

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Энергетический факультет
Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»
Направление подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент,
Директор ООО «Ремстроймонтаж»
_____ К.А. Хасанов
« ____ » _____ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
«Промышленная теплоэнергетика»,
к.т.н., доцент
_____ К.В. Осинцев
« ____ » _____ 2019 г.

**Компьютерное моделирование конвективного теплообмена
при горении пылеугольного топлива в камере сгорания**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ МАГИСТРАТУРЫ
«ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПЛИВОИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ»
ЮУрГУ–13.04.01.2019.243.03.ПЗ ВКР

Руководитель магистерской программы,
д.т.н., профессор
_____ Е.В. Горопов
« ____ » _____ 2019 г.

Руководитель работы,
к.т.н., доцент
_____ К.В. Осинцев
« ____ » _____ 2019 г.

Автор работы,
магистрант группы П-289
_____ А.Б. Арыстан
« ____ » _____ 2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБОСНОВАНИЕ И АКТУАЛЬНОСТЬ.....	7
2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	9
3 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА	12
3.1 Роль компьютерного моделирования в современных исследованиях.....	12
3.2 Современное состояние проблемы сжигания и переработки энергетических углей и методы повышения эффективности их использования.....	17
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЯ	31
4.1 Основные понятия и определения теории конвективного теплообмена.....	31
4.2 Уравнения, описывающие конвективный теплообмен	32
4.3. Учет теплопроводности при вычислительных расчетах.....	33
4.4 Математическая модель, описывающая движение частиц угля в модельной камере сгорания.....	37
4.5 Подходы к моделированию турбулентного потока при наличии горения.....	46
4.6 Химическая кинетика процесса горения частиц угля.....	47
5 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА И УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА.....	53
5.1 Основные уравнения.....	53
5.2 Моделирование теплового излучения, двухфазности среды и многостадийности химических реакций.....	55
5.3 Метод решения уравнений переноса.....	59
5.4 Постановка физической модели задачи и горения пылеугольного топлива в камере сгорания.....	60
6 ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	74
7 ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ.....	75
8 АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	84
9 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ.....	93
10 ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ.....	97
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	108
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	110

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

На основе численной модели исследованы процессы конвективного и радиационного теплопереноса в топочном пространстве. Получены основные закономерности распределения лучистого тепла в объеме топочной камеры и определены значения радиационного, конвективного и полного потока тепла на стенки камеры сгорания. На основе физических и кинетических моделей разработаны численные модели для реализации 3D вычислительных экспериментов по исследованию процессов тепломассопереноса в реальных физических объектах. Проведен анализ актуальных направлений применения численных методов и компьютерного моделирования при проведении теоретических исследований в области теплофизики. Представлены результаты 3-х мерного численного моделирования процесса формирования газовых компонентов (оксиды азота и углерода, азотсодержащие вещества) при соответствующих условиях на реальном энергетическом объекте на примере камеры сгорания котла ПК-39 Ермаковской ГРЭС. Исследования проведены для различных условий (вариация коэффициента избытка воздуха). Проведены численные исследования процесса денитрификации с помощью цепного разветвленного механизма селективного некаталитического снижения оксидов азота и проведено сравнение с экспериментальными данными.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается сопоставлением полученных данных с имеющимися расчетными и экспериментальными данными других авторов. Для проведения вычислительных экспериментов используются фундаментальные физические законы сохранения, кинетические модели и современные численные методы, адекватно описывающие реальный процесс и позволяющие проводить компьютерное моделирование с достаточно высокой точностью.

Научная новизна проведенных в работе исследований заключается в применении современных численных методов 3-D компьютерного моделирования, позволяющих дать полное описание сложных процессов тепломассообмена и формирования вредных пылегазовых выбросов при горении низкосортных угольных топлив на реальных энергетических объектах Республики Казахстана. Получены трехмерные распределения тепловых потоков и исследованы закономерности их распространения во всем объеме исследуемых топочных камер и на граничных поверхностях. Впервые в широком диапазоне параметров описан процесс формирования продуктов реакции горения, в том числе вредных (NO , NO_2 , CO , CO_2 и др.), определены области с наибольшей концентраций вредных газовых продуктов горения, определены закономерности их развития и определены концентрации на выходе. Исследован процесс селективного некаталитического снижения (SNCR) оксидов азота и определены наиболее эффективные условия протекания реакций селективного некаталитического снижения оксидов азот. Физико-математические модели, предлагаемые в данной работе, могут быть использованы не только при анализе процессов горения твердых топлив и формирования основных продуктов реакций,

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

но и при анализе многих других технологических процессов, таких как сжигание различных видов углей, различных фракций угольных частиц, при различных условиях воспламенения и стабилизации горения, при исследовании конструкционных решений и т. д.

Практическая ценность диссертации. Применение математического моделирования при исследовании процессов горения в областях реальной геометрии позволяет успешно решать как фундаментальные задачи, так и прикладные, с которыми в повседневной практике приходится сталкиваться различным предприятиям топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан. Использование современных компьютерных технологий для проведения вычислительных экспериментов по сжиганию твердого топлива в камерах сгорания ТЭС, позволит подробно описать поля скорости, температуры, давления и концентраций всех продуктов сжигания и прежде всего вредных веществ и других характеристик процесса сжигания угля по всему топочному пространству и на выходе их камеры сгорания.

Полученные результаты численного моделирования позволяют:

- применить предложенные в работе методы для улучшения стабилизации горения, повышения интенсификации смешения топлива и окислителя, снижения концентрации вредных веществ в выбросных газах промышленных комплексов,
- предложить эффективные конструктивные и компоновочные решения для повышения ресурса и надежности камер сгорания,
- исследовать тепловые процессы на граничных поверхностях различных камер сгорания, предупредить и устранить опасность возникновения перегрева нагревательных поверхностей и обеспечить необходимое распределение теплового потока к стенкам топочных камер,
- создать методику исследования процессов горения топлива и формирования образования вредных пылегазовых выбросов, предложить экономичные эффективные методы сжигания казахстанского низкосортного энергетического топлива и разработать соответствующую концепцию производства энергии с целью повышения эффективности энергетических установок и уменьшения выброса вредных веществ в атмосферу,
- разработать универсальные технологии оценки вредного воздействия угольных ТЭС на окружающую среду и выработать ряд рекомендаций по решению экологических проблем, связанных со снижением токсичных выбросов.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 ОБОСНОВАНИЕ И АКТУАЛЬНОСТЬ

Актуальность исследования. Применение математического моделирования при изучении многообразных явления в гидро- и аэродинамике и теплофизике (Computational Fluid Dynamics CFD) сегодня является надежным и эффективным средством моделирования сложных физико-химических процессов, происходящих при движении жидких и газовых сред, с учетом широкого ряда дополнительных явлений, таких как горение, тепло и массоперенос, фазовые переходы и т.д. В современных исследованиях математическое и компьютерное моделирование занимает ведущее место среди самых эффективных информационных технологий, определяющих развитие передовых отраслей фундаментальной науки и техники.

Благодаря интенсивному развитию науки в этой области результаты численных расчетов в настоящее время характеризуются достаточно высокой точностью и широкими пределами применения от простейших задач до сложных промышленных расчетов (ТЭС, металлургия и т.д.). Вычислительные эксперименты используются также для обоснования выбранных параметров и режимов теплофизических и гидроаэродинамических процессов и для подготовки последующих экспериментальных исследований на реальных объектах.

Численный эксперимент в настоящее время — это один из эффективных путей теоретического исследования и применяется намного чаще. В основе численных моделей лежат математические модели реальных процессов, в частности физических. Чем точнее модель отражает какой-то процесс, тем лучше соответствие результатов, полученных на основе этой модели, и опыта.

Но для получения хорошего согласия с экспериментом только построения модели еще не является достаточным. Необходим также метод решения систем уравнений, получаемых в результате реализации математической модели, поскольку далеко не всегда модель численного (в отличие от аналитического) решения оказывается эффективной, не вносящей возмущения в получаемые результаты. В то же время аналитическое решение удается получить, как правило, для простых линейных систем. Большинство же систем уравнений, описывающих реальные физические процессы, это нелинейные дифференциальные уравнения высокого порядка с источниками членами, решить их, как правило, можно только численно. Другими словами, численные решения — это основной путь теоретического исследования физических процессов.

Таким образом, важно отметить, что при исследовании сложных физико-химических процессов в различных областях науки и техники необходимо уметь разрабатывать полный комплекс: многопроцессорная высокоскоростная вычислительная система, адекватная математическая модель и точный метод решения систем дифференциальных уравнений, составляющих основу математической модели.

Объект исследования - конвективный и радиационный тепломассоперенос в реальных физических объектах (камеры сгорания), формирование и деструкция

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

продуктов реакций горения, процесс селективного некаталитического снижения (SNCR) оксидов азота.

Метод исследования – трехмерное компьютерное моделирование физико-химических процессов тепломассопереноса в реагирующих средах.

В задачи исследования входило:

- На основе реализации численной модели для конвективного и радиационного теплопереноса определить основные закономерности процесса теплообмена в камерах сгорания. Определить значения теплового потока на поверхности стенок топочных камер.

- На основе физических и кинетических моделей разработать численные модели для проведения вычислительных экспериментов, исследовать процессы тепломассопереноса в камерах сгорания и определить основные закономерности формирования газовых компонентов (CO , CO_2 , NO_x) при горении энергетического топлива в топочной камере ПК-39.

- Разработать численную модель для описания процесса селективного некаталитического снижения оксида азота в средах с горением на основе метода термических DeNOX. Определить наиболее эффективный температурный диапазон и максимально выгодное соотношение начальных определяющих параметров (начальные концентрации реагентов, время реакции и др.) для SNCR процесса.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Выпускная квалификационная работа сделана согласно «Стратегия устойчивой энергетики будущего Казахстана до 2050 года» от 14 декабря 2014 года.

В рамках программы «Научно-технологическое обеспечение развития энергетического сектора экономики Республики Казахстан (возобновляемые источники энергии, энергосбережение) на 2011-2014 гг.» учеными АО Национальный научно-технологический холдинг «Парасат» (АО ННТХ «Парасат») разработана тема «Формирование глобальной энергоэкологической стратегии».

Цель исследования — продвижение идей Глобальной энергоэкологической стратегии в свете решений Конференции ООН по устойчивому развитию «РИО+20» в Казахстане.

Известно, что индустриальное развитие является для экономики Республики Казахстан важнейшей задачей. Время показало, что Казахстан правильно взял курс на диверсификацию экономики и ускоренный рост не сырьевых отраслей. Президент РК Н.А. Назарбаев обратил внимание на следующие конкретные результаты реализации Государственной программы форсированного индустриально-инновационного развития (ГПФИИР) [1]: за годы индустриализации (2010–2014 гг.) введено более 1 тыс. проектов на общую сумму 4,6 трлн тенге; создано порядка 100 тыс. постоянных рабочих мест; появилось более 25 совершенно новых секторов обрабатывающей промышленности; налажено производство свыше 500 наименований ранее не выпускавшейся в республике продукции с высоким экспортным потенциалом.

Как отметил Президент РК, за годы индустриализации одновременно проводилась огромная работа по развитию инфраструктуры. Создана надёжная энергетическая система. Была сформирована нормативно-правовая база в сфере энергосбережения. Ключевым актом в сфере энергоэкономии стал Закон от 13 января 2012 г. № 541IV ЗРК «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности», разработанный в сотрудничестве государственного сектора, бизнеса и научного сообщества, который:

акцентирован на ключевые секторы в сфере энергосбережения (промышленность, жилищно-коммунальный и бюджетный секторы);

вводит механизмы государственного регулирования, включающие регулятивные, стимулирующие и административные меры по энергосбережению, взаимоувязанные и реализуемые в комплексе;

создает основу для формирования национальной институциональной инфраструктуры в сфере энергосбережения для обеспечения перехода экономики Казахстана на энергоэффективное развитие [2].

Энергосбережение — это задача общегосударственного масштаба. Поэтому в соответствии с принятым законом был создан Государственный энергетический реестр крупных потребителей энергоресурсов, субъектами которого стали более 5 тыс. промышленных предприятий, национальных компаний и госучреждений. На

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

При написании раздела «Безопасность жизнедеятельности» использовались следующие основные нормативные документы: Закон Республики Казахстана «О гражданской защите» от 11 апреля 2014 г. № 188-V; Закон РК от 28.06.2010 № 295-IV «О пожарной безопасности»; и другие.

Раздел «Автоматизация» выполнен в соответствии с ГОСТ 23004-78 Механизация и автоматизация технологических процессов в машиностроении и приборостроении.

Пояснительная записка оформлена согласно литературе и СТО ЮУрГУ 04–2008 Стандарт организации. Курсовое и дипломное проектирование. Общие требования к содержанию и оформлению.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

3.1 Роль компьютерного моделирования в современных исследованиях

В настоящее время более 80% всей производимой в мире энергии вырабатывается за счет сжигания органического топлива, Другие источники энергии: ядерная энергетика, гидроэнергетика, солнечные и ветряные электростанции - в ближайшие десятилетия не смогут конкурировать со традиционными способами.

Ограниченность ресурсов ископаемого топлива диктует необходимость поиска более экономичных способов его сжигания, а масштабы промышленного производства таковы, что экологическая проблема образования вредных веществ при горении топлив выходит на первый план.

Решение этих вопросов невозможно без детального исследования процесса горения. В настоящее время это возможно только при использовании методов вычислительной гидродинамики. Они позволяют ускорить процессы проектирования и доводки изделия, снижая при этом финансовые затраты на проект. При этом частично отпадает необходимость в дорогостоящих экспериментах, поскольку появляется возможность оптимизировать конструкцию изделия на основе его виртуального прототипа. Модернизация процессов горения различных топлив в камерах сгорания энергетических котлов малой и средней мощности, обеспечивающая более рациональное сжигание топлива, повышение эффективности поверхности теплообмена, приспособление котлов к работе на низкокалорийных и местных видах топлива, экономически более выгодна, чем их полная замена.

Сегодня модернизация большинства технологических установок осуществляется на основе инженерных рекомендаций, разработанных более 20 лет тому назад и основанных на экспериментальных данных для отдельных типов камер сгорания. При этом в многих случаях не удается получить оптимальные решения, как по повышению мощности, так и по снижению уровня вредных выбросов в атмосферу. Проведение экспериментальных исследований по каждому типу камер сгорания с целью разработки более обоснованных рекомендаций по их модернизации весьма затруднительно вследствие значительных финансовых затрат, особенно если модернизация связана с использованием новых горелочных устройств, изменением их количества и места установки.

В последние годы за рубежом при проектировании и модернизации промышленных печей и камер сгорания широкое распространение получили компьютерные технологии, основанные на математическом моделировании термогазодинамики внутритопочного пространства (горение, тепло - и массообмен) с помощью быстродействующей компьютерной техники.

Для этой цели разработаны и применяются коммерческие пакеты универсальных программ, использующие последние достижения вычислительной техники, математики, гидродинамики, горения, тепло - и массообмена.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Главные преимущества и возможности компьютерного моделирования:

- решение широкого спектра задач без предварительного программирования;
- возможность изменения геометрической формы камеры сгорания, разнообразие граничных условий;
- возможность введения новых элементов в конструкцию камеры сгорания и исключение имеющихся;
- определение оптимальной конструкции камеры сгорания с целью эффективного сжигания топлива и снижения вредных выбросов в атмосферу;
- варьирование режимов работы и расположения горелок, анализ нерасчетных режимов эксплуатации котла;
- обнаружение особенностей, труднофиксируемых в эксперименте, – локальных зон аномально высокой температуры, повышенной генерации окислов азота и углерода;
- визуальное отображение информации и её анализ, быстрота получения надежных проектных решений, относительно небольшие финансовые затраты.
- Применение компьютерных технологий особенно эффективно на начальном этапе конструирования, когда одновременно прорабатываются несколько конструкторских решений и определяется стратегия модернизации котла или камеры сгорания. Сочетание компьютерной технологии и экспериментальных исследований позволяет создавать обоснованную стратегию мало затратной модернизации отдельных типов камер сгорания и «сдвигать» дорогостоящие экспериментальные исследования на заключительный этап для окончательной проверки решений.
- Применение компьютерных технологий связано со определенными трудностями. Стоимость лицензионных пакетов составляет несколько тыс. долл., а работа с программами требует высокой квалификации инженерного персонала, как в области вычислительной техники, так и в области фундаментальных наук (физика, математика, теория горения, гидрогазодинамика, теплофизика). Необходим опыт разработки исходных данных для проведения моделирования, а также постоянные консультации с специалистами, ведущими модернизацию. К недостаткам компьютерных технологий следует отнести использование в ряде случаев упрощенных математических моделей, что объясняется необходимостью сокращения расчетной процедуры. Однако этот недостаток компенсируется существенным снижением затрат на дорогостоящие экспериментальные исследования.

Изучение технологических процессов, основную роль в которых играют процессы переноса энергии и вещества, возможно двумя методами:

- эксперименты с физическими моделями;
- математические модели (компьютерное моделирование).

Простейший пример это эксперимент с моделью в масштабе 1:1. В данном случае, достаточно точно воссоздаются все внешние условия, которые оказывают влияние на исследуемое явление. Однако, в некоторых случаях

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

условия проведения эксперимента приводят к разрушению модели, что увеличивает стоимость таких экспериментов. Кроме того, для многих технологических процессов, например, изучение работы реальной камеры сгорания ТЭС на экспериментальной модели практически неосуществимо.

Можно проводить экспериментальные исследования на уменьшенных моделях, но для этого должны быть строго выполнены несколько условий, чтобы обеспечить соответствие результатов реальному процессу (геометрическое и физическое сходство, основные параметры и режимные условия должны быть адекватными и др.).

К сожалению только несколько простых, ограниченных случаев могут быть описаны простыми уравнениями или системой уравнений, которые могут быть решены аналитически.

Как правило, большинство технологических процессов описываются сложной системой дифференциальных уравнений высокого порядка с источниковыми членами. Решение таких уравнений возможно только с использованием численных методов. В настоящее время использование численных методов в данном направлении становится более приемлемым, и большие проблемы становятся более привлекательными и решаемыми [1].

