, а жидкое распыляют в виде капель. Таким образом, горение гетерогенных систем может происходить так же, как и горение гомогенных газовых смесей, так как перемешивание компонентов происходит достаточно быстро и не лимитирует реакцию. При низкой дисперсности частиц горючего осуществляется режим диффузионного горения [2].

Пылеугольный факел в современных камерах сгорания в газодинамическом отношении представляет собой трехмерную криволинейную турбулентную струю сжимаемого газа, движущуюся в условиях горения и интенсивного теплообмена с окружающими поверхностями [3].

При горении капли жидкого топлива вокруг нее образуется диффузионное пламя, поддерживающее интенсивное испарение. Время диффузионного горения частиц топлива пропорционально квадрату их размера. Помимо минимального размера, отвечающего пределу интенсификации диффузионного горения, существует максимальный размер частицы, при котором топливо не может гореть вследствие радиационных теплопотерь [2].

1.1. Теоретические основы горения топлива

Процесс горения характеризуется двумя особенностями: во-первых, наличием критических условий, а во-вторых, в способности процесса к пространственному распространению [4]. Независимо от химической природы горения, критические явления и явления распространения зоны реакции играют основную роль. К критическим явлениям относятся явления воспламенения, зажигания и концентрационные пределы распространения пламени. К явлениям распространения горения относятся нормальное распространение пламени, горение в неравномерно движущемся газе и турбулентное горение, детонация [4-5].

Перечисленные выше явления могут наблюдаться в самых разнообразных процессах, различающихся как по природе химических реакций, так и по агрегатному состоянию исходных веществ и гидродинамической обстановке. Как было сказано выше, при исследовании процесса горения топлива необходимо различать гомогенное и гетерогенное горение [6].

Гетерогенное горение происходит на поверхности раздела фаз. Одно из реагирующих веществ находится в конденсированном состоянии, другое доставляется диффузией из газовой фазы. Для того, чтобы горение было гетерогенным, конденсированная фаза должна иметь достаточно высокую температуру, так чтобы при температуре горения ее испарением можно было пренебречь. В противном случае, с поверхности конденсированной фазы будет исходить поток пара и горение будет происходить в процессе смешения этого пара со вторым компонентом. Такой вид горения имеет название диффузионного квазигетерогенного, так как сам процесс горения происходит не на границе фаз [4, 6].

Процесс горения угля – важнейший технический процесс гетерогенного горения. Однако процесс осложняется образованием дополнительных объемных реакций: выходом летучих компонент, термическим разложением с выделением горючих газов, сгорающих в объеме топочной камеры. Даже при горении чистого углерода на поверхности может образоваться монооксид углерода CO , который догорает в объеме. Таким образом, теория горения угля с учетом дополнительных побочных реакций представляет собой сложную задачу для исследования.

Противоположностью гетерогенному горению является чисто гомогенное горение предварительно смешанных газов. Классическими примерами гомогенного горения являются: горение смеси окисей углерода и углеводов в кислороде, горение гремучей смеси и др. Горение этих смесей нашло широкое практическое применение, однако далеко не всегда выполняется условие предварительно перемешивания, так что здесь возможны все переходы между гомогенным и диффузионным горением.

Горение, происходящее в газовых потоках, условно необходимо делить на ламинарное и на турбулентное горение. Турбулентность ускоряет все процессы горения за счет раздробления фронта пламени и увеличения его поверхности при крупномасштабной турбулентности или ускорения процессов переноса во фронте пламени при мелкомасштабной турбулентности [5].

Процессы диффузионного горения получили широкое применение в технике. В таких процессах все вещества, вступающие в реакцию, находятся в газообразном состоянии, и процесс сме-

шивания происходит в процессе горения. Для пылеугольных топок, а также для камер сгорания, работающих на газообразном и жидком топливе, в основном преобладает система раздельной подачи не перемешанных предварительно компонентов горючей смеси. В таких технических топочных устройствах перемешивание топлива с воздуха происходит в топочном пространстве камеры сгорания.

Процесс перемешивания требует определенного времени для своего завершения, величина которого в первую очередь зависит от первичного дробления и смешения компонентов, а во вторую – от факторов гидродинамической природы (относительные скорости движения компонентов смеси, их распределение в топочном пространстве, характер и степень турбулентности потока и т.п.). Для общей оценки процесса горения предварительно перемешанного топлива и для обобщения представлений диффузионной теории топлива вводится понятие «диффузионное время» – время, характеризующее процесс перемешивания.

В частности, для сжигания перемешанных газов, паров жидкого топлива и т.п., когда скорость суммарного процесса горения определяется ходом смешения, можно говорить о «диффузионном» горении, характеризующимся высокими температурами, малыми относительными скоростями и большими первичными объемами компонентов. Другой предельный случай – «кинетическое» горение, которое отвечает сравнительно низким значениям температуры, высоким скоростям перемешивания и т.п.

При наличии «кинетического» горения окончательное перемешивание полностью заканчивается до воспламенения, значительный градиент концентрации здесь отсутствует, в отличие от «диффузионного» горения. Такой тип горения преобладает в тех участках камеры, где происходит воспламенение смеси. Наконец, случай «промежуточного» процесса горения, в котором скорость и время смешения соизмеримы. Горение протекает по некоторому среднему между предельными случаями механизму, суммарная скорость сгорания зависит как от гидродинамических факторов, так и от кинетических [7].

Существенно, что ни один из этих факторов, взятый в отдельности, не определяет характера суммарного процесса. В реальной топочной камере энергетического объекта все три случая горения

могут осуществляться одновременно. Кинетическое горение преобладает в областях сравнительно невысокой температуры, диффузионное – в области повышенной температуры.

При адиабатическом горении топлива с заданными составом и термодинамическими функциями исходной смеси и продуктов могут быть рассчитаны количество выделившегося при горении тепла, адиабатическая температура горения T_G и состав продуктов сгорания. Если состав продуктов также заранее известен, T_G может быть рассчитана из условия равенства внутренней энергии системы (при постоянном объеме) или ее энтальпии (при постоянном давлении) в исходном и конечном состояниях с помощью соотношения (1):

$$T_G = T_0 + Q_G / C, \quad (1)$$

где T_0 – начальная температура смеси,

Q_G – удельная теплота сгорания смеси при температуре T_G ,

C – средняя в интервале температур от T_0 до T_G удельная теплоемкость исходной смеси (с учетом ее изменения при возможных фазовых переходах) [2].

Значение температуры горения T_G при постоянном объеме больше, чем при постоянном давлении, поскольку в последнем случае часть внутренней энергии системы расходуется на работу расширения. На практике условия адиабатического горения обеспечиваются в тех случаях, когда реакция успеваает завершиться прежде, чем станет существенным теплообмен между реакционным объемом и окружающей средой, например, в камерах сгорания крупных реактивных двигателей, в больших реакторах, при быстро распространяющихся волнах горения.

Термодинамический расчет дает лишь частичную информацию о процессе – равновесный состав и температуру продуктов. Полное описание горения, включающее также определение скорости процесса и критических условий при наличии тепло- и массообмена с окружающей средой, можно провести только в рамках макрокинетического подхода, рассматривающего химическую реакцию во взаимосвязи с процессами переноса энергии и вещества [2].

1.2. Особенности горения твердых топлив

Условно процесс сжигания твердого топлива делят на три стадии: воспламенение (зажигание), активное горение и дожигание. В первой стадии твердое топливо вначале подогревается и подсушивается и при температуре 105-110 °С теряет свою влагу. Затем при температуре 300-400 °С оно начинает разлагаться на летучие вещества и твердый остаток.

При дальнейшем нагреве, когда его температура становится равной температуре воспламенения, топливо загорается. Температура воспламенения (примерная) различных топлив следующая, °С: дров – 300; бурого угля – 300-400; каменного угля – 450-500; антрацита – 700-750; жидкого топлива – 500- 600; газа – около 600. Стадия активного горения характеризуется высокой температурой (более 1000 °С) с максимальным выделением тепла и наибольшим потреблением воздуха (кислорода), расходуемого на горение кокса и летучих веществ. Дожигание твердого топлива характеризуется уменьшающимся тепловыделением и снижающейся потребностью в воздухе [8].

Основной стадией, определяющей интенсивность всего процесса в целом, является стадия горения так называемого коксового остатка – углерода, оставшегося в частице топлива после завершения деструкции вещества исходного топлива и выхода летучих веществ [9].

Существует множество способов для сжигания угля в топочных устройствах, классификация по аэродинамике угольно-воздушных потоков которых представлена на рисунке 1. Способы сжигания делятся на слоевой, в котором сжигается кусковое топливо, и камерный, при котором сжигается газообразное, пылевидное и распыленное жидкое топлива.

Слоевой метод сжигания более присущ для парогенераторов малой производительности. При организации сжигания угля слоевым методом топливо подается в топку кусками. Слоевая топка состоит из колосниковой решетки, на которой располагается слой кускового угля и через которую подается необходимый для горения воздух.

Слоевые топки для сжигания твердого топлива делят на три класса:

- топки с неподвижной колосниковой решеткой и лежащим неподвижно на ней слоем топлива, к которым относят топку с ручной горизонтальной колосниковой решеткой;
- топки с неподвижной колосниковой решеткой и перемещающимся по ней слоем топлива, к которым относят топки с шурующей планкой и топки с наклонной колосниковой решеткой;
- топки с движущимися механическими цепными колосниковыми решетками двух типов: прямого и обратного хода [10].



Рисунок 1 – Способы сжигания угля в различных топочных устройствах

При сгорании топлива в плотном слое уголь размещается плотным слоем на решетке, а скорость подачи воздуха выбирается такой, при которой устойчивость слоя не нарушается. При этом в топке образуются две зоны – окислительная, в которой преобладает реакция реагирования углерода с кислородом и выделения оксидов углерода (CO и CO_2) и повышением температуры, и восстановительная, в которой завершаются процессы окисления и активно протекают реакции восстановления H_2O и CO_2 .

Сжигание в кипящем, или в псевдоожигенном, слое осуществляется при нарушении устойчивости слоя, тогда, когда часть частиц угля отрывается от поверхности и совершает возвратно-поступательные движения вверх-вниз, что напоминает кипящую

жидкость. Особенностью сжигания в кипящем слое являются малые теплотери в окружающую среду, постоянная температура в слое и высокая плотность сжигания топлива.

Циклонный (вихревой) способ сжигания основан на использовании закрученных топливо-воздушных потоков, в которых частицы топлива циркулируют по определенным траекториям в течение времени, необходимого для завершения их сгорания. Под действием центробежных сил частицы движутся в виде уплотненного пристенного слоя. Время пребывания частиц в циклонных камерах выбирается достаточным для выгорания грубой пыли (размер частиц – 200 мкм) или дробленого топлива (частицы – до 5 мм) [11].

Наиболее распространенным способом сжигания в топках высокой мощности является сжигание во взвешенном пылевидном состоянии. При факельном способе сжигания твердое топливо размалывают в пыль, которую в смеси с воздухом подают в топку. Основную массу такой пыли составляют частицы размером менее 100 мкм. Увеличение тонины помола приводит к возрастанию удельной поверхности частиц топлива и более эффективному его горению.

При сжигании твердого топлива в виде пыли летучие вещества, выделяющиеся в процессе ее прогрева, сгорают в факеле, способствуя разогреву твердых частиц до температуры воспламенения, что облегчает стабилизацию факела. Количество первичного воздуха должно быть достаточным для сжигания летучих компонентов. Факельный способ позволяет сжигать с высокой надежностью и экономичностью самые различные и низкосортные виды топлива [12].

1.3. Методы исследования процессов горения

Для исследования любых процессов и явлений, происходящих в природе, а также для проверки применимости предложенных для этих процессов теоретических гипотез и выявления закономерностей исследователями проводится физический эксперимент.

При проведении натурного эксперимента с целью исследования сложных физико-химических процессов непосредственно на

объектах исследований экспериментатор сталкивается со следующими проблемами: дороговизной и энергозатратностью таких исследований, невозобновимостью условий для проведения повторного эксперимента и невозможностью измерить некоторые физические величины.

В этой связи возникает необходимость в применении различных видов моделирования для исследования сложных физических процессов. В физике наиболее широкое применение нашли физическое (модельное) и компьютерное моделирование. Физическое моделирование основано на использовании критериев подобия при построении модели физического (натурного) объекта. Экспериментальное изучение физических явлений с помощью модельных экспериментов дает надежные результаты только при условии физического подобия реального объекта физической модели.

Другим видом моделирования является компьютерное моделирование, основанное на проведении вычислительного эксперимента. Вычислительный эксперимент – это эксперимент над математической моделью объекта исследования с помощью компьютерных и информационных технологий. Данный вид эксперимента состоит в том, что по одним параметрам модели вычисляются другие её параметры и на этой основе делаются выводы о свойствах объекта, описываемого математической моделью.

В настоящее время численное моделирование получило широкое применение вследствие точности результатов проводимых вычислительных экспериментов, а также хорошего согласия с результатами натуральных экспериментов. Проведение вычислительных экспериментов по исследованию процессов тепломассопереноса в областях реальной геометрии основывается на наличии мощных современных ЭВМ, специально ориентированных комплексов прикладных программ для решения задач промышленности и теплоэнергетики.

Однако при организации численного моделирования одним из недостатков является то, что данный вид эксперимента является численной реализацией созданной человеком математической модели. При некорректно заданной математической модели результаты сильно расходятся с физическим экспериментом. В этой связи необходимо верифицировать полученные при проведении

вычислительных экспериментов данные, проводя сравнение с результатами натуральных экспериментов, проведенных непосредственно на объекте исследования.

При построении математической модели исследования некоторых процессов необходимо описать данные процессы с помощью систем уравнений с заданными начальными и граничными условиями и выбрать метод их решения. На сегодняшний день наибольшую популярность для решения данных уравнений получили метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ) и метод контрольных, или конечных, объемов (МКО).

Основой метода конечных разностей (МКР) является представление уравнений в дифференциальной форме, в которых дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Применение данного метода позволяет значительно упростить решение системы уравнений, однако данный метод дает плохую аппроксимацию границ сложных областей.

Метод конечных элементов (МКЭ) базируется на разделении исследуемой геометрической области на элементы, внутри которых неизвестная функция аппроксимировалась пробными функциями, удовлетворяющими граничным условиям непрерывности и совпадающим с граничными условиями, заданными исследуемой задачей. Данный метод в отличие от МКЭ дает хорошую аппроксимацию в областях сложной геометрии, однако сложен.

Метод конечных объемов (МКО) основан на разбиении выделенного объема на малые объемы, по которым интегрируют дифференциальные уравнения математической модели [13].

Моделирование процесса горения твердого топлива в той или иной степени включает моделирование процессов тепломассопереноса, химических процессов, распределение по размерам частиц (рассчитанное в диапазонах конечных размеров во всех точках области), потоковые или зонные характеристики лучистого теплопереноса и данные о распределении сажи. При сгорании частиц необходимо учитывать скорости гетерогенных реакций и требуется знать о распределении частиц по размерам и в пространстве.

Несмотря на все сложности, связанные с построением адекватных физической, математической, химической моделей,

компьютерное моделирование процессов горения в топочных камерах играет важную роль в решении вопросов теплоэнергетики и экологии. Результаты проведения вычислительных экспериментов позволяют осуществлять организацию процесса сжигания с тем, чтобы добиться увеличения эффективности и уменьшения выбросов вредных пылегазовых веществ в атмосферу.

Моделирование процессов теплопереноса в топочных камерах действующих энергетических котлов позволяет решать сложные задачи теплоэнергетики и экологии, связанные с уменьшением эмиссии загрязняющих веществ, таких, как углеводороды C_nH_m , сажа, оксиды углерода CO , CO_2 и азота NO_x , с помощью управления закономерностями изменения температуры и концентраций топлива и окислителя, которые подаются в области их сгорания.

Горение пылеугольного факела в реальных условиях представляет собой сложный для математического анализа физико-химический процесс. Особой сложностью отличается он в условиях камер сгорания котельных топок, где ось факела криволинейна, а холодные экранированные стены топочной камеры обуславливают значительный градиент температуры и всех зависящих от нее параметров от периферии к центру факела [6].

В настоящее время в области развития информационных технологий, и компьютерного моделирования в частности, были получены значительные успехи: произошел качественный скачок в разработке моделей и их верификации; создаются новые и совершенствуются существующие численные методы исследования и пакеты прикладных программ; активно развиваются способы анализа и представления результатов моделирования.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О ГОРЕНИИ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ФАКЕЛА

Теплоэнергетика является одним из важнейших элементов топливно-энергетического комплекса РК, поскольку около 86–88% всей электроэнергии в Казахстане вырабатывается на теплоэлектростанциях. К наиболее крупным теплоэлектростанциям относятся Аксуская ТЭС, Экибастузкая ГРЭС-1 и ГРЭС-2, использующие в качестве топлива Экибастузский, Борлинский, Карагандинский угли.

В монографии в качестве исследуемого объекта была выбрана топочная камера парового котла ПК-39, установленного на Аксуской электростанции (г. Аксу, Казахстан), работающей на Экибастузском угле. Общая установленная мощность электростанции – 2450 МВт. На электростанции работают 8 энергоблоков (паровых котлов) ПК-39 номинальной мощностью 300 и 325 МВт.

Экибастузский уголь является высокозольным труднообогатимым каменным углем средней стадией метаморфизма. Добыча угля осуществляется на трех угольных разрезах: «Богатырь», «Восточный» и «Северный». Аксуская электростанция работает на Экибастузских углях угольного разреза «Восточный».

В связи с тем, что сжигаемый уголь является низкосортным, возникают проблемы при его использовании. Так, высокая зольность угля при его сжигании приводит к проблемам в стабилизации пламени и горении в целом, а также в зашлакованности топочных экранов [14].

2.1. Паровой котел ПК-39. Общее устройство и определения

Паровой котел ПК-39 разработан и построен на Подольском Машинном Заводе в 1961 г. для работы на углях Экибастузского месторождения, теплота сгорания которых составляет 17,5

МДж/кг (4165 ккал/кг). Коэффициент полезного действия КПД парового котла $\eta = 92 \%$. Прямоточный котел выполнен двухкорпусным, корпуса которого имеют Т-образную компоновку для обеспечения низких скоростей газов в конвективных газоходах [15].

Поперечный срез котла ПК-39 представлен на рисунке 2. На рисунке 3 изображена принципиальная схема парового котла, а на рисунке 4 – схема пароводяного тракта парового котла ПК-39 [15, с. 21].

Топочная камера каждого корпуса открытая, призматическая, прямоугольного сечения, с небольшим сужением в средней ее части полностью экранирована трубами, образующими по высоте холодную воронку. Топочная камера котла разделена на три части: нижнюю (НРЧ), среднюю (СРЧ) и верхнюю (ВРЧ) радиационные части [15-16].

Нижняя часть выполнена из вертикальных трехходовых панелей; холодная воронка, средняя и верхняя радиационная части – из горизонтальных панелей.

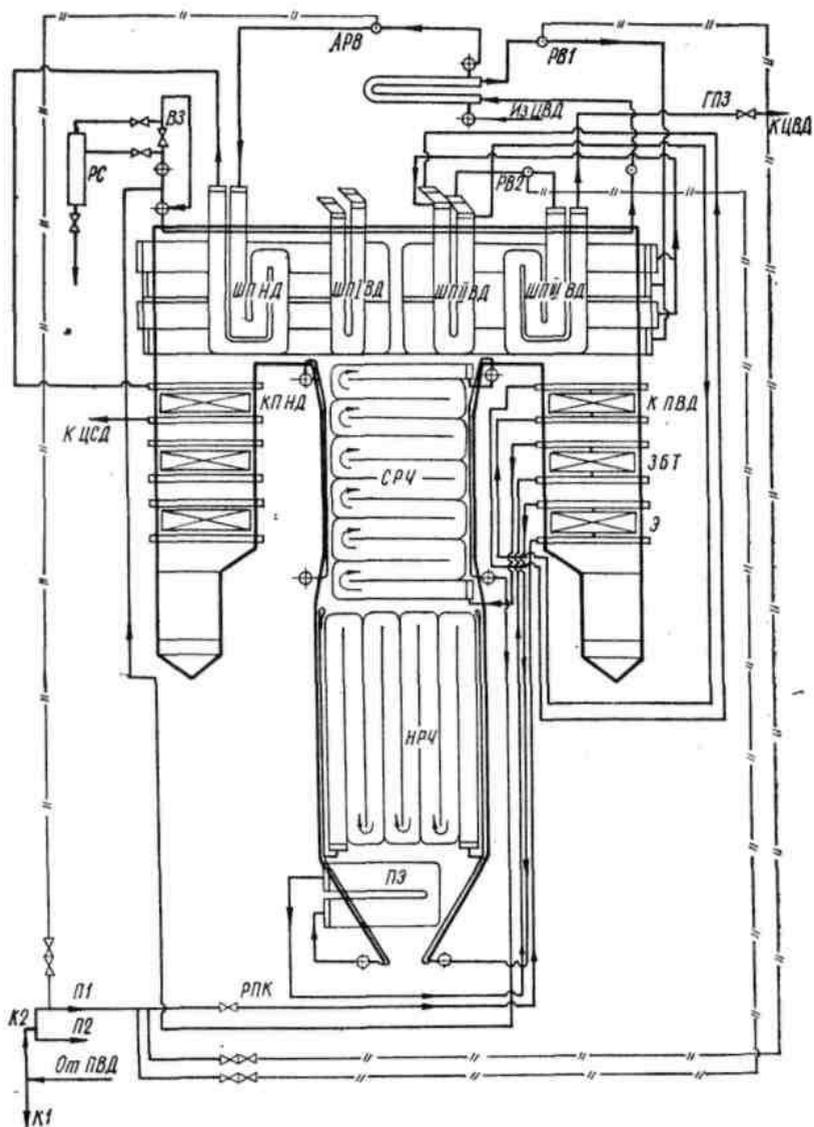


Рисунок 2 – Поперечный разрез котла ПК-39 [15, с. 21]

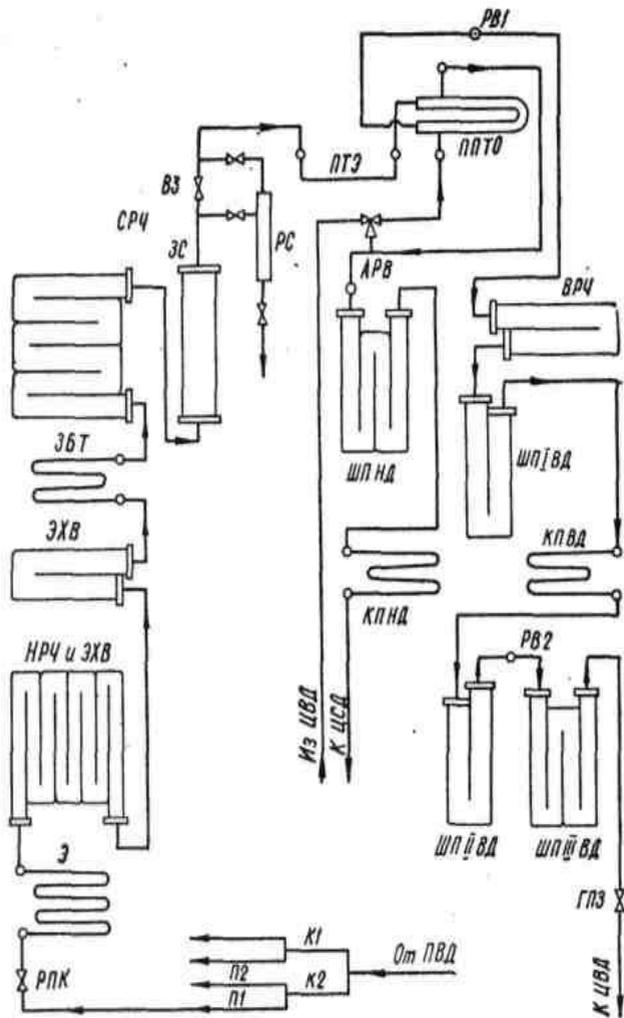


Рисунок 4 – Схема пароводяного тракта парового котла ПК-39 [15, с. 22]

На выходе из топочных камер расположены ширмовые пароперегреватели высокого давления 1 степени (крайние ширмы) и

2 ступени, конвективный промперегреватель 1 ступени, зона максимальной теплоемкости и экономайзер.

Змеевики конвективных поверхностей нагрева расположены перпендикулярно фронту котла. Среда высокого давления от входа в котел до выхода из него движется четырьмя параллельными автономно регулируемыми потоками (по два на корпус), среда низкого давления – четырьмя параллельными потоками.

Регулирование температуры перегрева первичного пара происходит путем поддержания соотношения вода-топливо, а также двумя регуляторами впрыска РВ 1 и РВ 2. Регулирование температуры перегрева вторичного пара осуществляется с помощью паропаровых теплообменников, установленных вне газопроходов парогенератора.

Система пылеприготовления выполнена по схеме прямого вдувания с молотковыми мельницами. Обмуровка котла изготовлена из плит. Котел снабжен необходимой арматурой, устройствами для отбора проб пара и воды, а также контрольно-измерительными приборами. Процессы питания котла, регулирования температуры перегрева пара и горения автоматизированы [16].

Как было сказано выше, для решения уравнений математической модели существует несколько численных методов, к наиболее распространенным среди которых относят метод конечных разностей, метод контрольных элементов и метод контрольных объемов.

Для решения систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы тепломассопереноса в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС, использовался метод контрольного объема. Суть метода заключается в том, что пространство топочной камеры разбивается на контрольные объемы и для каждой точки пространства, окруженной некоторым объемом, решаются уравнения сохранения физической величины (массы, импульса, энергии и др.).

Для проведения численного моделирования процессов тепломассопереноса при сжигании пылеугольного топлива в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС использовался пакет прикладных программ FLOREAN [17-23]. Перед проведением вычислительных экспериментов с помощью программы PREPROZ были созданы файлы и стартовые программы,

включающие в себя начальные и граничные условия, характеристики сжигаемого топлива (элементный состав, теплота сгорания, фракционный состав Экибастузского угля), геометрию котла и горелочных устройств [24-25].

Для численного моделирования проведена разбивка выбранной топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС на элементарные объемы. На рисунке 5 представлена общая схема топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС и разбивка ее на элементарные объемы для проведения численного моделирования [26-27]. Всего нами было получено 98 820 элементарных объемов расчетной сеткой размером 27x61x60.

Основные характеристики топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС и сжигаемого Экибастузского угля представлены в таблице 1. На рисунке 5 представлена также схема расположения «лючков» для проведения экспериментальных измерений и контроля характеристик топочной камеры.