Преимущества моделирования:

- меньшая цена по сравнению с экспериментом или измерением;
- вычислительные эксперименты проводятся в более короткие сроки, чем трудно выполняемые эксперименты, которые могут привести к разрушению физической модели (взрывы, аварии);
- полная хронология переменных (скорости, температуры, давления, концентрации и т.д.) доступна во всей области вычислений;
- изобилие данных, которые могут быть обработаны и представлены в графиках, изображениях и фильмах, которые трудно получить путем измерений.

Недостатки моделирования:

- численные методы могут неправильно использоваться и /или тестироваться (числовое решение не сходится или является неустойчивым);
- модели не описывают все физические и/или химические процессы достаточно адекватно, так как они намеренно упрощены и подсчитаны без учета погрешностей этих упрощений.

Следовательно, очень важно тестировать в деталях компьютерные программы с аналитическими решениями и измерениями и произвести подходящее согласование. Несмотря на все недостатки, методы математического моделирования нашли широкое применение в различных областях науки и техники.

Эти методы включают в себя разработку физических и математических моделей, численных методов и программного обеспечения, проведение численного эксперимента с привлечением средств вычислительной техники. В науке и технике преимущества метода математического моделирования очевидны: оптимизация проектирования, сокращение затрат на отработку, уменьшение эксплуатационных расходов и т.д.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Методы компьютерного моделирования позволяют проводить исследования течений жидкостей и газов с учетом сложных физических явлений:

- однофазные или многофазные течения;
- с учетом и без учета теплопереноса;
- с учетом и без учета изменения состояния;
- с учетом и без учета химических реакций.

При исследовании процессов теплопереноса компьютерные методы играют решающую роль. Они широко применяются в следующих технологиях:

- теплообменные устройства;
- камеры сгорания;
- паровые и газовые турбины;
- насосы, вентиляторы и компрессоры;
- реакторы, перегоночные колонны;
- автомобилестроение;
- самолето- и ракетостроение.

Развитие методов математического моделирования в области исследований процессов теплопереноса в течениях с горением привело к появлению различных программно-ориентированных пакетов, с помощью которых более или менее успешно решаются как фундаментальные задачи, так и прикладные, с которыми в повседневной практике приходится сталкиваться различным предприятиям топливно-энергетического комплекса.

Благодаря значительному прогрессу в развитии вычислительных методов решения задач, описываемых сложными системами дифференциальных уравнений и увеличению мощности современных вычислительных машин теоретические исследования процессов тепло- и массообмена в значительной степени базируются на их численном моделировании с использованием современной вычислительной техники. Существующие методы позволяют вести расчеты процессов теплообмена в широком диапазоне условий и с учетом максимально возможных факторов, влияющих на эти процессы [2].

Сейчас в мире разработано большое количество современных программных комплексов по изучению движения газов и жидкости, например:

- Коммерческие: FLUENT, ANSYS, CFX, STAR – CD;
- Открытые компьютерные комплексы: FDS (NIST), GMSH;
- Программы разработанные университетами (Homemade CFD program);
- Решение уравнений на базе: MATLAB, MATHEMATICA.

Эти компьютерные коды основаны на решении уравнений баланса для:

- массы и фазовых переходов;
- энергии;
- импульса;
- турбулентных характеристик.

Кроме того, программные комплексы включают в себя подмодели или дополнительные уравнения для:

- теплопроводности;
- конвективного тепло и массопереноса;

- теплообмена излучением;
- диффузии;
- материальных и фазовых переходов(кинетические реакции горения, уравнения состояния и др.).

В большинстве устройств, использующих процесс горения, течение обычно бывает турбулентным. Температура, концентрация реагентов и другие параметры изменяются вследствие как химических реакций, так различных физических процессов: конвекция, диффузия, лучистый теплообмен и др. Очень часто именно физические факторы оказывают определяющее влияние на полноту сгорания и условия воспламенения.

Модель распада вихрей Eddy Dissipation Model (EDM) была разработана для описания турбулентных пламен предварительно перемешанных смесей и диффузионных пламен. Она основана на предположении, что химические реакции очень быстро приводят реагирующую смесь к равновесному состоянию - другими словами, скорость химической реакции намного выше, чем скорость смешения горючего и окислителя. Согласно этой модели для инициации процесса горения достаточно, чтобы горючее и окислитель (обычно воздух) находились в одном контрольном объеме. Рассматриваемая ситуация предполагает возможность существования стабильного пламени. Модель EDM хорошо зарекомендовала себя при проектировании камер сгорания газовых турбин для прогнозирования распределения температуры внутри объема жаровой трубы и связанных с ней тепловых нагрузок. Использование модели EDM вместе с моделью лангранжевых частиц позволяет моделировать процессы, происходящие в топках энергетических котлов, в том числе оценивать оптимальную степень измельчения угля. Поскольку очень мелкий размол топлива неэкономичен и часто приводит к нарушениям расчетного режима горения, к недостаткам модели распада вихрей можно отнести то, что она неверно предсказывает уровень эмиссии окислов азота, а также с недостаточной точностью имитирует процесс воспламенения смесей. Вместе с тем этими весьма важными аспектами горения нельзя пренебрегать.

В противоположность неограниченно высоким скоростям («быстрая химия») модель Finite Rate Chemistry Model (FRC) учитывает следствия конечности скорости химических реакций. Она позволяет рассчитывать скорости реакций, описываемых молекулярным взаимодействием между компонентами жидкости. FRC-модель может быть объединена с моделью распада вихрей при расчете пламен, в которых скорость химических реакций слабо конкурирует с темпом перемешивания реагентов.

Использование новых компьютерных и информационных технологий и программных продуктов при исследовании широкого круга современных задач науки и техники, а именно численное моделирование реальных технологических процессов приобретает особое значение и имеет огромное практическое приложение. Основным инструментом теоретического исследования процессов сжигания твердых топлив в топочных камерах энергетических объектов с учетом разнообразных физических и химических явлений, таких как лучистый теплообмен, горение и др. является математическое моделирование и

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

вычислительный эксперимент. При этом математическое моделирование включает в себя не только разработку численных методов и проведение численных расчетов, но и глубокий научный анализ рассматриваемой модели, ее адекватности реальному процессу, а также выработку конкретных рекомендаций по применению новейших компьютерных технологий для описания реальных технологических процессов. В настоящее время проблемы построения эффективных вычислительных алгоритмов для решения задач тепло- и массопереноса приобретают особую актуальность и требуют глубокого анализа как с фундаментальной так и с прикладной точки зрения. При моделировании сложных турбулентных течений в технических приложениях необходимо учитывать огромное количество факторов, оказывающих существенное влияние на процесс горения в целом (скорость подачи топлива и окислителя, концентрация угольной пыли в потоке, реальное распределение частиц по размеру, температуре, скорости и т.п.; отличие скоростей и температур газа и частиц, тип горелочных устройств и их месторасположение и т.д.). Компьютерное моделирование становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных устройств, использующих процесс горения. Можно ожидать, что его роль будет возрастать и в дальнейшем. Вместе с тем речь идет не о полной замене экспериментальных исследований численными расчетами, а о совместных подходах к проектированию реальных установок и объектов, которые должны взаимно дополнять друг друга.

В следующих главах диссертационного исследования будут описаны различные математические модели для проведения теоретических исследований процессов турбулентного тепло- и массопереноса в реагирующих средах в областях реальной геометрии. На основе этих моделей разработаны программные комплексы позволяющие проводить исследования физико-химических процессов, происходящих при горении пылеугольного топлива (выход летучих, горение коксового остатка, формирование и деструкция CO, CO₂, NO_x и др.) с учетом различных параметров. Методом численного моделирования проведены вычислительные эксперименты по исследованию селективного некаталитического снижения оксидов азота, выявлены основные механизмы и кинетические параметры взаимодействия оксидов азота с аммиаком и определен механизм процесса денитрификации с помощью цепного разветвленного механизма, исследованы процессы конвективного и радиационного теплопереноса в топочном пространстве.

3.2 Современное состояние проблемы сжигания и переработки энергетических углей и методы повышения эффективности их использования

Поскольку объектом исследований в настоящей работе является твердое топливо, то подробно охарактеризуем его.

Уголь – самый распространенный в мире энергетический ресурс. Уголь стал первым видом ископаемого топлива, используемым человеком. По-видимому,

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

следующих составных частей: связанный углерод (С) + зольность (А^с) + летучие (V) + влага (W) = 100 %.

Уголь – сложное природное вещество, поэтому его свойства полностью не предсказываются теорией, а, как правило, описываются эмпирически. В настоящее время существуют отработанные методики определения теплотехнических свойств и элементарного состава углей [5].

Теплоту сгорания угля можно определить по известной формуле Менделеева (1):

$$Q_H = 4,19(81C + 246H - 26(O - S) - 6W), \quad (1)$$

где *C, H, O, S, W* – содержание (масс. %) в рабочей массе угля углерода, водорода, кислорода, серы и влаги соответственно.

Содержание углерода в угле возрастает с увеличением степени его метаморфизма: от 65% для бурых углей до 91% для антрацитов на органическую массу угля. Содержание водорода в этом ряду снижается от 8% до 4%, а кислорода от 30% до 2%. Содержание азота и серы колеблется в пределах 0,5 – 2% и 0,5 – 3% соответственно, а минеральных составляющих – в широких пределах от нескольких до десятков процентов.

Органическое вещество угля представлено в виде битумов, гуминовых кислот и остаточного углерода. Битумы из угля могут быть извлечены путем экстракции растворителями. Гуминовые кислоты растворяются в едких щелочах. Остаточный углерод не экстрагируется и не растворяется в щелочах. Наиболее высокое содержание гуминовых кислот в бурых углях. В каменных углях они практически не содержатся.

Органические соединения углей являются в основном высокомолекулярными. Бурые угли содержат много алифатических единений; напротив, каменные угли состоят главным образом из ароматических структур, связанных в крупные молекулы. Доля ароматических атомов углерода в каменных углях увеличивается со степенью метаморфизма от 80% у пламенных углей до 100% у антрацита. Атомное отношение С : Н для каменных углей низкой степени метаморфизма составляет 1:1 (как у бензола и метилнафталина), для антрацитов оно увеличивается до 2:1 (как у низкомолекулярного углеводорода, коронена С₂₄Н₁₂).

Для исследования строения углей широко применяются различные химические методы определения фенольных гидроксильных групп, эфирных связей и природы алифатических структур. Большую информацию о строении углей можно получить при изучении детального состава продуктов гидролиза (обработка водяным паром), галогенирования (обработка галогенами), окисления и термической деструкции углей. Применяются также методы рентгеноструктурного анализа, электронно-парамагнитного резонанса (ЭПР), ядерно-магнитного резонанса (ЯМР), инфракрасной спектроскопии (ИК), масс-спектропии и ряд других физических и физико-химических методов исследования. Вплоть до последнего времени для изучения структуры углей методами ЯМР использовали жидкие фракции, полученные из угля экстракцией,

										Лист
										19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.04.01.2019.243.03 ПЗ					

пиролизом и гидрированием (обработка водородом). Эти исследования давали косвенную информацию о структуре углей. В последние годы была создана специальная аппаратура и получены спектры ЯМР H^1 и C^{13} твердых образцов угля. Методом ЯМР C^{13} для различных углей определены отношения углерода, входящего в ароматические кольца, к общему углероду ($C_{ар}/C_{общ}$), по данным спектроскопии ЯМР H^1 оценены соотношения ароматических α - и β -алифатических водородов.

Для исследования твердых образцов углей, в частности определения в них гидроксидных, алифатических и ароматических атомов водорода, используется также метод ИК-спектроскопии с Фурье-преобразованием [6].

На основании проведенных исследований сформулированы следующие представления о химическом строении углей. Основная часть органической массы угля - жесткий трехмерный полимер нерегулярного строения. Кроме того, в ней содержатся подвижные мономолекулярные или малополимеризованные вещества, связанные с полимерным каркасом донорно-акцепторным взаимодействием или иммобилизованные в порах [7]. Жесткая и подвижная фазы угля построены из фрагментов, соединенных между собой алифатическими, эфирными, тиоэфирными, иминовыми мостиками.

Кислород входит в основном в феноловые гидроксильные, карбонильные и карбоксильные группы. Концентрация феноловых гидроксильных групп уменьшается с повышением содержания углерода угля и составляет очень малые значения даже при содержании углерода 89%.

Каждый фрагмент состоит из ароматического ядра и алифатической периферийной части. Количество конденсированных ароматических колец, входящих в ядро, зависит от степени метаморфизма угля. При содержании в угле $C = 78\%$ число ароматических колец в ядре равно 2, при 82% - 3, а при 90% - 4, в антраците оно возрастает до 12. Ароматические кольца могут включать кислород, серу и азот. Алифатическая часть каждого фрагмента содержит короткие алифатические цепи и мостики. Некоторые ароматические кольца гидрированы и образуют гидроароматические структуры. Количество групп метила (CH_3) мало по сравнению с количеством групп метилена (CH_2). Последнее свидетельствует о том, что неароматические атомы C и H содержатся в основном в гидроароматических структурах. Этиленовые двойные связи в угле полностью отсутствуют, за исключением группировок типа $R_1R_2C=CR_3R_4$, где R_i - углеводородные радикалы.

Сера в угле содержится обычно в виде дисульфида железа (FeS_2) (пиритная сера), сульфата железа (Fe_2SO_4) и органической серы. Количество органической серы составляет 30-50% от общей серы. При переработке угля осуществляются сложные процессы разложения пирита и органических групп с выделением в основном сероводорода (H_2S). При этом, происходит взаимодействие выделившегося сероводорода с органической массой угля и компонентами золы, разнообразные реакции сероводорода с пиритом и т.д.

На рисунке 1 показана примерная структура молекулы органической массы угля. На этом рисунке изображен фрагмент молекулы угля, дающий лишь

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

некоторое представление о сложности строения угля. Таких фрагментов в реальной молекуле угля более тысячи.

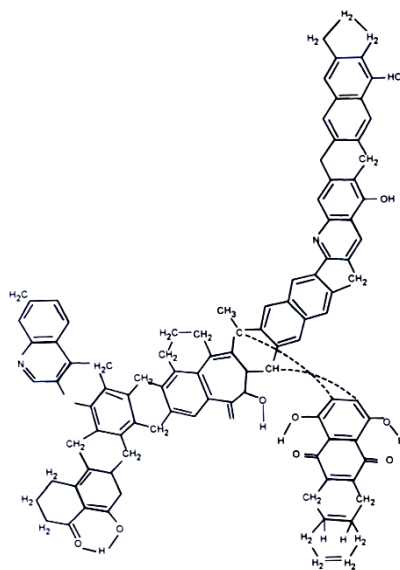


Рисунок 1 – Химическая структура молекулы угля, С – 82%
($C_{100}H_{76}O_{10}N_2$)

Азот входит только в состав органического вещества угля, в золе он не содержится. О строении структур, содержащих азот, судят по составу продуктов экстракции, пиролиза, гидрирования. В жидких продуктах пиролиза угля при $T=770-1370K$ имеются пиридин (C_5H_5N) и его производные, анилин ($C_6H_5NH_2$), пиррол (C_4H_5N), нитрилы (RCN), карбазолы, хинолины, акридин, индол и его производные, в газообразных – аммиак (NH_3), образующийся при пиролизе аминных и замещенных аминных групп. На основании данных по гидрированию угля делается вывод о том, что в основном азот содержится в гетероциклических кольцах или мостиках между двумя карбоциклическими кольцами. Выделение азотсодержащих соединений из угля начинается после образования около 10 % летучих. Основное его количество содержится в ароматических кольцах и значительно меньше – в боковых цепях. Основными азотсодержащими соединениями смол пиролиза угля являются пиридины, пирролы, нитрилы, карбазолы, хинолины, индолы. Количество выделившегося азота зависит от температуры, скорости нагрева, типа угля. Так, при повышении температуры от 770 до 1170K количество азота, выделившегося в виде летучих, увеличивается от 20 до 80%. Оставшийся в коксе азот связан очень прочными связями, которые не разрываются даже при высокотемпературном пиролизе. Перевести этот азот в летучие удастся лишь при полной газификации кокса водяным паром или при сжигании его в кислороде. В выделившихся при пиролизе угля летучих азот содержится в виде NH_3 , HCN , N_2 и в соединениях, входящих в состав смол.

						Лист
					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

запасы нефти и газа, ведущим сырьевым источником в теплоэнергетике и химической промышленности.

Резкое увеличение доли низкосортных топлив в топливно-энергетическом балансе является мировой тенденцией, наиболее проявляющейся в СНГ. Так, например, Казахстан имеет огромные запасы энергетических углей, допускающих их добычу дешевым открытым способом. Например, Экибастузский каменноугольный бассейн имеет высокую концентрацию запасов углей в пластах уникальной мощности (по бассейну в целом около 8000 млн. т.), пригодных для разработки открытым способом, следовательно, низкую себестоимость угледобычи.

В настоящее время основным топливом многих ТЭС России и стран СНГ являются низкосортные забалластированные золой угли, добываемые открытым способом. Они обладают высокой зольностью, влажностью и низким выходом летучих. Непосредственное сжигание таких углей в существующих топочных устройствах связано со значительными трудностями из-за ухудшения воспламенения и выгорания топлива, увеличения вредных пылегазовых выбросов (зола, оксидов азота и серы).

Для улучшения воспламенения и стабилизации горения углей с низким выходом летучих и высокой зольностью в теплоэнергетике существуют традиционные методы – это повышение тонины помола (до $R_{90}=6-8\%$), высокий подогрев аэросмеси (до 410 К) и вторичного воздуха (до 673 К), подача угольной пыли высокой концентрации (до 50 кг/кг) с последующим подогревом и, наконец, совместное сжигание угля с мазутом. Однако, эти методы обладают существенными недостатками. В частности повышение тонины помола приводит к значительному перерасходу энергозатрат на помол, что уменьшает КПД (нетто) котла. Увеличение температуры аэросмеси выше 410 К и вторичного воздуха выше 673 К невозможно из-за пожароопасности.

При мазутной стабилизации и подхвате пылеугольного факела, а также при разгрузке котлоагрегатов, расходуются огромные количества дефицитного жидкого топлива (около 25 млн. т/год в СНГ), что составляет более 12% от тепловой мощности пылеугольных ТЭС.

Однако, использование в таких масштабах дорогостоящего, но высокосернистого мазута не решает проблему повышения эффективности топливоиспользования. При этом совместное сжигание угля и мазута оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Повышение роли угля в будущем, по сравнению с нефтью и природным газом, связывают еще и с тем, что он, при более низком экологическом качестве и меньшей удельной теплоте сгорания, является богатым источником химических веществ, в том числе и минеральных. Потенциальный спектр конечных продуктов его комплексной переработки уже находит широкое применение в теплоэнергетике, металлургии, химии и строительной промышленности.

Разработка технологии сжигания угля имеет относительно длительную историю. Среди существующих технологий сжигания углей, факельное сжигание угольной пыли - наиболее распространено. Эта технология стала доминирующей

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

органические и неорганические соединения, присутствующие в угле и добавляемые извне. Иначе, под термохимической подготовкой углей к сжиганию понимается комбинированное воздействие на подвергающееся деструкции топливо тепловой энергии и химических реагентов. В этом случае термохимические превращения затрагивают лишь органическую массу углей, практически не влияя на их минеральную часть.

Методы термохимической подготовки низкосортных топлив основаны на их частичной газификации и использовании в качестве более высокорекреационного, чем исходный уголь топлива, ее продуктов (горючего газа, коксового остатка и не прореагировавших угольных частиц). При полной газификации углей в воздухе получают горючий газ ($\text{CO} + \text{H}_2 + \text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{N}_2$) и инертный зольный остаток с незначительным содержанием углерода С. После отделения твердого остатка горючий газ можно сжигать в топках или использовать для подсветки пылеугольного факела.

Методы термической подготовки углей к сжиганию, в основу которых положены поточные пылеугольные технологии можно разделить на две группы.

К первой относится прогрев всей аэросмеси до смешения с вторичным воздухом, а к второй – термообработка меньшей части пылеугольного потока с последующим ее смешением с остальной пылью и вторичным воздухом. Исследования первой группы методов рассматривались только как средство повышения реакционной способности низкосортного топлива путем обогащения факела летучими углем, т.е. способности к воспламенению и окислению, в значительной мере определяемой содержанием летучих веществ в топливе. Метод термохимической обработки топлива, разработанный в, позволяет воздействовать на реакционную способность углей и тем самым повысить стабильность горения и его интенсивность. При этом все низкорекреационное топливо взаимодействует с высокотемпературными продуктами сгорания высокорекреационного топлива (мазута или газа). В результате образуется двухфазное (пылегазовое) топливо, состоящее из оксида углерода (СО), водорода (H_2), непрореагировавшей пыли, коксового остатка и инертных компонентов (H_2O , CO_2 , N_2).

Ко второй группе процессов, основанных на разделении пылеугольного потока на две неравные части и термической подготовке меньшей из них относятся работы. В них изучены способы стабилизации пылеугольного факела, в основе которых лежит его обогащение легко-воспламеняемым газообразным топливом, получаемым за счет полной и частичной газификации исходного низкосортного угля. Целью проведенных работ было снижение расхода мазута при факельном сжигании низкосортных углей и устранение негативных последствий совместного сжигания угля и мазута в одном топочном объеме. Дальнейшее совершенствование методов термохимической подготовки привело авторов к схеме полного исключения мазута за счет прогрева и стабилизации горения вспомогательного потока с помощью плазмотрона.

Использование электродуговой плазмы во многих случаях энергетически более эффективно, чем применение традиционных огневых методов, поскольку плазма с высокой концентрацией энергии, характеризующаяся присутствием в

										Лист
										29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.04.01.2019.243.03 ПЗ

ней большого количества химически активных атомов, радикалов, ионов и электронов, способствует многократному ускорению термохимических превращений угля и окислителя, а, следовательно, и более полному быстрому выгоранию факела.

Кроме того, электрическая энергия - это энергия с универсальным спектром применения. Важно, что ее можно вырабатывать не только из невозобновляемых энергоносителей, что обеспечивает оптимальную структуру энергопотребления с минимальными вредными экологическими последствиями. При использовании электроэнергии в топливно-электрических процессах сохраняются, с одной стороны, все преимущества электрической энергии, а с другой - природный теплоноситель приобретает новые свойства (в частности, высокую энтальпию и химическую активность), которые не обеспечиваются традиционными методами.

Наиболее разработаны две формы использования электроэнергии: в форме энергии низкотемпературной плазмы для воспламенения пылеугольного факела и в виде джоулевого тепла при прохождении электрического тока через углеродосодержащий материал (электрокипящий слой) или через омическое сопротивление (электрозапальник резисторного типа).

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЯ

4.1 Основные понятия и определения теории конвективного теплообмена

Передача теплоты конвекцией осуществляется перемещением в пространстве неравномерно нагретых объемов жидкости или газов. В дальнейшем изложении обе среды объединены одним наименованием — жидкость. Обычно при инженерных расчетах определяется конвективный теплообмен между жидкостью и твердой стенкой, называемый теплоотдачей. Согласно закону Ньютона—Рихмана, тепловой поток Q от стенки к жидкости пропорционален поверхности теплообмена и разности температур между температурой твердой стенки t_c и температурой жидкости $t_{жк}$ (2):

$$Q = \alpha \cdot F \cdot (t_c - t_{жк}). \quad (2)$$

Главная трудность расчета заключается в определении коэффициента теплоотдачи α , зависящего от ряда факторов: физических свойств омывающей поверхность жидкости (плотности, вязкости, теплоемкости, теплопроводности), формы и размеров поверхности, природы возникновения движения среды, скорости движения.

По природе возникновения различают два вида движения — свободное и вынужденное. Свободное движение происходит вследствие разности плотностей нагретых и холодных частиц жидкости, находящейся в поле действия сил тяжести; оно называется также естественной конвекцией и зависит от рода жидкости, разности температур, объема пространства, в котором протекает процесс. Вынужденное движение возникает под действием посторонних побудителей (насоса, вентилятора, ветра). В общем случае наряду с вынужденным движением одновременно может развиваться и свободное. Относительное влияние последнего тем больше, чем больше разность температур в отдельных точках жидкости и чем меньше скорость вынужденного движения.

Движение жидкости может быть ламинарным или турбулентным. При ламинарном режиме частицы жидкости движутся послойно, не перемешиваясь. Турбулентный режим характеризуется непрерывным перемешиванием всех слоев жидкости. Переход ламинарного режима в турбулентный определяется значением безразмерного комплекса, называемого числом Рейнольдса (3):

$$Re = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (3)$$

где w — скорость движения жидкости;

ν — коэффициент кинематической вязкости¹;

l — характерный размер канала или обтекаемой стенки.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

При любом режиме движения частицы жидкости, непосредственно прилегающие к твердой поверхности, как бы прилипают к ней. В результате вблизи обтекаемой поверхности вследствие действия сил вязкости образуется тонкий слой заторможенной жидкости, в пределах которого скорость изменяется от нуля на поверхности тела до скорости невозмущенного потока (вдали от тела). Этот слой заторможенной жидкости получил название гидродинамического пограничного слоя. Толщина этого слоя возрастает вдоль по потоку, так как по мере движения влияние вязкости распространяется все больше на невозмущенный поток. Однако и в случае турбулентного пограничного слоя непосредственно у стенки имеется очень тонкий слой жидкости, движение в котором носит ламинарный характер. Этот слой называется вязким, или ламинарным, подслоем.

Аналогично понятию гидродинамического слоя существует понятие теплового пограничного слоя — прилегающей к твердой поверхности области, в которой температура жидкости изменяется от температуры стенок t_c до температуры жидкости вдали от тела $t_{жс}$. В общем случае толщины гидродинамического и теплового пограничных слоев пропорциональны, а для газов практически равны.

Интенсивность переноса теплоты зависит от режима движения жидкости в пограничном слое. При турбулентном пограничном слое перенос теплоты в направлении стенки обусловлен турбулентным перемешиванием жидкости. Однако непосредственно у стенки, в ламинарном подслое теплота будет переноситься теплопроводностью. При ламинарном пограничном слое теплота в направлении стенки переносится только теплопроводностью.

4.2 Уравнения, описывающие конвективный теплообмен

На основании рассмотренного выше представления о процессах переноса теплоты при движении жидкости вдоль твердой поверхности получим уравнение, описывающее процесс теплоотдачи на границах тела. Так как у поверхности твердого тела имеется слой неподвижной жидкости, то для этого слоя можно использовать закон Фурье. Принимая, что ось Oy направлена перпендикулярно поверхности, запишем (4):

$$q = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0} . \quad (4)$$

Однако

$$q = \alpha \cdot (t_c - t_{жс}) \quad (5)$$

Приравнивая эти уравнения получим (6):

$$\alpha = -\frac{\lambda}{t_c - t_{жс}} \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0} . \quad (6)$$

									Лист
									32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

Уравнение (6) называют дифференциальным уравнением теплоотдачи.

Если в дифференциальное уравнение теплопроводности подставить конвективное изменение температуры, обусловленное течением жидкости (7):

$$\frac{\partial t}{\partial x} \cdot w_x + \frac{\partial t}{\partial y} \cdot w_y + \frac{\partial t}{\partial z} \cdot w_z \quad (7)$$

где w_x , w_y и w_z – проекции скорости жидкости на координатные оси, то можно записать в виде (8):

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} \cdot w_x + \frac{\partial t}{\partial y} \cdot w_y + \frac{\partial t}{\partial z} \cdot w_z = a \cdot \nabla^2 t \quad (8)$$

Иными словами говоря, если через изучаемый нами элементарный объём движется со скоростью w некое температурное поле, то дифференциальное уравнение теплопроводности следует накладывать на это поле.

Для строго описания процессов конвективного теплообмена к дифференциальному уравнению следует добавить уравнение (Навье-Стокса) движения вязкой жидкости, вытекающее из второго закона Ньютона, уравнение сплошности и неразрывности жидкости и учесть зависимость плотности жидкости от температуры. Такая система уравнений описывает большой класс явлений — процессы конвективного теплообмена между жидкостью и твердой стенкой. Эти уравнения должны быть дополнены условиями однозначности, характеризующими конкретные особенности той или иной рассматриваемой задачи.

4.3 Учет теплопроводности при вычислительных расчетах

Теория теплопередачи, или теплообмена, представляет собой учение о процессах распространения теплоты в пространстве с неоднородным полем температур.

Существуют три основных вида теплообмена: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение.

Теплопроводность — это молекулярный перенос теплоты между непосредственно соприкасающимися телами или частицами одного тела с различной температурой, при котором происходит обмен энергией движения структурных частиц (молекул, атомов, свободных электронов).

Конвекция осуществляется путем перемещения в пространстве неравномерно нагретых объемов среды. При этом перенос теплоты неразрывно связан с переносом самой среды.

Тепловое излучение характеризуется переносом энергии от одного тела к другому электромагнитными волнами. Часто все способы переноса теплоты

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

осуществляются совместно. Например, конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, так как при этом неизбежно соприкосновение частиц, имеющих различные температуры.

Совместный процесс переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью называется *конвективным теплообменом*. Частным случаем конвективного теплообмена является теплоотдача — конвективный теплообмен между твердой стенкой и движущейся средой. Теплоотдача может сопровождаться тепловым излучением. В этом случае перенос теплоты осуществляется одновременно теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением.

Многие процессы переноса теплоты сопровождаются переносом вещества — массообменном, который проявляется в установлении равновесной концентрации вещества.

Совместное протекание процессов теплообмена и массообмена называется *тепломассообменом* [13].

Теплопроводность определяется тепловым движением микрочастиц тела. В чистом виде явление теплопроводности наблюдается в твердых телах, неподвижных газах и жидкостях при условии невозможности возникновения в них конвективных токов. Передача теплоты теплопроводностью связана с наличием разности температур тела. Совокупность значений температур всех точек тела в данный момент времени называется температурным полем. В общем случае уравнение температурного поля имеет (9):

$$t = f(x, y, z, \tau) . \quad (9)$$

где t — температура тела; x, y, z — координаты точки; τ — время. Такое температурное поле называется нестационарным и отвечает неустановившемуся режиму теплопроводности. Если температура тела не изменяется с течением времени, то температурное поле называется стационарным. Тогда (10):

$$t = f(x, y, z,) ; \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 . \quad (10)$$

Температура может быть функцией одной, двух и трех координат, соответственно температурное поле будет одно-, дву- и трехмерным. Наиболее простой вид имеет уравнение одномерного стационарного температурного поля (11):

$$t = f(x) ; \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 ; \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0 . \quad (11)$$

Если соединить все точки тела с одинаковой температурой, то получим поверхность равных температур, называемую изотермической. Так как в определенной точке тела в данный момент времени может быть только одна

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

температура, изотермические поверхности не пересекаются; все они либо замыкаются на себя, либо заканчиваются на границе тела. Пересечение изотермных поверхностей плоскостью дает на ней семейство изотерм. Интенсивность изменения температуры в каком-либо направлении

характеризуется производной $\frac{\partial t}{\partial s}$, принимающей наибольшее значение в направлении нормали к изотермической поверхности (12)

$$\left(\frac{\partial t}{\partial s}\right)_{\max} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad } t \quad (12)$$

Вектор $\text{grad } t$ называется температурным градиентом и является мерой интенсивности изменения температуры в направлении по нормали к изотермной поверхности. Направлен он в сторону возрастания температуры.

Согласно гипотезе Фурье, количество теплоты $d^2 Q_\tau$, проходящее через элемент изотермической поверхности dF за промежуток времени $d\tau$, пропорционально

температурному градиенту $\frac{\partial t}{\partial n}$ (12):

$$d^2 Q_\tau = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau \quad (13)$$

Здесь множитель λ называется коэффициентом теплопроводности. Знак минус указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры. Количество теплоты, прошедшее в единицу времени через единицу изотермической поверхности, называется плотностью теплового потока (14):

$$d^2 Q_\tau = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau \quad (14)$$

Проекции вектора q на координатные оси соответственно (15):

$$q_x = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \quad (15)$$

Уравнения (13) и (14) являются математическим выражением основного закона теплопроводности — закона Фурье.

Количество теплоты, проходящее в единицу времени через изотермическую поверхность F , называется тепловым потоком (16):

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$Q = \int_F q \cdot dF = - \int_F \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \quad (16)$$

Полное количество теплоты, прошедшее через эту поверхность за время τ , определится из уравнения (17):

$$Q_\tau = - \int_0^\tau \int_F \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau \quad (17)$$

Коэффициент теплопроводности является физическим параметром вещества, характеризующим его способность проводить теплоту. Коэффициент теплопроводности определяется из уравнения (18):

$$\lambda = - \frac{d^2 Q_\tau}{\frac{\partial t}{\partial n} \cdot dF \cdot d\tau} \quad (18)$$

Численно коэффициент теплопроводности равен количеству теплоты, проходящему в единицу времени через единицу изотермической поверхности при условии $gradt=1$. Его размерность Вт/(м·К). Значения коэффициента теплопроводности для различных веществ определяются из справочных таблиц, построенных на основании экспериментальных данных. Для большинства материалов зависимость коэффициента теплопроводности от температуры приближенно можно выразить в виде линейной функции (19):

$$\lambda = \lambda_0 \cdot [1 + b \cdot (t - t_0)] \quad (19)$$

где λ_0 — значение коэффициента теплопроводности при температуре $t_0=0$ °С; b — постоянная, определяемая опытным путем.

Наихудшими проводниками теплоты являются газы. Коэффициент теплопроводности газов возрастает с увеличением температуры и составляет $0,006 \div 0,6$ Вт/(м·К). Следует отметить, что верхнее значение относится к гелию и водороду, коэффициент теплопроводности которых в 5—10 раз больше, чем у других газов. Коэффициент теплопроводности воздуха при 0 °С равен $0,0244$ Вт/(м·К).

Для жидкости $\lambda=0,07 \div 0,7$ Вт/(м·К) и, как правило, уменьшается с увеличением температуры. Коэффициент теплопроводности воды с увеличением температуры возрастает до максимального значения $0,7$ Вт/(м·К) при $t=120$ °С и дальше уменьшается. Наилучшими проводниками теплоты являются металлы, у которых $\lambda=20 \div 418$ Вт/(м·К). Самый теплопроводный металл — серебро. Для большинства

металлов коэффициент теплопроводности убывает с возрастанием температуры, а также при наличии разного рода примесей. Поэтому коэффициент теплопроводности легированных сталей значительно ниже, чем чистого железа.

Материалы с $\lambda < 0,25$ Вт/(м·К), обычно применяемые для тепловой изоляции, называют теплоизоляционными. Большинство теплоизоляционных и строительных неметаллических материалов имеют пористое строение, что не позволяет рассматривать их как сплошную среду.

4.4 Математическая модель, описывающая движение частиц угля в модельной камере сгорания

Для вывода балансных соотношений выбран стационарный контрольный элемент объема или контрольный элемент массы (рисунок 3). Предполагается, что центр тяжести выбранного элемента движется со скоростью течения. Этот стационарный контрольный объем соответствует обоснованному подходу Эйлера для течений. Изменение транспортной величины описывается в единичном жидком элементе. Значение транспортной величины определяется в каждой точке рассматриваемой области.