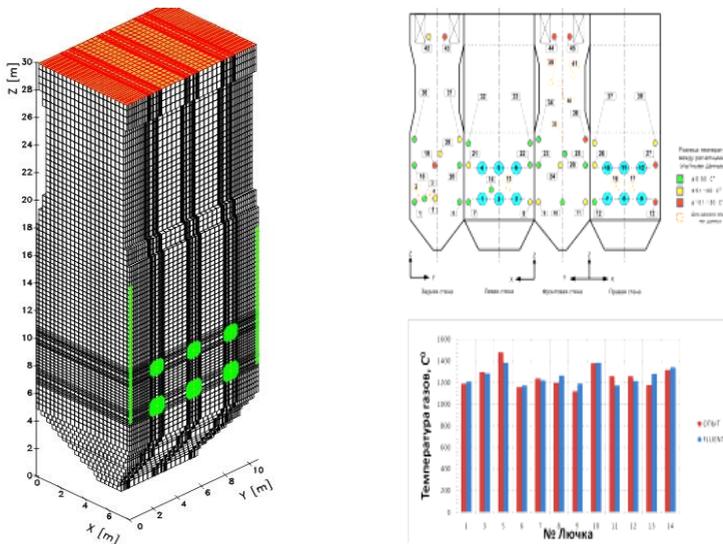


Рисунок 5 – Общий вид топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС и разбивка ее на контрольные объемы

Таблица 1

**Характеристика топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС и
сжигаемого на ней пылеугольного топлива
(Экибастузский уголь) [28]**

Наименование, характеристики, размерность	Обозначение	Величина
1	2	3
Расход топлива на котел, кг/ч	B	87 500
Расход топлива на горелку, кг/ч	$B_{\Gamma} = B/Z$	7291.1
Топливо – Экибастузский уголь, Состав угля, %	W ^P	7.0
	A ^P	40.9
	S ^P	0.8
	C ^P	41.1
	H ^P	2.8
	O ^P	6.6
	N ^P	0.8
Теплота сгорания, МДж/кг	Q_{H}^P	15.87
Выход летучих, %	V^F	30.0
Коэффициент избытка воздуха на выходе из топки	α_{Γ}	1.25
Коэффициент избытка воздуха в горелках	α_{Γ}	1.15
Присосы воздуха в топку	$\Delta\alpha$	0.1
Температура аэросмеси, °С (К)	T_a	150(423)
Температура вторичного воздуха, °С (К)	T_2	327(600)
Температура третичного воздуха, °С (К)	T_3	327(600)
Температура стенок, °С (К)	T_w	600(873)
Тип используемых горелок	Вихревые	
Количество горелок, шт.	n_B	12
Количество ярусов,	N	2
Высота топки, m	$z(H)$	29.985
Ширина топки, m	Y	10.76
Глубина топки, m	X	7.762
Скорость первичного воздуха, (аэросмеси) горелок нижнего яруса, м/с	w_1	15.0
Скорость вторичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	w_2	28.0

Наименование, характеристики, размерность	Обозначение	Величина
Скорость третичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	w_3	26.0
Скорость центрального воздуха горелок нижнего яруса, м/с	w_0	10.0
Скорость первичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	w_1	15.0
Скорость вторичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	w_2	23.0
Скорость третичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	w_3	23.0
Скорость центрального воздуха горелок верхнего яруса, м/с	w_0	10.0
Размер горелок нижнего яруса, м	\emptyset	1.2
Размер горелок верхнего яруса, м	\emptyset	1.05

2.2. Горелочные устройства топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС

Пылеугольная горелка – устройство для образования смесей пылевидного топлива с воздухом и подачи его к месту сжигания. Через горелки в топку поступают два различных потока: топливовоздушная смесь (топливная пыль при температуре 70-130 °С и первичный воздух) и вторичный воздух с температурой 250-420 °С. Образование горючей смеси завершается в топочной камере.

От работы горелок и их размещения зависит характер смесеобразования, что в сочетании с аэродинамикой топочной камеры определяет интенсивность воспламенения, скорость и полноту сгорания. Горелки для камерного сжигания твердого топлива подразделяют на вихревые (турбулентные) и прямоточные (щелевые). Для сжигания пылевидного топлива совместно с газом применяют комбинированные горелки.

При использовании щелевых горелок топливо и окислитель в камеру сгорания подается прямоточно, т.е. смешение угольной пыли с окислителем происходит в самой топочной камере. Для

наиболее тщательного перемешивания горелки в топке располагают тангенциально к мнимой окружности.

Характерной особенностью вихревых горелок является закручивание одного или нескольких воздушных потоков в горелке с помощью различного рода завихрителей, в результате которого на выходе из горелки образуется вихревое движение вокруг осевой линии со своеобразной аэродинамической структурой.

Для закрутки воздушных потоков основными видами завихрителей являются улиточные и лопаточные завихрители. Лопаточные завихрители в свою очередь подразделяются на аксиальные и тангенциальные. В зависимости от количества каналов первичного и вторичного воздуха и видов завихрителей вихревые горелки классифицируются на различные типы. Для обеспечения скоростного режима работы горелок при пониженных нагрузках применяются четырехканальные, или сдвоенные вихревые горелки, в которых имеется по два канала первичного и вторичного воздуха. Также, широкое применение получили трехканальные пылеугольные горелки, в которых имеется один канал аэросмеси и два канала вторичного воздуха.

На котлоагрегатах большой производительности устанавливают одно- и двухулиточные, лопаточные и улиточно-лопаточные пылеугольные круглые горелки. При любой конструкции круглой горелки потоки пылевоздушной смеси и вторичного воздуха закручиваются в одном направлении.

В одноулиточной горелке пылевоздушная смесь поступает в топку прямоточно; вторичный воздух закручивается в улитке и, пройдя кольцевой канал, через амбразуру поступает в топку. Необходимый для хорошего перемешивания с вторичным воздухом разнос струи пылевоздушной смеси достигается рассекающим конусом. В получивших широкое распространение двухулиточных горелках и улиточно-лопаточных горелках оба потока закручиваются в улиточном или лопаточном подводе.

Потоки образуют в топке два концентрически расходящихся усеченных конуса, как бы опирающихся малыми основаниями на кольцевые выходы из горелки. Внутри образуется конус пылевоздушной смеси, к которому снаружи примыкает конусообразный поток вторичного воздуха. По мере движения в топке оба потока

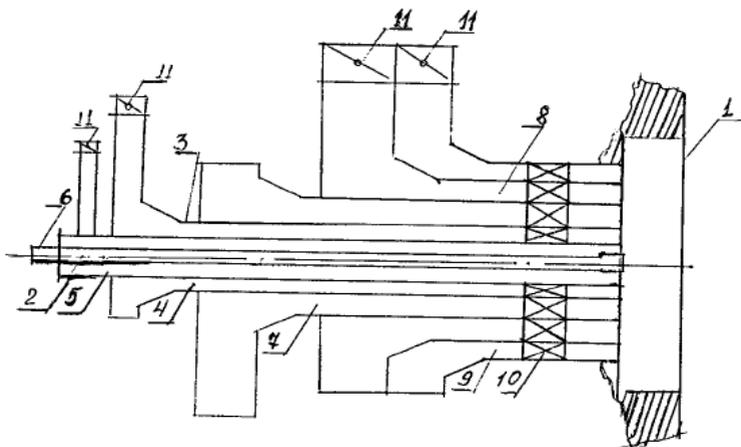
проникают один в другой, перемешиваются, увлекая за собой топочные газы.

Чем больше горячих топочных газов вовлекается в этот процесс, тем быстрее воспламеняется и сгорает топливо. Для увеличения угла раскрытия факела мощные горелки имеют коническую выходную насадку. С этой же целью выходную часть амбразуры часто выполняют конической, расширяющейся к устью, в результате чего достигается лучшее сочетание форм развития факела и амбразуры, увеличивается площадь поверхности контакта факела, ускоряется воспламенение топлива.

Полнота сгорания топлива зависит от скорости вдувания в топку первичной смеси и вторичного воздуха. При малой скорости первичной смеси возможны выпадание из потока крупных частиц топлива и обгорание выходных патрубков горелки; при слишком большой скорости ухудшаются условия воспламенения и увеличивается длина факела. Скорость пылевоздушной смеси в круглых закручивающих горелках при сжигании пыли антрацитов, полуантрацитов и тощих углей принимают равной 15-20 м/с, а каменных и бурых углей – 20-25 м/с; соответственно скорости вторичного воздуха принимают равными 20-30 и 25-35 м/с [29].

В топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС установлено 12 вихревых пылеугольных горелок, расположенных на двух ярусах. Каждая горелка содержит один канал с подаваемой аэрозолью и два канала вторичного воздуха [30]. Закрутка вторичного воздуха осуществляется встроенным лопаточным аппаратом; канал подачи мазута имеет переменное сечение – расширяется к устью. Схема пылеугольной горелки представлена на рисунке 6.

Использование вихревых горелок значительно интенсифицирует смешение потоков топлива и воздуха между собой и с горячими топочными газами, обеспечивает на коротком расстоянии от устья горелки необходимый прогрев и воспламенение пылеугольного факела [31-32].

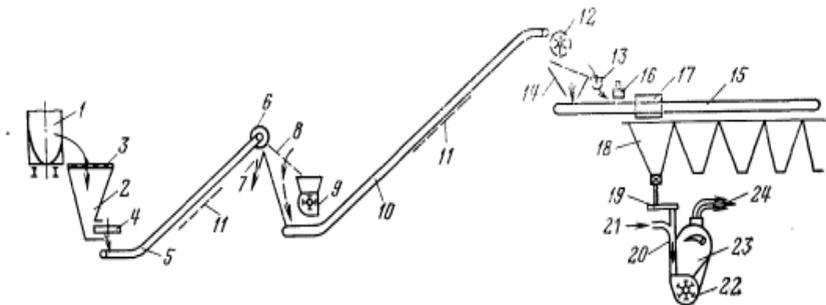


1 – цилиндрическая амбразура, 2 – центральная труба, 3 – внутренняя труба, 4 – канал центрального воздуха, 5 – внутренний канал, 6 – мазутная форсунка, 7 – канал аэросмеси, 8 – канал вторичного воздуха, 9 – канал третичного воздуха, 10 – аксиально-лопаточные завихрители, 11 – шиберы

Рисунок 6 – Вихревая горелка котла ПК-39 Аксуской ТЭС [30]

2.3. Приготовление и этапы сжигания пылевидного топлива

На современных ТЭС применяется такая организация сжигания угля, при которой уголь кускового сырого топлива, проходя такие этапы как дробление, подсушка и размол, подается в топочное пространство в виде пыли. Такая организация процесса позволяет улучшить воспламенение и стабилизацию горения факела. Подробнее пылеприготовительная установка представлена на рисунке 7.



1 – вагоны с углем; 2 – бункера разгрузочного сарая; 3 – решетка; 4 – питатель сырого топлива; 5 – ленточный транспортер; 6 – шкивный магнитный сепаратор; 7 – отвод кусков железа; 8 – грохот; 9 – дробилка; 10 – ленточный транспортер; 11 – устройство парового обогрева топливного тракта; 12 – шеполовитель; 13 – отвод щепы; 14 – поступление сырого топлива на транспортер; 15 – парогенераторный цех; 16 – подвесной магнитный сепаратор; 17 – разгрузочная тележка; 18 – бункера сырого топлива парогенераторов; 19 – питатель сырого топлива мельничной системы; 20 – нисходящий сушильный участок мельницы; 21 – подвод горячего воздуха к мельнице; 22 – мельница; 23 – сепаратор; 24 – пылепроводы

Рисунок 7 – Схема топливного тракта [33]

Для предотвращения поломки и износа мельниц из угля удаляются с помощью магнитных сепараторов металлические предметы, а также щепы щеполовителем. Размол угля происходит следующим образом: для уменьшения нагрузки на дробилки сначала уголь подвергается предварительному грохочению – разделению на фракции при прохождении набора качающихся сит с различным размером отверстий. Не прошедший через сита грохота уголь подается в дробилки для измельчения, после чего вместе с «мелочью» из грохота поступают в бункера сырого топлива, а потом в мельницы.

Углеразмольные мельницы делят по принципу размола и по частоте вращения подвижной части мельницы. Основными принципами размола угля являются раздавливание, истирание и удар. По частоте вращения мельницы разделяют на тихоходные (16-24 об/мин), среднеходные (50-300 об/мин) и быстроходные (600-1500 об/мин).

Среди углеразмольных мельниц наибольшее применение получили:

- шаровые барабанные мельницы (ШБМ) – тихоходные мельницы, основанные на ударе стальных шаров о слой угля и истирании последнего при перекате шаров;
- среднеходные мельницы (СМ), основным принципом размола которых является раздавливание частиц топлива прижимаемыми с большой силой стальными шарами или валками;
- быстроходнобильные мельницы (ББМ) с частотой вращения ротора около 1500 об/мин и молотковые мельницы (ММ) с частотой 600-1000 об/мин, в которых размол происходит главным образом при ударе стальных бил или молотков, шарнирно присоединенных к барабану мельницы о слой угля, поступающий в пространство между барабаном и корпусом мельницы, а также за счет раздавливания и истирания их мелющими телами;
- мельницы-вентиляторы (М-В) – быстроходные мельницы, основанные на ударе поступающих к всасу мельницы угольных частиц о лопатки ротора.

Горение твердого топлива имеет ряд стадий: подогрев, подсушка, возгонка летучих и образование кокса, горение летучих и кокса. Из всех стадий определяющей является стадия горения коксового остатка, т.е. стадия горения углерода, интенсивность которой и определяет интенсивность топливосжигания и газификации в целом [33].

Процесс горения пылевидных топлив совершается в объеме топочной камеры в потоках больших масс топлива и воздуха, к которым подмешиваются продукты сгорания. Окислитель, необходимый для сжигания топлива, делится на первичный воздух, подаваемый совместно с угольной пылью и образуя при этом аэросмесь, а также вторичный, необходимый для полного ее сгорания в объеме топочной камеры котла [12, 33].

Для первичного нагрева, прогрева и воспламенения угольных частиц требуется подвод тепловой энергии – так называемая подсветка – в противном случае процесс горения прекращается. Горение угля начинается тогда, когда достигается температура окисления углерода (около +950...+1050 °С), а газообразные продукты, образовавшиеся в результате выхода

летучих веществ, не препятствуют доступу кислорода воздуха к сгораемому топливу [34].

При подводе тепла к угольным частицам быстро нагревается их тонкий поверхностный слой и равномерно прогреваются их внутренние слои. При этом воздух диффундирует во внутренние слои горючего, что приводит к его светимости, медленному и равномерному разложению, выходу значительного количества летучих компонент, а также к выделению тепловой энергии [34].

Основой горения пылевидных топлив является химическое реагирование горючих составляющих топлива с кислородом воздуха. Однако химические реакции горения совершаются в условиях сильного взаимного влияния с одновременно протекающими физическими процессами, такими как:

- процесс движения подаваемых в топочную камеру составляющих горючую смесь газовых и твердых диспергированных веществ в системе струй, переходящих в поток и распространяющихся в ограниченном пространстве топочной камеры с развитием вихревых течений, в совокупности составляющих сложную структуру аэродинамики топки;
- диффузия и конвективный перенос реагирующих веществ и продуктов горения в газовом потоке, а также перенос летучих компонент к угольным частицам;
- теплообмен между аэросмесью, газовыми потоками и коксовыми частицами, а также за счет протекания химических реакций;
- лучистый теплообмен между угольными частицами, газоздушными потоками и экранными поверхностями топочной камеры;
- нагрев частиц, возгонка летучих, перенос и горение их в газовом объеме и др.

Все описанные процессы для частиц топлива (уголь), имеющих различный размер, по своей длительности будут отличаться. Чем больше частичка, тем дольше идут процессы ее нагрева, пиролиза и горения. Таким образом, для получения необходимых характеристических параметров процесса горения необходимо определить размер угольных частиц, который необходимо получить в процессе размола кусков угля в мельницах. На практике

размер частичек угольной пыли, полученной в результате размола, лежит в широком диапазоне.

Обычно для проведения исследований и необходимых расчетов распределением угольных частиц по размерам пренебрегают, выбирая в качестве размера осредненный диаметр частиц. Результаты проведенных вычислений достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Тем не менее, угольная пыль с различной тонкостью помола горит по-разному. Учет тонкости помола (тонина помола) позволяет смоделировать процессы тепломассопереноса с большей точностью, нежели при выборе для расчетов монофракционную угольную пыль. Однако, учет дисперсности угольной пыли при моделировании усложняет задачу, ее математическую и физическую модель и вместе с тем увеличивает количество машинного времени для проведения вычислительных экспериментов.

Из вышесказанного следует, что горение угольной пыли является сложным физико-химическим процессом, состоящим из химических реакций и физических процессов, протекающих в условиях взаимной связи и взаимного влияния [33]. Однако, подробные исследования процессов ТМП, происходящих в топочной камере реальных энергетических котлов, имеют большое значение для развития теплоэнергетической отрасли.

В связи с этим ниже в монографии приведены результаты численного моделирования процессов тепломассопереноса в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС и их основных характеристик: аэродинамика потоков (вектор полной скорости V , давление p), теплоперенос (поля температуры T и химической энергии Q_{chem}) и массоперенос (концентрации кислорода O_2 , оксидов углерода CO , CO_2 и азота NO_x) при горении моно- и полидисперсного пылеугольных факелов, изучено влияние влажности Экибастузского угля и предложена новая технологии «острого дутья-OFA».

3. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

В монографии приведены основные уравнения математической и химической моделей, описывающие процессы теплопереноса и массопереноса, которые происходят при горении пылеугольного факела в топочных камерах ТЭС.

3.1. Основные уравнения математической модели процессов переноса в турбулентных течениях с химическими реакциями

3.1.1. Обобщенное транспортное уравнение

Для математического описания процесса горения угольной пыли в топочной камере котла был использован метод контрольного объема. На рисунке 8 представлен стационарный контрольный элемент объема в декартовой системе координат.

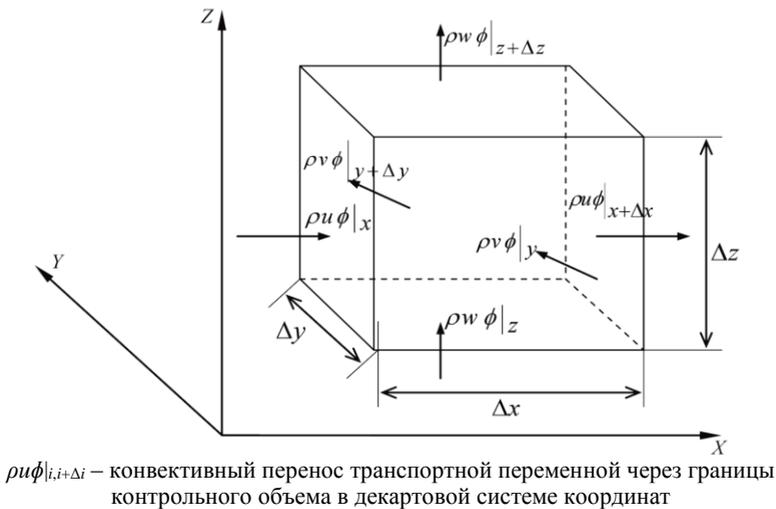


Рисунок 8 – Контрольный объем для обобщенного уравнения переноса [22]

Считая, что центр тяжести контрольного объема движется со скоростью течения и данный контрольный элемент объема соответствует обоснованному подходу Эйлера для течений, изменение транспортной величины ϕ описывается в единичном жидком элементе, а значение этой величины определяется в каждой точке рассматриваемой области.

В результате преобразования предельного значения в бесконечно малый контрольный элемент объема и замены конвективного и диффузионного переноса плотностью потоков, проходящих через границы контрольного объема, получаем дифференциальное уравнение, которое описывает сохранение транспортной переменной ϕ :

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial\Phi_{(K),j}}{\partial x_j} + \frac{\partial\Phi_{(D),j}}{\partial x_j} + S_\phi \quad (2)$$

Математическое описание физических и химических процессов основано на решении уравнений баланса (2). В общем виде эти уравнения содержат четыре слагаемых, описывающих:

- $\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$ – изменение величины ϕ со временем;
- $\frac{\partial\Phi_{(K),j}}{\partial x_j} = \frac{\partial(\rho u_j\phi)}{\partial x_j}$ – изменение величины ϕ за счет конвективного переноса;
- $\frac{\partial\Phi_{(D),j}}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j}$ – изменение величины ϕ за счет диффузионного переноса;
- S_ϕ – источник или сток для транспортной величины ϕ .

3.1.2. Основные уравнения теплопереноса в реагирующих средах

Вычислительный эксперимент проводился на основе решения трехмерных уравнений конвективного теплопереноса с учетом распространения тепла, теплового излучения, химических реакций и многофазности среды. Для описания трехмерного движения реагирующих течений в топочной камере котла ПК-39 используется система дифференциальных уравнений [35-37]:

– *Закон сохранения массы или уравнение неразрывности*

Соотношение баланса массы для контрольного объема представляет собой уравнение неразрывности, которое может быть получено из обобщенного транспортного уравнения (2) при:

$$\phi = 1 \quad \Gamma_{\phi} = 0 \quad S_{\phi} = 0.$$

Поток массы через поверхность контрольного объема равен:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j}. \quad (3)$$

– *Закон сохранения импульса или уравнение движения*

Баланс импульса основывается на втором законе Ньютона – изменение импульса жидкости в контрольном объеме равно сумме всех внешних (поверхностных и эффективных объемных) сил, приложенных к данному контрольному объему.

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i, \quad (4)$$

где $\tau_{i,j}$ – тензор напряжений; f_i – объемные силы.

Используя закон трения Стокса, уравнение (4) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,j} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученное выражение соответствует обобщенному транспортному уравнению (2), в котором:

$$\begin{aligned} \phi &= u_i, \quad \Gamma_\phi = \mu, \\ S_\phi &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,j} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

– Закон сохранения энергии

Уравнение энергии базируется на первом начале термодинамики

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j E)}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j^{res}}{\partial x_j} - \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j} + \rho u_i g_i + S_q, \quad (7)$$

где $E = e + \frac{\rho}{2} \cdot u^2$ – полная энергия E , которая складывается из внутренней энергии e и кинетической энергии $\frac{\rho}{2} \cdot u^2$.

В газовых потоках изменением механической энергии по сравнению с изменением внутренней (тепловой) энергии, как правило, пренебрегают. Баланс механической энергии, однако, присутствует в скалярном произведении векторов скорости в уравнении движения (баланса импульса) [38].

Таким образом, вычитая выражение для закона сохранения механической энергии из уравнения полной энергии (7) и принимая во внимание соотношение для полной энергии, получаем уравнение сохранения внутренней энергии:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho e)}{\partial t}}_I = - \underbrace{\frac{\partial(\rho u_j e)}{\partial x_j}}_{II} - \underbrace{\frac{\partial q_j^{res}}{\partial x_j}}_{III} - p \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial x_i}}_{IV} + \tau_{ij} \underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_V + S_e^e \quad (8)$$

В многокомпонентных системах плотность потока энергии за счет молекулярного теплопереноса складывается из трех частей: перенос энергии за счет теплопроводности, перенос энергии за счет потока вещества и диффузии:

$$q_j^{res} = q_j^L + q_j^{S_i} + q_j^D.$$

В сравнении с плотностью потока тепла за счет теплопроводности (q_j^L) два других члена $q_j^{S_i}$ и q_j^D в уравнении (8) в рассматриваемых течениях пренебрежимо малы [22, р. 117].

Внутренняя энергия e является не очень удобной величиной для проведения расчетов. Удельная энтальпия h и удельная изобарная теплоемкость c_p напротив для многих веществ известна и является табличной величиной или может быть представлена в виде приближённой функции.

Тогда с учетом выражения для удельной энтальпии:

$$h = e + \frac{p}{\rho} \Leftrightarrow e = h - \frac{p}{\rho} \quad \text{и} \quad c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_{p = const}, \quad (9)$$

имеем преобразованное уравнение:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Pr} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_h \quad (10)$$

Полученное выражение соответствует обобщенному транспортному уравнению (2), в котором:

$$\phi = h, \quad \Gamma_\phi = \frac{\mu}{Pr}, \quad S_\phi = S_q.$$

– Закон сохранения для компоненты вещества

В изотропной среде, состоящей из β компонент, компоненты могут двигаться с различными скоростями $u_{i,\beta}$. Для баланса массы β – компоненты среды можно записать:

$$\frac{\partial \rho_{\beta}}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho_{\beta} u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + S_{\beta}, \quad (11)$$

где ρ_{β} – парциальная плотность – масса компоненты β в рассматриваемом контрольном объеме; j_i – диффузионный поток.

Для удобства при проведении вычислительных экспериментов вместо парциальной плотности в работе вводится массовая концентрация c_{β} :

$$c_{\beta} = \frac{\rho_{\beta}}{\rho},$$

При этом выполняются следующие условия:

$$\sum_{\beta=1}^n c_{\beta} = 1 \quad \text{и} \quad \sum_{\beta=1}^n \rho_{\beta} = \rho,$$

$$\frac{\partial (\rho c_{\beta})}{\partial t} = - \frac{\partial (\rho c_{\beta} u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \cdot D_{c_{\beta}} \cdot \frac{\partial c_{\beta}}{\partial x_i} \right) + S_{\beta}, \quad (12)$$

где $i=1, 2, 3$; $\beta=1, 2, 3, \dots, N$; S_{β} – источник вещества.

В этом случае обобщенное транспортное уравнение (2) записано с учетом:

$$\phi = c_{\beta}; \quad \Gamma_{\phi} = \rho \cdot D_{c_{\beta}}; \quad S_{\phi} = S_{\beta} \phi.$$

Процесс горения угольной пыли в топочных камерах является турбулентным, и в связи с этим для моделирования турбулентной вязкости и замыкания системы использовалась стандартная k - ϵ -модель турбулентности. Модель включает в себя:

– Уравнение переноса турбулентной кинетической энергии k :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \rho \cdot \varepsilon, \quad (13)$$

Здесь P – производство кинетической энергии турбулентности:

$$P = \left[\mu_{turb} \cdot \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot k \cdot \delta_{ij} \right] \cdot \frac{\partial u_j}{\partial x_j}. \quad (14)$$

– Уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии ε :

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon,1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot P - C_{\varepsilon,2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \cdot \rho, \quad (15)$$

где $\rho \varepsilon$ – преобразование кинетической энергии пульсационного движения во внутреннюю энергию (диссипация);

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ – соответствующие турбулентные числа Прандтля

Турбулентная вязкость μ_{turb} определяется с помощью соотношения Прандтля-Колмогорова [39]:

$$\mu_{turb} = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (16)$$

где c_μ – эмпирическая константа.

В работе [40] были предложены следующие эмпирические константы k - ε -модели турбулентности:

$$c_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,00; \sigma_\varepsilon = 1,30; C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92.$$

3.1.3. Граничные условия

Для решения системы уравнений (3-15) необходимо задать начальные и граничные условия. Начальные условия относятся к

условиям при $t=0$. Если задача устойчива, то необходимости в начальных условиях нет. Однако, в переходных задачах, для получения единственного решения, начальные условия должны быть заданы для всех переменных.

В качестве граничных условий задаются значения транспортных переменных ϕ на входе (горелочные устройства, места поддува воздуха), на выходе из топочной камеры, в плоскости симметрии и твердых стенках топочной камеры.

Для решения уравнения движения задаются на границах значения компонент скорости или нормальный и тангенциальный градиенты скоростей.

В граничных условиях первого рода переменная задана функцией:

$$\phi = f(x, y, \tau), \quad (17)$$

где ϕ – переменная;

τ – время.

Например, постоянная температура стенки или постоянная скорость ввода пылеугольной смеси и воздуха. Если скалярная функция всюду на границе равна нулю, то это условие относится к однородным граничным условиям первого рода.

В граничных условиях второго рода градиент переменной задан следующей функцией:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = f(x, y, \tau), \quad (18)$$

где n – нормаль к поверхности.

Например, постоянный поток тепла в горизонтальной стенке. Если всюду на границе градиент равен нулю, то это однородные граничные условия второго рода.

Граничные условия третьего рода являются линейной комбинацией граничных условий первого и второго рода и могут быть представлены следующим выражением:

$$a\phi + b \frac{\partial \phi}{\partial n} = f(x, y, \tau), \quad (19)$$

где a и b – функции, независимые от ϕ ,
 n – нормаль к поверхности.

Например, если тепло, поступающее на поверхность стенки, равно теплу, передаваемому за счет теплопередачи внутри стенки, то справедливо следующее равенство:

$$k \frac{\partial t}{\partial y(y-0)} + ht_1 = ht_0, \quad (20)$$

где k – удельный термический коэффициент проводимости твердых тел;

h – конвективный коэффициент.

Если функция всюду на границе равна нулю, то это однородные граничные условия третьего рода. Эти три вида граничных условий применимы для большинства задач.

Для решения предложенной в работе исследования математической модели процессов турбулентного теплопереноса, происходящих в реагирующих средах, были выбраны следующие граничные условия:

для скорости:

– Вход: $-u_i$ – значения скоростей на входе

– Выход: $-\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \Big|_{no} = 0$ (21)

– Плоскость симметрии: $u_i \Big|_{no} = 0, \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \Big|_{no} = 0,$ (22)

– Твердая поверхность: $u_i \Big|_{no}=0, \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \Big|_{no}=0, u_i \Big|_{ta}=0$ (23)

– Для решения уравнения энергии краевые условия будут следующими:

– Вход: $h = c_p T$ – задается температура потока на входе

$$- \text{Выход: } \left. \frac{\partial h}{\partial x_i} \right|_{no} = 0 \quad (24)$$

$$- \text{Плоскость симметрии: } \left. \frac{\partial h}{\partial x_i} \right|_{no} = 0, \left. \frac{\partial h}{\partial x_i} \right|_{ta} = 0 \quad (25)$$

На твердых стенках могут задаваться различные виды граничных условий для температуры. Для адиабатических стенок поток тепла q_w равен нулю и в этом случае используются краевые условия как в плоскости симметрии. В случае теплообмена между стенкой и жидкостью можно задавать температуру стенки или тепловой поток [41]. Если экспериментально или аналитически определен конвективный коэффициент теплоотдачи α , то можно использовать условие:

$$q_w = \alpha (T_{wp} - T_w) \quad (26)$$

Для уравнения переноса концентрации компонент можно задать следующие граничные условия:

Вход: c_β – значение концентрации компонента,

$$\text{Выход: } \left. \frac{\partial c_\beta}{\partial x_i} \right|_{no} = 0,$$

$$\text{ось симметрии: } \left. \frac{\partial c_\beta}{\partial x_i} \right|_{no} = 0,$$

$$\text{на поверхности: } \left. \frac{\partial c_\beta}{\partial x_i} \right|_{no} = 0.$$

Кинетическая энергия турбулентности k для течения с изотропной турбулентностью может быть определена следующим соотношением:

$$Tu = \frac{(u'^2)^{1/2}}{u}, \quad (27)$$

здесь T_u – степень турбулентности, которая для течений в топочных камерах может принимать значения $0.05 \leq T_u \leq 0.2$.