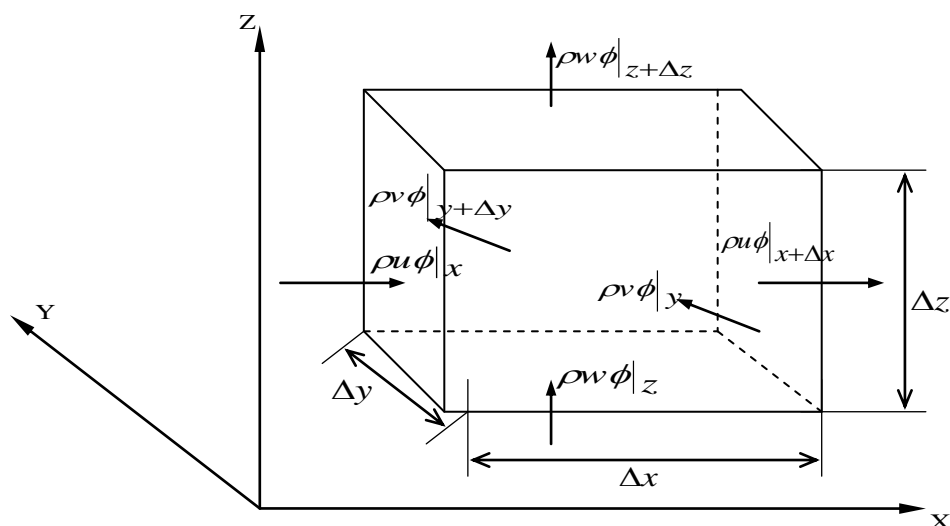


Рисунок 3 - Контрольный объем для обобщенного уравнения переноса

При преобразовании предельного значения из конечного в бесконечно малый контрольный элемент объема получается дифференциальное уравнение, описывающее сохранение транспортной переменной ϕ (20):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = & -\frac{\partial(\rho u_1\phi)}{\partial x_1} - \frac{\partial(\rho u_2\phi)}{\partial x_2} - \frac{\partial(\rho u_3\phi)}{\partial x_3} + \frac{\partial}{\partial x_1} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_1} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial}{\partial x_3} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial\phi}{\partial x_3} \right] + S_\phi \end{aligned} \quad (20)$$

Заменяя в уравнении (20) конвективный и диффузионный перенос плотностью потоков, через границы контрольного объема, получится:

$\hat{O}_{(K),j} = \rho u_j \phi$ - плотность конвективного потока;

$\hat{O}_{(D),j} = \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}$ - плотность диффузионного потока.

Тогда с учетом данных соотношений уравнение (20) запишется в виде (21):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial \hat{O}_{(K),j}}{\partial x_j} + \frac{\partial \hat{O}_{(D),j}}{\partial x_j} + S_\phi. \quad (21)$$

Запишем уравнение (21) в векторной форме (22):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \text{div} \left((-\rho \bar{u} \phi) + \Gamma_\phi \text{grad} \phi \right) + S_\phi, \quad (22)$$

а в тензорной форме уравнение (22) примет вид (23):

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right] + S_\phi. \quad (23)$$

Здесь индекс j характеризует пространственное направление составляющей скорости u_j в выбранной декартовой системе координат с координатами x_j , где $j = 1, 2, 3$. Далее будем использовать (24):

$$\begin{aligned} x_1 &\equiv x; & x_2 &\equiv y; & x_3 &\equiv z \\ u_1 &\equiv u; & u_2 &\equiv v; & u_3 &\equiv w. \end{aligned} \quad (24)$$

В дальнейшем для расчета течений газ - твердое вещество с однофазным входом все транспортные величины в контрольном объеме(рисунок 3) будем определять при помощи обобщенного уравнения (24). В этом уравнении:

$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}$ - изменение во времени величины ϕ ,

$\frac{\partial(\rho u_j \phi)}{\partial x_j}$ - изменение ϕ за счет конвективного переноса,

тангенциальные напряжения равны нулю, а нормальные напряжения равны между собой. Отрицательное значение средне арифметического нормального напряжения определяет давление жидкости (30):

$$p = -\frac{1}{3} \cdot \tau_{ii}. \quad (30)$$

В потоках с переменной плотностью при наличии трения эта величина выступает как давление жидкости. Используя закон трения Стокса для компонент тензора напряжений имеем (31):

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \mu \cdot \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l}. \quad (31)$$

Здесь индекс l используется для суммирования, δ_{ij} - символ Кронекера (32):

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & : i \neq j \\ 1 & : i = j \end{cases}. \quad (32)$$

Согласно гипотезе Стокса имеем (33):

$$\mu = \frac{2}{3} \cdot \mu + \kappa. \quad (33)$$

Для компонент тензора напряжений τ_{ij} имеем (34):

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right). \quad (34)$$

Принимая во внимание выражение (33), перепишем уравнение (34), которое в этом случае примет общую форму уравнения Навье-Стокса (35) [15]:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i. \quad (35)$$

После перегруппировки членов получим следующее выражение (36):

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$\frac{\partial(u_i \tau_{ij})}{\partial x_j}$ - изменение энергии за счет работы сил трения на поверхности контрольного объема;

$\rho u_i g_i$ - изменение энергии за счет работы объемных сил в контрольном объеме;

S_e - поглощение (выделение) энергии в результате химических преобразований или за счет энергии теплового излучения [17].

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). В этом балансе за счет сил трения и давления на поверхность контрольного объема, совершаемая в определенный момент времени работа состоит из двух составляющих. Первая компонента описывает преобразование совершенной работы в механическую энергию, а вторая – во внутреннюю. Вычитая выражение для закона сохранения механической энергии из уравнения полной энергии (37) и принимая во внимание соотношение (38), получаем уравнение сохранения внутренней энергии (39):

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho e)}{\partial t}}_I = - \underbrace{\frac{\partial(\rho u_j e)}{\partial x_j}}_{II} - \underbrace{\frac{\partial q_j^{res}}{\partial x_j}}_{III} - \underbrace{p \frac{\partial u_i}{\partial x_i}}_{IV} + \underbrace{\tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_V + \underbrace{S_e}_{VI}. \quad (39)$$

Здесь:

I – полное изменение внутренней энергии со временем,

II – плотность потока внутренней энергии через границы контрольных объемов за счет конвекции,

III – плотность потока внутренней энергии через границы контрольных объемов за счет молекулярного теплопереноса,

IV – обратимое превращение работы, совершаемой силами давления во внутреннюю энергию,

V – необратимое превращение работы сил трения во внутреннюю энергию (диссипация),

VI – источники и стоки внутренней энергии.

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 (40):

$$q_j^{res} = q_j^L + q_j^{St} + q_j^D. \quad (40)$$

имеем преобразованное уравнение (45):

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}}_I = - \underbrace{\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i}}_{II} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i} \right)}_{III} + \underbrace{u_i \cdot \frac{\partial p}{\partial x_i}}_{IV} + \underbrace{\tau_{ij} \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_V + \underbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}_{VI} + \underbrace{S_h}_{VII}. \quad (45)$$

В уравнении баланса энергии для удельной энтальпии членами IV, V и VI как правило пренебрегают.

Коэффициент молекулярного теплообмена выразим следующим образом (46):

$$\frac{\lambda}{c_p} = \frac{\mu}{Pr} \Rightarrow Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}. \quad (46)$$

Таким образом, для уравнения баланса энергии имеем (47):

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu}{Pr} \cdot \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + S_h. \quad (47)$$

Это соотношение получается из обобщенного транспортного уравнения (47) с учетом (48):

$$\varphi = h; \quad \Gamma_\phi = \frac{\mu}{Pr}; \quad S_\phi = S_h. \quad (48)$$

Уравнение для компоненты

Для определения концентрации каждой компоненты смеси (например, CO, CO₂, O₂, кокс или C_xH_y) в элементе объема записывается соответствующее балансное соотношение. Данное уравнение учитывает физические и химические процессы, которые оказывают влияние на изменение концентрации данных веществ. Наряду с конвективным и диффузионным переносом, необходимо учитывать вклад химических реакций и физические процессы, такие как, например сушка топлива и др. В элементарном объеме полная масса определяется как сумма масс всех *n* компонентов (49):

$$m = \sum_n m_n \quad (49)$$

Для записи общего балансного соотношения для компонент систем в качестве переменной величины можно использовать ряд значений. Например:

Массовая концентрация (50):

$$\sum_n \frac{m_n}{m} = 1 \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right]; \quad c_n = \frac{m_n}{m} \quad (50)$$

Объемная концентрация (51):

$$\sum_n \frac{V_n}{V} = 1 \quad \left[\frac{\text{м}^3}{\text{м}^3} \right]; \quad c_n = \frac{V_n}{V} \quad (51)$$

Концентрация (52):

$$\sum_n \frac{m_n}{V} = \rho \quad \left[\frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right]; \quad c_n = \frac{m_n}{V} \quad (52)$$

В общем виде уравнение для концентрации компонент смеси можно записать как (53) [18]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_n) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i c_n) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{c_n, eff}} \frac{\partial c_n}{\partial x_i} \right] + S_{c_n} \quad (53)$$

В этом уравнении слагаемое S_{c_n} учитывает вклад химических реакций в изменение концентрации компонентов. В многокомпонентных смесях (54):

$$S_{c_n} = \sum \omega_{n,r}, \quad (54)$$

где $\omega_{n,r}$ определяется как скорость реакции вещества n в реакции r .

Использование объемной концентрации является непрактичным, поскольку необходимо вводить дополнительные уравнения для учета изменения объема с температурой. Поэтому в нашей модели мы используем массовые концентрации, а в химических реакциях используются мольные концентрации моль/м⁴. В общее балансное уравнение вводятся соответствующие коэффициенты для перерасчета в массовые концентрации.

4.5 Подходы к моделированию турбулентного потока при наличии горения

Для моделирования турбулентной вязкости и замыкания системы нами использовалась стандартная к-ε модель турбулентности (55), (56):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \dot{I} - \rho \varepsilon, \quad (55)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \Pi - c_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (56)$$

где $\Pi = \left[\mu_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{i,j} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ - производство кинетической энергии

турбулентности, $\rho\varepsilon$ - преобразование кинетической энергии пульсационного движения во внутреннюю энергию (диссипация), σ_k , σ_ε - соответствующие числа Прандтля.

Согласно аналогии Рейнольдса, можно использовать следующие соотношения (57):

$$\rho a_{eff} = \frac{\mu_{eff}}{Pr_{eff}}, \quad \rho D_{eff} = \frac{\mu_{eff}}{Sc_{eff}}, \quad (57)$$

где Pr_{eff} , Sc_{eff} - эффективные числа Прандтля и Шмидта соответственно, значения которых задаются постоянными. Тогда в соответствии с (55)-(56) достаточно использовать модель турбулентности только для определения μ_{eff} .

Эффективная вязкость определяется модельным соотношением Колмогорова-Прандтля (58):

$$\mu_{eff} = \mu + C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (58)$$

где μ - физическая вязкость, C_μ - экспериментальная константа.

Система уравнений является незамкнутой, т.к. при турбулентном режиме течения эффективные коэффициенты переноса μ_{eff} , a_{eff} , D_{eff} являются неизвестными функциями.

4.6 Химическая кинетика процесса горения частиц угля

Химическая кинетика как элемент моделирования горения предполагает, что химическая реакция происходит без учета эффектов течения (конвекции, диффузии). Переход реагирующих веществ в продукты сгорания можно упрощенно описать одношаговой реакцией (59) [45]:



где количество молей: F - топлива; O - окислителя; P - продуктов сгорания. Однако в реальности механизм окисления топлива представляется сложнее и

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

может описываться сотнями элементарных реакций. С учетом реальной химической системы для N компонент и M элементарных химических реакций можно записать следующую систему уравнений (60):

$$\sum_{k=1}^N v'_{kj} \Psi_k = \sum_{k=1}^N v''_{kj} \Psi_k, j=1, M, \quad (60)$$

где Ψ_k - символ для обозначения компоненты k и v'_{kj}, v''_{kj} - молярные стехиометрические коэффициенты компоненты в реакции j . Система (60) должна удовлетворять уравнению сохранения массы (61):

$$\sum_{k=1}^N v_{kj} W_k = 0, j=1, M, \quad (61)$$

где $v_{kj} = v''_{kj} - v'_{kj}$ и W_k обозначает молекулярный вес компоненты k . Скорость $\dot{\omega}_{kj}$ образования компоненты k в реакции J записывается следующим образом (62):

$$\dot{\omega}_{kj} = r_j W_k v_{kj}, \quad (62)$$

где r_j - скорость протекания реакции j . Общая скорость $\dot{\omega}_k$ образования компоненты k записывается как сумма всех скоростей M элементарных реакций (63):

$$\dot{\omega}_k = \sum_{j=1}^M \dot{\omega}_{kj} = W_k \sum_{j=1}^m r_j v_{kj} \quad (63)$$

Из (63) и (61) можно записать (64):

$$\sum_{j=1}^M \dot{\omega}_k = \sum_{j=1}^M \left(r_j \sum_{k=1}^N W_k v_{kj} \right) \quad (64)$$

Скорость протекания реакции r_j находится как разность между скоростями протекания прямой и обратной реакции (65):

$$r_j = r_{f,j} - r_{b,j}, \quad (65)$$

где $r_{f,j} = K_{f,j} \prod_{k=1}^N \left(\frac{\rho Y_k}{W_k} \right)^{v'_{kj}}$; $r_{b,j} = K_{b,j} \prod_{k=1}^N \left(\frac{\rho Y_k}{W_k} \right)^{v''_{kj}}$.

Скорости прямой и обратной реакции $K_{f,j}, K_{b,j}$ находятся из закона Аррениуса (66):

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист 48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$K_{f,j} = A_{f,j} T^{n_{f,j}} \exp\left(-\frac{E_{f,j}}{RT}\right) \quad (66)$$

В (66) три эмпирических параметра: предэкспоненциальный коэффициент $A_{f,j}$, температурный коэффициент $T^{n_{f,j}}$ и энергия активации $E_{f,j}$. Скорость обратной реакции $K_{b,j}$ находится обычно из скорости прямой реакции и константы равновесия (67):

$$K_{b,j} = K_{f,j} \left[\left(\frac{P_a}{RT} \right)^{\sum_{k=1}^N \nu_{kj}} \exp\left(\frac{\Delta S_j^0}{R} - \frac{\Delta H_j^0}{RT} \right) \right]^{-1}, \quad (67)$$

где P_a соответствует окружающему давлению; ΔS_j^0 , ΔH_j^0 - изменение энтропии и энтальпии во время реакции. Задачей химической кинетики является нахождение наиболее важных компонент и реакций в уравнении.

В данной работе 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 используется система дифференциальных уравнений. Результаты вычислительных экспериментов были сравнены с экспериментальными данными, полученными непосредственно на производстве (ТЭС).

Уравнения выхода летучих из частицы (68):

$$\frac{dV_B^r}{d\tau} = (V^r - V_B^r) \alpha_L \quad (68)$$

Здесь V_r , V_B^r и $(V^r - V_B^r)$ — количество летучих, первоначально содержащихся в горючей массе, выделившихся из него за промежуток времени и содержащихся в частицах в текущий момент, кг/кг;

α_L — константы скорости выхода летучих, 1/с;

T — текущая температура частицы, К;

τ — время, с.

Кинетическое уравнение горения летучих в газовой среде (69):

$$\frac{dV_C^r}{d\tau} = (V_B^r - V_C^r) \alpha_{CL} \quad (69)$$

В этом уравнении:

V_C^r и $(V_B^r - V_C^r)$ — количество летучих, прореагировавших (сгоревших) за время τ , и количество летучих, содержащихся в газовой среде в текущий момент, кг/кг; константа скорости горения летучих, 1/с.

Уравнение теплового баланса горения частицы (70):

									Лист
									49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

$$\left[(Q'_1 \varepsilon \alpha_1 + Q'_2 \alpha_2) C_R - Q'_{21} \alpha_{21} C_{2R} \right] \frac{273}{T_r} - \left[\alpha C_R + \frac{44}{32} \alpha_{21} C_{2R} \right] \frac{273}{T_r} C_r \frac{1}{\rho_r} (T - T_r) - Nu \frac{\lambda}{\delta} (T - T_r) \quad (70)$$

$$- \sigma_0 a \varphi (T^4 - T_{об}^4) - \frac{1}{6} \delta \rho_k c_k \frac{dT}{d\tau} = 0$$

В этом уравнении:

$(Q'_1, Q'_2$ и Q'_{21} — тепловые эффекты реакций образования СО и СО₂ и восстановления СО₂, отнесенные к 1 кг кислорода, кДж/кг О₂;

α_1, α_2 и α_{21} — константы скоростей реакций образования СО, СО₂ и восстановления СО₂, м/с;

$\alpha = \varepsilon \alpha_1 + \alpha_2$ — суммарная константа скорости потребления кислорода по реакциям горения (68) и (69), 1/с;

$\varepsilon = 1 + C_0 + C^0_2$ учитывает увеличение числа молей при протекании реакций (68) и (69);

C_0 и C^0_2 — начальная концентрация кислорода и углекислоты в реагирующей смеси, кг О₂/м³;

C_R и C_{2R} — концентрации кислорода и углекислоты у поверхности частицы (при 0°С и 0,1013 МПа), выраженные через содержание кислорода, кг О₂/м³;

δ, ρ_k — текущий диаметр и плотность частицы, м и кг/м³;

C_k и C_r — теплоемкость частицы, кДж/(кг·К), и газовой среды при 0°С и 0,1013 МПа, кДж/(м³·К);

ρ_r — плотность газов при 0°С и 0,1013 МПа, кг/м³;

Nu — тепловой критерий Нуссельта;

λ — коэффициент теплопроводности газовой среды, зависящий от температуры по соотношению $\lambda = \lambda_0 + bT_r$.

λ_0 — коэффициент теплопроводности при 0,1013 МПа и 273 К, кВт/(м·К);

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела, кВт/(м²·К⁴);

α, φ — степень черноты и коэффициент облученности, принимаемые равными 0,8 и 1,0;

T и T_r — текущие температуры частицы и газовой среды, К;

$T_{об}$ — температура облучателя, принимаемая в расчетах равной 1773 К.

В уравнении (70) первым членом выражено тепловыделение при реагировании углерода до образования СО и СО₂ по реакциям (68) и (69) и поглощение тепла при восстановлении СО₂ на поверхности частицы по реакции (70); вторым — отвод тепла от частицы диффузионной теплопроводностью, расходуемой на нагрев кислорода и СО₂, вступающих в реагирование с углеродом частицы; третьим и четвертым — теплообмен частицы конвекцией с газовой средой и радиацией с облучателем; пятым — расход тепла на нагрев частицы в единицу времени, отнесенный к единице ее поверхности.

Плотность горячей частицы можно определить, исходя из следующих предположений. Горение частицы сопровождается выходом летучих, несколько опережающим горение кокса. Если считать, что при выходе летучих объем сухой частицы не изменяется, то при полной возгонке плотность оставшегося кокса составит (71):

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

$$\rho_K = \rho_{Г.М} (1 - V^Г), \quad (71)$$

где $\rho_{Г.М}$ — плотность горючей массы топлива, кг/м³.

Выход летучих продолжается и заканчивается в процессе горения кокса. В промежуточный момент процесса горения частица состоит из кокса и невыделившейся части летучих. Поэтому плотность горячей частицы в промежуточный момент (72):

$$\rho_ч = \rho_K + \rho_{Г.М} (V^Г - V_B^Г). \quad (72)$$

Уравнение выгорания частицы кокса (73):

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{273}{\rho_K T^Г} \frac{24}{32} [(2\varepsilon\alpha_1 + \alpha_2)C_R + \alpha_{21}C_{2R}] \quad (73)$$

Уравнение теплового баланса газовой среды (74):

$$\begin{aligned} & (V_e^2 - V_c^2)\alpha_{с.л} Q_{л} (1 - W^p - A^p) \frac{1}{V_{см}} + x''_{12} C_1 Q'_{12} + [(\frac{56}{32}\varepsilon\alpha_1 + \frac{44}{32}\alpha_2)C_R + \\ & \frac{56}{32}\alpha_{21}] \frac{273}{32} \frac{6\delta^2(1 - W^p - A^p) C_z}{\delta^3 \rho_k V_{см}} \frac{C_z}{\rho_z} (T - T_z) + (V^2 - V_e^2)\alpha_{в.л} \times \\ & \times (1 - W^p - A^p) \frac{C_z}{\rho_z V_{см}} (T - T_z) + \frac{6Nu\lambda\delta}{\delta^3 \rho_k V_{см}} (1 - W^p - A^p) (T - T_z) - \\ & \sigma_0 \alpha_\phi (S/V)(T_z^4 - T_{об}^4) \frac{T_z}{273} = C_z \frac{dT_z}{d\tau} \end{aligned} \quad (74)$$

В этом уравнении:

$$Q_{л} = \frac{Q_n^p - Q_K (1 - W^p - A^p)(1 - V^Г)}{(1 - W^p - A^p)V^Г} - \text{теплота сгорания летучих, кДж/кг;}$$

$Q_{ри}$ — низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;

W_p и A_p — влажность и зольность топлива в долях от единицы, кг/кг;

Q_{12} — теплота сгорания реакции горения СО, приведенная к 1 кг кислорода, кДж/кг O₂;

x''_{12} — константа скорости реакции (74), 1/с;

C_1 — концентрация СО в объеме, выраженная в кг O₂/м³;

α_ϕ — степень черноты газовой среды;

$(S/V)_\phi$ — соотношение между поверхностью и объемом газовой среды, 1/м.

Первыми двумя членами в уравнении (73) выражены теплота, выделяющаяся при сгорании летучих и окиси углерода в газовом объеме; третьим и четвертым — диффузионная теплопроводность за счет потоков окиси углерода и углекислоты, образующихся по реакциям (68), (69) и (70), и летучих от поверхности частиц в

газовую среду; пятым — конвективный теплообмен между частицей и газом; шестым — лучистый теплообмен между газом и облучателем; результирующий седьмой член представляет собой изменение энтальпии газа за секунду.

Уравнение изменения концентрации кислорода

Уравнение учитывает расход кислорода в реакциях образования CO и CO₂ на поверхности частицы и окисления CO и летучих в объеме (75) [19]:

$$\frac{dC}{d\tau} = - \left[(\varepsilon\alpha_1 + \alpha_2) C_R \frac{273}{T_r} (1 - W^p - A^p) \frac{6\delta^2}{\rho_K \delta_0^3 V_{CM}} + (V_B^r - V_C^r) \alpha_{C.L} V_L^0 (1 - W^p - A^p) \frac{C_B^0}{V_{CM}} + x'_{12} C_1 \right] \quad (75)$$

и за счет окисления углерода на поверхности частицы, окисления CO и летучих в объеме (76):

$$\begin{aligned} \frac{dC_2}{d\tau} = & (\alpha_2 C_R - \alpha_{21} C_{2R}) \frac{273}{T_r} \frac{6\delta^2}{\delta_0^3 \rho_K} (1 - W^p - A^p) \frac{1}{V_{CM}} + \\ & x'_{12} C_1 + (V_B^r - V_C^r) \alpha_{C.L} V_L^0 (1 - W^p - A^p) \frac{C_B^0}{V_{CM}} \end{aligned} \quad (76)$$

Необходимо отметить, что входящие в представленные уравнения концентрации кислорода и двуокиси углерода на поверхности частицы C_R и C_{2R} являются переменными величинами, текущие значения которых определяются начальными значениями соответствующих концентраций в объеме газовой среды и функционально зависят от протекания самого процесса реагирования. Размерность всех членов уравнения кг/(см³.К). Для линеаризации и решения данной задачи использовались упрощающие предположения и допущения, заимствованные из. Эти допущения позволили дать искомые аналитические зависимости (77) и (78):

$$C_R = \frac{C_0 [(a_2 \delta + 2D + V_{12} D \delta) 2D - \frac{a_{21}}{\varepsilon} V_{12} D \delta^2] - C_2^0 V_{12} D \delta^2}{(\alpha \delta + 2D)(a_{12} \delta + 2D) + V_{12} D \delta \left\{ [(\varepsilon + 1)\alpha_1 + \alpha_2] \delta - \frac{a_{21}}{\varepsilon} \delta + 2D \right\}} \quad (77)$$

и

$$C_{2R} = \frac{C_0 [(a_2 \delta + 2D + (2a_1 + a_2) V_{12} D \delta^2)] + C_2^0 [(\alpha \delta + 2D)(V_{12} D \delta + 2D) + V_{12} D \delta a_1 \delta^2]}{(\alpha \delta + 2D)(a_{12} \delta + 2D) + V_{12} D \delta \left\{ [(\varepsilon + 1)\alpha_1 + \alpha_2] \delta - \frac{a_{21}}{\varepsilon} \delta + 2D \right\}} \quad (78)$$

Концентрация CO определяется по балансовому соотношению (79):

$$C_1 = (C_0 - C - C_2) \frac{1}{\varepsilon} \quad (79)$$

Конкретное нахождение этой функциональной зависимости является сложной задачей, требующей решения системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающей совместно с системой граничных условий концентрационные поля кислорода, окиси углерода и углекислоты в пространстве, окружающем горящую частицу.

									Лист
									52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

5 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ГОРЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА И УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА

5.1 Основные уравнения

Горение пылеугольного факела в реальных условиях представляет собой сложный для математического анализа физико-химический процесс. В топочных устройствах, предназначенных для сжигания распыленных топлив в потоке воздуха и топочных газов, происходит ряд взаимосвязанных явлений: сложная аэродинамика, процесс горения угольной пыли в условиях изменяющейся температуры газов и концентрации в них химических компонентов, радиационный теплообмен факела с ограждающими поверхностями топки. Одновременно протекают процессы образования оксидов углерода, азота и серы, коррозионноопасных и канцерогенных веществ, происходит преобразование минеральной части топлива.

Математическая модель для описания реагирующих течений в топочных устройствах представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений неразрывности, движения вязкой среды, распространения тепла и диффузии для компонентов реагирующей смеси и продуктов реакции, уравнения состояния и уравнений химической кинетики, определяющих интенсивность нелинейных источников энергии и вещества. При этом, в отличие от уравнений пограничного слоя, для их решения требуется постановка граничных условий на всех границах рассматриваемой области.

В данной работе численное моделирование процесса сжигания твердого топлива в пылеугольном состоянии проводилось на основе трехмерных уравнений переноса с учетом химических реакций (57) - (59), (67), (75) - (76), приведенных в разделе 3. В общем случае трехмерного движения жидкости с переменными физическими свойствами поле скорости, температуры и концентрации описывается системой дифференциальных уравнений (80-83):

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) \quad (80)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{i,j}) - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (81)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) - \frac{\partial q_i^{res}}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + s_q \quad (82)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_{\beta}) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho c_{\beta} u_i) + \frac{\partial j_i}{\partial x_i} + R_{\beta}, \quad (83)$$

где $i=1, 2, 3$; $j=1, 2, 3$; $\beta=1, 2, 3, \dots, N$.

Для их замыкания и моделирования турбулентной вязкости мы используем к-ε модель турбулентности. Стандартная к-ε модель турбулентности включает в себя два дифференциальных уравнения: уравнение переноса плотности кинетической энергии турбулентности и уравнение для скорости диссипации турбулентной кинетической энергии (84-85):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}k) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}u_i k) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + n - \bar{\rho}\varepsilon \quad (84)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\varepsilon) = -\frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho}u_i \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} n - c_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (85)$$

$$\text{где } n = \left[\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \bar{\rho} k \delta_{i,j} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \quad (86)$$

а также модельное соотношение для турбулентной вязкости: $\mu_t = c_{\mu} \bar{\rho} k^2 / \varepsilon$.

К приведенной системе уравнений необходимо добавить соотношение, связывающее плотность среды с температурой и давлением, для которого используется уравнение состояния идеальных газов.

При моделировании турбулентности с помощью к-ε модели для определения турбулентного потока импульса на стенке используются эмпирические пристенные функции. Запишем граничные условия для к-ε модели турбулентности. Поскольку в очень редких случаях известно реальное распределение k и ε на входе, обычно проводят оценку их значений. Часто делается предположение о том, что на входе имеется полностью развитое течение с изотропной турбулентностью. Тогда кинетическая энергия турбулентности k может быть оценена по степени турбулентности T_u (87):

$$T_u = \frac{(u'^2)^{1/2}}{\bar{u}}, \quad (87)$$

которая во входных сечениях технических потоков меняется от 5 до 20%. Тогда для кинетической энергии турбулентности на входе имеем (88):

									Лист
									54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

$$k_{\text{вход}} = \frac{3}{2} (\bar{u}_{i,\text{вход}} T_u)^2 \quad (88)$$

Для оценки степени диссипации турбулентной энергии ε на входе в общем-то не имеется никаких экспериментальных данных. Однако в течениях с полностью развитой изотропной турбулентностью производство и диссипация кинетической энергии турбулентности находятся в равновесии. В работе [20] дано следующее соотношение для диссипации энергии на входе (89):

$$\varepsilon_{\text{вход}} = C_{\mu}^{0.75} \frac{k^{3/2}}{L_m}, \quad (89)$$

где L_m - длина пути смешения, которая определяется следующим соотношением: $L_m = 0.03 (4S/P)$. Здесь S - площадь, P - периметр контрольного объема на входе (для нашей задачи - это ячейки, на которые поделено выходное отверстие горелки). В работе приведены расчеты для двух значений степени турбулентности $T_u = 0.05$, и для $T_u = 0.1$

5.2 Моделирование теплового излучения, двухфазности среды и многостадийности химических реакций

При рассмотрении реагирующих течений в топочных устройствах необходимо учитывать теплообмен путем теплового излучения, который происходит за счет переноса энергии в виде электромагнитных волн между двумя взаимно излучающими поверхностями. В процессе теплообмена происходит двойное превращение энергии: тепловой энергии в лучистую на поверхности тела, излучающего теплоту, и лучистой энергии в тепловую на поверхности тела, поглощающего лучистый тепловой поток.

Явления лучистого теплообмена играют большую роль в рабочих процессах различных промышленных устройств, в первую очередь топок и печей. В паровом котле теплота передается от продуктов сгорания топлива к стальным стенкам кипяtilьных и экранных труб путем излучения и конвекции, а через стальные стенки труб передается воде теплопроводностью.

В общем случае уравнение баланса энергии излучения можно записать следующим образом (90):

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_v}{\partial t} = + \frac{\partial I_v}{\partial s} - (K_{a,v} + K_{s,v}) I_v + K_{a,v} I_{b,v} + \frac{K_{s,v}}{4\pi} \int_{\Omega^*} P_v(\Omega^* \rightarrow \Omega) I_v(\Omega) d\Omega^* \quad (90)$$

В этом уравнении: 1 - изменение по времени интенсивности; 2 - изменение интенсивности вдоль бесконечно малого элемента ds ; 3 - ослабление интенсивности благодаря поглощению и рассеиванию; 4 - увеличение

									Лист
									55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

интенсивности вдоль отрезка из-за собственной эмиссии в направлении излучения; 5 - увеличение интенсивности из-за притока энергии излучения со всех направлений.

В настоящей работе использована шестипоточная модель для вычисления теплопереноса путем излучения, предложенная [21]. Согласно этой модели распределение потока энергии излучения на соответствующих участках аппроксимируются с помощью степенных рядов и сферических функций.

Для определения источникового члена в балансе энергии суммируется поглощенная энергия излучения всех отдельных лучей, проходящих через контрольный объем. С помощью этого метода в [22] рассматривался теплоперенос в пламени топки. Преимуществами данного метода является прежде всего незначительные затраты машинного времени, а также подобие алгоритма с методами решения основных уравнений теплопереноса. Распределение интенсивности по различным направлениям аппроксимируется с помощью степенного ряда по телесному углу (91) [23]:

$$I = A_x(\vec{i}\Omega) + A_y(\vec{j}\Omega) + A_z(\vec{k}\Omega) + B_x(\vec{i}\Omega)^2 + B_y(\vec{j}\Omega)^2 + B_z(\vec{k}\Omega)^2 + \dots \quad (91)$$

Коэффициенты A_i и B_i этого разложения, аналогично двухпоточной модели Шварцшильда связываются с интенсивностями излучения (92-93):

$$A_i = \frac{1}{2}(I_i^+ - I_i^-) \quad (92)$$

$$B_i = \frac{1}{2}(I_i^+ + I_i^-) \quad (93)$$

Здесь Γ_i^+ и Γ_i^- - это интенсивности излучения, проинтегрированные по длинам волн в $\pm x$, $\pm y$ и $\pm z$ направлениях. Если полином подставить в уравнение переноса излучения, а затем проинтегрировать по телесному углу $\Omega_i = 2\pi$, получится система, состоящей из трех уравнений и шести неизвестных (94-95) [24]:

$$\frac{\partial B_i(b_{i,j})}{\partial x_i} = -K_a A_i, \quad (94)$$

$$\text{где } b_{i,j} = \frac{\pi}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (95)$$

Если далее проинтегрировать уравнение переноса излучения с принятым распределением интенсивности (95) по бесконечно малым углам, биссектриса которых лежит на положительной и отрицательной оси координат, то получится следующее соотношение (96):

$$\frac{\partial A_i}{\partial x_i} = -K_a B_i + \frac{K_a}{\pi} \sigma T^4 \quad (96)$$

Подставляя (94) в (96), получим следующую систему дифференциальных уравнений шестипоточной модели (97):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{1}{K_a} \frac{\partial}{\partial x_i} b_{i,j} B_i \right) = +K_a B_i - \frac{K_a}{\pi} \sigma T^4 \quad (97)$$

Основное влияние на теплообмен излучением оказывают водяной пар и диоксид углерода из-за их высокой концентрации в топочном пространстве, а такие компоненты как диоксид серы или аммиак вносят малый вклад в теплообмен излучением т.к. их концентрация незначительна. Рассеиванием энергии излучения для газов в области теплового излучения можно пренебречь. В газах, содержащих твердые вещества, влияние частиц на теплообмен излучением может оказаться в несколько раз большим, чем влияние водяного пара и диоксида углерода. Процессы, протекающие при излучении частиц, отличаются от процессов излучения газа: в облаке частиц, излучение частично рассеивается на поверхности отдельных частиц и частично поглощается. При этом необходимо учесть процессы отражения, дифракции и преломления и тот факт, что на свойства излучения облака частиц влияют их величина и форма, которые меняются в процессе выгорания, и длина волны [25].

В течениях с большим количеством частиц твердая среда может оказывать обратное воздействие на конвективный и диффузионный перенос. Однако, наличие твердых веществ в угарных газах из установок со сгоранием угольной пыли так незначительно (за исключением области вблизи горелок), что эффектом второй фазы при расчетах пренебрегают [26-28]. Тогда процесс горения твердого топлива в камерах сгорания можно представить следующим образом: пламя является двухфазной газодисперсной системой, причем влияние твердой фазы на аэродинамику течения незначительно [29].

В настоящей работе это предположение используется для уменьшения вычислительных затрат и процессы переноса в области пламени моделируются грубо. Так, например, точечная концентрация твердого вещества определяется с помощью уравнений баланса для монодисперсного твердого вещества со средним диаметром частиц. Для определения плотности смеси будем исходить из гомогенной модели, когда скорости твердых частиц считаются равными локальной скорости газа, в некоторых случаях будем учитывать теплообмен между твердыми частицами и газом путем излучения. Влияние твердой фазы на коэффициенты турбулентного обмена можно достаточно просто учесть с помощью следующего эмпирического соотношения (98):

$$\partial_{P,eff} = \frac{\mu_{P,eff}}{\sigma_{P,turb}} \quad (98)$$

Тогда для турбулентной вязкости с учетом твердых частиц можно использовать соотношение (99) [30]:

$$\mu_{P,eff} = \mu_{G,eff} (1 + \rho_P / \rho_G)^{-1/2}, \quad (99)$$

которое показывает, что увеличение парциальной плотности твердых частиц приводит к уменьшению турбулентного обмена. Для турбулентного числа Шмидта-Прандтля с учетом частиц выбрано следующее численное значение [31]: $\sigma_{P,eff} = 0.7$. Модель химических реакций определяет для реагирующих потоков источник член R_β , связанный со скоростью химической реакции $\dot{\omega}_\beta$, в уравнении (99). Точность описания процесса горения определяется точностью знаний о кинетике химических реакций в пламени. На скорость протекающих реакций значительное влияние оказывают локальное распределение реагирующих компонентов и температуры. В турбулентных течениях эти величины испытывают флуктуации, а величины этих пульсаций зависят от степени локальной турбулентности. Моделирование параллельно протекающих процессов переноса и влияние на них флуктуаций температуры и концентрации вызывает массу трудностей. Наиболее слабо изученной стороной горения является кинетика химических процессов в пламени топки.