Используя формулу для кинетической энергии турбулентности

$$k = \frac{1}{2} (u_1'^2 + u_2'^2 + u_3'^2), \quad (28)$$

и то, что для изотропной турбулентности $\overline{u_1'^2} = \overline{u_2'^2} = \overline{u_3'^2}$, имеем на входе:

$$k_{\text{вход}} = \frac{3}{2} (\overline{u_{i,\text{вход}} Tu})^2. \quad (29)$$

Для определения значения диссипации кинетической энергии турбулентности на входе можем использовать соотношение:

$$\varepsilon_{\text{вход}} = C_{\mu}^{0.75} \frac{k^{3/2}}{L_m}, \quad (30)$$

где $L_m = 0.03 (4S/P)_m$ – длина пути смешения,

S – площадь,

P – периметр расчетной ячейки в области выходного отверстия горелки.

На выходе:

$$\left. \frac{\partial k}{\partial x_i} \right|_{\text{но}} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right|_{\text{но}} = 0,$$

в плоскости симметрии:

$$\left. \frac{\partial k}{\partial x_i} \right|_{\text{но}} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right|_{\text{но}} = 0. \quad (31)$$

3.1.4. Моделирование теплообмена посредством излучения

Теплообмен излучением, или лучистый теплообмен, по своей природе отличается от передачи тепла теплопроводностью и конвективным теплообменом. Количество тепла, передаваемое посредством излучения, не зависит от температуры окружающей среды, если среда является лучепрозрачной, а также может передаваться через вакуум.

При рассмотрении процессов теплообмена в технических реагирующих течениях в топочных камерах теплообмен посредством излучения вносит наибольший вклад в полный теплообмен. В зоне пламени вклад лучистого теплообмена составляет до 90% от общего теплообмена и даже больше [42]. В связи с этим, моделирование теплообмена посредством излучения в реагирующих течениях в камерах сгорания является одним из наиболее важных этапов при расчетах процессов тепломассобмена в реальных топочных камерах.

Тепловое излучение – это процесс распространения внутренней энергии излучающего тела путем электромагнитных волн. В общем, при температуре выше абсолютного нуля материя излучает, поглощает и отражает электромагнитные волны различной частоты. Передача тепла излучением происходит главным образом в инфракрасной и видимой части спектра [43].

При расчетах, связанных с лучистым теплообменом, характерными величинами являются энергия излучения E и спектральная интенсивность I_ν , связанные между собой соотношением (32):

$$I_\nu = \lim_{\Delta A, \Delta\Omega \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta E_{\nu, \Theta}}{\Delta A \cdot \Delta\Omega \cdot \cos \Theta} \right), \quad (32)$$

где $\Delta E_{\nu, \Theta}$ – энергия излучения с частотой ν , испускаемая от элемента площади ΔA , в телесном угле $\Delta\Omega$, в направлении, определяемом косинусом угла Θ (рис. 9) [43, с. 41].

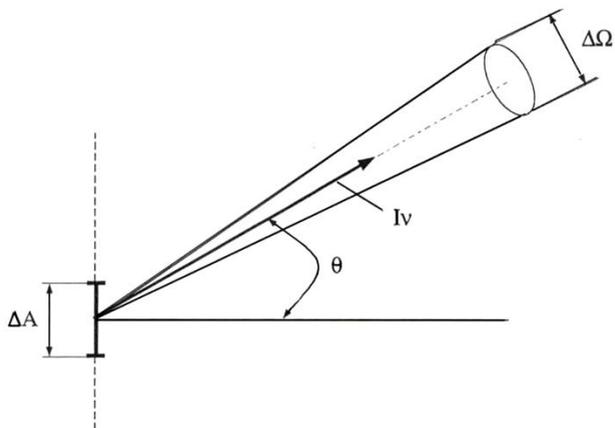


Рисунок 9 – Определение спектральной интенсивности излучения [43, с. 41]

Поскольку испускаемые основным пучком лучи меняют свое направление, тогда, как следствие, происходит изменение и величины спектральной интенсивности излучения.

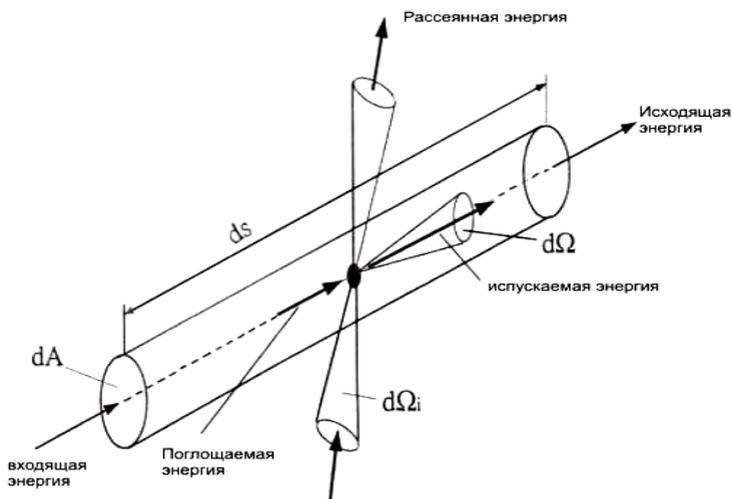


Рисунок 10 – Изменение интенсивности излучения вдоль элемента ds [43, с. 42]

Как говорилось ранее, любое тело не только излучает, но отражает и поглощает лучистую энергию. Для описания изменения величины спектральной интенсивности во времени, выделяется бесконечно малый объем в исследуемом пространстве, с площадью dA и длиной ds , в котором происходит испускание, поглощение и рассеяние квантов электромагнитного излучения (рис. 10). Таким образом, изменение интенсивности излучения I_ν вдоль выделенного бесконечно малого объема можно записать в виде уравнения баланса энергии излучения (33):

$$\frac{1}{c} \cdot \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \frac{\partial I_\nu}{\partial s} = - (K_{abs,\nu} + K_{sca,\nu}) \cdot I_\nu + K_{abs,\nu} \cdot I_\nu + \frac{K_{sca,\nu}}{4\pi} \times \int_{4\pi} (P(\Omega_i \rightarrow \Omega) \cdot I_\nu(\Omega_i)) d\Omega_i \quad (33)$$

где K_{abs} и K_{sca} – оптические коэффициенты поглощения и рассеивания [43, с. 41].

Здесь первое и второе слагаемые характеризуют изменение со временем вдоль бесконечно малого объема.

В связи с тем, что изменение интенсивности излучения во времени значительно меньше скорости света, то первым слагаемым в уравнении баланса лучистой энергии можно пренебречь. Третье слагаемое характеризует уменьшение интенсивности излучения вследствие ее рассеивания либо поглощения из одного направления в другие. Четвертое и пятое слагаемые представляют собой увеличение спектральной интенсивности из-за собственного излучения среды и за счет поглощения энергии излучения с других направлений.

Вследствие того, что система находится в термодинамическом равновесии и температура излучаемых и поглощаемых лучистую энергию тел одинакова, тогда можно считать коэффициенты поглощения и излучения равными. Также примем, что все тела, участвующие в теплопереносе излучением, являются серыми излучателями [43, с. 42]:

$$I = \int_0^\infty I_\nu d\nu, \quad (34)$$

$$K_{abs} = \int_0^{\infty} K_{abs,v} dv, \quad (35)$$

$$K_{sca} = \int_0^{\infty} K_{sca,v} dv,$$

Таким образом, используя приведенные выражения для расчета интегральной интенсивности излучения (34) и интегральных оптических коэффициентов (35) и принимая во внимание формулу, описывающую интенсивность абсолютно черного тела (36):

$$I_b = \int_0^{\infty} I_{b,v} dv = \frac{\sigma}{\pi} \cdot T^4 \quad (36)$$

выражение (33) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_v}{\partial s} = & - (K_{abs} + K_{sca}) \cdot I_v + K_{abs} \cdot \frac{\sigma}{\pi} T^4 + \frac{K_{sca}}{4\pi} \times \\ & \times \int_{4\pi} (P(\Omega_i \rightarrow \Omega) \cdot I_v(\Omega_i)) d\Omega_i, \end{aligned} \quad (37)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Общее аналитическое решение уравнения (37) получить невозможно. Для расчета теплообмена излучением в топочных камерах используют один из нескольких существующих групп моделей: статистические модели, зональные методы и модели потоков [43-44].

В монографии была использована модель потока, согласно которой уравнение (37) интегрируется по телесным углам, для которых потоки предполагаются независимыми от направления. В результате интегро-дифференциальное уравнение (37) сводится к системе связанных дифференциальных уравнений.

Для трехмерной декартовой геометрии в шестипоточных моделях [45] поток излучения делится на шесть частей по положительным и отрицательным координатным направлениям. После этого распределение интенсивности аппроксимируется с помощью степенного ряда Тэйлора и сферических функций. Будем принимать во внимание только первые два члена этого ряда:

$$I = A_i (\vec{n}_i \cdot \Omega) + B_i (\vec{n}_i \cdot \Omega)^2, \quad (38)$$

где коэффициенты A_i и B_i записываются следующим образом:

$$A_i = \frac{1}{2} \cdot (I_i^+ - I_i^-), \quad (39)$$

$$B_i = \frac{1}{2} \cdot (I_i^+ + I_i^-). \quad (40)$$

После подстановки соотношения (38) в уравнение переноса лучистой энергии (37) его необходимо проинтегрировать по всем шести направлениям с постоянным углом интегрирования $\Omega_i = 2\pi$ (рассеиванием в данном случае можно пренебречь – $K_{sca} = 0$).

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial (B_i \cdot b_{1,i})}{\partial x_1} \\ \frac{\partial (B_i \cdot b_{2,i})}{\partial x_2} \\ \frac{\partial (B_i \cdot b_{3,i})}{\partial x_3} \end{pmatrix} = -K_{abs} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix}. \quad (41)$$

Проинтегрировав уравнение (37) с учетом (38) по бесконечно малым углам и подставив в полученное выражение (41), получим систему дифференциальных уравнений шестипоточной модели:

$$\left(\begin{array}{c} \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\frac{1}{K_{abs}} \frac{\partial (B_i \cdot b_{1,i})}{\partial x_1} \right] \\ \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\frac{1}{K_{abs}} \frac{\partial (B_i \cdot b_{2,i})}{\partial x_2} \right] \\ \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\frac{1}{K_{abs}} \frac{\partial (B_i \cdot b_{3,i})}{\partial x_3} \right] \end{array} \right) = K_{abs} \cdot \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix} - K_{abs} \cdot \frac{\sigma}{\pi} \cdot \begin{pmatrix} T^4 \\ T^4 \\ T^4 \end{pmatrix} \quad (42)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{1}{K_{abs}} \frac{\partial (B_i \cdot b_{i,j})}{\partial x_j} \right] = K_{abs} \cdot B_j - K_{abs} \cdot \frac{\sigma}{\pi} \cdot T^4. \quad (43)$$

где b_{ij} – матричный коэффициент, который определяется как:

$$b_{ij} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} 1 + x_i^{//2} & \frac{1 - x_i^{//2}}{2} & \frac{1 - x_i^{//2}}{2} \\ \frac{1 - x_i^{//2}}{2} & 1 + x_i^{//2} & \frac{1 - x_i^{//2}}{2} \\ \frac{1 - x_i^{//2}}{2} & \frac{1 - x_i^{//2}}{2} & 1 + x_i^{//2} \end{pmatrix}. \quad (44)$$

Параметры $x_i^{//}$ зависят от интенсивности направляющего излучения и определяются соотношением:

$$x_i^{//} = \gamma_{sca} \cdot \frac{B_i}{\sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}}. \quad (45)$$

Значение постоянной γ_{sca} определено в работе [46] и принимается равным 0,1. Источниковый член, связанный с лучистым

теплопереносом, в уравнении баланса энергии (7) получается путем интегрирования суммарной интенсивности по телесному углу $\Omega = 4\pi$ и записывается:

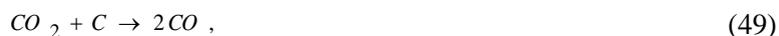
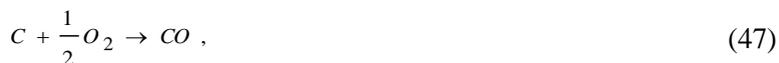
$$S_{h, Scc} = \frac{4\pi}{3} \cdot K_{abs} (B_1 + B_2 + B_3) - 4 \cdot K_{abs} \cdot \sigma \cdot T^4 . \quad (46)$$

3.2. Уравнения, описывающие формирование вредных веществ, которые образуются при сжигании пылеугольного топлива

В течение ряда лет было известно, что определенные примеси в угле могут оказывать значительное влияние на типы выбросов, производимых во время горения угля. Наиболее токсичными из них являются оксиды азота (NO_x), углерода (CO , CO_2) и серы (SO_x). В топках котельных установок используют самый распространенный в природе окислитель – атмосферный воздух, 21% по объему или 23,2% по массе которого составляет кислород.

3.2.1. Образование оксидов углерода

Горение коксового остатка является более медленным процессом, чем выход летучих, и, следовательно, определяет время полного сгорания в топочной камере, которое для угольной пыли в топочной камере имеет порядок нескольких секунд. Общий механизм реакции является сложным, и наиболее важными являются гетерогенные реакции, протекающие на поверхности угольных частиц (47-50), а также гомогенные (51-53) в газовом объеме.





В первых двух (47-48) гетерогенных реакциях образуются оба оксида на границе двух фаз, то есть на поверхности коксового остатка. При температуре около 1200 К, оба оксида CO и CO_2 образуются в равных количествах; с увеличением температуры увеличивается скорость реакции образования монооксида углерода CO [47].

Общая скорость горения коксового остатка определяется диффузией кислорода из общего газового потока к поверхности и далее в объем коксовой частицы, а также скоростью химической реакции реагирования углерода C с кислородом O_2 . Проникновение воздуха в поры коксовой частицы затрудняется за счет того, что у её поверхности существует тонкий пограничный слой, в котором протекают реакции догорания летучих компонент. Горение внутри частицы сопровождается изменением ее размера и плотности. Таким образом, в случае равенства концентрации окислителя в газовом потоке и на поверхности частицы общая скорость реакции ограничена только собственной скоростью химической реакции.

Моделирование всех химических реакций (в том числе промежуточных), протекающих при горении, возможно только для простых случаев, при которых известны все возможные взаимодействия исходных веществ и продуктов горения. В этой связи, в монографии была использована модель, в которой учитываются только реакции основных компонент, физико-химических реагирующих потоков в окислительной среде.

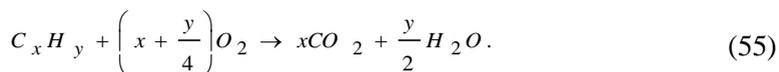
Образование вредных веществ моделировалось с помощью реакционно-кинетических моделей, учитывающих протекание

реакций при наличии неустойчивых продуктов промежуточных реакций [43, с. 50].

Прямая реакция между CO и O_2 :



имеет высокую энергию активации (48 ккал/моль) и тем не менее протекает очень медленно даже при очень высоких температурах. Кроме того, образовавшийся атом кислорода O не приводит к каким-либо быстрым цепным разветвленным реакциям. Однако даже при минимальном присутствии водорода (H_2), формируются радикалы OH . Процесс формирования диоксида углерода CO_2 может быть представлен в виде двухступенчатой реакции: первый этап – это разложение молекул топлива до молекул монооксида углерода CO и воды H_2O , второй этап – окисление до CO_2 . При очень высоких температурах и достаточно высоком содержании кислорода происходит более быстрое самоокисление до диоксида углерода CO_2 . Этот процесс можно описать с помощью одноступенчатой реакции:



В топочных камерах эмиссия диоксида углерода CO_2 представляет собой одну из сложнейших проблем при моделировании.

3.2.2. Образование оксидов серы

Одним из сильнейших загрязнителей атмосферы является диоксид серы SO_2 , составляющий более 95% промышленных выбросов газообразных соединений серы. Наибольшее количество диоксида серы образуется при сжигании таких органических топлив, как каменный уголь и нефть, в составе которых постоянно присутствуют серосодержащие соединения.

Содержание серы S в угле колеблется от очень малых количеств до нескольких весовых процентов. Сера в состав топлива входит в трех видах: органическая (входящая в состав органических соединений), пиритная (входящая в состав пиритов и

марказита) и сульфатная (входящая в состав неорганических сульфатов) сера. Общее количество серы, входящей в состав органического топлива, является суммой различных видов серы в органической и минеральной массе топлива [48].

При окислительном сжигании из серы топлива образуется диоксид серы SO_2 (56), который, растворяясь в атмосферной влаге, образует сернистую кислоту средней силы H_2SO_3 (57):



Часть диоксида серы в воздухе окисляется до триоксида серы SO_3 (58), что, в свою очередь при взаимодействии с водяными парами дает сильную серную кислоту H_2SO_4 , которая, как и диоксид серы, растворяется в атмосферной влаге (59).



Результатом этих процессов являются кислотные дожди, время от времени выпадающие на поверхность Земли не только в окрестностях промышленных предприятий, но и в соседних с ними районах.

В связи с этим на промышленных предприятиях введены жесткие меры по контролю выбросов оксидов серы в атмосферу, а также создание газоочистных сооружений, обеспечивающих производство энергии в соответствии с нормативами содержания диоксида серы SO_2 в дымовых газах. Предельно-допустимые значения концентрации SO_x приведены в таблице 2 [49].

Таблица 2

**Технические удельные нормативы эмиссий оксидов серы
SO_x в атмосфере**

Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу оксидов серы реконструируемых и вновь вводимых котельных установок на действующих ТЭС для твердых и жидких видов топлива				
Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводительность котла D, т/ч)	Приведенное содержание серы S, % х пр кг/МДж	Массовый выброс SO _x на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс SO _x , кг/т.у.т	Массовая концентрация SO _x в дымовых газах при α=1,4, мг/м ³ *
до 299 (до 420)	0,045 и менее более 0,045	0,875	25,7	2000
		1,5	44,0	3400
300 и более (420 и более)	0,045 и менее более 0,045	0,875	25,7	2000
		1,3	38,0	3000
Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу оксидов серы для действующих котельных установок ТЭС до реконструкции, для твердых и жидких видов топлива				
до 299 (до 420)	0,045 и менее более 0,045	0,875	25,7	2 000
		1,5	44,0	3 400
300 и более (420 и более)	0,045 и менее более 0,045	0,875	25,7	2 000
		1,3	38,0	3 000

3.2.3. Образование оксидов азота

Также одними из наиболее вредных веществ, загрязняющих атмосферу, являются оксиды азота – монооксид азота *NO*, диоксид азота *NO₂*, азотистый ангидрид *N₂O₃*, димер диоксида азота *N₂O₄*, азотный ангидрид *N₂O₅*. Причем источниками оксидов являются как естественные (почвенная эмиссия оксидов азота, грозовые разряды, горение биомассы), так и антропогенные (сжигание ископаемого топлива, горение горючих и др.) процессы.

Около 40 % от общего количества выбрасываемых в атмосферу оксидов азота приходится на долю тепловых электростанций. Оксиды азота образуются за счет содержания азота в воздухе и азотсодержащих компонент органической массы топлива. При сжигании топлива в автомобилях и на тепловых электростанциях основными образующимися оксидами являются монооксид *NO*

и диоксид азота NO_2 . При этом примерно 90% оксидов азота образуется в форме монооксида азота NO , а оставшиеся 10% приходятся на диоксид азота NO_2 .

Оксиды азота NO_x занимают второе место после диоксида серы SO_2 по вкладу в увеличение кислотности осадков, а длительное воздействие диоксида азота NO_2 ухудшает рост некоторых растений. Значимость атмосферных эффектов оксидов азота связана с ухудшением видимости. Диоксид азота NO_2 играет важную роль в образовании фотохимического смога. В связи с этим выбросы оксидов азота теплоэлектростанциями строго контролируются. Нормы выбросов оксидов азота для котельных установок ТЭС представлены в таблице 3 [49].

Таблица 3

Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу оксидов азота NO_x для котельных установок ТЭС

Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу оксидов азота для реконструируемых и вновь вводимых котельных установок на действующих ТЭС с 1 января 2013 года, для твердых, жидких и газообразных видов топлива				
Тепловая мощность котлов Q, МВт (паропроизводительность котла D, т/ч)	Вид топлива	Массовый выброс NO_x на единицу тепловой энергии, г/МДж	Массовый выброс NO_x , кг/т.у.т	Массовая концентрация NO_x в дымовых газах, при $\alpha=1,4$, мг/м ^{3*}
1	2	3	4	5
до 299 (до 420)	газ	0,088	2,58	255
	мазут	0,103	3,02	290
	бурый уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,188	5,47	500
	жидкое шлакоудаление	0,206	6,05	550
	каменный уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,208	6,10	570
	жидкое шлакоудаление	0,256	7,49	700
300 и более	газ	0,100	2,93	290

(420 и более)	мазут	0,124	3,64	350
	бурый уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,214	6,27	570
	жидкое шлакоудаление	-	-	-
	каменный уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,237	6,96	650
	жидкое шлакоудаление	0,292	8,56	800
Технические удельные нормативы эмиссий в атмосферу оксидов азота для действующих котельных установок ТЭС до реконструкции, для твердых, жидких и газообразных видов топлива				
до 299 (до 420)	газ	0,121	3,54	350
	мазут	0,142	4,16	400
	бурый уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,225	6,60	600
	жидкое шлакоудаление	0,244	7,15	650
	каменный уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,248	7,28	680
	жидкое шлакоудаление	0,317	9,10	850
300 и более (420 и более)	газ	0,138	4,05	400
	мазут	0,178	5,21	500
	бурый уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,225	6,60	600
	жидкое шлакоудаление	-	-	-
	каменный уголь:			
	твердое шлакоудаление	0,310	9,10	850
	жидкое шлакоудаление	0,383	11,24	1050

В настоящее время различают 3 механизма образования оксидов азота: из азота воздуха образуются термические NO_x (механизм Зельдовича) и быстрые NO_x (механизм Фенимора); из

связанного с органической массой азота топлива (угля, мазута) образуются топливные NO_x .

Термические оксиды формируются вследствие окисления атмосферного азота при высоких температурах. Механизм их образования был предложен Я.Б. Зельдовичем [41, 50]. Им было доказано, что образование оксидов азота не связано непосредственно с реакцией горения, а идет через диссоциацию молекулярного кислорода при температурах выше 1800 К. Данный механизм состоит из следующих элементарных реакций (60-63):



Образуются термические NO_x при максимальной температуре, т.е. в той зоне факела, где уже сгорела основная масса топлива.

Механизм образования быстрых NO_x предложен Фенимором по результатам измерений концентрации NO над плоским углеводородным пламенем [51]. Действительный механизм образования оксидов азота во фронте пламени более сложный, поскольку в нем участвуют углеводородные радикалы CH (62, 64-66):



Быстрые оксиды азота образуются во фронте пламени и зависят главным образом от стехиометрического соотношения в месте их образования. Следовательно, существенное количество

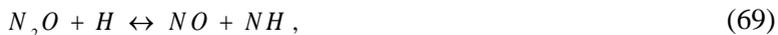
быстрых NO_x образуется только при сжигании газа с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения меньше единицы.

Топливные оксиды азота образуются в результате превращения топливного (или, так называемого топливно-связанного) азота, содержащегося в мазуте и всех видах твердого топлива. Поэтому при сжигании угольной пыли доля топливных NO_x весьма велика. Значительная часть (до 80 %) NO_x образуется на начальном участке факела, в зоне выхода и воспламенения летучих веществ.

Также NO может образовываться из закиси азота N_2O . Этот процесс аналогичен процессу образования термических NO_x . Однако в присутствии третьей частицы M в этой реакции образуется также молекула N_2O (67) (впервые эта реакция была предложена в работе [52]):



Молекула N_2O может затем прореагировать с атомом кислорода O (68), атомом водорода H (69) и молекулой монооксида углерода CO (70) и образовать NO [53]:



При сжигании угольной пыли в топочных камерах котлов ТЭС имеют место все три механизма образования оксидов азота. Существует множество кинетических моделей образования оксидов азота для численного моделирования. Наиболее распространенной среди них является модель, предложенная Митчеллом и Тарбеллом [54].

Данная кинетическая модель учитывает реакции пиролиза угольной частицы, гомогенное горение углеводородов, гетеро-

генное горение кокса, а также образование топливных и термических NO_x . На рисунке 11 представлена схема образования оксидов азота, представленная в модели Mitchell-Tarbell.

Согласно предложенной схеме, образование NO_x происходит следующим образом: при нагреве угольной частицы происходит пиролиз с выделением летучих, в состав которых входят углеводородные компоненты C_nH_m , водяные пары H_2O и азот N . При этом топливно-связанный азот переходит в газообразные цианиды, в частности, в синильную кислоту HCN (71)

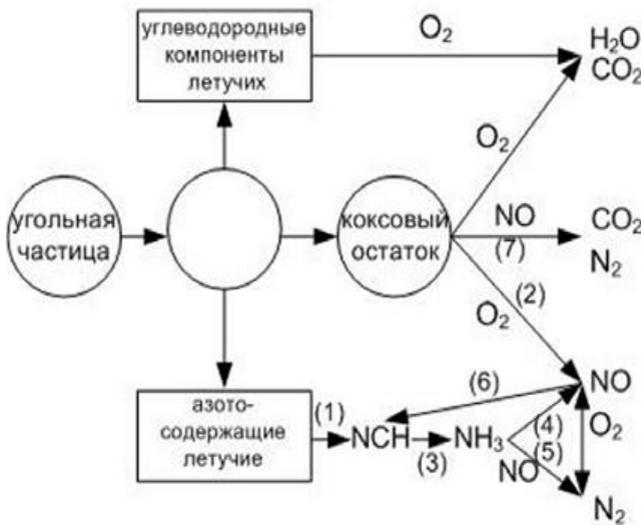
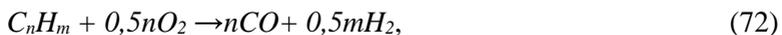
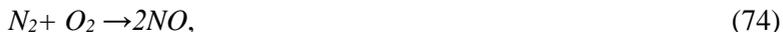


Рисунок 11 – Схема кинетической модели формирования оксидов азота, предложенная Mitchell-Tarbell [54]

Далее происходит гомогенное горение углеводородных летучих (72-75):





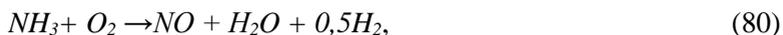
и гетерогенное горение коксового остатка и азота, входящего в состав кокса (76-78):



Образовавшиеся молекулы HCN переходят в амины NH_3 :



которые реагируют с кислородом (с образованием оксида азота) (80) или с оксидом азота (с восстановлением до молекулярного азота) (81):



Также очень важной является реакция образования цианидов в результате взаимодействия углеводородов с оксидом азота:



В монографии используется численное моделирование процесса генерации оксидов азота NO_x при горении угольной пыли на базе модели Mitchell-Tarbell [54, p. 307].

Учитывая вышесказанное, в главе 4 монографии были проведены вычислительные эксперименты по исследованию процессов теплопереноса при наличии химически реагирующих потоков для монодисперсного, диаметр пылеугольных частиц которого равен 60 мкм, и полидисперсного (с соответствующим реальному распределением частиц по размерам $d_p=10$ мкм – 10%;

$d_p=30$ мкм – 20%; $d_p=60$ мкм – 40%; $d_p=100$ мкм – 20%; $d_p=120$ мкм – 10%) [55] пылеугольных потоков.