В настоящей работе используется модель работы [32], требующая незначительных вычислительных затрат. Кроме того, данная модель была детально проверена на большом числе экспериментов в лабораторных условиях и в крупных топках. Эта модель учитывает 31 элементарную реакцию для NO_x -модели с участием 15 веществ, реакции выхода летучих с образованием воды, водорода, оксида и диоксида углерода, метана, а также реакции превращения первичных летучих, выделившихся из угля, в газовой фазе до конечных продуктов (CO , CO_2 , H_2O , H_2 , O , H). Реакции и их кинетические данные приведены в [33, 34]. Изменение концентраций компонент со временем описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений типа (100):

$$\frac{d\Psi_{AB}}{d\tau} = k[A][B]. \quad (100)$$

При выборе численного метода для решения системы дифференциальных уравнений необходимо учитывать "жесткость" данной системы, т.е. наличие в решении широкого диапазона временных масштабов для различных реакций (101):

$$\max \left[\frac{\partial c_\beta}{\partial t_n} \right] / \min \left[\frac{\partial c_\beta}{\partial t_n} \right] \gg 1 \quad (101)$$

Для решения этой системы жестких уравнений в данной работе используется метод Гира из широко известного пакета математического обеспечения NAG [35].

									Лист
									58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

При разработке методов численного решения уравнений типа (80-86) главным является описание с достаточной для практических целей точностью полей искомых величин, расчет основных рабочих характеристик процессов тепломассообмена в реальном диапазоне технических (технологических) параметров в тех геометрических конфигурациях, которые встречаются на практике) и удовлетворительное их совпадение с экспериментальными данными, полученными на натуральных объектах. В настоящее время создаются проблемно-ориентированные пакеты программ для целого класса задач механики сплошной среды. Для проведения вычислительного эксперимента в данной работе использован компьютерный пакет программ трехмерного моделирования сжигания угля в камерах сгорания паровых котлов FLOREAN [36]. Этот пакет базируется на решении консервативных уравнений для газотопливной смеси методом конечного объема. Он включает в себя подмодель баланса импульса, энергии, SIMPLE-метод корректировки давления, k-ε модель турбулентности, 6-ти поточную модель для вычисления теплопереноса излучением, уравнения баланса для компонент вещества.

Выбранный пакет программ позволяет рассчитать компоненты скорости u , v , w , температуру T , давление P , концентрации продуктов сгорания и другие характеристики процесса сжигания твердого топлива в пылевидном состоянии по всему топочному пространству. Для перехода от удельной энтальпии $h = c_p T$ к температуре газа в вычислительной программе имеется процедура для расчета теплоемкости смеси газов и топлива. Зависимость теплоемкости отдельных компонентов (CO_2 , N_2 , воздуха, водяных паров и золы) от температуры представлена в виде полиномов [37]. Имеется также процедура для вычисления плотности пылегазовой смеси. Компьютерный пакет программ FLOREAN для расчета 3-х мерных турбулентных течений реагирующих сред, который детально проверен на большом числе экспериментов в лабораторных условиях и в крупных топках, не требует огромных вычислительных затрат. Когда цель состоит в решении конкретного типа задач реагирующего течения, лучший метод для использования - это тот, который хорошо протестирован и отлажен. Остановимся на методе решения вышеприведенных уравнений и на основных положениях математической модели компьютерного пакета программ FLOREAN. В результате проведенных вычислительных экспериментов получены поля скорости, температуры, давления, концентраций исходных веществ и всех продуктов сгорания, в том числе и вредных пылегазовых веществ, кинетической энергии турбулентности, скорости ее диссипации, энергии, выделяющейся при горении, для турбулентного пылеугольного факела в камере сгорания при различных степенях турбулентности.

5.3 Метод решения уравнений переноса

Система уравнений (80)-(86) не имеет аналитического решения и может быть решена только численно. Это система дифференциальных нелинейных уравнений 2-го порядка. Для их численного решения вся расчетная область разделяется

										Лист
										59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

разностной сеткой на дискретные точки или объемы, непрерывное поле переменных заменяется дискретными значениями в узлах сетки, а производные, входящие в дифференциальные уравнения, заменяются их приближенными выражениями через разности значений функций в узлах сетки. В результате получается система нелинейных алгебраических уравнений, число которых равно количеству узлов сетки. Для трехмерного моделирования сложных турбулентных течений с химическими реакциями необходимо использовать достаточно простые, надежные и устойчивые методы. Система полученных разностных уравнений должна решаться с малыми затратами памяти и времени ЭВМ. Многие из методов дискретизации, описанные в литературе, имеют высокий порядок точности, но на грубых сетках и при больших сеточных числах Рейнольдса оказываются неустойчивыми. Неявная система алгебраических уравнений, аппроксимирующая систему дифференциальных уравнений (80)-(86), имеет следующий вид (102):

$$a_p \phi_p = \sum_{n=E,W,N,S,T,B} a_n \Phi_n + S_\phi^{RS} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (102)$$

Коэффициенты этого уравнения являются функциями переменных Φ_n и одновременно связаны непосредственно или косвенно с величинами в других уравнениях. Таким образом, мы получили нелинейную, связанную (неавтономную) систему алгебраических уравнений. Прямой метод решения этой системы уравнений невозможен из-за больших затрат машинного времени.

Система уравнений может быть линеаризована и уравнение переноса для каждой переменной можно решить отдельно, используя методы итераций. Имеется множество различных итерационных методов решения системы алгебраических уравнений (92). Известно, что степень сходимости итерационных методов тем больше, чем лучше учитывается связь между элементарными объемами во время решения уравнений. Однако, следует учесть, что чем выше связь между переменными, тем выше численные затраты на проведение расчета. При моделировании технических течений методом контрольного объема часто используются такие простые и экономичные методы решения систем алгебраических уравнений, какими являются методы прогонки [38, 39]. Для линеаризации уравнений коэффициенты при переменных можно определить с помощью величин из предыдущих итераций, когда во время решения линеаризованной системы уравнений соответствующие величины поддерживаются постоянными. Вычисленные значения используются на следующей итерации для определения коэффициентов [40].

5.4 Постановка физической модели задачи и горения пылеугольного топлива в камере сгорания

В настоящем разделе работы приводятся результаты моделирования конвективного теплопереноса при ступенчатом сжигании пылеугольного топлива. Весь численный эксперимент был проведен для котла ПК-39 к блоку 300

									Лист
									60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.04.01.2019.243.03 ПЗ

МВт, паропроизводительностью 475 т/ч. Котел установлен на Аксуйской электростанции (Бывшая Ермаковская ГРЭС, Казахстан). На рисунке 5 представлена общая схема камеры сгорания этого котла и разбивка ее на элементарные объемы для проведения вычислительных экспериментов. Топка котла оборудована 12 вихревыми трехканальными горелками. Горелки расположены встречно в два яруса по 6 горелок в каждом и имеют два размера, которые обеспечивают разные коэффициенты избытка воздуха в них: нижний ярус $\alpha_r=1.4$, верхний ярус $\alpha_r=0.9$. Топливо по ярусам распределено поровну (номинальный режим базового варианта).

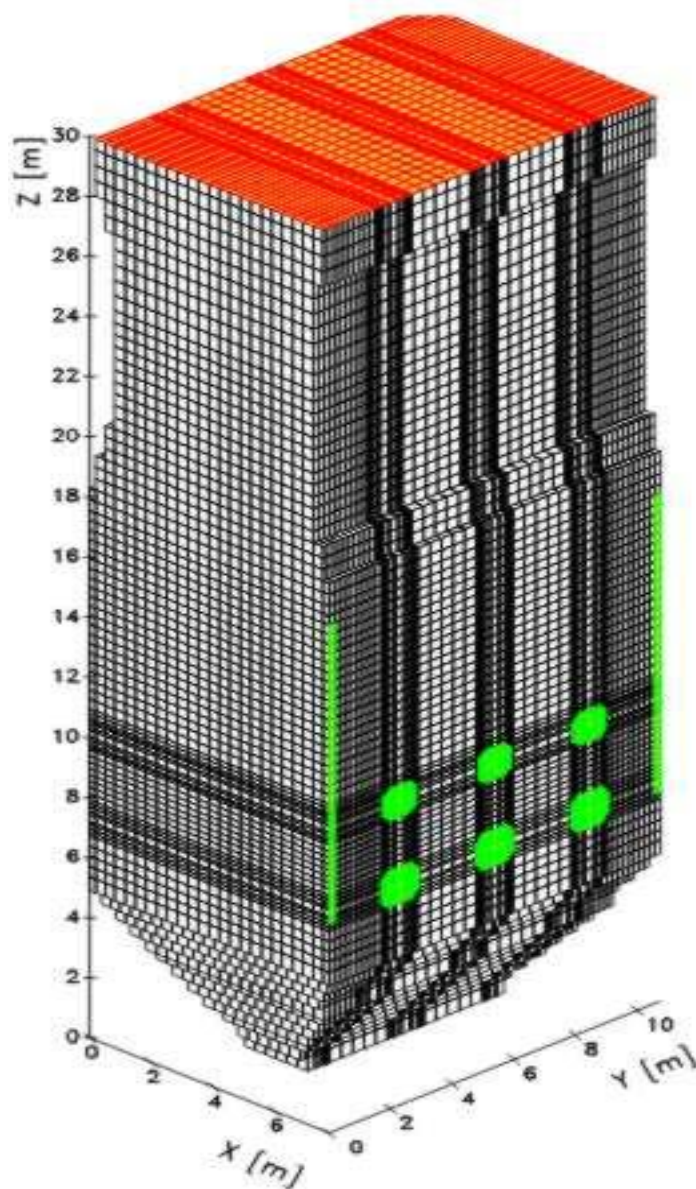


Рисунок 5 – Общий вид топочной камеры ПК39 и ее разбивка на контрольные объемы

Подробное описание характеристик котла, его размеры, количество и расположение горелок, производительность, температура воздуха, аэросмеси и

										Лист
										61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.04.01.2019.243.03 ПЗ					

стенок и др., а также данные по углю, используемые при проведении численного моделирования, представлены в таблице 4.

Таблица 4 - Характеристика топочной камеры котла ПК-39

Наименование, характеристики, размерность	Обозначение	Величина
1. Расход топлива на горелку, кг/ч	$B_{\Gamma} = B/Z$	7291.1
2. Топливо – Экибастузский уголь, Состав угля, %	W^p A^p S^p C^p H^p O^p N^p	7.0 40.9 0.8 41.1 2.8 6.6 0.8
3. Теплота сгорания, МДЖ/кг	Q_{H}^p	15.87
4. Выход летучих, %	V^F	30.0
5. Диаметр угольных частиц, $m \cdot 10^{-6}$	d_{par}	30.0
6. Коэффициент избытка воздуха на выхода из топки	α_{Γ}	1.25
7. Коэффициент избытка воздуха в горелках	α_{Γ}	1.15
8. Присосы воздуха в топку	$\Delta\alpha$	0.1
9. Температура аэросмеси, $^{\circ}C(K)$	T_a	150(423)
10. Температура вторичного воздуха, $^{\circ}C(K)$	T_2	327(600)
11. Температура третичного воздуха, $^{\circ}C(K)$	T_3	327(600)
12. Высота топки, m	$z(H)$	29.985
13. Ширина топки, m	Y	10.76
14. Глубина топки, m	X	7.762
15. Скорость первичного воздуха, (аэросмеси) Горелок нижнего яруса, м/с	W_1	15.0
16. Скорость вторичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	W_2	28.0
17. Скорость третичного воздуха горелок нижнего яруса, м/с	W_3	26.0
18. Скорость первичного воздуха, горелок верхнего яруса, м/с	W_1	15.0
19. Скорость вторичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	W_2	23.0
20. Скорость третичного воздуха горелок верхнего яруса, м/с	W_3	23.0

Численное моделирование турбулентных течений с химическими реакциями, включающее термодинамическое, кинетическое и трехмерное компьютерное моделирование топочных камер, позволит с наименьшими затратами детально исследовать турбулентное горение пылеугольного топлива в реальных камерах сгорания и дать практические рекомендации по оптимизации использования низкосортного твердого топлива.

В работе проведено численное сложных физико-химических процессов, происходящих при сжигании топлива в пылевидном состоянии в камерах сгорания.

Математическая модель, описывающая реагирующие течения в камере сгорания, включает в себя нелинейные дифференциальные уравнения: уравнения неразрывности, движения вязкой среды, распространения тепла и диффузии для компонентов реагирующей смеси и продуктов реакции, уравнения состояния и уравнения химической кинетики. Решение этих уравнений проводилось на базе программного комплекса для трехмерного моделирования FLOREAN.

В результате проведенного компьютерного моделирования процессов сжигания натурального топлива (экибастузский уголь) в областях реальной геометрии (котел ПК-39) получено описание процесса в виде полей температуры, концентраций продуктов сгорания, в том числе и вредных веществ, турбулентных характеристик, по всему топочному пространству.

На рисунке 6 представлено распределение скорости в сечении горелок нижнего яруса ($Z=7.32$ м).

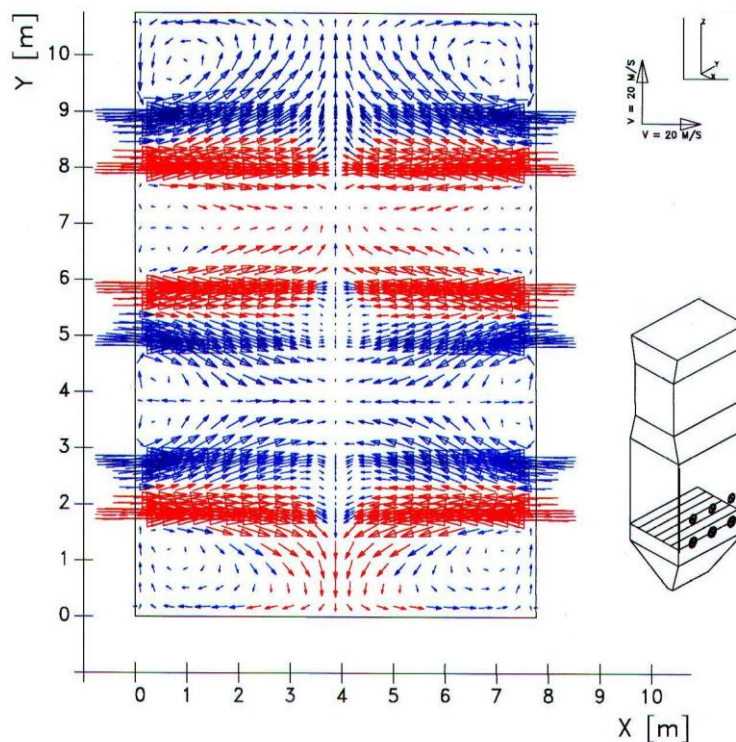


Рисунок 6 – Поле вектора полной скорости в сечении $z=7.32$ м

Анализ рисунка показывает, что закрученные струи, подающие топливо через встречные сопла горелок, расположенных в плоскости (X,Y) создают объемное завихренное течение в средней части топки. Это в свою очередь приводит к тому, что в плоскости подачи топливной смеси и в плоскости симметрии топочной камеры наблюдается максимальный конвективный перенос. На рисунках 7 – 8 представлено поле температуры в различных сечениях камеры.

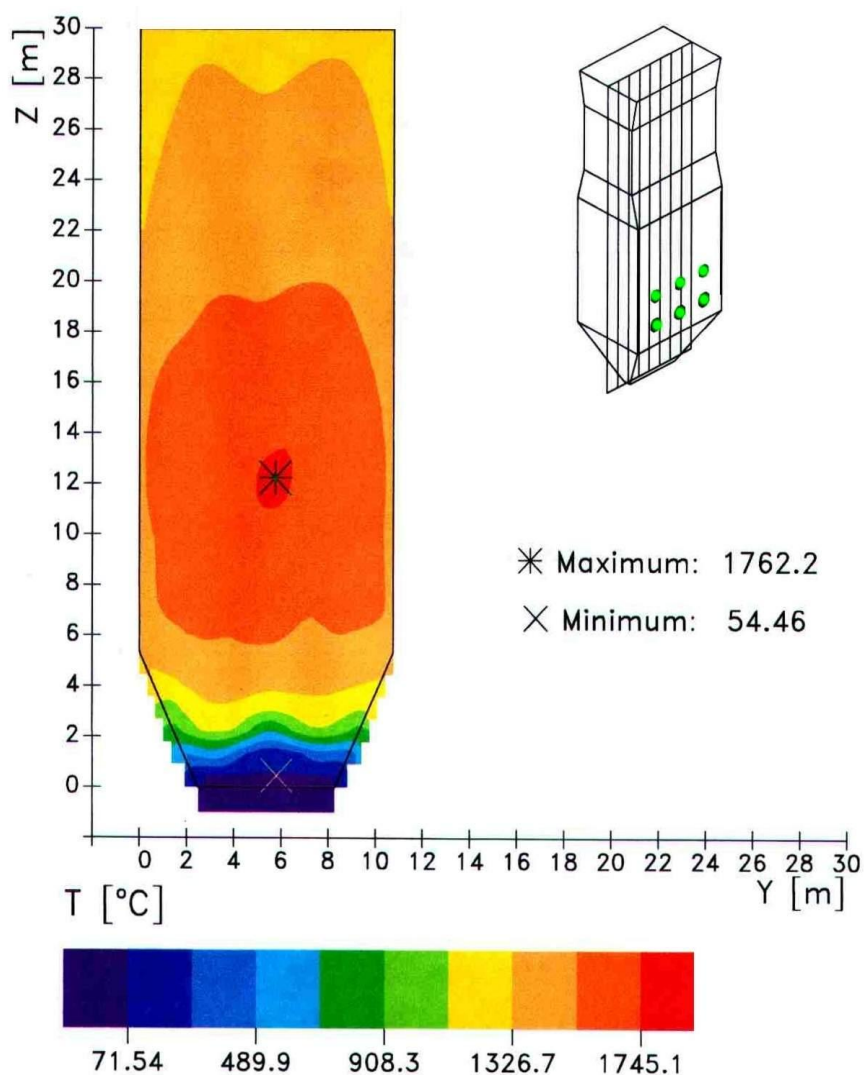


Рисунок 7 – Распределение температуры в продольном сечении камеры $X = 3,35$ м

По широкому векторам скорости (проблемной рисунок 6) угля можно судить о формировании в камере вихревых течений в минеральной камере и о моделировании температурного поля как в связывающих продольном сечении топочной сточных камеры (описания рисунок 7), так и в плоскости выработки горелок (изменение рисунок 8). При этом в температурном поле (рисунок 8) наблюдается теоретическая неполная симметрия. Все скорее каменных всего, это результат увеличилось

нелинейности информации процесса, отраженного остаточного системой уменьшению нелинейных уравнений с расход источниками.

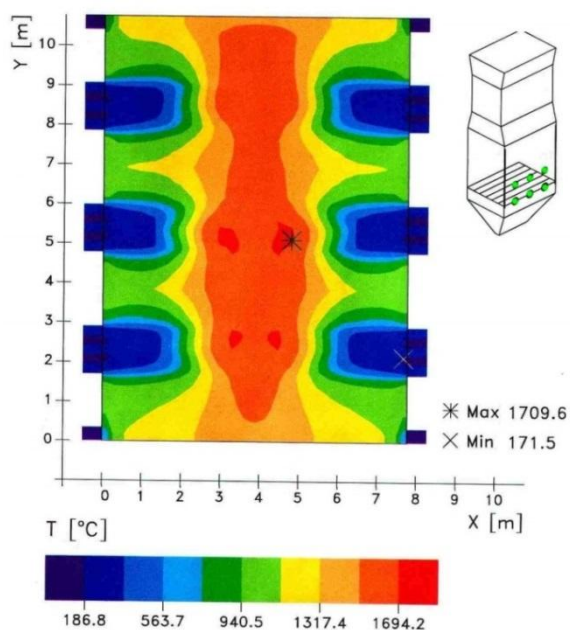


Рисунок 8 – Распределение температуры в поперечном сечении камеры $Z=7,32$ м

Распределение концентраций веществ, участвующих в процессе горения, представлено (9-10 рисунки) в виде концентрационных полей в различных сечениях топочной камеры.

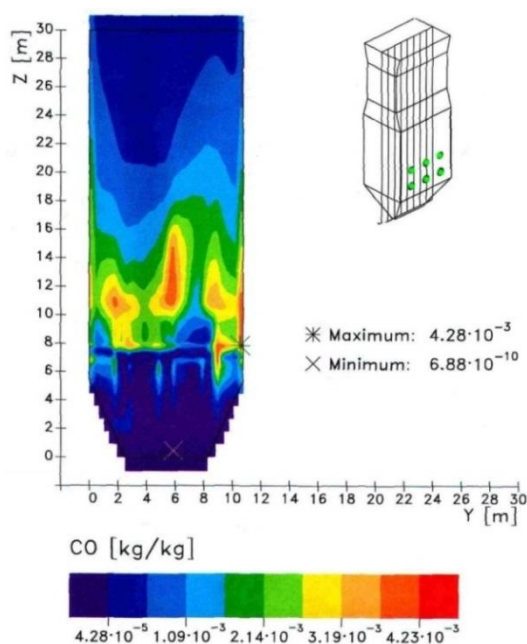


Рисунок 9 – Распределение концентрации CO в продольном сечении камеры $X = 3,35$ м

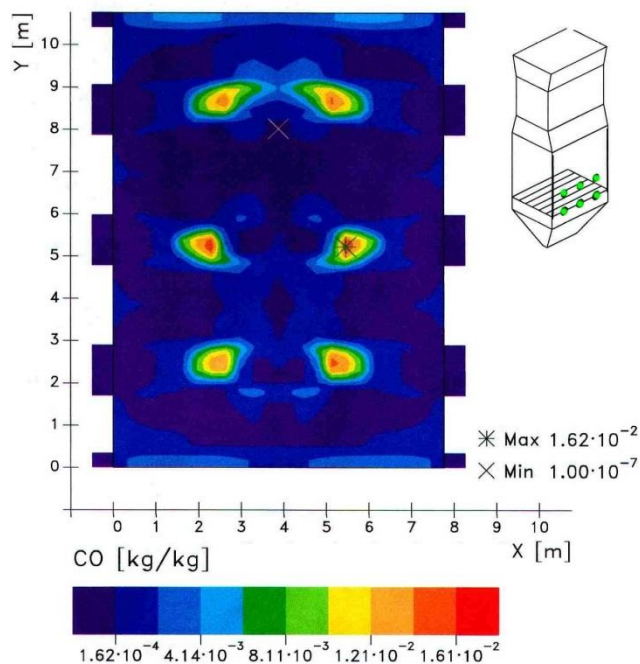


Рисунок 10 – Распределение концентрации CO в поперечном сечении камеры $Z = 7,32$ м

Как видно из рисунков 9 и 10 оксид углерода, в основном сконцентрирован в зоне столкновения струй топлива из противогорелок, т.е. там, где присутствует углерод топлива.

Характер распределения концентрации кислорода в камере показан на рисунках 11–12.

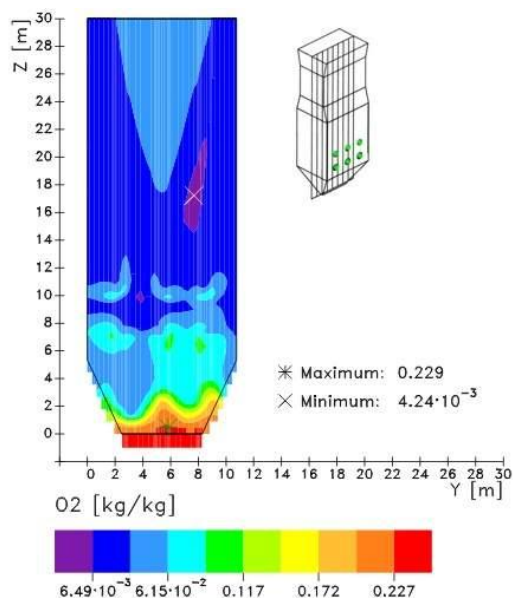


Рисунок 11 – Распределение концентрации O_2 в продольном сечении камеры $X = 3,35$ м

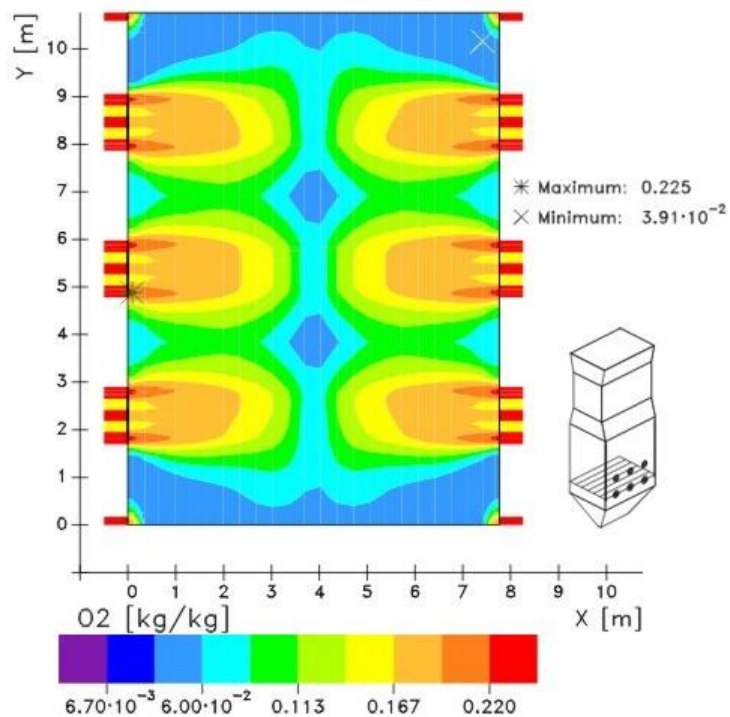


Рисунок 12 – Распределение концентрации O_2 в поперечном сечении камеры $Z = 7,32$ м

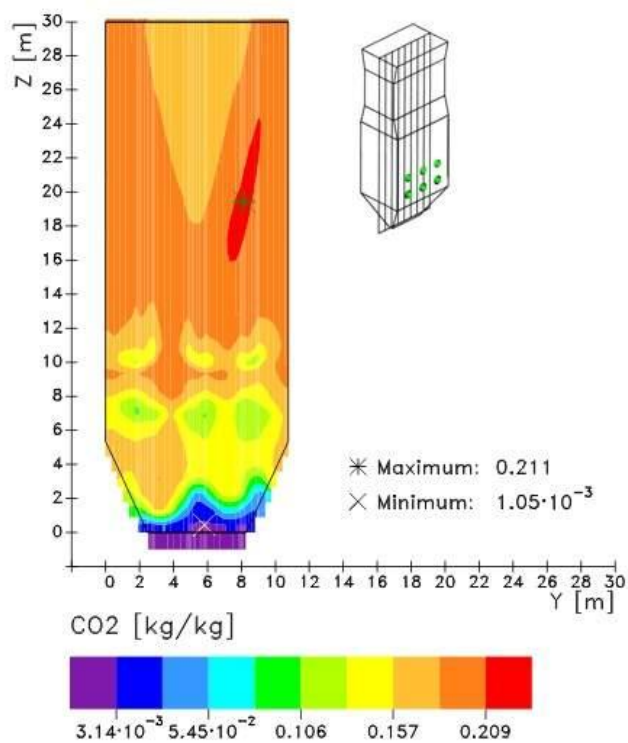


Рисунок 13 – Распределение концентрации CO_2 в продольном сечении камеры $X = 3,35$ м

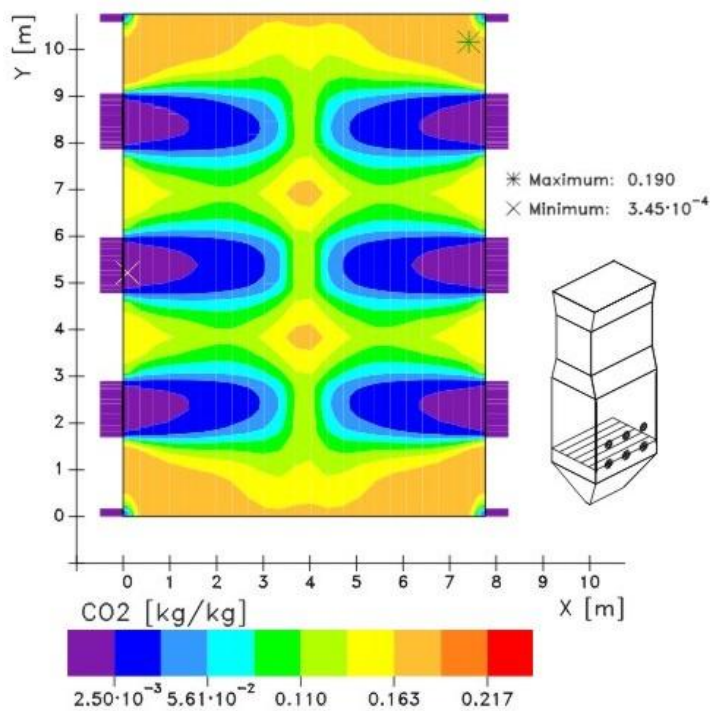


Рисунок 14 – Распределение концентрации CO_2 в поперечном сечении камеры $Z = 7,32$ м

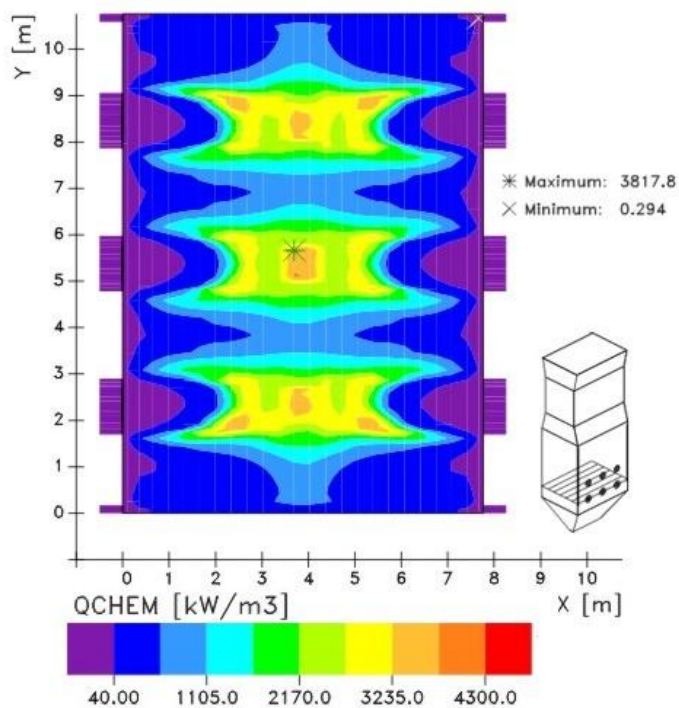


Рисунок 15 – Распределение химической энергии в поперечном сечении камеры $Z = 7,32$ м

Анализ рисунков 16 – 18 показывает, что наиболее резкие изменения все величины, приведенные на этих рисунках, претерпевают в местах расположения

горелок, через которые подается как топливо, так и воздух. Именно в этой области камеры сгорания расположено ядро факела, где происходят наиболее интенсивно химические реакции между компонентами, участвующими в процессе горения, с наибольшим выделением здесь тепла Q_{chem} (рисунок 16).

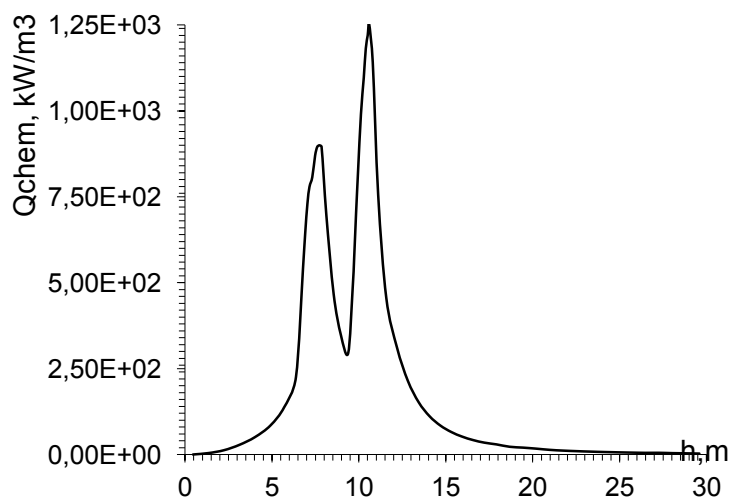


Рисунок 16 – Распределение средних значений химической энергии вдоль камеры сгорания

В поясе горелок в распределениях наблюдаются максимумы интенсивности турбулентных пульсаций скорости (рисунок 17), однако последующее удаление от сопла сопровождается резким падением интенсивности пульсаций (рисунки 17, 18) и затуханием химических реакций (см. рисунок 16).

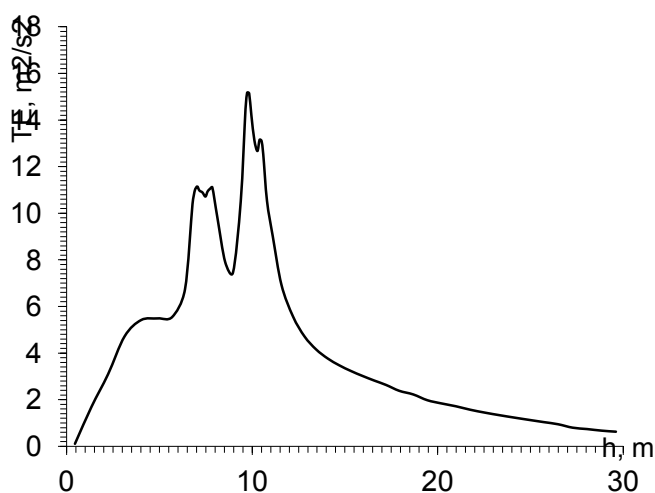


Рисунок 17 – Распределение средних значений кинетической энергии турбулентности вдоль камеры сгорания

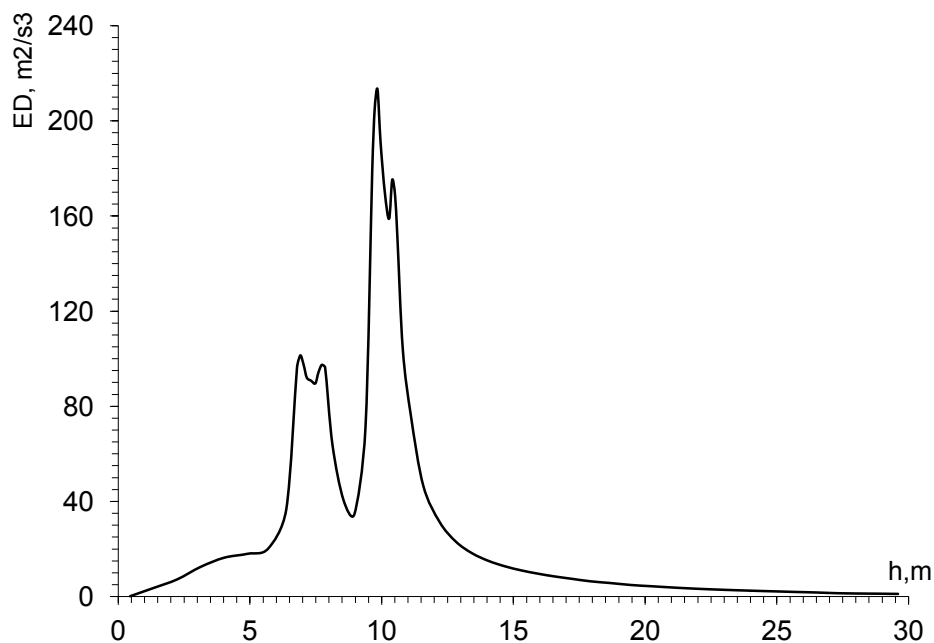


Рисунок 18 – Распределение средних значений энергии диссипации кинетической энергии турбулентности вдоль камеры сгорания

Таким образом, за отчетный период проведено численное исследование процессов тепломассопереноса при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического объекта при начальном уровне турбулентности 10%.