Были получены основные характеристики процессов тепломассопереноса: аэродинамики потоков – вектор полной скорости V , давления p ; теплопереноса – поля температуры T и химической энергии Q_{chem} ; массопереноса – концентрационные поля кислорода O_2 , входящего в состав окислителя, и продуктов сгорания – оксидов углерода CO , CO_2 и оксида азота NO_x , при горении моно- и полидисперсной пыли Экибастузского угля в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ НА ПРОЦЕСС СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

4.1. Влияние тонины помола

Под тониной помола понимают степень измельчения топлива, или весовое количество мелких и более крупных частиц в помоле. Пыль, полученная в результате ее размола, неоднородна по размерам частиц. Практическое определение тонины помола производится с помощью специальных сит с определенным количеством отверстий на квадратный сантиметр: процентное содержание веса остатка к весу пробы дает представление о количестве частиц того или иного размера [61].

Выбор тонкости помола (равный 14-16% на Аксуской ТЭС) в значительной мере обуславливается затрудненными условиями воспламенения факела Экибастузского угля. В частности, согласно данным [62], по количеству горючих летучих, отнесенных к рабочей массе топлива, Экибастузский уголь обычной зольности ($A^P = 35-39\%$) приближается к тощим углям.

Опыт освоения топочных котлов ПК-39 показывает, что вихревые горелки с достаточной круткой первичного и вторичного воздуха обеспечивают устойчивое и раннее зажигание факела и экономичное выгорание топлива при $R_{90} = 16\%$. Если дополнительно учесть, что высота современных мощных парогенераторов существенно превышает длину факела, необходимую для полного выгорания топлива, то возможно смещение величины оптимальной тонкости помола в сторону ее угрубления. Угрубление помола заметно снижает затраты на пылеприготовление [62, с. 38-43].

С другой стороны, угрубление помола имеет и негативные последствия. В частности, при этом возможно снижение устойчивости горения факела, так как уменьшается поверхность контакта топлива с окислителем. Из-за смещения ядра факела возможно возрастание потерь тепла с механическим недожогом.

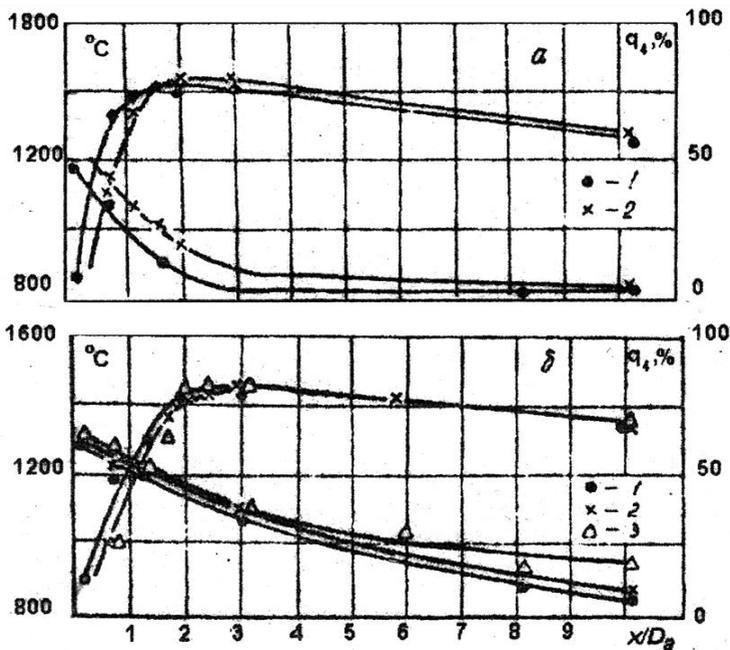
Повышается золовой износ конвективных поверхностей нагрева. Таким образом, из краткого рассмотрения влияния тонины помола на надежность и экономичность работы котлов видно, что она является одним из основных параметров, определяющих топочный процесс.

Эксперименты по изучению влияния тонкости помола угольной пыли на горение пылеугольного факела Экибастузского угля проводились на факельном стенде КазНИИЭ и на натурном котле ПК-39 Аксуской ТЭС [55, 62]. При этом в огневых опытах на стендах сжигалась угольная пыль с тониной помола $R_{90} = 10, 15, 27, 31$ и 38% , а на натурном котле – с $R_{90} = 10, 15$ и 27% [56-57].

На рисунке 12 представлено влияние тонины помола высокозольного Экибастузского угля на температуру факела вдоль оси топочной камеры исследуемого котла. Следует отметить, что до момента зажигания и стабилизации пламени за температуру факела была принята начальная температура аэросмеси, а далее, по длине факела, температура усреднялась [63].

На рисунке 13 приведены совмещенные поперечные профили температур в начальных сечениях факела, а на рисунке 14 представлен график изменения температуры и выгорания топлива по длине факела для различных значений зольности и тонкости помола.

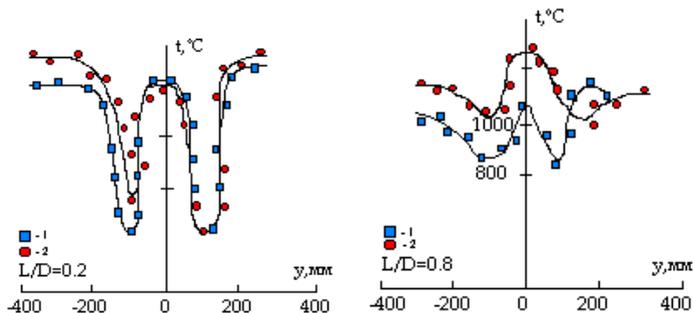
Анализ рисунков 12 и 13 показывает, что огрубление помола приводит к увеличению температуры и смещению местоположения ядра факела, что говорит о задержке в воспламенении пылевоздушной смеси. Так при увеличении остатка на сите R_{90} с 10% до 38% ядро факела смещается от расстояния $1,6$ до $2,4$ калибра от устья горелки. Также из графика можно видеть, что утонение помола приводит к интенсификации процесса горения, и как следствие, к более тщательному выгоранию пыли. Различия в температуре газов в сечении $x/D_a = 10$ составляют порядка 100°C , а разница в степени выгорания пыли в этом сечении может достигать $10-15\%$.



для тонкой (а) и грубой (б) пыли: а - 1, 2 - соответственно $R_{90} = 10$ и 15% ;
 б - 1, 2, 3 - соответственно $R_{90} = 27, 31$ и 38%

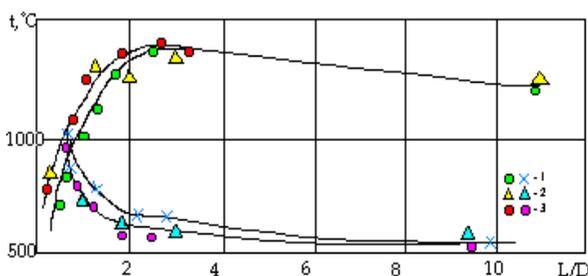
Рисунок 12 – Изменение температуры и выгорания топлива [55, 62]

В начальных же сечениях $x/D_a = 0,2$ и $x/D_a = 0,8$ (рисунки 12-14) за счет затягивания процесса воспламенения более грубой пыли значения ее температуры ниже, чем при сжигании более тонкой пыли. Так, в сечении $x/D_a = 0,8$ различия в температурах при горении угольной пыли с тониной помола $R_{90} = 14 \div 16\%$ и $R_{90} = 10 \div 11\%$ составляют порядка $200\text{ }^\circ\text{C}$. В топочных камерах при сжигании Экибастузского угля обычной зольности в большей степени используется пыль с тониной помола $R_{90} = 14 \div 16\%$. [63, с. 104].



1 – $A^p = 53\%$, $R_{90} = 14 \div 16\%$, 2 – $A^p = 53\%$, $R_{90} = 10 \div 11\%$

Рисунок 13 – Совмещенные поперечные профили температур в начальных сечениях факела [55, 62]



1 – $A^p=53\%$, $R_{90}=10 \div 11\%$; 2 – $A^p=53\%$, $R_{90}=14 \div 16\%$;
3 – $A^p=44\%$, $R_{90}=14 \div 16\%$

Рисунок 14 – Изменение температуры и выгорание топлива по длине факела [55, 62]

Однако увеличение зольности, согласно рисунку 14, заметно затягивает воспламенение пылеугольного потока и снижает устойчивость зажигания факела. В связи с этим высокозольный уголь следует сильнее утонять, так как увеличивается реагирующая площадь, что приводит к стабилизации факела. Поэтому при проведении опытов с сжиганием углей повышенной зольности помол был утонен до $R_{90} = 10\%$ [63, с. 104].

4.2. Сравнительный анализ результатов вычислительных экспериментов по сжиганию моно- и полидисперсного пылеугольного факела

В монографии представлены результаты вычислительного эксперимента по 3D-моделированию турбулентного горения пылеугольного факела в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС. Для проведения вычислительных экспериментов были выбраны монодисперсный ($d_p=60$ мкм) и полидисперсный пылеугольный факелы, в которых частицы распределяются следующим образом: $d_p=10$ мкм – 10%; $d_p=30$ мкм – 20%; $d_p=60$ мкм – 40%; $d_p=100$ мкм – 20%; $d_p=120$ мкм – 10%, что соответствует реальному процессу горения угля на ТЭС [64].

На рисунках 15–17 представлены сравнительные графики распределения основных характеристик процесса горения – температуры T , химической энергии Q_{chem} и концентрации кислорода O_2 . Концентрации продуктов сгорания (оксидов углерода CO и CO_2) изображены на рисунках 18–19. Также на графиках нанесены результаты натурных экспериментов, описанные в работах Б.К. Алиярова [55, 62].

На рисунке 15 представлен график сравнения распределений средней температуры для полидисперсного и монодисперсного (60 мкм) факелов. Из рисунка можно видеть, что температуры полидисперсного и монодисперсного пылеугольного факелов незначительно различаются только в области расположения горелок, т.е. в области активного горения и на выходе из топочной камеры. Средняя температура полидисперсного факела в этих областях ниже, что объясняется неоднородностью помола угольной пыли и, соответственно, наличием крупных фракций в нем.

Как известно, с увеличением размеров угольной частицы этапы сжигания затягиваются и частица горит дольше, что приводит к выделению чуть меньшего количества тепла в процессе горения. Нанесенные на графике распределения температуры экспериментальные точки показывают хорошее согласование численного моделирования с натурным экспериментом [58–60].

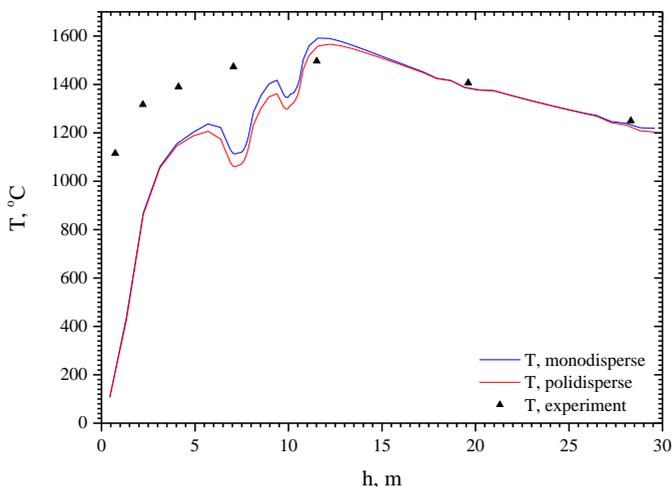


Рисунок 15 – Распределение средней температуры T в моно- и полидисперсном факелах по высоте топочной камеры и сравнение с экспериментом [55, 62]

На рисунке 16 показано распределение средней химической энергии для полидисперсного факела в сравнении с горением монодисперсного. Из рисунка можно видеть, что количество тепла, выделяемое в монодисперсном и полидисперсном факелах, практически одинаково, за исключением области расположения горелок.

Химическая энергия в нижнем ярусе горелок для монодисперсного пылеугольного факела больше, чем для полидисперсного факела, в то время как на уровне расположения верхних горелок значения химической энергии полидисперсного факела превышают значения монодисперсного факела. Это может быть связано с тем, что в области расположения нижнего яруса горелок за счет наличия более крупных фракций в полидисперсном факеле химической энергии Q_{chem} в результате процесса горения выделяется меньше, чем в монодисперсном.

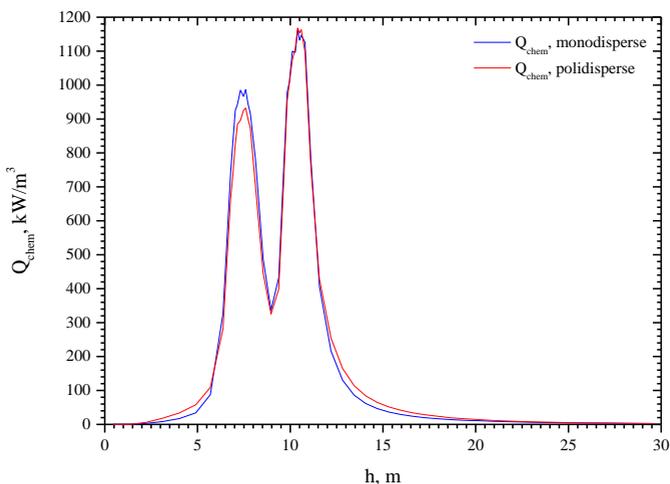


Рисунок 16 – Распределение средних значений химической энергии Q_{chem} по высоте топочной камеры котла ПК-39 при горении моно- и полидисперсного пылеугольных факелов

По мере продвижения от нижнего яруса к верхнему несгоревшая часть аэросмеси, подаваемой через нижние сопла, догорают вместе с аэросмесью, подаваемой через верхние сопла, что приводит к увеличению химической энергии в этой области. На выходе из топочного пространства энергия, выделяемая за счет протекания химических реакций, не выделяется, что показывает низкую скорость протекания химических реакций.

На рисунке 17 приведен сравнительный график распределения концентрации кислорода O_2 для моно- и полидисперсного пылеугольных факелов. Анализ рисунка показывает, что при сжигании угольного топлива полидисперсного состава наблюдается повышенное содержание кислорода по всему объему топочной камеры котла, чем для монодисперсного. Это происходит из-за того, что для монодисперсного факела наблюдается температура с более высокими значениями, а также дополнительно расхода кислорода вследствие интенсификации процессов теп-

ломассопереноса в объеме топочной камеры. Наибольшее значение концентрации кислорода приходится на область расположения холодной воронки.

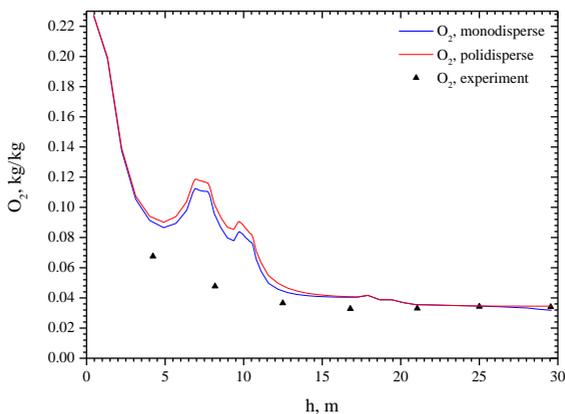


Рисунок 17 – Распределение средней концентрации кислорода O_2 по высоте топочной камеры котла ПК-39 в моно- и полидисперсном факелах и сравнение с экспериментом [55, 62]

Картина образования окислов углерода (CO и CO_2) представлена на рисунках 18-19. На рисунке 18 представлено распределение монооксида углерода CO по высоте топочной камеры для моно- и полидисперсного пылеугольного факела. Анализируя данный график, можно заметить, что наибольшая концентрация CO и в случае монодисперсного факела, и в случае полидисперсного факела образуется в зоне активного горения, причем значения для полидисперсного факела больше, чем для монодисперсного.

В области расположения пояса горелок разница в концентрации незначительна: на уровне нижних горелок концентрация CO монодисперсного факела больше соответствующих значений полидисперсного факела, а на высоте расположения верхних горелок концентрация монооксида углерода CO больше в полидисперсном, что согласуется с представленным выше графиком распределения химической энергии (рисунок 16). По мере продвижения к выходу из топочной камеры концентрация окиси углерода уменьшается и разница в значениях так же уменьшается.

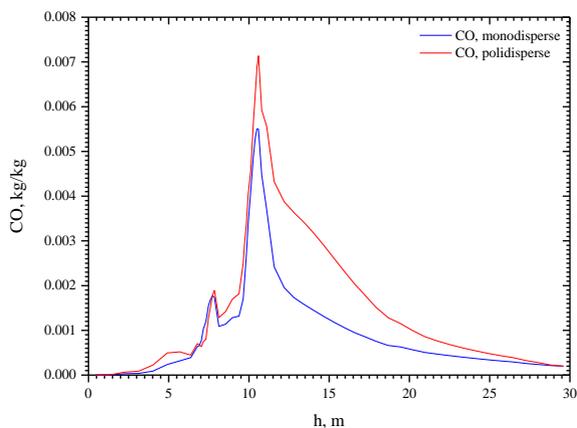


Рисунок 18 – Распределение средней концентрации монооксида углерода CO по высоте топочной камеры котла ПК-39 в моно- и полидисперсном факалах

Рисунок 19 представляет собой сравнительный анализ распределения концентрации диоксида углерода CO_2 по высоте топочной камеры в поли- и монодисперсном факалах.

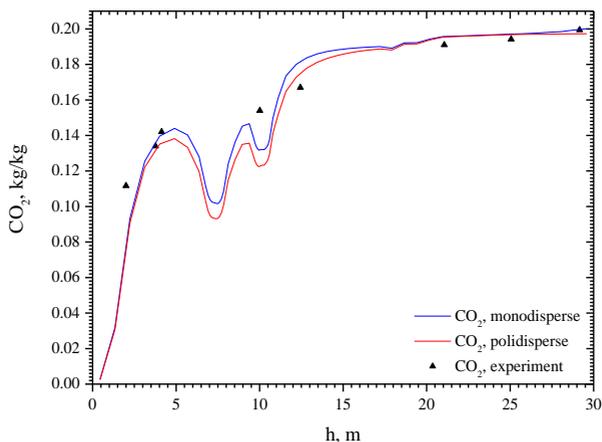


Рисунок 19 – Распределение средней концентрации диоксида углерода CO_2 по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС в моно- и полидисперсном факалах и сравнение с экспериментом [55, 62]

Минимумы концентрации двуокиси углерода приходятся на места подачи пылеугольного топлива и окислителя. По мере удаления от области расположения горелок происходит повышение значений концентрации углекислого газа и на выходе из топочной камеры достигает максимума [65, 66].

Ниже, в таблице 4 для наибольшей наглядности приведены численные значения основных характеристик (температуры T , концентрации кислорода O_2 , окиси CO и двуокиси углерода CO_2) процесса горения монодисперсного и полидисперсного пылеугольных факелов на выходе из топочной камеры котла ПК-39 в сравнении с результатами проведенных натурных экспериментов [55, 62] непосредственно на Аксуской ТЭС.

Таблица 4

Значения основных характеристик процесса горения монодисперсного и полидисперсного пылеугольного факелов в сравнении с экспериментальными данными

№	Величина	Единица измерения	Монодисперсный факел	Полидисперсный факел	Эксперимент
1	T	$^{\circ}C$	1219	1203	1250
2	O_2	кг/кг	0.0318	0.0345	0.034
3	CO	кг/кг	$2.01 \cdot 10^{-4}$	$1.97 \cdot 10^{-4}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$
4	CO_2	кг/кг	0.200	0.197	0.198

Анализ таблицы 4 показал, что расчетные данные численного эксперимента по горению полидисперсного факела более точно нежели данные монодисперсного факела совпадают с экспериментальными данными, полученными непосредственно на Аксуской ТЭС [55, 62]. В этой связи, учитывая тот факт, что в реальных промышленных условиях пылеугольный факел в большинстве случаев представляет собой только полидисперсную среду, содержащую частицы, диаметр которых лежит в широком диапазоне, несмотря на усложнение задачи и увеличение времени, было принято дальнейшие исследования в работе проводить для полидисперсного пылеугольного потока.

4.3. Результаты вычислительных экспериментов по сжиганию полидисперсного пылеугольного топлива

В связи с вышесказанным, в настоящей главе монографии приведены результаты численного моделирования процесса сжигания угля в пылевидном состоянии в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС с учетом различных диаметров угольных частиц [67-70]. Вычислительные эксперименты и все дальнейшие расчеты были проведены для полидисперсного пылеугольного факела, диаметры угольных частиц которого подчиняются следующему распределению [55, 62]:

- $d_p=10$ мкм – 10%;
- $d_p=30$ мкм – 20%;
- $d_p=60$ мкм – 40%;
- $d_p=100$ мкм – 20%;
- $d_p=120$ мкм – 10%.

Ниже, на рисунках 20-32 представлены результаты численного моделирования горения полидисперсного пылеугольного факела: аэродинамические характеристики течения (поле вектора полной скорости V и давления p), тепловые (поля температуры T и химической энергии Q_{chem} , выделяемой в процессе горения) и концентрационные (концентрации кислорода O_2 , оксидов углерода CO , CO_2 и оксида азота NO) характеристики [72-74].

На рисунке 20 представлено графическое распределение вектора полной скорости потока горючей V смеси в центральных продольных сечениях (а, б), в области расположения нижнего яруса горелок (в) и на выходе (г) из топочной камеры котла ПК-39. Вектор полной скорости в общем виде определяется следующим образом:

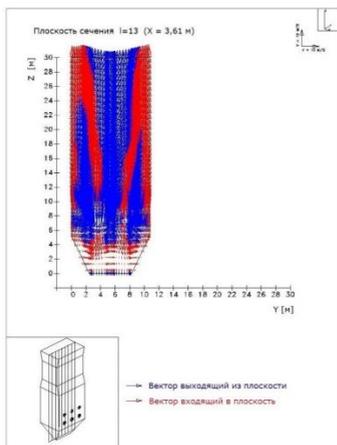
$$\vec{V} = U \cdot \vec{i} + V \cdot \vec{j} + W \cdot \vec{k}, \quad (83)$$

а значение длины вектора полной скорости:

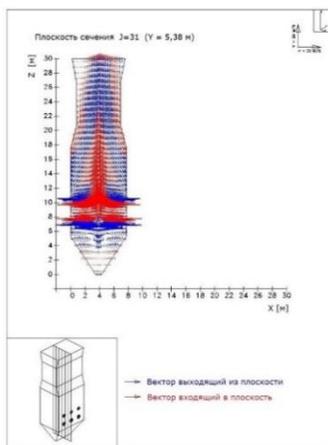
$$V = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}. \quad (84)$$

Красным цветом на рисунке 20 обозначено направление потока в выбранную плоскость сечения, а синим – из выбранной

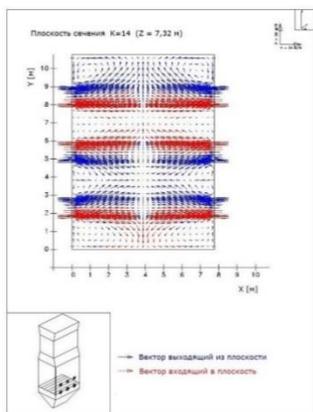
плоскости сечения (встречный поток), а длина стрелок указывает на величину скорости в выбранных сечениях топочной камеры. Можно видеть, как топливо и окислитель через горелочные устройства (рисунок 20 б, в) поступают в топочную камеру котла.



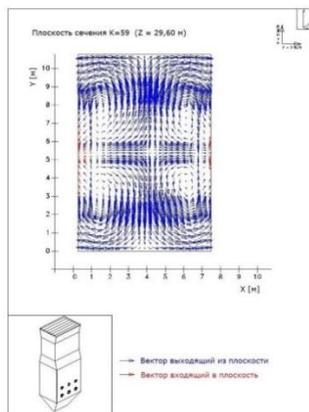
а) Плоскость сечения X=3,61м



б) Плоскость сечения Y=5,38м



в) Плоскость сечения Z=7,32 м



г) Плоскость сечения Z=29,60 м

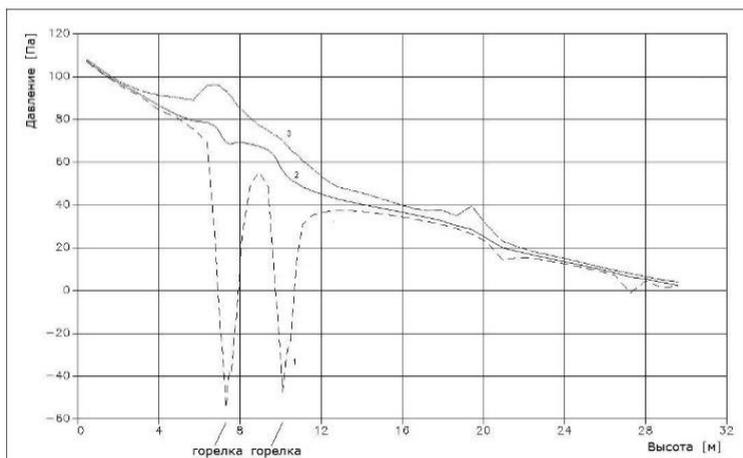
а, б) – в центральные продольные сечения, в) – в области горелок, г) – на выходе из топочной камеры

Рисунок 20 – Распределение векторов полной скорости в топочной камере котла ПК-39 в различных сечениях

Анализ рисунка 20 указывает на то, что взаимное проникновение встречных струй турбулизирует поток. В результате несколько разреженного заполнения области камеры над горелками у передней и задней стен развиваются вихри. Часть восходящего потока направляется на выход из топки. Часть потока рециркулирует, образуя у стен в области над горелками вихревые зоны.

Наличие вращения потоков в пристеночной зоне способствует равномерному обогреву поверхностей и снижению шлакования экранов, что позволяет уменьшить коррозию и тепловой перегрев. По мере удаления от плоскости расположения горелок поле скоростей выравнивается, восходящий поток расширяется и вихревой характер течения ослабевает.

На рисунке 21 представлено распределение максимальных, средних и минимальных значений (по поперечному сечению котла) избыточного давления p , возникающего в результате горения, по высоте топочной камеры. Как можно видеть из рисунка, наиболее сильное изменение давления наблюдается в области расположения горелок, где резко меняются скорости потоков за счет подачи топлива и окислителя, то есть в местах наиболее интенсивного прохождения химических реакций. По мере удаления к выходу топочной камеры давление монотонно убывает.



1 – минимальные; 2 – средние; 3 – максимальные значения
Рисунок 21 – Распределение давления p по высоте топочной камеры

На рисунке 22 показаны кривые распределения температурного поля по высоте топочной камеры для полидисперсного факела [69]. На графике приведены кривые, распределения минимальной, средней и максимальной температуры T в каждом сечении по высоте топочной камеры. Здесь же нанесены результаты натурального эксперимента [55].

Минимумы температур на кривой минимальных температур приходится на область расположения горелок: падения температур обусловлены низкой температурой подачи топлива ($150\text{ }^{\circ}\text{C}$) по сравнению с полем температуры в топочной камере. Максимального значения температура достигает в зоне активного горения, то есть на высоте $11,6\text{ м}$, что подтверждается трехмерным рисунком распределения, представленным ниже.

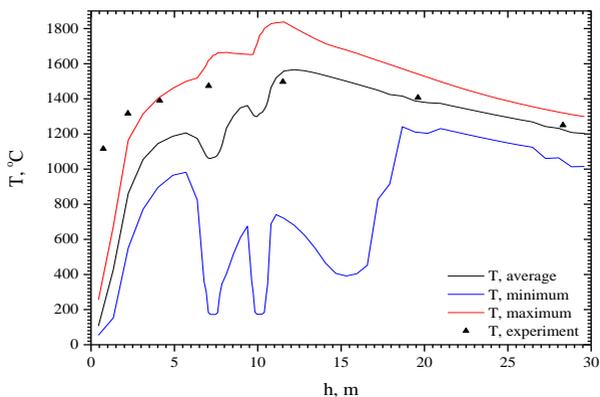
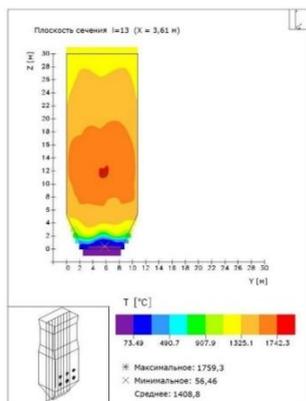


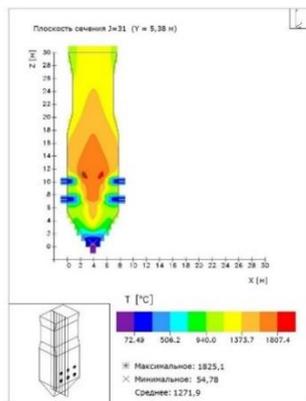
Рисунок 22 – Распределение температуры T (максимальные, средние и минимальные значения) по высоте топочной камеры котла ПК-39 для полидисперсного факела и сравнение с экспериментом [55, 62]

На рисунке 23 представлено трехмерное распределение температурного поля в различных сечениях. Из рисунка можно заметить, что в центральной части топочной камеры в области расположения вихревых горелок образуется ядро факела [68]. Трехмерные графики и шкала температур позволяют определить значение температуры в любой точке топочной камеры.

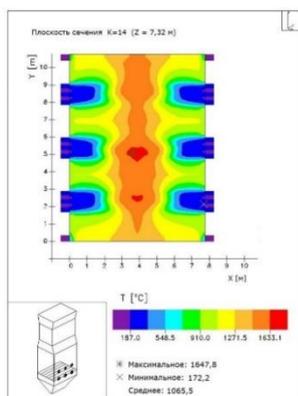
Так, например, в области ядра факела температура достигает наибольших значений ($T=1807,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). По мере продвижения к выходу температурное поле выравнивается и на выходе из топочной камеры имеем среднее значение температуры, равное $1202,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, что по сравнению с монодисперсным факелом незначительно отличается от эксперимента.



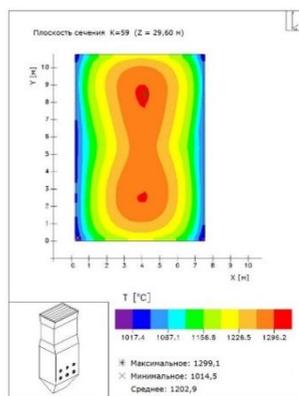
а) Плоскость сечения $X=3,61\text{ м}$



б) Плоскость сечения $Y=5,38\text{ м}$



в) Плоскость сечения $Z=7,32\text{ м}$



г) Плоскость сечения $Z=29,60\text{ м}$

а) и б) – центральные продольные сечения, в) – область горелок,
 г) – на выходе из топочной камеры

Рисунок 23 – Распределение температуры T в топочной камере котла ПК-39 в различных сечениях

Была рассчитана химическая энергия Q_{chem} , выделяемая в процессе горения пылеугольного топлива в топочной камере [69]. На рисунках 24-25 представлено распределение Q_{chem} по высоте топочной камеры и в ее сечениях для полидисперсного факела.

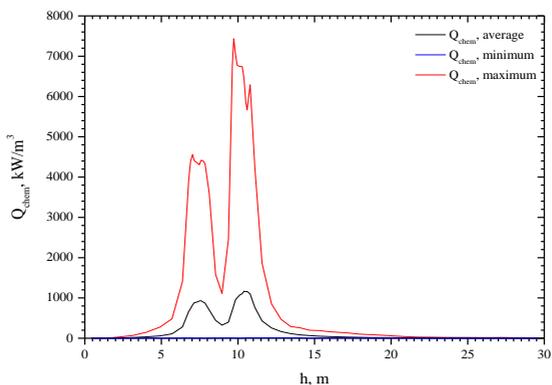
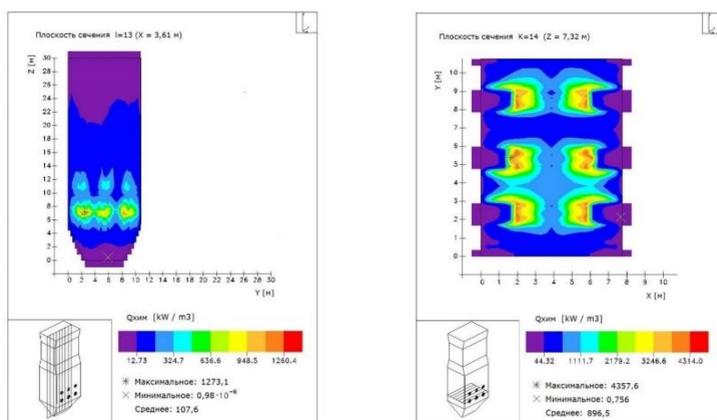


Рисунок 24 – Распределение химической энергии Q_{chem} (максимальные, средние и минимальные значения) по высоте топочной камеры котла ПК-39 для полидисперсного факела



а) Плоскость сечения $X=3,61$ м

б) Плоскость сечения $Z=7,32$ м

Рисунок 25 – Распределение химической энергии Q_{chem} в топочной камере котла ПК-39 в различных сечениях: а) – центральное продольное сечение, б) область горелок

Максимальное количество тепла выделяется в области расположения горелок, непосредственно там, где происходит смешение топлива и окислителя и химические реакции наиболее интенсивны. Причем, в области расположения верхнего яруса горелок значения химической энергии значительно выше, чем значения нижнего яруса, что соответствует повышению температуры верхнего яруса горелок. На выходе из топочной камеры тепло практически не выделяется, так как по мере приближения к выходу химические реакции топлива и окислителя идут с минимальной интенсивностью.

Оптимальный вариант сжигания топлива в топочной камере обеспечивает полное выделение теплоты сгорания и уменьшает потери, вызванные неполным сгоранием топлива и избыточными объемами воздуха.

Поле концентрации окислителя по высоте топочной камеры представлено на рисунке 26 в виде кривых изменения концентрации кислорода O_2 . Мы видим, что концентрация кислорода достигает максимума и минимума в области расположения горелочных устройств, через которые подаются топливо и окислитель. Здесь в области пояса горелок наиболее интенсивно идут химические реакции, в связи с чем поля температур, концентраций окислителя и продуктов реакции неоднородны.

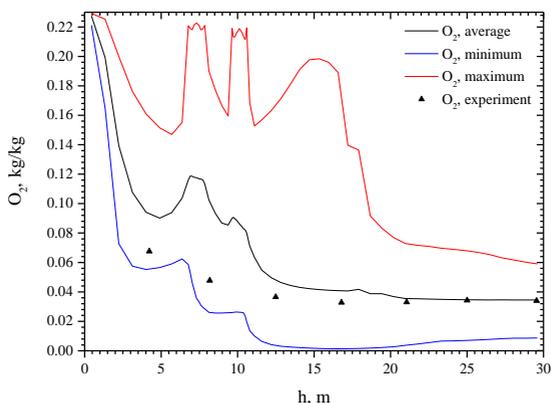


Рисунок 26 – Распределение концентрации O_2 (максимальные, средние и минимальные значения) по высоте топочной камеры котла ПК-39 для полидисперсного факела

По мере приближения к выходу из топочной камеры отклонения максимальных и минимальных значений от среднего сокращаются.

Концентрационные поля оксидов углерода (CO , CO_2) представлены на рисунках 27-30. При горении углерода происходят первичные реакции образования монооксида CO и диоксида CO_2 углерода, а также вторичные реакции догорания CO в газовом объеме и восстановления CO_2 на поверхности углерода [70].

Повышение температуры в топочном пространстве приводит к увеличению образующихся оксидов углерода CO_2 и CO . В свою очередь углерод при определенных температурных условиях реагирует с кислородом и углекислотой. В первом случае одновременно образуется оба окисла углерода – CO_2 и CO , а во втором случае в результате реагирования с углекислотой образуется монооксид углерода CO . Далее взаимодействие окиси углерода и кислорода, способных реагировать друг с другом, дает третью реакцию – горение окиси углерода.

На рисунке 27 представлено распределение минимальных, средних и максимальных в поперечном сечении концентраций CO по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС. Можно видеть, что максимумы на графике распределения монооксида углерода наблюдаются в области расположения горелок. Это связано с тем, что здесь подается аэрозоль, в состав которой входит определенное количество монооксида углерода, а также с тем фактом, что именно в этой области происходят основные реакции углерода C топлива с кислородом воздуха O_2 .

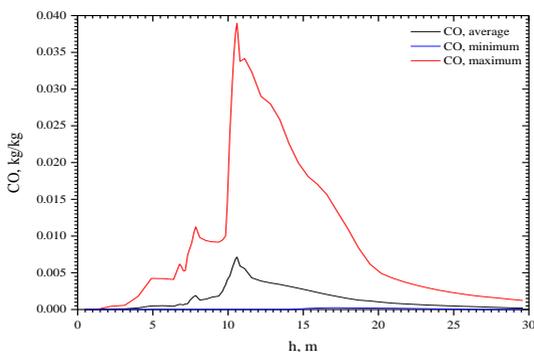


Рисунок 27 – Распределение концентрации CO (максимальные, средние и минимальные значения) по высоте топочной камеры котла ПК-39

На рисунке 28 представлено распределение концентрации диоксида углерода CO_2 по высоте топочной камеры с нанесенными результатами натурного эксперимента [55, 62]. Анализ рисунков 27 и 28 показывает, что картина распределения окиси углерода CO не соответствует полю CO_2 , что говорит об отличиях в процессе образования CO_2 и CO . Из рисунка можно видеть, что основное образование диоксида углерода CO_2 происходит по мере удаления от центра топки, т.е. в области столкновения струй топлива и окислителя из противогорелок. На этом основании можно сделать вывод, что процесс образования оксидов углерода зависит не только от явлений переноса, но и от кинетики процесса.

Знание химической кинетики образования оксидов углерода позволяет дать рекомендации по проектировке топочных камер таким образом, чтобы обеспечивалось более полное выгорание топлива с уменьшением его мехнедожога. Иначе тепловыделение резко снизится, поскольку при образовании CO выделяется лишь 28% той энергии, которая выделяется при образовании CO_2 [43, с. 91].

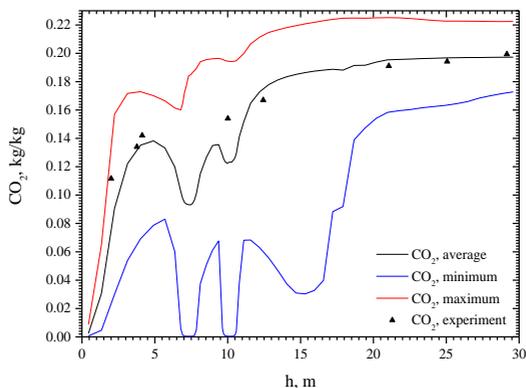
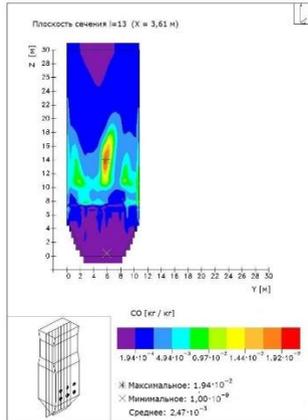


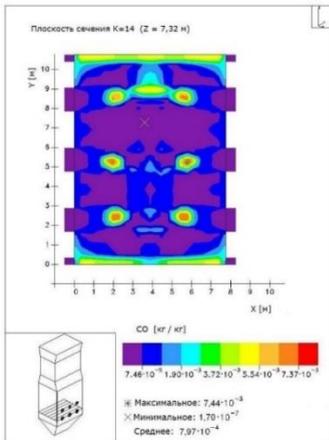
Рисунок 28 – Распределение концентрации CO_2 (максимальные, средние и минимальные значения) по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС и сравнение с экспериментом [55, 62]

На рисунках 29 и 30 представлено трехмерное распределение концентрации CO и CO_2 в различных сечениях камеры сгорания. Используя эти графики, мы можем определить значения концентраций окиси и двуоксида углерода (CO и CO_2) в любой точке топочной камеры и на выходе из нее. Так, на выходе из топочного

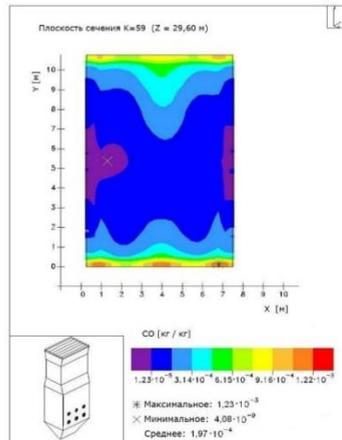
пространства среднее значение концентрации угарного газа CO в безразмерном виде составляет $1,97 \cdot 10^{-4}$ кг/кг, а концентрация углекислого газа CO_2 – $0,197$ кг/кг.



а) Плоскость сечения X=3,61 м



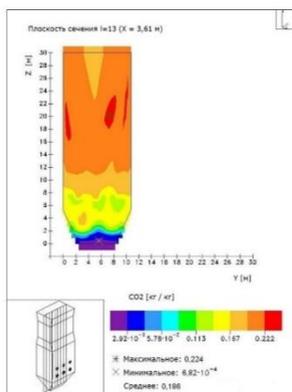
б) Плоскость сечения Z=7,32 м



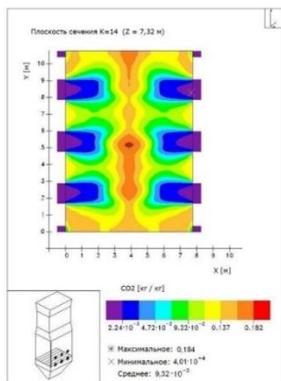
в) Плоскость сечения Z=29,60 м

Рисунок 29 – Распределение концентрации монооксида углерода CO в топочной камере котла ПК-39 в различных сечениях: а) центральное продольное сечение, б) область горелок, в) выход из топочной камеры

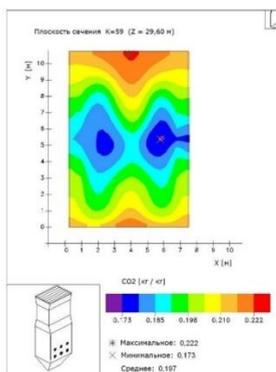
Что касается максимальных и минимальных значений окиси углерода CO , то они равны $7,44 \cdot 10^{-3}$ и $1,7 \cdot 10^{-7}$ кг/кг в области расположения горелок и $1,23 \cdot 10^{-3}$ и $4,08 \cdot 10^{-9}$ кг/кг на выходе из топочного пространства соответственно. Максимальные и минимальные значения же двуокиси углерода CO_2 в безразмерном эквиваленте равны 0,184 и $4,01 \cdot 10^{-4}$ кг/кг – в области расположения горелочных устройств, а на выходе из топочного пространства – 0,222 и 0,173 кг/кг соответственно [67, 71].



а) Плоскость сечения $X=3,61$ м



б) Плоскость сечения $Z=7,32$ м



в) Плоскость сечения $Z=29,60$ м

Рисунок 30 – Распределение концентрации CO_2 в топочной камере котла ПК-39 в различных сечениях: а) центральное продольное сечение, б) область горелок, в) выход из топочной камеры

При организации процессов горения также очень важно учитывать образование оксидов азота, в особенности NO и NO_2 , которые признаны одними из наиболее вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу. Согласно современным представлениям, окисление азота происходит по обратимой цепной термической реакции $N_2 + O_2 = 2NO$. Распределение концентрации оксида азота NO , образующегося в топочной камере котла ПК-39 при сжигании в ней Экибастузского угля, представлено на рисунках 31-32.

Картина распределения максимальных, минимальных и средних значений NO_x по всему топочному пространству представлена на рисунке 31. Как видно из представленного графика, наиболее интенсивное газообразование основных азотосодержащих компонентов происходит в области распространения потоков из горелок [70], что соответствует реальной картине процесса в топочной камере. При этом характер распределения концентраций в этих плоскостях неоднозначен, что говорит о сложном, нелинейном характере процесса образования указанных веществ в этой области.

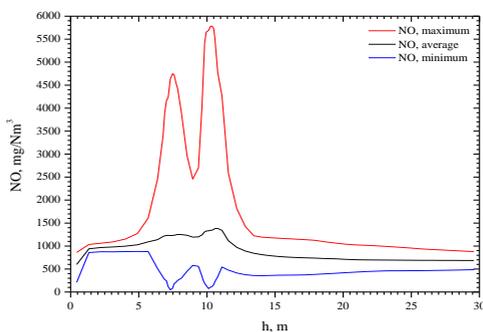
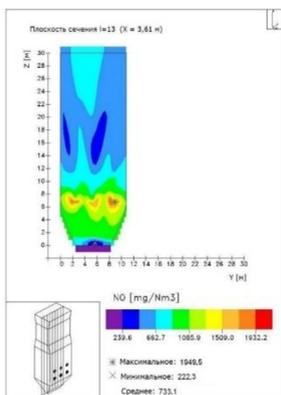


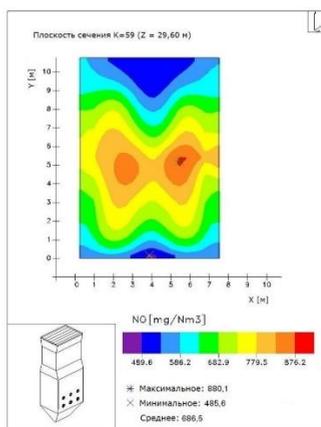
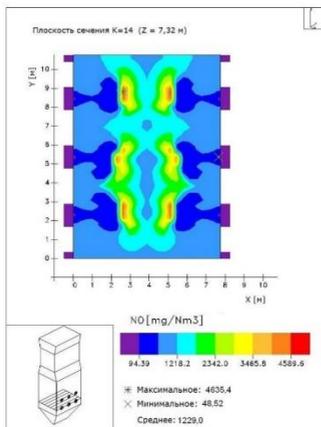
Рисунок 31 – Распределение концентрации NO (максимальные, средние и минимальные значения) по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС

Учитывая важность выброса окиси азота при сжигании топлива, необходимо знать значения концентрации в различных областях топочной камеры. На рисунке 32 представлено трехмерное распределение концентрации NO для различных сечений. Анализ графиков, представленных на рисунке 32, показывает, что максимальное и минимальное значения окиси азота равны

4635,4 и 48,52 мг/Нм³ в области расположения горелок и 880,1 и 485,6 мг/Нм³ на выходе из топочного пространства соответственно. Среднее значение концентрации оксида азота *NO* в зоне подачи топлива равно 1229 мг/Нм³, а на выходе из топочного пространства составляет 686,5 мг/Нм³.



а) Плоскость сечения X=3,61 м



б) Плоскость сечения Z=29,60 м в) Плоскость сечения Z=7,32 м

Рисунок 32 – Распределение концентрации *NO* в топочной камере котла ПК-39 в различных сечениях: а) центральное продольное сечение, б) область горелок, в) выход из топочной камеры

Для более наглядного представления результаты вычислительных экспериментов сведены в таблицу 5, в которой представлены значения температуры (T) в топочной камере, концентрации кислорода (O_2), оксидов углерода (CO , CO_2) и азота (NO) в различных сечениях топочной камеры котла ПК-39.

Таблица 5

Средние значения основных характеристик теплопереноса по объему топочной камеры котла ПК-39 при горении Экибастузского угля

Высота h , м	Величина				
	T , °C	O_2 , кг/кг	CO , кг/кг	CO_2 , кг/кг	NO_x , мг/Нм ³
7,32	1065,51	0,11758	$7,97 \cdot 10^{-4}$	0,0932	1228,96
10,12	1315,66	0,08624	$4,59 \cdot 10^{-3}$	0,1232	1332,84
29,60	1202,89	0,0345	$1,97 \cdot 10^{-4}$	0,1973	686,48

Таким образом, в данной главе монографии были проведены вычислительные эксперименты по определению основных характеристик процесса горения пылеугольного потока. Было показано, что данные численного моделирования полидисперсного потока лучше согласуются с данными натурных экспериментов. Были рассчитаны тепловые (температура T и химическая энергия Q_{chem}), аэродинамические (вектор полной скорости и давление p) и концентрационные (кислород O_2 , оксиды углерода CO , CO_2 и оксиды азота NO_x) характеристики при горении полидисперсного пылеугольного факела.

Анализ таблицы 5 показывает, что концентрация оксида азота NO на выходе из топочной камеры составляет 686,48 мг/Нм³, что соответствует техническим удельным нормативам эмиссий в атмосферу оксидов азота, приведенным в таблице 3. Согласно этой таблице для действующих котельных установок, к которым относится Аксуская ТЭС, значение концентрации (ПДК) NO_x в дымовых газах составляет 850 мг/Нм³.

Однако, в связи с растущим мировым вниманием к охране воздушного бассейна требования к предприятиям энергетической отрасли, и в особенности к теплоэлектростанциям, становят-

ся жёстче. Как можно также видеть из таблицы 3, для реконструируемых теплоэлектростанций величина массовой концентрации NO_x в дымовых газах уже сокращена до 650 мг/м^3 .

В связи с этим, одной из важных задач является более тщательное исследование процессов тепломассопереноса при разработке новых и оптимизации существующих технологий сжигания с целью уменьшения выбросов вредных веществ в атмосферу. Одним из таких способов минимизации пылегазовых выбросов является технология «острого дутья» (overfire air). Результаты вычислительных экспериментов по ее внедрению на котле ПК-39 Аксуской ТЭС представлены ниже в главе 6 настоящей монографии.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЯ РАЗЛИЧНОЙ ВЛАЖНОСТИ В ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ КОТЛА ПК-39 АКСУСКОЙ ТЭС

В монографии представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния влажности сжигаемого угля на процесс его сжигания в топочной камере энергетических установок.

5.1. Влияние влажности топлива на процесс горения

Влажность топлива наряду с зольностью является внешним балластом, который существенно снижает энергоэффективность его сжигания. Принято различать внешнюю (поверхностную и капиллярную) и внутреннюю (коллоидную и гидратную) влагу топлива.

Поверхностная влага обусловлена добычей, транспортировкой и хранением угля и легко удаляется в результате сушки топлива. Капиллярная влага – влага, заполняющая поры топлива, гидратная – входящая в состав минеральных примесей. Коллоидная влага распределяется в топливе равномерно и физико-химически связана с органической массой топлива [75].

Для Экибастузского каменного угля в связи с его большим возрастом количество капиллярной, коллоидной, а также гидратной влаги невелико. В процессе сушки топлива уменьшается количество поверхностной и коллоидной влаги, в то время как гидратная остается практически без изменений.

При изменении процентного содержания внешнего балласта топлива изменяется содержание остальных составляющих топливно-веществ, таких как горючие вещества и внутренний балласт топлива. Формула перерасчета данных характеристик топлива записывается следующим образом:

$$x_2^p = x_1^p \frac{100 - W_2^p}{100 - W_1^p} \text{ и } x_2^p = x_1^p \frac{100 - A_2^p}{100 - A_1^p}. \quad (85)$$

В лабораторных условиях определение содержания различного типа влаги осуществляется согласно ГОСТ 11014-2001. Сущность метода определения внешней влаги каменных углей заключается в высушивании пробы угля до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре или в сушильном шкафу при температуре не более 50 °С и вычислении массовой доли влаги по потере массы.

Максимальный размер зерна пробы для определения внешней влаги не должен превышать 20 мм. Пробу разравнивают на взвешенном противне так, чтобы на 1 дм² поверхности приходилось не более 100 г пробы. Противень с пробой взвешивают и ставят для свободной сушки в помещение с хорошей вентиляцией или в сушильный шкаф. Продолжительность сушки в сушильном шкафу не должна превышать 8 ч.

После окончания сушки в сушильном шкафу противень с пробой вынимают и оставляют для свободной сушки при комнатной температуре, взвешивая его каждый час до тех пор, пока результаты двух последних взвешиваний будут отличаться не более чем на 0,1 % исходной массы пробы. В течение сушки, а также после каждого взвешивания пробу осторожно перемешивают, не допуская потерь.

Общую влагу определяют двухступенчатым или одноступенчатым методом в зависимости от степени увлажненности топлива и возможности его измельчения без предварительной подсушки. Общую влагу двухступенчатым методом определяют как сумму внешней влаги (W_{ex}) и влаги воздушно-сухого топлива (W_h). Массовые доли общей влаги W_t , внешней влаги W_{ex} , влаги воздушно-сухого топлива W_h и влаги аналитической пробы W_a , %, вычисляют по формуле:

$$W = \frac{m_1}{m} \cdot 100, \quad (86)$$

где m_1 – потеря массы при сушке навески топлива;
 m – масса навески пробы топлива.

Массовую долю общей влаги W_t , определяемую двухступенчатым методом, вычисляют по формуле:

$$W_t = W_{ex} + W_h \frac{100 - W_{ex}}{100}, \quad (87)$$

где W_{ex} – внешняя влага топлива, %;

W_h – влага воздушно-сухого топлива, %.

Результаты вычисляют с точностью до 0,1 % [75, с. 6].

Считается, что наличие в топливе влаги ухудшает его воспламенение, однако имеются данные, что изменение содержания влаги в топливе от 0 до 20%, например для полубитуминозных углей, не оказывает влияния на начальную температуру воспламенения. При изменении влажности топлива изменяется теплота сгорания рабочей массы топлива:

$$Q_{n2}^P = (Q_{n1}^P + 25W_1^P) \frac{100 - W_2^P}{100 - W_1^P} - 25W_2^P, \quad (88)$$

где Q_n^P – низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж/кг; W_1^P , W_2^P – начальное и конечное содержание влаги в рабочей массе топлива.

Изменение теплоты сгорания приведет к изменению адиабатической температуры горения и энтальпии газов в зоне максимального тепловыделения. Кроме того, изменится средняя температура факела вследствие изменения потерь теплоты на испарение и нагрев влаги [76].

В этой связи был проведен ряд исследований по изучению влияния влажности угля. Авторы работы [77] произвели исследование энтальпии образования углей различных марок и месторождений Украины, а также исследовали влияние влажности и зольности угля на энтальпию его образования. Из полученных авторами данных видно, что увеличение влажности приводит к уменьшению энтальпии образования. При этом при увеличении влажности на 5% энтальпия образования уменьшается в среднем на 7,4%, что соответствует 390 кДж/кг.

В своей работе Исаков Р.Т. и Энгельшт В.С. [78] провели термодинамический анализ влияния процентного содержания

влаги на процесс горения угля в кислороде и в воздухе. Ими было показано, что с увеличением влажности понижается адиабатическая температура и коэффициент использования топлива, однако, уменьшается концентрация токсичных примесей NO и CO .

В работе [79] представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния зольности и влажности топлива на примере японских углей, таких как Кимото, Икешима, на процесс горения. Было показано, что с увеличением влажности угля увеличивается доля несгоревшего углерода топлива, однако уменьшается доля азота, образующего окись азота.

Как было отмечено выше, изменение процентного содержания влаги в топливе приводит к изменению тепловых и концентрационных характеристик процесса тепломассопереноса. В связи с этим, ниже были исследованы характеристики процессов тепломассопереноса в топочной камере с учетом различного значения содержания влаги в топливе.

5.2. Результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния влажности топлива на характеристики тепломассопереноса

В качестве топлива использовался Экибастузский уголь марки КСН разреза «Восточный». Угли Экибастузского бассейна – каменные, гумусовые, представленные в большинстве своем полублестящими, полуматовыми и матовыми. Угли почти всех пластов являются малосернистыми и сильно минерализованными. Теплота сгорания рядового угля изменяется в среднем от 3380 до 4540 ккал/кг. Плотность угля составляет $1,5 \text{ т/м}^3$. Угли пластов 1, 2 и 3 весьма труднообогатимы, что обусловлено тонким проращением самого вещества угля минеральными примесями.

В таблице 6 представлен процентный состав используемого при расчетах исследуемого угля.

Рабочий состав Экибастузского угля с пересчетом на различную влажность

W ^P	A ^P	C ^P	H ^P	O ^P	N ^P	S ^P
5	41,78	41,98	2,86	6,74	0,82	0,82
7	40,9	41,1	2,8	6,6	0,8	0,8
9	40,02	40,22	2,74	6,46	0,78	0,78
11	39,14	39,33	2,68	6,32	0,77	0,77

Результаты проведенного исследования представлены на рисунках 33-41. Как можно заметить, качественно приведенные характеристики не меняются в зависимости от различного значения влажности угля [80-83]. Однако можно заметить, что кривые на этих рисунках отличаются в количественном отношении. Рисунки 33 и 34 представляют распределение поля температуры по высоте топочной камеры и в области расположения нижнего яруса горелок. Наряду с результатами вычислительного эксперимента, на рисунке 33 представлены результаты натурального эксперимента на ТЭС [55, 62] для угля с влажностью, равной 7%.

Можно видеть, что характер изменения экспериментальной и расчетных (вычислительный эксперимент) кривых совпадает. Можно видеть наличие минимумов кривых в областях расположения пояса горелок, что связано с низкой температурой аэросмеси (150 °С), подаваемой через эти горелки. Максимальных значений температура достигает в центральной части топочной камеры, там, где находится ядро факела. По мере продвижения к выходу из топочной камеры поле температуры выравнивается, а значения уменьшаются.

Наибольшие различия между расчетными и экспериментальными данными (рисунок 33) наблюдаются при воспламенении угольного факела. Это можно объяснить неустойчивым характером процесса горения в этой области и соответственно различием между реальными физическими условиями воспламенения пылеугольной смеси и математической моделью, описывающей процесс горения твердого топлива в этой области.

Анализируя кривые рисунка 33, также можно заметить, что ход температурных кривых при изменении влажности топлива от

5% до 11% качественно не меняется. Что касается количественных изменений, то следует отметить, что увеличение влажности топлива ведет к уменьшению средней температуры в топочной камере. Это можно объяснить тем, что влажность топлива уменьшает его тепловую ценность, так как для превращения 1 кг воды в пар необходимо затратить 2,5 МДж теплоты. Наибольшие различия между температурными кривыми для угля разной влажности можно заметить внутри топочной камеры в области пояса горелок.

Так, при увеличении процентного содержания влаги топлива от 5% до 11% температура в области расположения нижнего яруса горелок уменьшается с 1178,86 °С до 885,72 °С. Что касается верхнего яруса горелочных устройств, то для такого же диапазона изменения влажности топлива температура уменьшается с 1382,07 °С до 1046,97 °С (таблица 7). Это соответствует результатам экспериментальных исследований, приведенных в работах [55, 62, 77-78]. На выходе из топочной камеры различия в значениях температуры для углей, влажность которых меняется от 5% до 11%, уменьшаются и составляют не более 35°С.

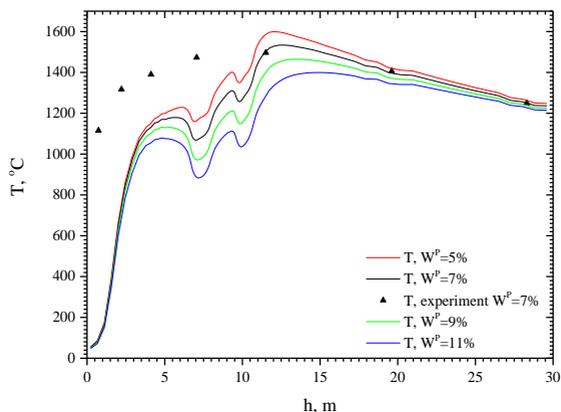


Рисунок 33 – Распределение температуры T по высоте топочной камеры при сжигании угля различной влажности в топочной камере котла ПК-39 и сравнение с экспериментом [55, 62]

На рисунке 34 представлены результаты 3-D моделирования процесса горения Экибастузского угля виде распределения температуры в сечении топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС, приходящемся на нижний ярус горелок. По температурной шкале можно определить значение температуры в любой точке этого сечения. Анализ рисунка показывает, что с увеличением влажности топлива уменьшается средняя по сечению температура пылеугольного факела, что ранее было продемонстрировано на рисунке 33.

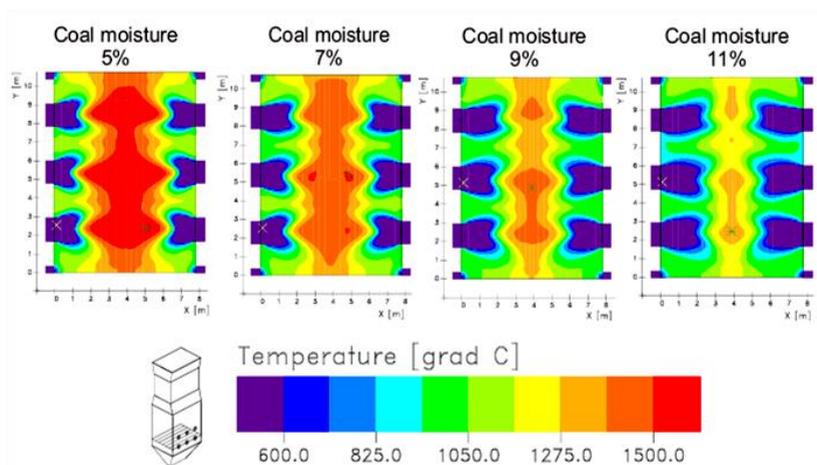


Рисунок 34 – Распределение температуры T в сечении нижнего яруса горелок котла ПК-39 при сжигании Экибастузского угля различной влажности

На рисунке 35 представлено распределение концентрации кислорода по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС. Можно наблюдать максимумы концентрации кислорода в области поясов горелок, через которые подаются аэросмесь и вторичный воздух. По мере продвижения к выходу из топочного пространства концентрация кислорода уменьшается в связи с прохождением химических реакций горения и окисления.

Показано, что уменьшение влажности ведет к уменьшению концентрации окислителя в топочной камере, что, вероятно, связано с более полным сжиганием угля и с большим расходом

при этом окислителя (кислород). В области нижнего яруса горелок значение концентрации для угля с влажностью 5% составляет 0,1067 кг/кг, а для 7% – 0,1149 кг/кг, в то время как для угля с влажностью 11% – 0,1306 кг/кг. На выходе из топочной камеры концентрация O_2 составляет 0,0281 кг/кг, 0,0320 кг/кг и 0,04004 кг/кг соответственно (таблица 7).

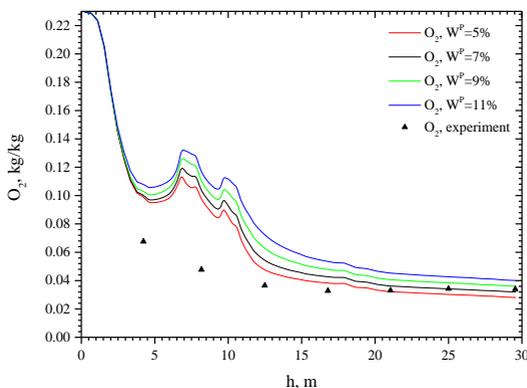


Рисунок 35 – Распределение концентрации O_2 по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС при сжигании в нем угля различной влажности и сравнении с экспериментом [55, 62]

Сказанное выше можно подтвердить рисунком 36, где показано трехмерное распределение кислорода в продольном сечении топочной камеры для различных значений содержания влаги в топливе. По цветной шкале можно видеть, что максимумы концентрации O_2 приходятся на места расположения горелок и подсосов, то есть там, где подается аэросмесь и дополнительный воздух. Минимальных значений концентрация O_2 достигает в центральной области, где расположен пылеугольный факел и где наиболее интенсивны химические реакции горения и окисления.

В тоже время с увеличением влажности концентрация кислорода увеличивается, а минимум смещается к выходу из топочной камеры (рисунок 36). Это объясняется тем, что повышение влажности топлива приводит к ухудшению условий для

воспламенения пылеугольной смеси и как следствие к более позднему зажиганию.

Также можно видеть, что для 5%-ной влажности минимальная концентрация кислорода составляет порядка 0,01 кг/кг, в то время как для 11%-ной влажности – порядка 0,06 кг/кг. Сказанное подтверждается кривыми распределения по высоте топочной камеры средней температуры, приведенными на рисунке 33.

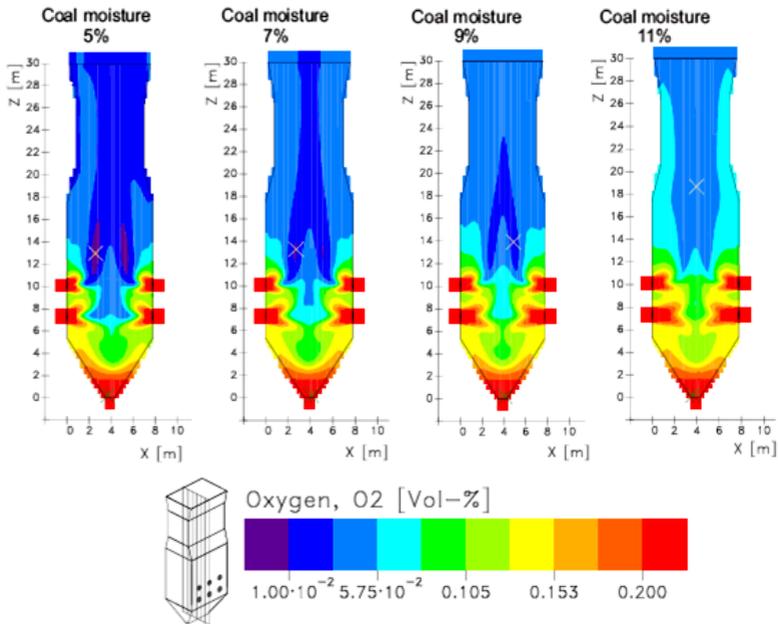


Рисунок 36 – Распределение концентрации O_2 в центральном продольном сечении топочной камеры котла ПК-39 при сжигании угля различной влажности

На рисунке 37 показано поле концентрации водяных паров при различных значениях влажности Экибастузского угля. Анализ рисунка показывает, что характер образования водяных паров H_2O для углей различной влажности совпадает. Также из рисунка видно, что в области пояса горелочных устройств наблюдается наибольшая интенсивность в образовании H_2O . К выходу из топочного пространства концентрация водяных паров

почти не изменяется, что говорит об окончании процесса выхода летучих. На выходе из топочного пространства концентрация достигает максимальных значений.

Также можно отметить, что с увеличением влажности топлива естественно увеличивается и концентрация водяных паров в топочном пространстве. Так, увеличение влажности на 2% приводит к увеличению концентрации водяных паров в сечении нижнего яруса горелок в среднем на 0,0008 кг/кг, а на выходе – на 0,0019 кг/кг (таблица 7).

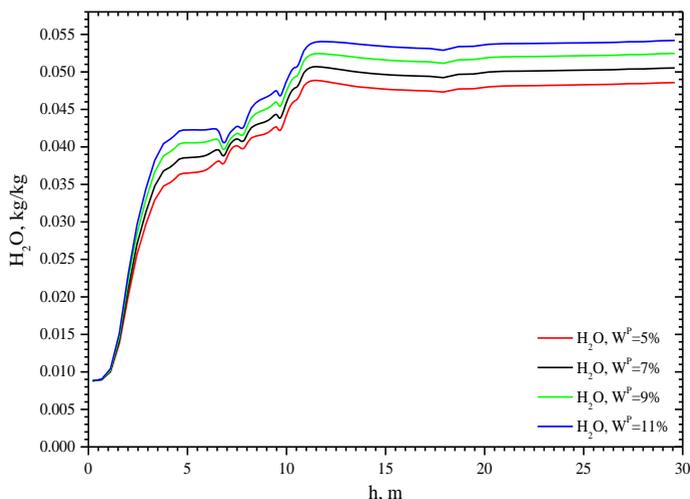


Рисунок 37 – Распределение концентрации H_2O по высоте топочной камеры котла ПК-39 при сжигании угля различной влажности

В результате проведения вычислительных экспериментов по сжиганию Экибастузского угля были рассчитаны концентрационные поля вредных пылегазовых продуктов сгорания. На рисунках 38-41 представлены графики распределения концентраций оксидов углерода CO и CO_2 и оксида азота NO .

Анализ рисунка 38 показывает, что формирование окиси углерода происходит главным образом в основной части факела, там, где средняя его температура достигает своих максимальных значений. Причем с уменьшением содержания влаги в угле максимум концентрации CO возрастает и смещается к области

расположения горелок. Для 5%-ной влажности топлива максимальное значение концентрации окиси углерода составляет 10609,59 мг/Нм³; для 7%-ной влажности – 9266,46 мг/Нм³; для 9% – 8439,37 мг/Нм³; для 11% – 8653,53 мг/Нм³.

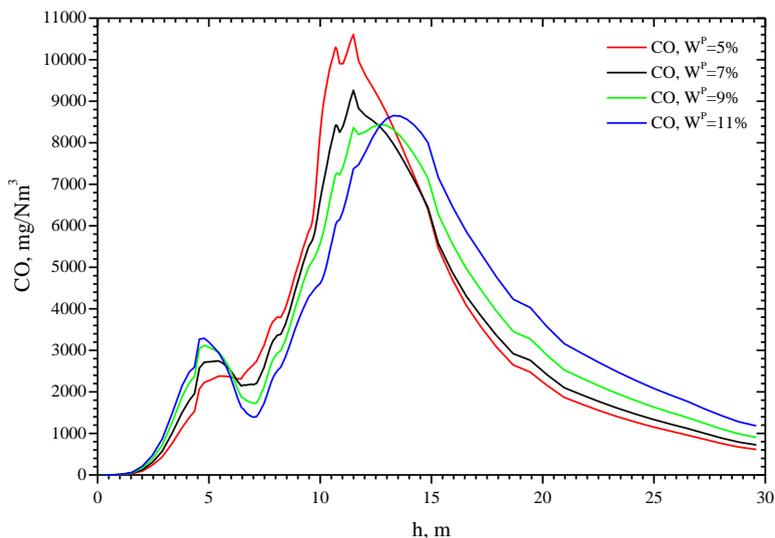


Рисунок 38 – Распределение концентрации CO по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС при сжигании угля различной влажности

По мере продвижения к выходу из топки концентрация окиси углерода уменьшается, и на выходе значения концентрации составляют: для $W^P=5\%$ – 614,40 мг/Нм³; для $W^P=7\%$ – 724,52 мг/Нм³; для $W^P=9\%$ – 907,38 мг/Нм³; для $W^P=11\%$ – 1183,05 мг/Нм³. Таким образом, увеличение влажности топлива приводит к уменьшению концентрации окиси углерода CO в области активного горения, что совпадает с экспериментальными данными, приведенными в работах [55, 62, 77-78]. Это можно объяснить тем, что при невысоких температурах преобладает реакция образования диоксида углерода из углерода топлива (3.45), однако при повышении температуры начинает преобладать реакция между углем и образовавшимся диоксидом углерода (3.46).

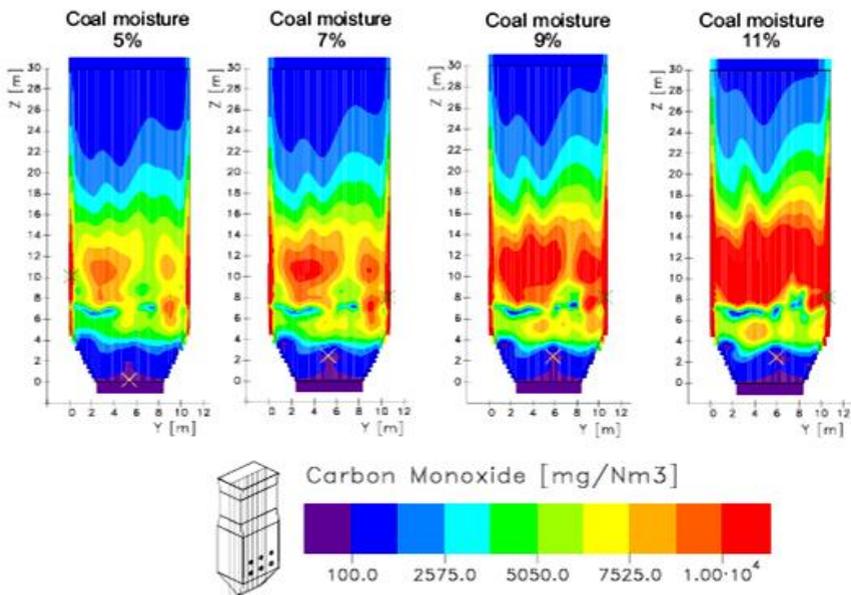


Рисунок 39 – Распределение концентрации CO в центральном продольном сечении топочной камеры при сжигании угля различной влажности

На рисунке 39 показаны результаты 3-D моделирования и приведены трехмерные рисунки поля концентрации окиси углерода CO в центральном продольном сечении топочной камеры. Анализ рисунка показывает, что с увеличением процентного содержания влаги в сжигаемом топливе увеличивается максимальная и средняя концентрации окиси углерода в этом сечении топочной камеры, как было отмечено кривыми рисунка 38.

На рисунке 40 представлено распределение средних значений концентрации диоксида углерода CO_2 в каждом сечении по высоте топочного пространства. Можно видеть, что увеличение влажности приводит к уменьшению концентрации двуокиси углерода, что связано с температурными условиями процесса (так при увеличении температуры превалирует реакция образования монооксида углерода CO (3.44)). А это в свою очередь создает худшие условия для реакции, связанной с догоранием CO до CO_2 (3.48). Вследствие этого значение концентрации диоксида углерода CO_2 на выходе из топки с увеличением влажности топлива уменьшается.

Здесь же на рисунке 40 нанесены результаты эксперимента, проведенного непосредственно на ТЭС [55, 62]. Мы видим, что наибольшие различия в результатах вычислительного и натурального экспериментов наблюдаются в области воспламенения горючей смеси, что связано с неустойчивостью горения и различием между моделируемыми и экспериментальными условиями для воспламенения аэрозмеси. В области горелок нижнего яруса средняя концентрация двуокиси углерода CO_2 составляет: для влажности $W^P=5\%$ – 0,10364 кг/кг; $W^P=7\%$ – 0,0945 кг/кг; $W^P=9\%$ – 0,08507 кг/кг; $W^P=11\%$ – 0,07707 кг/кг. На выходе из топочной камеры эти значения увеличиваются до 0,2039 кг/кг; 0,19918 кг/кг; 0,19424 кг/кг; 0,18944 кг/кг соответственно.

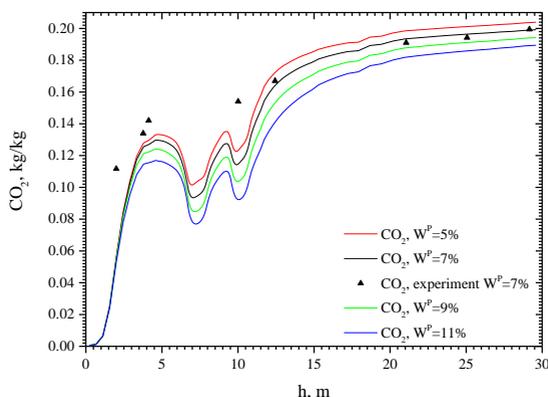


Рисунок 40 – Распределение концентрации CO_2 по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС при сжигании угля различной влажности и сравнение с экспериментом [55, 62]

На рисунке 41 показано поле концентрации оксида азота NO по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС для различного значения содержания влаги в топливе. Из рисунка можно видеть, что наибольшие различия в средних концентрациях приходятся на центральную часть топки, где расположены горелочные устройства. Формирование оксида азота NO осуществляется в результате окисления азота, содержащегося в топливе, а также азота

атмосферного воздуха. Здесь увеличение влажности угля приводит к уменьшению концентрации NO , что подтверждается исследованиями, описанными в работах [55, 62, 77-79].

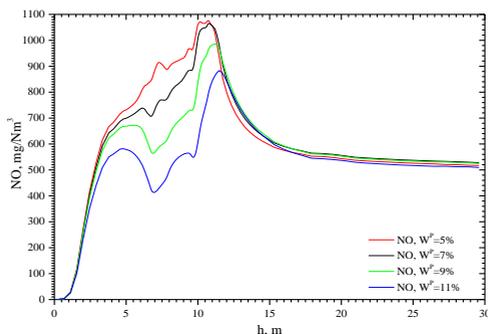


Рисунок 41 – Распределение концентрации NO по высоте топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС при сжигании угля различной влажности

Результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния влажности угля на тепловые и концентрационные поля в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС сведены в общую таблицу 7.

В таблице 7 приведены численные значения основных характеристик процесса тепломассопереноса при сжигании Экибастузского угля различной влажности в топочной камере котла ПК-39 Аксуской ТЭС, а именно значения средней температуры T , средних концентраций кислорода O_2 , водяных паров H_2O , оксидов углерода CO , CO_2 и оксида азота NO в различных сечениях топочного пространства и на выходе из него.

Анализ полученных результатов вычислительных экспериментов показывает, что увеличение влажности угля приводит к уменьшению температуры T как в области расположения горелок, так и на выходе из топочной камеры. Концентрации кислорода O_2 , воды H_2O и диоксида углерода CO_2 также уменьшаются с уменьшением рабочей влаги по всей высоте топочного пространства. В области расположения горелочных устройств с увеличением влажности количество образуемого монооксида углерода CO снижается, однако, выше зоны активного горения увеличение влажности приводит к менее интенсивному процессу догорания монооксида CO до диоксида углерода CO_2 .

Таблица 7

Распределение средних значений температуры, концентраций O_2 , H_2O , CO , CO_2 , NO в сечениях расположения горелочных устройств (нижний и верхний ярусы горелок) и на выходе из топочной камеры для различных значений влажности топлива

Сечение по высоте топочной камеры	Влажность, W^P			
	5 %	7 %	9 %	11%
Средняя температура T , °С				
7,3 м (нижний ярус горелок)	1178,86	1079,82	976,46	885,72
10,1 м (верхний ярус горелок)	1382,07	1285,22	1168,28	1046,97
29,6 м (выход из топки)	1247,91	1236,08	1224,97	1214,62
Средняя концентрация кислорода O_2 , кг/кг				
7,3 м (нижний ярус горелок)	0,1067	0,1149	0,1234	0,1306
10,1 м (верхний ярус горелок)	0,0827	0,0905	0,1003	0,1104
29,6 м (выход из топки)	0,0281	0,0320	0,036	0,0400
Средняя концентрация водяных паров H_2O , кг/кг				
7,3 м (нижний ярус горелок)	0,0400	0,0408	0,0415	0,0424
10,1 м (верхний ярус горелок)	0,0452	0,0469	0,0483	0,0496
29,6 м (выход из топки)	0,0486	0,0505	0,0524	0,0542
Средняя концентрация окиси углерода CO , мг/Нм ³				
7,3 м (нижний ярус горелок)	2938,94	2391,90	1912,79	1550,57
10,1 м (верхний ярус горелок)	8921,02	7026,65	5849,54	4778,07
29,6 м (выход из топки)	614,40	724,52	907,38	1183,05
Средняя концентрация двуокиси углерода CO_2 , кг/кг				
7,3 м (нижний ярус горелок)	0,1036	0,0945	0,0851	0,0771
10,1 м (верхний ярус горелок)	0,1246	0,1159	0,1044	0,0925
29,6 м (выход из топки)	0,2039	0,1992	0,1942	0,1894
Средняя концентрация оксида азота NO , мг/Нм ³				
7,3 м (нижний ярус горелок)	914,58	766,67	589,49	431,33
10,1 м (верхний ярус горелок)	1070,84	1035,27	884,06	653,79
29,6 м (выход из топки)	516,97	527,79	524,78	509,25

В области активного горения уменьшение влажности и повышение температуры влекут за собой повышенное формирование оксидов азота NO_x . Однако можно заметить, что к выходу из топки поля концентрации окиси азота выравниваются и различия в концентрациях согласно таблице 7 составляют порядка 3-18 мг/Нм³. Полученные в монографии данные согласуются с исследованиями, опубликованными в работах [77-79].

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОФА-ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СЖИГАНИИ НИЗКОСОРТНОГО ЭКИБАСТУЗСКОГО УГЛЯ

6.1. Использование ОФА-технологии для снижения выбросов NO_x

При сжигании любых видов органического топлива, одними из наиболее вредных продуктов сгорания, как было сказано в главе 3, являются оксиды азота NO_x , которые наносят ущерб как окружающей среде, так и здоровью человека в частности.

Снижение выбросов NO_x , образующихся при сжигании топлива на ТЭС, играет важную роль в снижении общего уровня оксидов азота NO_x , выбрасываемых в атмосферу. При использовании методов снижения NO_x в расчетах количества NO_2 не следует использовать традиционное процентное отношение NO_2 от общего количества NO_x (10%), так как это приводит к очень значительным ошибкам в расчетах [84].

К основным методам снижения NO_x относят ступенчатое сжигание, каталитические преобразователи, рециркуляция дымовых газов, низкоэмиссионные горелки, использование мазута с низким содержанием азота, впрыск воды/пара, селективное каталитическое восстановление (SCR) и селективное некаталитическое восстановление (SNCR) [84].

Одним из способов снижения концентрации оксидов азота NO_x является ступенчатое сжигание пылеугольной смеси, в частности технология «Overfire Air». Суть данного метода заключается в том, что основной объем воздуха подается в пылеугольные горелки, а остальной воздух – далее по высоте факела через специальные сопла.

Технологические методы подавления образования оксидов азота основаны на снижении пиковой температуры и содержания кислорода в области активного горения, а также создании в топочной камере зон с восстановительной средой, где продукты неполного горения, вступая во взаимодействие с образующимся оксидом азота, приводят к восстановлению NO_x до молекулярного азота N_2 .

Конструктивно метод ступенчатого сжигания топлива можно осуществить в котельных агрегатах с двухъярусным расположением горелок по высоте топочной камеры. При этом практически не требуется существенной реконструкции котла, связанной с дополнительными затратами. Ниже приведена зависимость для определения экологической эффективности процесса двухступенчатого сжигания:

$$\eta = \frac{NO_x - NO_x^{ДВ}}{NO_x} = \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \alpha_{11}/\alpha_1} \right)^m \right] 100\% , \quad (89)$$

где α_1 – коэффициент избытка воздуха в первичной зоне горения;
 α_{11} – коэффициент избытка воздуха во вторичной зоне горения;
 $m \approx 3$.

Таким образом, в зоне активного горения образуется обедненная кислородом и обогащенная топливом зона горения. В связи с недостатком воздуха в этой области средняя температура меньше, чем при традиционном сжигании, что позволяет уменьшить количество топливных и термических оксидов азота. Далее, выше уровня основных горелок через сопла третичного воздуха подается дополнительный воздух, необходимый для дожигания продуктов неполного сгорания, и образуется окислительная среда.

Наиболее сложным этапом при реализации технологии «острого» дутья является определение оптимальной высоты расположения и диаметра сопел-инжекторов, через которые будет подаваться воздух, а также нахождение лучшего соотношения количества воздуха, подаваемого через основные горелки и ОФА-инжекторы. Эти характеристики зависят от конструкции котлов и способа подачи топливно-воздушной смеси.

Для эффективного внедрения данной технологии на промышленном котле высота ОФА-инжекторов должна быть выбрана таким образом, чтобы в области активного горения обеспечивалось полное выгорание топлива и его догорание до конечных продуктов сгорания, поскольку неполное перемешивание топлива и окислителя может привести к увеличению недожога [85].

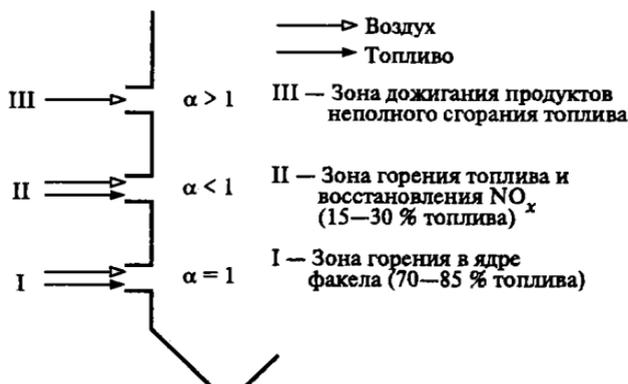


Рисунок 42 – Принципиальная схема ступенчатого сжигания топлива в топке котла

Существуют различные варианты введения дополнительного воздуха по технологии OFA. Учеными из Китая [86] (Min Kuang, Zhengqi Li, Chunlong Liu, Qunyi Zhu, Yan Zhang, Yang Wang) были проведены исследования влияния процентного соотношения воздуха, подаваемого с помощью OFA технологии на энергетических котлах, в которых пылевоздушная смесь подается вниз. Было показано, что с увеличением процентного содержания острого дутья от 0% до 20% увеличивается достижение симметричности потоков в нижней части камеры.

При максимальном значении (25%) образование симметричного потока происходит не только в нижней части топки, но и в области аэродинамического выступа. Таким образом, в качестве оптимального режима был выбрано 20%-ное соотношение.

Проведенные в работе [87] вычислительные эксперименты по исследованию влияния технологии overfire air также показали, что выбросы NO в топке с OFA и на выходе уменьшились с 638 мг/Нм³ до 570 мг/Нм³.

В работе [88] авторами было изучено использование ступенчатого сжигания угля в воздухе и смеси газов 30% O_2 / 70% CO_2 . Было доказана эффективность внедрения ступенчатого сжигания для снижения выбросов оксидов азота NO_x , а также было показано, что концентрация диоксида серы SO_2 практически не зависит от выбора окислителя.

Авторами работы [89] было проведено сравнение процессов сжигания при стандартном режиме и при внедренной технологии

OFA. Было показано снижение выбросов NO_x и хорошее согласование результатов моделирования и натурного эксперимента.

В работах [90-92] авторами были проведены численные эксперименты по исследованию внедрения технологии OFA для котлов с встречной компоновкой горелок и циклонных топков с использованием программного обеспечения консалтинговой фирмы Reaction Engineering International (REI). Было доказано, что внедрение технологии острого дутья приводит к уменьшению уровня выбросов оксидов азота более чем на 30%. Однако, при предложенных модификациях увеличивается концентрация оксида углерода и содержание углерода в летучей золе.

Группой ученых в работе [93] было изучено влияние формы сопел третичного воздуха OFA на эмиссию оксида углерода и на количество уносимого вместе с летучей золой углерода. Основными формами сопел были выбраны круглое прямоточное сопло, прямоугольное прямоточное сопло и сопло с циклонным внешним и прямоточным внутренним потоком воздуха. Было показано, что наибольшая проникающая способность у сопел с круглым прямоточным подводом воздуха, а самая наименьшая у циклонно-прямоточных сопел. Концентрация монооксида углерода CO максимальна для круглых сопел в связи с малой областью покрытия у основания сопел и малой толщины воздуха вдоль пути потока горючих газов. Количество несгоревшего углерода, уносимого с золой, наименьшее для сопел с циклонно-прямоточным потоком воздуха из-за его высокой интенсивности турбулентного перемешивания. Также было показано, что форма сопел третичного воздуха практически не влияет на эмиссию оксидов азота NO_x .

В работе [94-95] авторы на примере котла БКЗ-160 показали, что применение OFA-технологий вызывает снижение концентрации кислорода в области наиболее интенсивного горения. Это приводит к повышению температуры пламени в этой области и снижению общего коэффициента избытка воздуха в этой зоне. В связи с этим снижается уровень выбросов от неполного сгорания, увеличивается скорость элементарных реакций и повышается качество смешения, что сокращает время пребывания, необходимое для смешения топливного газа и вторичного воздуха горения.

На рисунке 43 представлена аэродинамическая картина для различных вариантов организации ступенчатого сжигания с подачей третичного воздуха выше сопел основных горелок.

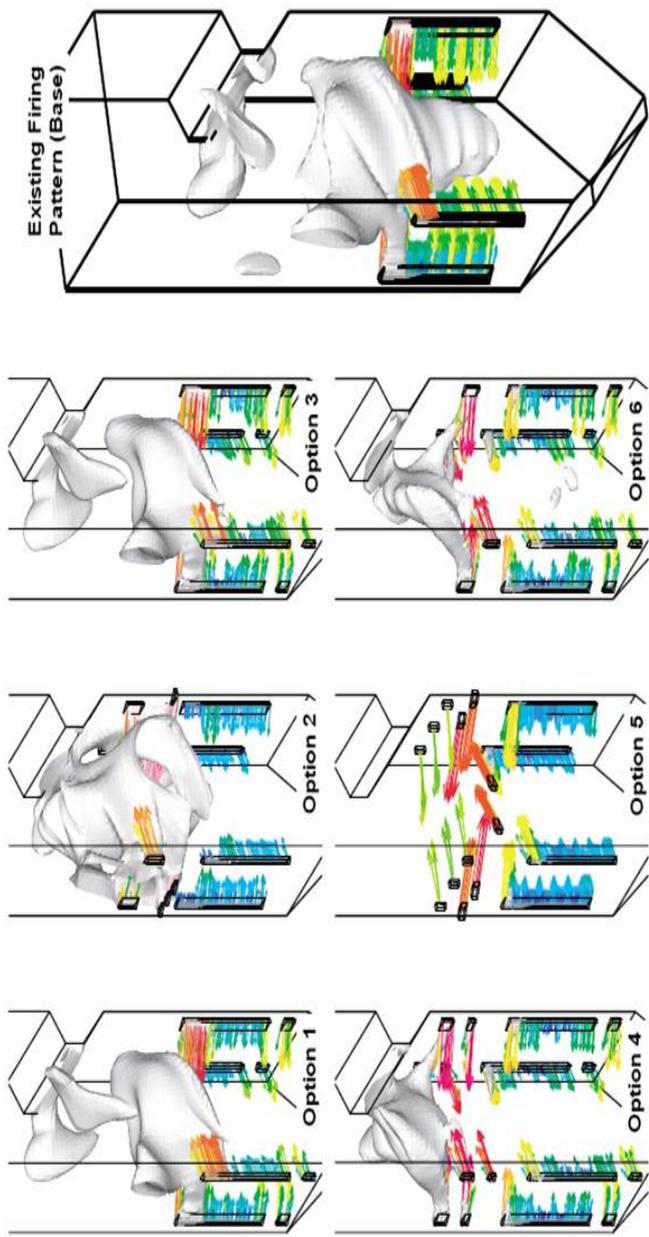


Рисунок 43 – Аэродинамическая картина введения в камеру сгорания дополнительных воздушных потоков по методу «Overfire Air»

6.2. Результаты вычислительных экспериментов по использованию OFA-технологии

В были исследованы тепловые и концентрационные характеристики ступенчатого сжигания пылеугольного топлива на примере котла ПК-39 Аксуской ТЭС. На рисунке 44 представлен общий вид и разбивка котла: а) для традиционного сжигания пылеугольного топлива, б) при внедрении сопел дополнительного воздуха OFA, основные конструктивные характеристики которых представлены в таблице 8.

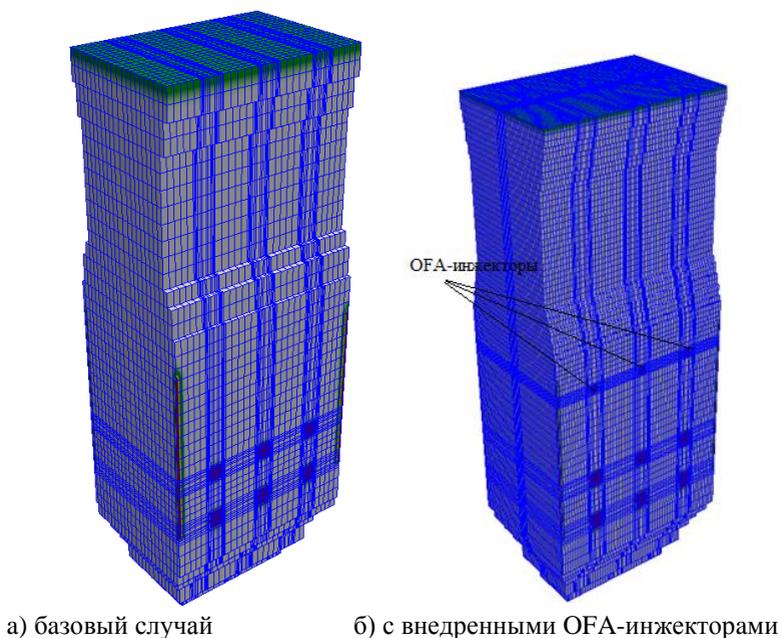


Рисунок 44 – Общий вид котла ПК-39 и разбивка его на контрольные объемы

Таблица 8

**Конструкционные характеристики котла ПК-39 Аксуской ТЭС
при организации ступенчатого сжигания топлива**

№	Характеристика	Величина
1	Количество OFA-горелок, шт	6
2	Высота расположения яруса нижних горелок, м	7,315
3	Высота расположения яруса верхних горелок, м	10,115
4	Высота расположения яруса OFA-горелок, м	15,735
5	Диаметр OFA-горелок, м	0,7

В работе были исследованы случаи с процентным содержанием подаваемого воздуха через сопла OFA, равным 0 (базовый случай), 10 и 20 % от общего количества вторичного и третичного воздуха, подаваемого в топочную камеру. Расходы и скорости вторичного и третичного воздуха, подаваемого через горелки и сопла OFA, представлены в таблице 9.

Таблица 9

**Аэродинамические характеристики при организации
ступенчатого сжигания топлива**

% OFA	0	10	20
Массовый расход воздуха через сопло OFA, кг/с	-	4,5	8,97
Объемный расход воздуха через сопло OFA, м ³ /с	-	8,5	16,95
Скорость подачи воздуха через сопло OFA, м/с	-	20,3	40,5
Расчетная скорость вторичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	28	25	22
Расчетная скорость третичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	26	23	21
Расчетная скорость вторичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	23	21	18
Расчетная скорость третичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	23	21	18

На рисунках 45-47 показано распределение вектора полной скорости в центральном продольном сечении (рисунок 45), в

области расположения OFA-инжекторов (рисунок 46) и на выходе из топочной камеры (рисунок 47) для базового случая (OFA = 0%) и с применением технологии «острого дутья» (OFA = 20%). Сравнительный анализ рисунков показывает, что аэродинамические характеристики горения пылеугольного факела при внедрении дополнительных сопел OFA отличаются от базового случая, когда эти сопла отсутствуют.

Анализ рисунка 45 показывает, что форма факела и распределение по скоростям в отличие от базового случая изменились – наиболее интенсивно процесс горения происходит в центральной части топочной камеры, в связи с чем скорости газоздушных потоков в этой области увеличились. Из рисунка 46 можно видеть, что в связи с высокой скоростью подачи дополнительного воздуха (около 40 м/с) потоки сильно турбулизированы. Заметны завихрения в пристеночных областях топочной камеры и в центральной области, где происходит смешение встречных потоков воздуха, исходящих из OFA-инжекторов.

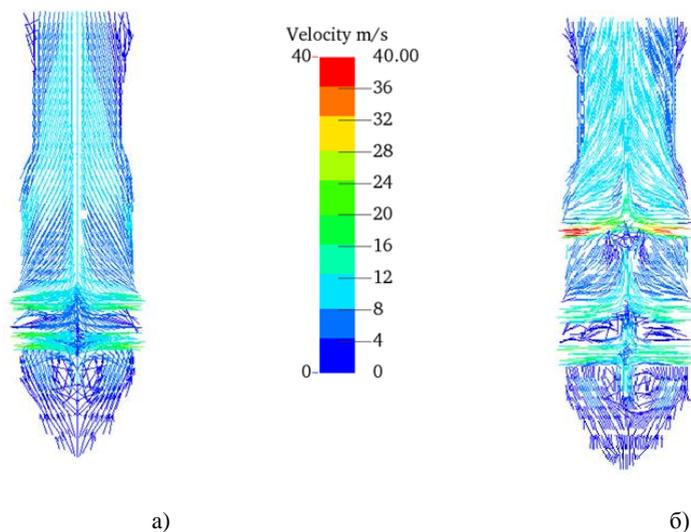


Рисунок 45 – Распределение вектора скорости в центральном продольном сечении ($Y=5,38$ м) топочной камеры котла ПК-39: а) базовый случай (OFA=0%), б) с внедренными OFA-инжекторами (OFA=20%)

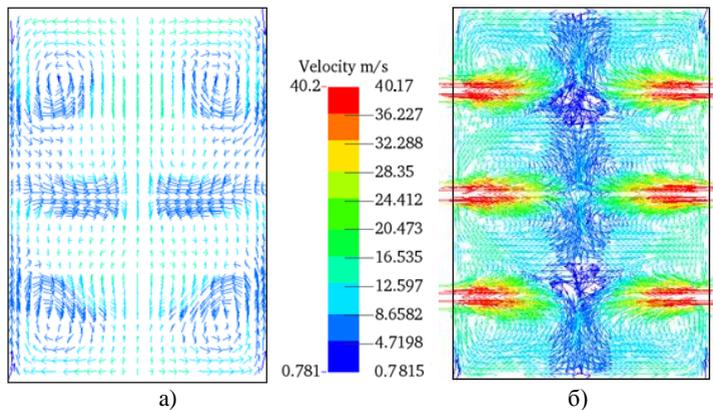


Рисунок 46 – Распределение вектора скорости в поперечном сечении топочной камеры котла ПК-39 в зоне расположения сопел OFA ($Z=15,735$ м): а) базовый случай (OFA=0%), б) с внедренными OFA-инжекторами (OFA=20%)

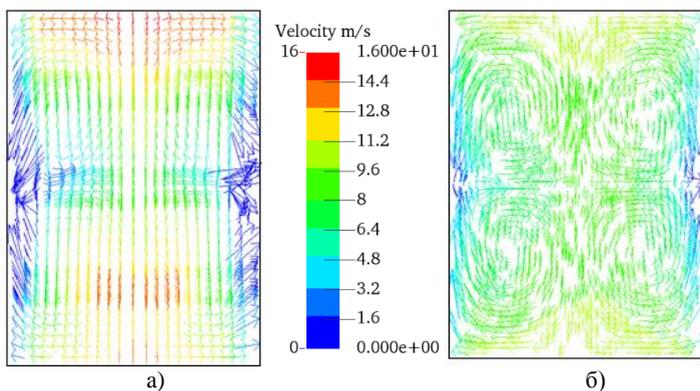


Рисунок 47 – Распределение вектора скорости на выходе из топочной камеры котла ПК-39 ($Z=29,595$ м): а) базовый случай (OFA=0%), б) с внедренными OFA-инжекторами (OFA=20%)

На рисунке 47 представлено распределение вектора полной скорости потоков на выходе из топочной камеры котла ПК-39 при традиционном сжигании пылеугольной смеси (а), и при подаче 20% от общего массового расхода вторичного и третичного воздуха через сопла OFA (б).

Рисунок 47 указывает на то, что в отличие от традиционного сжигания пылеугольного топлива вихревой характер течения на выходе из топки ослабевает незначительно – отчетливо видны 4 вихря. Это приводит к более длительному нахождению продуктов сгорания в топочной камере и, как следствие, к большему восстановлению оксида азота NO до молекулярного азота N_2 .

На рисунках 48-51 представлены поля температуры при различных значениях воздуха, подаваемого через дополнительные горелки. Распределение средних значений температуры по высоте топочной камеры показано на рисунке 48. Также на графике нанесены результаты натурального эксперимента, проведенного на Аксуской ТЭС [55, 62].

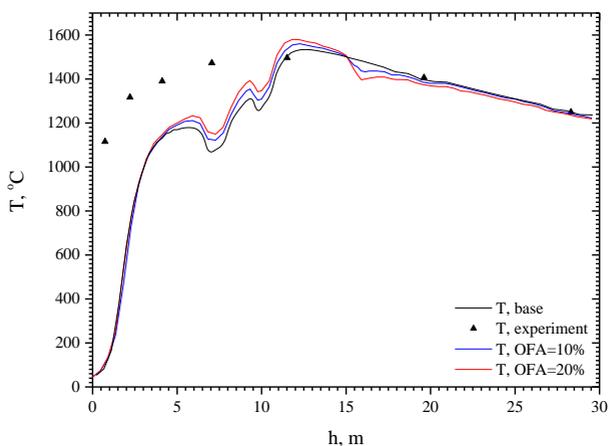


Рисунок 48 – Распределение температуры по высоте топочной камеры котла ПК-39 для различных значений воздуха, подаваемого через сопла OFA и сравнение с экспериментом [55, 62]

Анализ рисунка показывает, что с увеличением процента третичного воздуха, подаваемого через сопла OFA, температура в зоне активного горения увеличивается, а в области расположения OFA-инжекторов, наоборот, уменьшается. Это связано с тем, что в районе расположения горелочных устройств уменьшается коэффициент избытка воздуха, что приводит к уменьшению температуры горения. По мере продвижения к выходу из топочной

камеры поле температуры выравнивается и различия в значениях средней температуры для разных случаев уменьшаются. На выходе различие в средних значениях составляет 13,6 °С.

Также можно видеть, что наибольшие различия между результатами вычислительных и натуральных экспериментов наблюдаются в области поджигания пылеугольной смеси. По мере продвижения к выходу из топочного пространства эти различия незначительны, что говорит о хорошей согласованности и, как следствие, адекватности используемых моделей.

На рисунке 49 представлено 3D-распределение поля температуры в области расположения верхнего яруса горелок для традиционного сжигания (а) и для случая с внедренной технологией OFA=20% (б). Сравнительный анализ рисунка показывает, что в области верхнего яруса горелок ($z=10,115\text{ м}$) с увеличением процента массового расхода при подаче дополнительного воздуха через сопла OFA температура факела увеличивается, что подтверждается рисунком 48.

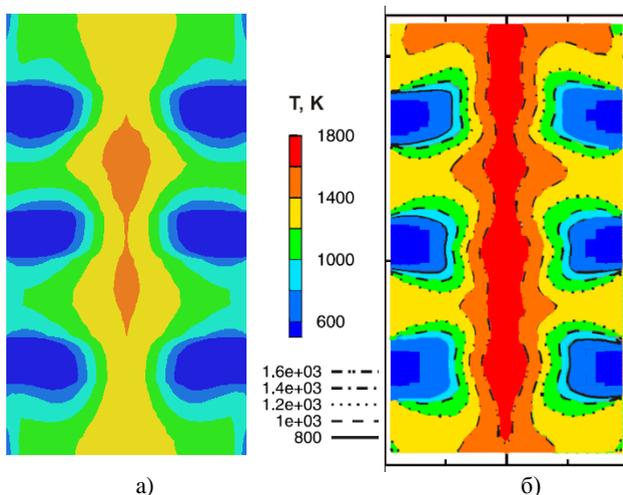


Рисунок 49 – Распределение температуры в поперечном сечении топочной камеры котла ПК-39 в зоне расположения горелок ($Z=10,115\text{ м}$): а) базовый случай (OFA=0%), б) с внедренными OFA-инжекторами (OFA=20%)

На рисунке 50 представлено трехмерное поле температуры в центральном продольном сечении топочной камеры котла ПК-39 для базового случая и для случая OFA=20%. Из анализа рисунка видно, что максимальная температура в центральной части топочной камеры при внедрении технологии острого дутья уменьшилась. Также, рисунок подтверждает изменение в форме факела в области выше яруса инжекторов OFA.

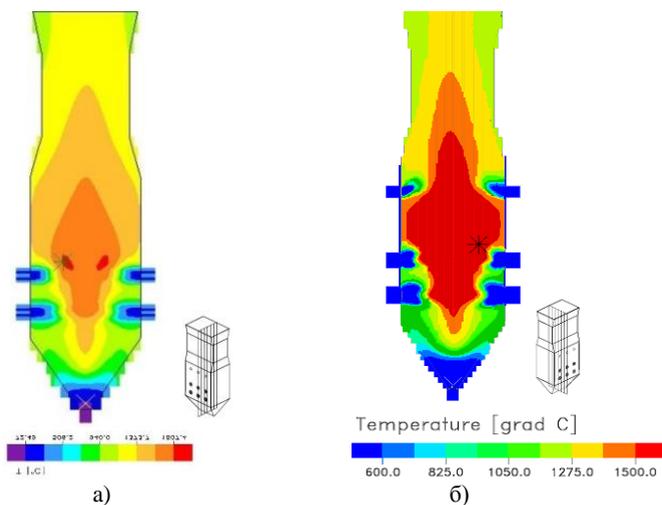


Рисунок 50 – Распределение температуры в центральном продольном сечении ($Y=5.38$ м) топочной камеры котла ПК-39: а) базовый случай (OFA=0%), б) с внедренными OFA-инжекторами (OFA=20%)

Трехмерный график распределения температуры на выходе из топочной камеры котла ПК-39 для трех исследуемых случаев с различным массовым расходом воздуха через сопла OFA изображен на рисунке 51. Из рисунка видно, что увеличение расхода третичного воздуха через сопла приводит к уменьшению температуры на выходе из топочного пространства, что подтверждает рисунок 48.

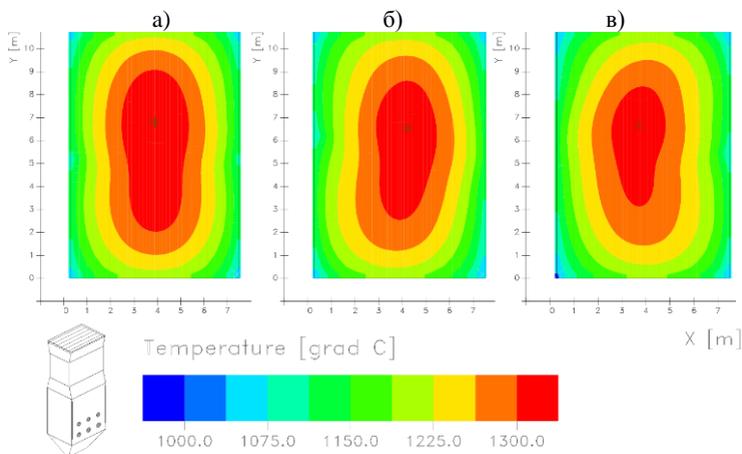


Рисунок 51 – Распределение температуры на выходе ($Z=29,60$ м) из топочной камеры котла ПК-39 для различных значений массового расхода воздуха, подаваемого через OFA-инжекторы: а) – базовый случай (OFA=0%); б) – OFA=10%; в) – OFA=20%

На рисунке 52 представлено распределение концентрации O_2 по высоте топочной камеры. Анализ рисунка показывает, что наибольшие различия в значениях наблюдаются только в центральной части топочной камеры. В области расположения горелок средние значения концентрации кислорода с увеличением процента OFA уменьшаются, а в области расположения инжекторов OFA увеличиваются. Это объясняется различиями в массовых расходах подаваемого воздуха через горелки и через сопла OFA (таблица 9). По мере продвижения к выходу из топочной камеры различия в значениях концентрации кислорода уменьшаются.

На рисунках 53-55 представлены графики распределения пылегазовых продуктов сгорания – оксидов углерода CO и CO_2 , и оксида азота NO по высоте топочного пространства котла ПК-39 Аксуской ТЭС. Анализируя распределение оксидов углерода (рисунки 53-54), можно видеть, что наибольшие различия в значениях заметны в области расположения пояса горелок и OFA-инжекторов. К выходу из топочного пространства с увеличением массового расхода воздуха через сопла OFA концентрация оксида углерода CO увеличивается, в то время как концентрация диоксида углерода CO_2

снижается. На выходе из топочного пространства различия в значениях концентраций CO и CO_2 сокращаются (рисунок 53-54). Так, различия в концентрации CO для базового случая и для $OFA=20\%$ на выходе из топки составляют 90 мг/Нм^3 , а для концентрации CO_2 данное значение не превышает $0,001 \text{ кг/кг}$.

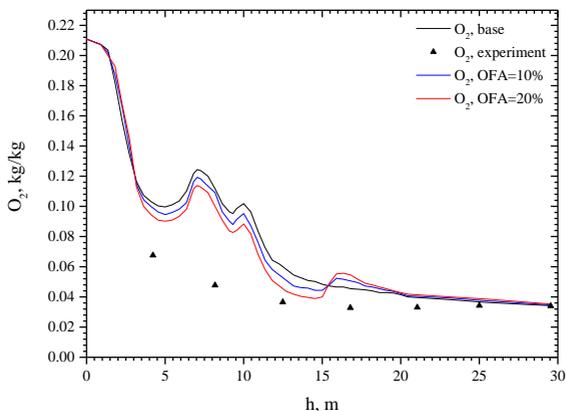


Рисунок 52 – Распределение концентрации кислорода O_2 по высоте топочной камеры для различных значений воздуха, подаваемого через сопла OFA и сравнение с экспериментом [55, 62]

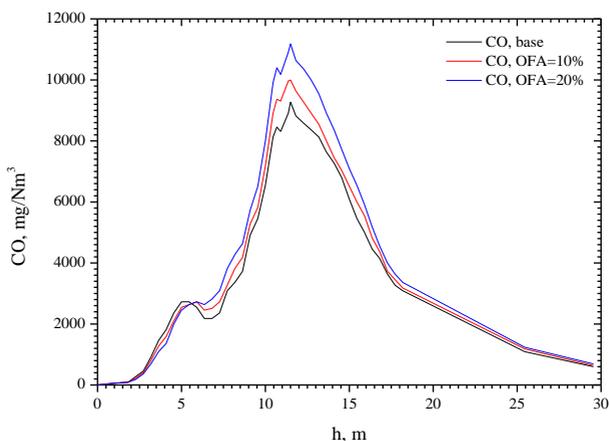


Рисунок 53 – Распределение концентрации CO по высоте топочной камеры котла ПК-39 для различных значений воздуха, подаваемого через сопла OFA

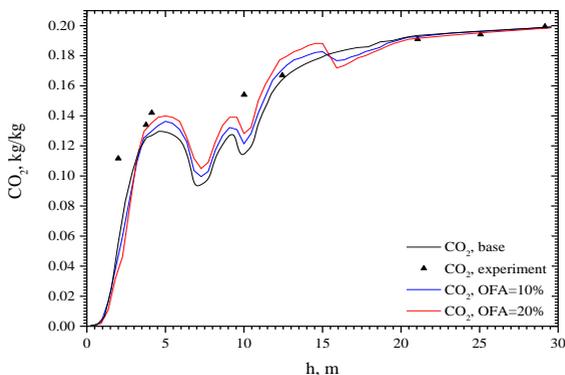


Рисунок 54 – Распределение концентрации CO_2 по высоте топочной камеры для различных значений воздушных потоков, подаваемых через сопла OFA и сравнение с экспериментом [55, 62]

На рисунках 55-57 показано влияние процентного содержания воздуха, подаваемого через OFA-инжекторы на концентрацию оксида азота. Рисунок 55 представляет собой распределение концентрации оксида азота NO по высоте топочного пространства котла ПК-39 Аксуской ТЭС.

Анализ рисунка 55 позволяет сделать вывод о том, что увеличение массового расхода воздуха, подаваемого через OFA-инжекторы, ведет к уменьшению концентрации NO на выходе из топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС. Это подтверждается известной зависимостью образующихся оксидов азота NO от температуры [41, 50] и анализом распределения температуры в топочной камере котла ПК-39, представленном на рисунках 48-51.

На рисунке 56 представлены трехмерные распределения концентраций оксида азота NO на выходе из топочного пространства котла ПК-39 для трех вариантов подачи дополнительного воздуха через инжекторы OFA: а) – OFA=0% (базовый вариант), б) – OFA=10%, в) – OFA=20%. Анализ рисунка показывает, что увеличение воздуха, подаваемого через инжекторы OFA, позволяет снизить концентрацию оксида азота на выходе из топочной камеры с 690,9 мг/Нм³ до 600,2 мг/Нм³. Результаты проведенных исследований представлены в виде диаграммы на рисунке 57.

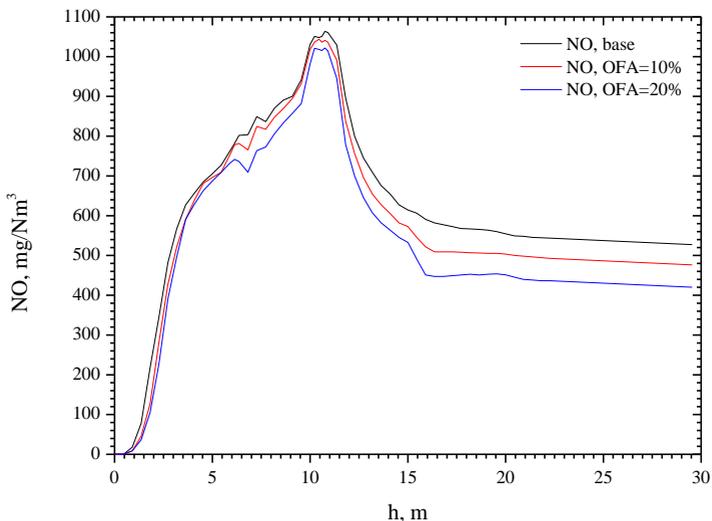


Рисунок 55 – Распределение концентрации окиси азота NO по высоте топочной камеры для различных значений воздуха, подаваемого через сопла OFA

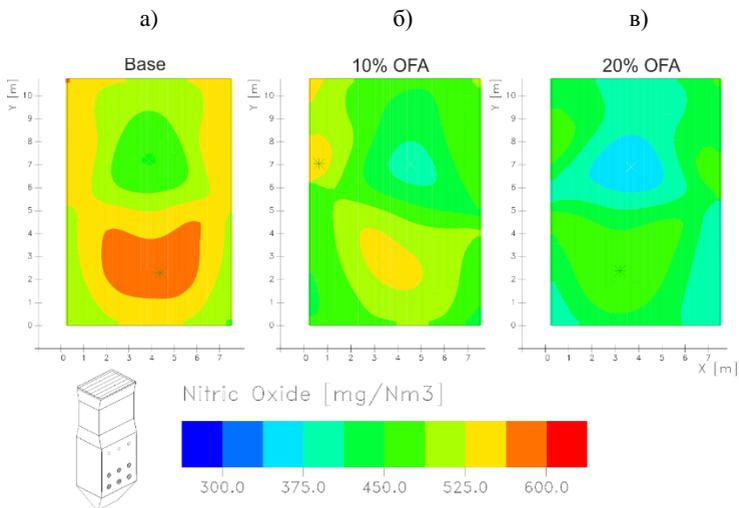


Рисунок 56 – Распределение концентрации NO на выходе из топочной камеры котла ПК-39 ($Z=29,60$ м) при различных значениях воздуха, подаваемого через дополнительные горелки: а) – базовый случай (OFA=0%); б) – OFA=10%; в) – OFA=20%

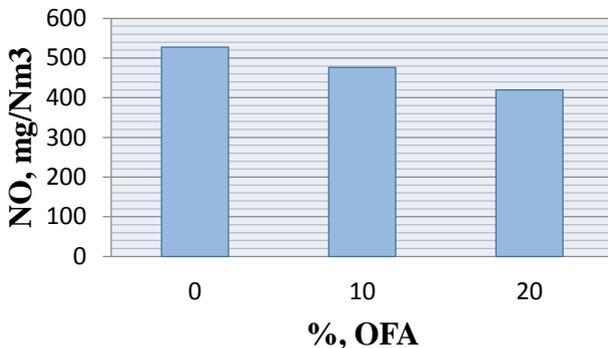


Рисунок 57 – Влияние процента массового расхода воздуха через OFA-инжекторы на значения концентрации NO на выходе из топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС

В монографии представлены вычислительные эксперименты по внедрению на примере топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС-технологии острого дутья (Overfire air), которая основана на разделении подаваемого в топочное пространство окислителя таким образом, чтобы уменьшить количество топливных NO_x в области расположения горелок за счет уменьшения избытка воздуха, и количество термических NO_x за счет снижения температуры факела в области расположения OFA-инжекторов.

Исследования показывают, что внедрение OFA-технологии на котле ПК-39 Аксуской ТЭС приводит к изменению в распределении температуры T , концентраций оксидов углерода CO и CO_2 и концентраций оксида азота NO в топочном пространстве. Наиболее важным результатом предлагаемой в этой главе монографии OFA-технологии является снижение с ее помощью концентрации оксида азота NO на выходе из топочной камеры при OFA=20% на 20% (рисунок 57).

Таким образом, исследования, проведенные в настоящей монографии, показывают, что технология «острого дутья» (Overfire air) является одним из перспективных способов снижения выбросов вредных веществ (оксида азота NO_x и диоксида углерода CO_2) в атмосферу и может быть использована при сжигании высокозольных топлив в топочных камерах углесжигающих ТЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая монография посвящена исследованию процессов тепломассопереноса, происходящих в топочной камере котла ПК-39 при сжигании в ней пылеугольного топлива – высокозольного Экибастузского угля. В результате проведения и обработки результатов вычислительных экспериментов можно сделать следующие **выводы**:

– Разработана методика проведения вычислительных экспериментов по горению пылеугольного топлива в топочных камерах реальных котлов, которая позволяет учитывать кинетику химических реакций, многофазность и турбулентность течений, нелинейные эффекты теплового излучения при движении высокотемпературных и химически реагирующих потоков.

– Разработаны и предложены математические модели процесса горения монодисперсного и полидисперсного пылеугольных факелов в топочной камере котла ПК-39, адекватно описывающие процессы тепломассопереноса в турбулентных химически реагирующих средах, и физические и геометрические модели котла ПК-39 Аксуской ТЭС при традиционном сжигании в ней угольной пыли и при внедрении на котле технологии «Overfire air».

Представленные в монографии графики трехмерного распределения векторов скоростей V , температур T , концентраций CO , CO_2 , NO , O_2 и химической энергии Q_{chem} для различных сечений топочной камеры позволяют определить минимальные, максимальные и средние значения этих величин на выходе из топки, в области расположения пояса горелок и по всему объему топочного пространства.

Проведен сравнительный анализ основных характеристик (температуры T , химической энергии, выделяющейся в результате химических реакций Q_{chem} , и содержания концентраций кислорода O_2 и оксидов углерода CO , CO_2) процесса горения монодисперсного и полидисперсного потока частиц с экспериментальными данными.

– Показано, что значения температур и концентраций CO , CO_2 и O_2 , полученные при моделировании горения полидисперсного пылеугольного факела, наиболее точно описывают данные натурального эксперимента [55, 62]. Это позволяет сделать вывод о

применимости предложенных в настоящей работе математических моделей для расчетов высокотемпературных потоков с химическими реакциями в областях реальной геометрии.

Исследованы поля вектора скорости V , температуры T , давления p , концентраций газообразных веществ O_2 , CO , CO_2 , NO и химическая энергия Q_{chem} при горении полидисперсного пылеугольного факела, имеющего следующее распределение угольных частиц по фракциям: $d_p=10$ мкм – 10%; $d_p=30$ мкм – 20%; $d_p=60$ мкм – 40%; $d_p=100$ мкм – 20%; $d_p=120$ мкм – 10%.

– Показано, что наибольшее количество тепла выделяется в поясе горелок, поскольку в этой области происходит столкновение потоков аэросмеси. По мере продвижения к выходу из топочного пространства химическая энергия уменьшается, что связано с уменьшением интенсивности протекающих химических реакций.

– Показано, что процесс образования оксидов углерода зависит не только от явлений переноса, но и от кинетики процесса, скорость образования CO_2 и CO сильно увеличивается с ростом температуры T . В области расположения горелок происходят основные реакции реагирования углерода с образованием окиси углерода, о чем свидетельствуют максимумы на кривых распределения CO . Характер распределения окиси углерода CO_2 не соответствует полю CO , что говорит об отличиях в процессе образования CO_2 и CO . Основное образование диоксида углерода CO_2 происходит по мере удаления от центра топки, что связано с догоранием CO .

– Показано, что наиболее интенсивное газообразование оксида азота NO происходит в области распространения потоков из горелок, т.е. в области активного горения, что соответствует реальной картине процесса в топочной камере.

Было исследовано влияние влажности сжигаемого угля на процессы тепломассопереноса. Были рассчитаны температурные (T) и концентрационные (O_2 , H_2O , CO , CO_2 , NO) поля для Экибастузского угля с рабочей влажностью, равной 5, 7, 9 и 11%.

– Показано, что увеличение влажности угля приводит к уменьшению температуры как в области расположения горелок, так и на выходе из топочной камеры. Концентрации кислорода, воды и диоксида углерода также уменьшаются с уменьшением рабочей влаги по всей высоте топочного пространства.

– В области расположения горелочных устройств с увеличением влажности количество образуемого монооксида углерода CO снижается, однако, выше зоны активного горения увеличение влажности приводит к менее интенсивному процессу догорания CO до CO_2 .

– В области активного горения уменьшение влажности и повышение температуры влекут повышенное формирование оксидов азота. Однако к выходу из топки поля концентрации окиси азота выравниваются и различия в концентрациях составляют порядка 3-18 мг/Нм³.

Было проведены вычислительные эксперименты по внедрению технологии Overfire Air на примере топочной камеры котла ПК-39 Аксуской ТЭС. Показано, что при подаче части воздуха через дополнительные сопла OFA изменяется аэродинамика течения. За счет увеличенных скоростей подачи дополнительно воздуха через OFA-инжекторы происходит более сильная турбулизация потоков и, как следствие, увеличивается интенсивность протекания химических реакций горения угольных частиц в области ядра факела.

– Основное различие в температурном поле топочной камеры достигается в области активного горения. При увеличении массового расхода воздуха через сопла дополнительного воздуха OFA средняя температура в области расположения ядра факела возрастает, а в области расположения OFA-инжекторов уменьшается. Однако к выходу из топочного пространства различия в температуре не превышают 15 °С.

– Наибольшие различия в образовании оксидов углерода CO и CO_2 заметны в области расположения пояса горелок и OFA-инжекторов, на выходе же из топки эти значения сокращаются. Увеличение массового расхода воздуха, подаваемого через специальные сопла OFA, не приводит к значительному изменению в концентрации диоксида углерода CO_2 , но приводит к увеличению концентрации CO примерно на 90 мг/Нм³. Было показано, что внедрение технологии острого дутья приводит к значительному (порядка 100 мг/Нм³) уменьшению концентрации оксида азота NO на выходе из топочной камеры при сжигании пылеугольного топлива.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 BP Statistical Review of World Energy // www.bp.com/statisticalreview
- 2 Горение. Химическая энциклопедия // www.xumuk.ru/encyklopedia/1128.html.
- 3 Резняков А.Б., Басина И.П., Бухман С.В., Вдовенко М.И., Устименко Б.П. Горение натурального твердого топлива. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 410 с.
- 4 Кабилов М. Исследование математических моделей процесса фильтрационного горения газов: дис. ...канд. физ.-мат. наук. – Душанбе, 1999. – 107 с.
- 5 Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
- 6 Корольченко А.Я. Процессы горения и взрыва. – М.: Пожнаука, 2007. – 266 с., ил.
- 7 Вулис Л. Тепловой режим горения. – М.: Рипол Классик, 1954. – 288 с.
- 8 Процесс горения. Котельный завод Росэнергопром // www.kvzr.ru/combustion-process.html.
- 9 Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.
- 10 Типы топок. Котельное оборудование // kotelnoe-oborudovanie.kz/types-furnaces.html.
- 11 Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы: справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
- 12 Устройства для сжигания твердого топлива (топки). Мир науки // worldofscience.ru/teplotehnika/4770-ustrojstva-dlya-szhiganiya-tverdogo-topliva-topki.html.
- 13 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Bekmukhamet A., Beketayeva M., Gabitova Z. Computational method for investigation of solid fuel combustion in combustion chambers of a heat power plant // High temperature. – 2015. – Vol. 53, issue 5. – P. 751-757.
- 14 Askarova A., Lavrichsheva Y., Leithner R., Müller H., Magda A. Combustion of low-rank coals in furnaces of Kazakhstan coal-firing power plants // VDI Berichte. – 2007. – Issue, 1988. – P. 497-502.
- 15 Волошенко А., Медведев В., Озерова И. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподач: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 100 с.
- 16 Каталог-справочник подольского машиностроительного завода. – Подольск: Изд-во ЗиО-Подольск, 2004. – 73 с.
- 17 Leithner R., Müller H. CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics. – Cambridge, 2003. – P. 172.
- 18 Leithner R. Der Zero Emission Coal Alliance Prozess und ähnliche Kreisläufe // DECHEMA GVC-Jahrestagung. – Karlsruhe, 2004. – 201 p.
- 19 Leithner R., Müller H., Heitmüller R. Dreidimensionale Simulation von Dampferzeuger-Brennkammern einschließlich der NOx-Schadstoffkinetik // VGB-Fachtagung: Dampfkessel und Dampfkesselbetrieb. – Essen, 1993. – 152 p.

20 Leithner R. Combined cycles for CO₂-capture with high efficiency // International Journal of Energy Technology and Policy. – 2007. – Vol. 5. – P.1472.

21 Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. – 152 p.

22 Müller H. Numerische Berechnung dreidimensionaler turbulenter Strömungen in Dampferzeugern mit Wärmeübergang und chemischen Reactionen am Beispiel des SNCR-Verfahrens und der Kohleverbrennung // Fortschritt-Berichte VDI-Verlag, 1992. – № 268. – 158 s.

23 Müller H., Schiller A. Prediction of Combustion and Pollutant Formation in Coal Fired Furnaces // 6th Int. Conference on Combustion and Heat Technics. – 1994. – Ungarn. – P.45-52.

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

25 Askarova A., Messerle V., Ustimenko A., Bolegenova S., Maximov V., Gabitova Z. Numerical simulation of pulverized coal combustion in a power boiler furnace // High temperature. – Vol. 53, issue 3. – 2015. – P. 445-452.

26 Askarova A., Messerle V., Ustimenko A., Bolegenova S., Maksimov V. Numerical simulation of the coal combustion process initiated by a plasma source // Thermophysics and aeromechanics. – 2014. – Vol 21, issue 6.– P. 747-754.

27 Askarova A., Karpenko E., Messerle V. et.al. Plasma enhancement of combustion of solid fuels // Journal of High Energy Chemistry. – 2006. – Vol. 40, Issue 2. – P.111-118.

28 Askarova A., Messerle V., Ustimenko A., Loktiomova I. 3D Modeling of the Two-Stage Combustion of Ekibastuz Coal in the Furnace Chamber of a PK-39 Boiler at the Ermakovo District Power Station // Thermal Engineering. – 2003. –Vol. 50, Issue 8. – P. 633-63.

29 Мир знаний: РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКАЯ РАБОТА №1 «Вихревые пылеугольные горелки» // mirznanii.com/info/vikhrevye-pyleugolnye-gorelki_191653.

30 Бухман М. Вихревые горелки с низким выходом NO_x // Энергетика и топливные ресурсы Казахстана. – 2001. – №4. – С. 64-68.

31 Беликов С., Котлер В. Котлы тепловых электростанций и защита атмосферы: учебное пособие для вузов и колледжей по спец. "Тепловые электростанции". – М.: Аква-Терм, 2008. – 210 с.

32 Айзен Б., Ромашко И., Сотников И. Горелочные устройства котлов ЗиО. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 143 с.

33 Хзмалян Д., Каган Я. Теория горения и топочные устройства. – М.: Энергия, 1976. – 484 с.

34 Дубровин И., Дубровин Е. Уголь как хорошо забытое будущее // Энергетика и промышленность России. – 2008. – №15-16. – P. 107-108.

35 Askarova A.S., Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Beketayeva M.T., Maximov Yu.V., Ospanova Sh., Gabitova Z.K. Investigation of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ 420 combustion chamber // WSEAS Transactions on Heat and Mass Transfer. – 2014. – Vol. 9. – P. 39-50.

- 36 Askarova A., Bekmukhamet A., Bolegenova S., Beketayeva M.T., Maximov Yu.V., Ospanova Sh., Gabitova Z.K. Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber // *International Journal of Mechanics*. – 2014. – Vol. 8. – P. 112-122.
- 37 Askarova A., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Ospanova Sh., Gabitova Z. Using 3D modeling technology for investigation of conventional combustion mode of BKZ-420-140-7C combustion chamber // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2014. – №9, Vol.1. – P. 24-28.
- 38 Bird R., Stewart E., Lighfoot E. *Transport phenomena*. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 912 p.
- 39 Колмогоров А. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости // *Известия АН СССР*. – 1942. – № 6(1). – С. 56–66.
- 40 Launder B., Spalding D. The numerical computation of turbulent flows // *Comp. Meths. Appl. Mech. Eng.* – 1974. –Vol.3. – P.269–289.
- 41 Zeldovich J. The oxidation of Nitrogen in combustions and explosions // *Acta Physicochemica*. – 1946. –Vol. 21. – P. 557.
- 42 Weber K. *Dreidimensionale Simulation der Gas–Feststoff–Strömung in kohlegefeuerten Dampferzeugern: Fortschritt–Berichte VDI–Verlag*. – 1999. – Reihe 6, № 415. – 198 s.
- 43 Лаврищева Е.И. 3D-моделирование высокотемпературных и термохимически активированных реагирующих потоков: дис. ...канд. физ.-мат. наук. – Алматы, 2006. – 145 с.
- 44 Smoot L. Modeling of coal combustion processes // *Prog. Energy Combustion Science*. – 1987. – №.10. – P. 229–272.
- 45 Filla M., Maresa G. A Flux Method Approach to the Radiative Transfer in a Cracking Furnace // *Riv. Combust.* – 1975. – Vol.7. – №8. – P.321– 328.
- 46 Lockwood F., Shah N. An improved flux model for calculation of radiation heat transfer in combustion chambers // *ASME–AIChE Heat transfer Conf.: ASME–Paper*. – St. Louis, MO. – 1976. – P. 2-7.
- 47 Пашков Л. *Основы теории горения: учебное пособие*. – М.: МЭИ (ТУ), 2002. – 125 с.
- 48 ГОСТ30404-2000. Топливо твердое минеральное. Определение форм серы. – Введ. 2000-06-22. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Изд-во стандартов, 2001. – 18 с.
- 49 Технический регламент «Требования к эмиссиям в окружающую среду при сжигании различных видов топлива в котельных установках тепловых электрических станций» N 1232, 14 декабря 2007 года.
- 50 Зельдович Я.Б., Садовников П., Франк-Каменецкий Д. Окисление азота при горении. – Москва-Ленинград: Издательство АН СССР, 1947. – 150 с.
- 51 Fenimore C. Formation of nitric oxide in premixed hydrocarbon flames // *Symposium (International) on Combustion*. – 1971. – 13(1). – P. 373-380.
- 52 Wolfram J. Bildung von Stickstoffoxiden bei der Verbrennung // *Chemie-Ingenieur-Technik*. – 1972. Vol. 44. – Issue 10. – P. 656–659.
- 53 Сербин С., Мостипаненко А. Исследование механизмов образования оксидов азота в камере сгорания газотурбинной установки типа «Воделей» // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 7 (33). – С. 93-97.

54 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.

55 Алияров Б.К. Освоение сжигания экибастузского угля на тепловых электростанциях. – Алматы: Гылым, 1996. – 272 с.

56 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т., Габитова З.Х. Исследование влияния тонины помола пылеугольного факела // *Материалы междунар. заочной научно-практич. конференции «Физико-математические науки и информационные технологии: актуальные проблемы»*. – Новосибирск, 2012. – С. 118-125.

57 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекетаева М.Т., Габитова З.Х. Влияние размеров угольных частиц на процесс горения в камере сгорания котла ПК-39 // *Материалы VIII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении»*. – Казань, 2012. – С. 371-374.

58 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х., Ергалиева А.Б. Применение 3-D моделирования для решения задачи о горении пылеугольного факела на примере реальной топочной камеры БКЗ-160 // *Материалы II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и достижения в естественных и математических науках»*. – Самара, 2015. – С. 55-60.

59 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х. Моделирование процессов образования продуктов горения в пылеугольном факеле // *Материалы 6 Международной научно-практической конференции "Решение проблем развития предприятий: роль научных исследований"*. – Краснодар, 2014. – С. 97-102.

60 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х. Горение низкосортных углей на казахстанских ТЭЦ // *Материалы 8 Международной научно-практической конференции "Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире"*. – Том 1. – СПб., 2014. – С. 179-184.

61 Соболев А. Сжигание пылевидного топлива: пособие для рабочих кружков. – Москва-Ленинград: Государственное энергетическое издательство, 1932. – 56 с.

62 Алияров Б.К., Устименко Б.П., Бухман М. Разработка и внедрение вихревых трехканальных горелок на котлах ПК-39-2 Ермаковской ГРЭС: отчет КазНИИЭ. – Алматы, 1991. – 372 с. – № 01910010550.

63 Болегенова С.А. Моделирование турбулентного тепломассопереноса в высокотемпературных и химически реагирующих потоках: дис. ...докт. физ.-мат. наук. – Алматы, 2010. – 231 с.

64 Аскарова А., Болегенова С., Болегенова С., Максимов В., Габитова З., Ергалиева А. Исследование влияния дисперсности пылеугольного топлива на тепловые характеристики процесса горения в топочной камере котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 // *Известия Национальной Академии Наук Республики Казахстан*. – 2015. – №2. – С. 147-153.

65 Аскарова А.С., Габитова З.Х. Исследование процессов тепломассопереноса в камерах сгорания ТЭС // *Международная конференция студентов и молодых ученых "Фараби әлемі"*. – Алматы, 2014. – 87 с.

66 Аскарова А., Болегенова С., Бекетаева М., Оспанова Ш., Ергалиева А., Габитова З. Формирование температурного поля при горении пылевидного топлива в камере сгорания // Материалы Международной конференции "Актуальные проблемы энергетики АПК". – Саратов. – 2014. – С. 26-31.

67 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Bekmukhamet A., Gabitova Z., Beketayeva M. Control of harmful emissions concentration into the atmosphere of megacities of Kazakhstan Republic // IERI Procedia. – 2014. – №10. – P. 252-258.

68 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Ергалиева А.Б., Габитова З.Х., Боранбаева А.Е. Исследование характеристик теплообмена при горении пылеугольного факела в топочной камере котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ-3 // Вестник КазНУ. Серия физическая. – Алматы, 2016. – №1(56). – С. 36-43.

69 Аскарова А., Болегенова С., Бекмухамет А., Оспанова Ш., Бекетаева М., Габитова З., Ергалиева А. Тепловые характеристики при сжигании твердого пылеугольного топлива в топочных камерах ТЭС // Materials of IV "Science, Technology and Higher Education" Conference. – Westwood, Canada. – 2014. – P. 323-330.

70 Габитова З., Аскарова А., Максимов В., Бекмухамет А., Бекетаева М., Оспанова Ш., Ергалиева А. Моделирование концентрационных характеристик в камере сгорания котла ПК-39 Аксуйской ГРЭС // Материалы XXX международной научно-практической конференции "Технические науки – от теории к практике". – Новосибирск. – 2014. – С. 112-118.

71 Аскарова А., Болегенова С., Бекетаева М., Габитова З., Нугманова А., Ергалиева А. Вычислительный расчет в областях реальной геометрии для контроля вредных выбросов в атмосферу // ВНКФ-20. – Ижевск. – 2014. – С. 584-585.

72 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Beketaeva M.T., Gabitova Z.Kh. High ash coal burning in the combustion chamber of TPP of the Republic of Kazakhstan // Programm Abstracts of International Symposium "Environmental and engineering aspects for sustainable living". – Hannover, 2014. – P. 19-20.

73 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Maximov V.Yu., Gabitova Z.Kh., Ospanova Sh. Numerical simulation of heat and mass transfer in the presence of physical-chemical processes // Programm Abstracts of International Symposium "Environmental and engineering aspects for sustainable living". – Hannover, 2014. – P. 20-21.

74 Аскарова А.С., Гороховски М.А., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х., Ергалиева А.Б. 3D-моделирование процессов горения полидисперсного пылеугольного факела в топочных камерах ТЭС // Вестник КазНУ. Серия физическая. – Алматы, 2015. – №1(52). – С. 4-10.

75 ГОСТ 11014-2001. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренные методы определения влаги. – Введ. 2001-11-01. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Изд-во стандартов, 2001. – 7 с.

76 Топливо и теория горения: Методические указания к выполнению лабораторных работ. – СПб.: СЗТУ, 2003. – 55 с.

77 Пинчук В., Потапов Б., Шарабура Т. Использование термодинамических показателей для оценки энергетической и технологической ценности различных марок углей // *Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.* – 2008. – С. 228-235

78 Исакаков Р., Энгельшт В. Термодинамический анализ влияния влажности на горение углерода // *Вестник ИГУ.* – 2002. – №. 8. – С. 75-83.

79 Kurose R., Watanabe H., Makino H. Numerical Simulations of Pulverized Coal Combustion // *KONA Powder Particle Journal.* – 2009. – № 27. – P. 144–156.

80 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Gabitova Z., Leithner R., Müller H., Heierle Y. Numerical simulation of high-ash coal combustion with different moisture content at aksu thermal power plant // *International Journal of mathematics and physics.* – 2014 – т. 5, № 2. – P. 29-32.

81 Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Yergaliyeva A., Gabitova Z., Maxutkhanova A., Shortanbayeva Z., Boranbayeva A., Berdikhan K. Application of 3D modeling for solving the problem of combustion coal-dust flame // *Bulgarian Chemical Communication.* – 2016. – Vol. 48. – Special Issue E. – P. 236-241.

82 Аскарова А., Болегенова С., Болегенова С., Максимов В., Габитова З., Ергалиева А., Боранбаева А. Исследование влияния влажности угля на процесс горения методами 3-D-моделирования // *Известия НАН РК. Серия физико-математическая.* – Алматы, 2016. – №2(306). – С. 21-29.

83 Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Yergaliyeva A., Gabitova Z., Maxutkhanova A., Shortanbayeva Z., Boranbayeva A., Berdikhan K. Application of numerical methods for calculating the burning problems of coal-dust flame in real scale // *International Journal of Applied Engineering Research.* – 2016. – Vol. 11. – N. 8. – P. 5511-5515.

84 L. E Instruments International. Combustion Training: NOx reduction // www.e-inst.com/combustion/nox-reduction.

85 Дюсенова Ж.А. Модельная оценка экологической обстановки промышленных регионов // *Мат. межд. науч.-практ. конф., посвященной 25-летию КазГАСА «Региональные проблемы безопасности жизнедеятельности (Охрана и безопасность труда, экология, защита в чрезвычайных ситуациях)».* – Алматы, 2005. – С. 166.

86 Kuang M., Li Z., Liu C., Zhu Q., Zhang Y., Wang Y. Evaluation of overfire air behavior for a down-fired 350 MWe utility boiler with multiple injection and multiple staging // *Applied Thermal Engineering.* – 2012. – № 48. – P.164-175.

87 Huang L., Li Z., Sun R. и Zhou J. Numerical study on the effect of the Over-Fire-Air to the air flow and coal combustion in a 670 t/h wall-fired boilerю – *Fuel processing technology.* – 2006. – Vol. 87(4). – P. 363-371.

88 Liu H., Zailani R., Gibbs B. Comparisons of pulverized coal combustion in air and in mixtures of O₂/CO₂ // *Fuel.* – 2005. – Vol. 84(7). – P. 833-840.

89 Le Bris T., Cadavid F., Caillat S., Pietrzyk S., Blondin J. Baudoin B. Coal combustion modelling of large power plant, for NO x abatement // *Fuel.* – 2007. – Vol. 86(14). – P. 2213-2220.

90 Cremer M., Adams B., Valentine J., Letcavits J., Vierstra S. Use of CFD modeling to guide design and implementation of overfire air for NOx control in coal-

fired boilers // Proceedings of Nineteenth Annual International Pittsburgh Coal Conference. – Pittsburgh, PA. – 2002. – P. 23-27.

91 Cremer M., Valentine J., Shim H., Davis K., Adams B., Letcavits J., Viestra S. CFD-Based development, design, and installation of cost-effective NOx control strategies for coal-fired boilers // Proceedings of the DOE-EPRI-EPA-AWMA Combined Air Pollutant Control Mega Symposium, 2003.–21 p.

92 Valentine J., Cremer M., Davis K., Letcavits J., Viestra S. CFD modeling for design of NOx control systems in two utility boilers // Proceedings of the PowerGen2003 Conference. – 2003. – 17 p.

93 Li M., Wang X., Sun S., Zhen X., Li Q., Zhang T. Influence of Overfire air jet form on low NOx retrofit effect of an opposed firing boiler // Journal of Chinese society of power engineering. – 2015. – Issue 4. – P. 263-269.

94 Аскарова А., Болегова С., Максимов В., Бекмухамет А. Использование технологии «Overfire Air» для снижения выбросов вредных веществ при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания котла БКЗ-160 Алматинской ТЭЦ // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – 2012. – С. 131-140.

95 Askarova A., Messerle V., Ustimenko A., Bolegenova S., Bolegenova S., Maximov V., Ergalieva A. 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. – Issue 1. – P. 125-134.

Научное издание

Алия Сандыбаевна Аскарова
Салтанат Алихановна Болегенова
Зарина Хамитовна Габитова

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА
В ТОПОЧНЫХ КАМЕРАХ ТЭЦ**

Монография

Редактор *Г.С. Бекбердиева*
Компьютерная верстка *Г.К. Шаккозовой*
Дизайн обложки: *А. Калиева*

ИБ №

Подписано в печать 15.02.2019. Формат 60х84/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Объем 8,62 п.л.
Тираж 500 экз. Заказ № . Цена договорная.
Издательский дом «Қазақ университеті»
Казахского национального университета имени аль-Фараби.
050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71, КазНУ.
Отпечатано в типографии издательского дома «Қазақ университеті».