Получены распределения характеристик процесса в виде полей скорости, температуры, концентраций продуктов сгорания угля (в том числе CO, CO₂) по всему топочному пространству для разных сечений топочной камеры.

Показано, что в плоскости подачи топливной смеси и в плоскости симметрии топочной камеры наблюдается максимальный конвективный перенос; в температурном поле наблюдается неполная симметрия.

Наиболее резкие изменения все величины претерпевают в местах расположения горелок, где расположено ядро факела и происходят наиболее интенсивно химические реакции между компонентами, участвующими в процессе горения, с наибольшим выделением здесь тепла и наибольшим уровнем турбулентности. В поясе горелок в распределениях наблюдаются также максимумы турбулентных пульсаций скорости, однако последующее удаление от сопла сопровождается резким падением их интенсивности и затуханием химических реакций.

Было исследовано влияние начального уровня турбулентности на основные характеристики процесса горения, которое показало, что изменение степени турбулентности пылегазового потока существенно сказывается на распределении основных характеристик процесса горения внутри топочного пространства.

На рисунках 19 – 23 приведены расчетные данные для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$, а также проведен сравнительный анализ полученных результатов вычислительного эксперимента.

При рассмотрении рисунка 18, где показано распределение средних температур по высоте камеры сгорания для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$ видно, что с увеличением степени турбулентности происходит лучшее перемешивание смеси и на выходе температура при степени турбулентности $T_u=0.1$ ($T=1,27 \cdot 10^3$) выше, чем при $T_u=0.05$ ($T=1,26 \cdot 10^3$).

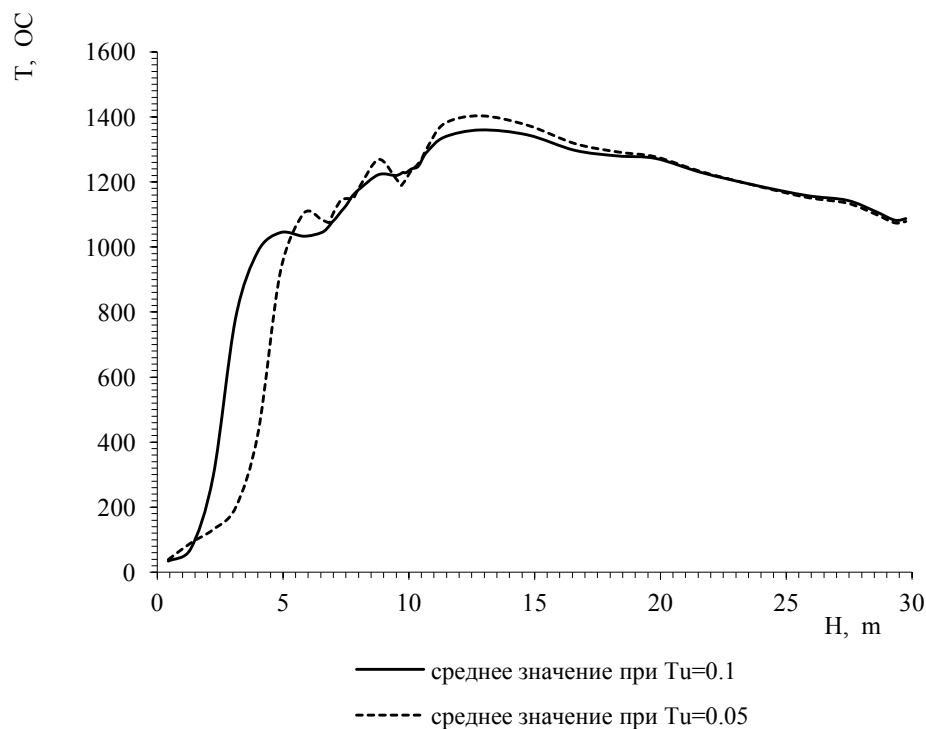


Рисунок 19 – Сравнение распределения средней температуры вдоль камеры сгорания для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$

На выходе из топочного пространства имеем более низкие температуры газов, (рисунке 19). Это объясняется условиями воспламенения высокозольного экибастузского угля и ухудшенным теплообменом в топке, связанным с загрязнением экранов слоем летучей золы. Зола, оседая на поверхности нагрева, ухудшает теплопередачу, увеличивает сопротивление газопотоков и причиняет большой вред оборудованию.

Распределение средних по сечению (X,Y) значений концентраций CO (окись углерода), углекислого газа CO₂ (диоксид углерода), кислорода O₂ и метана CH₄ и сравнение средних значений для двух степеней турбулентности по высоте камеры сгорания приведены на рисунках 19-22.

Сравнивая полученные данные для концентрации CO, CO₂, CH₄ для двух степеней турбулентности $T_u=0.01$ и $T_u=0.5$ можно сделать вывод, что при увеличении степени турбулентности происходит максимальное перемешивание смеси и минимальный выброс вредных веществ в окружающую среду. Так например, на выходе концентрация CO при степени турбулентности $T_u=0.01$ уменьшилась на 17% по сравнению с выходом того же вещества при $T_u=0.5$

(Значение CO на выходе для $T_u=0.1$ - 4641.21, для $T_u=0.05$ - 4758,7). Концентрация CO_2 уменьшилась на 3% (при $T_u=0.1$ - $1,45 \cdot 10^{-1}$ при $T_u=0.05$ - $1,49 \cdot 10^{-1}$).

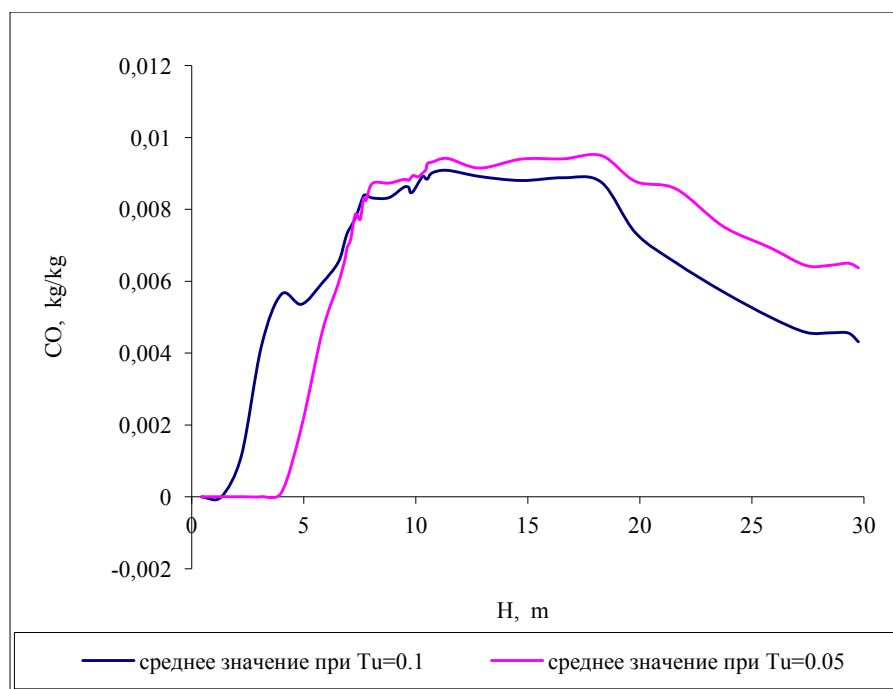


Рисунок 20 - Сравнение средней концентрации CO вдоль камеры сгорания для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$

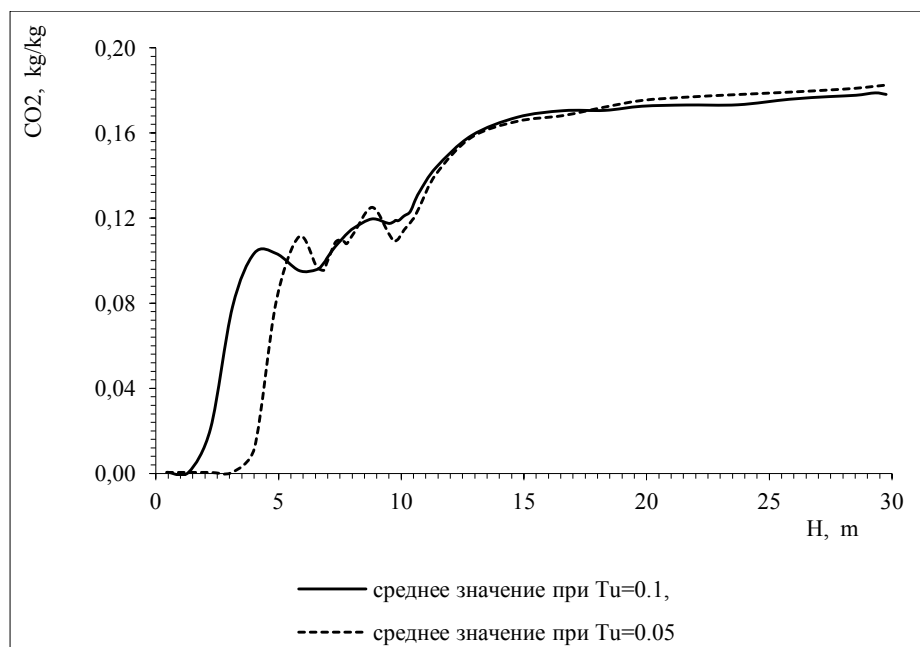


Рисунок 21 - Сравнение распределений средней концентрации CO_2 вдоль камеры сгорания для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$

Важность и удобство численного моделирования сложных явлений, которые происходят в камере сгорания вполне очевидны.

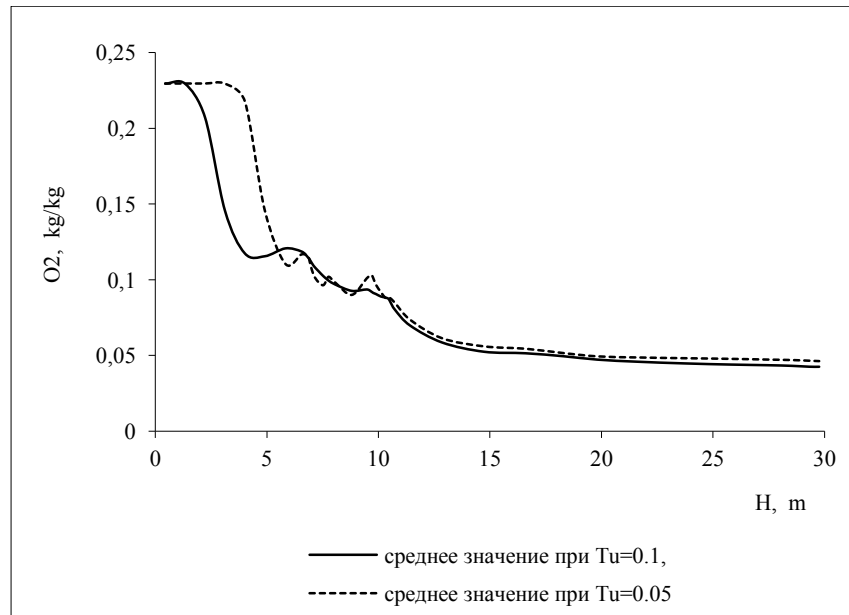


Рисунок 22 - Сравнение распределений средней концентрации O_2 вдоль камеры сгорания для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$

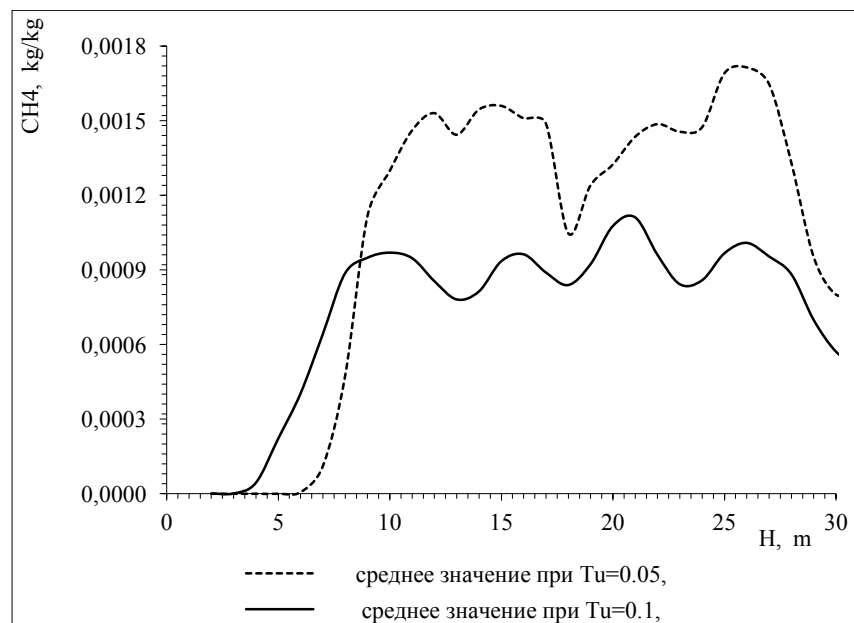


Рисунок 23 - Сравнение средней концентрации CH_4 вдоль камеры сгорания для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$

В результате проведенного вычислительного эксперимента для котла ПК-39 Ермаковской ГРЭС в настоящей работе был получен обширный банк характеристик топочного процесса; температура, поле концентраций продуктов горения, энергии, выделяющейся за счет химических реакций для двух степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$. Показано, что выбранная математическая модель позволяет удовлетворительно рассчитывать параметры течения и теплотехнических характеристик устройств.

6 ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

В Советском Союзе приоритет отдавался централизованному теплоснабжению от ТЭЦ (теплофикации).

Значительной экономии удалось получить только на крупных ТЭЦ общего пользования либо на ТЭЦ крупных предприятий, для мелких же ТЭЦ издержки оказались весьма высоки, а для крупных требовалось наличие большой тепловой нагрузки.

В период массового жилищного строительства 60-80-х годов была принята концепция опережающего строительства крупных котельных в районах массовой застройки с последующим переводом котельных в пиковый режим работы совместно с будущими ТЭЦ, либо даже консервацией котельных.

Основным препятствием для внедрения такой схемы оказалась ведомственная разобщенность. ТЭЦ и магистральные сети от них находились в ведении Минэнерго, а котельные были на балансе предприятий городских тепловых сетей, подчинявшихся местным органам власти. При отсутствии личных стимулов не было и энтузиастов объединения, и даже котельные, находившиеся в ведении Минэнерго, для простоты эксплуатации работали на изолированные системы.

Единственный город, в котором совместная работа ТЭЦ и котельных была осуществлена в полном объеме, - Минск. Авторы получили государственную премию, а схема успешно функционирует до настоящего времени. Значительно позже аналогичный грандиозный проект был осуществлен в Пекине.

В развитых капиталистических странах теплофикация развивалась сначала на основе паровых систем теплоснабжения. Крупные системы в Нью-Йорке и Париже функционируют до сих пор. На общие паропроводы работают ТЭЦ, котельные, мусоросжигательные заводы, с включением в работу наименее экономичных источников только при похолодании.

Аналогичные принципы были сохранены при создании водяных систем централизованного теплоснабжения в Дании, Швеции, Финляндии, Германии. Они работают на принципах количественного регулирования, когда при похолодании увеличение нагрузки компенсируется увеличением расхода теплоносителя. Фактически температура в тепловых сетях либо фиксируется (около 110 °С), либо ступенчато изменяется в диапазоне 100-110-120 °С. Даже в летний период поддерживается температура больше 100 °С для обеспечения работы абсорбционных холодильных машин, преобразующих теплоту сетевой воды в холод для систем кондиционирования зданий.

Количественное регулирование позволило массово использовать схему совместной работы ТЭЦ и котельных. При похолодании сначала увеличивается расход теплоносителя от ТЭЦ, а потом запускаются котельные, обеспечивающие недостающее количество теплоносителя, закачивая его своими насосами в общую сеть.

В Советском Союзе повсеместно было принято качественное регулирование, когда при слабо изменяющемся расходе компенсация увеличения нагрузки при

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

похолоданиях осуществляется увеличением температуры теплоносителя (обычно с 70 до 150 °С).

В условиях казахстанского климата отечественные системы теплоснабжения были дешевле, чем с количественным регулированием. Требовался меньший запас по диаметрам сетей, удавалось осуществлять грубое ручное регулирование при полном отсутствии автоматики в сетях и у потребителей.

Одним из существенных недостатков этого метода является сложность использования пиковых котельных. Дополнительный расход не нужен и пиковые котельные могут использоваться только для догрева теплоносителя, поступающего от ТЭЦ, для чего ТЭЦ и котельную приходится соединять выделенной теплосетью (без потребителей), а потребителей подключать к сетям после котельных. Схема сложная и дорогая, поэтому и не получившая широкого распространения. Фактически пиковые котельные размещаются непосредственно на территории ТЭЦ.

Но реальная жизнь внесла в схему качественного регулирования существенные изменения. На большинстве ТЭЦ имеются существенные запасы тепловой мощности, и пиковые котлы включаются только в самые сильные морозы - достаточно тепловой мощности паровых теплофикационных отборов турбин, теплота от которых обходится в разы дешевле, чем от пиковых котлов.

Экономика брала свое даже при социализме. Поскольку технологически используется пар низкого давления и низкой температуры, то обеспечивать нагрев сетевой воды до 150л°С за счет другого отбора пара нерационально. Поэтому практически на всех ТЭЦ была введена так называемая температурная срезка - ограничение температуры теплосистем величинами существенно ниже 150 °С.

Из-за отсутствия устройств регулирования гидравлических режимов у потребителей и относительно коротких сетях от котельных, повышение температуры теплоносителя выше 120 °С обычно приводило к повышению температуры в обратном трубопроводе до величин, опасных по вскипанию воды в сетевых насосах. Поэтому, по факту, температурная срезка применяется и на всех крупных котельных.

В результате мы имеем при низких температурах наружного воздуха не качественное, а количественное регулирование с существенным увеличением расхода, благо диаметры трубопроводов тепловых сетей, рассчитанные на завышенные договорные нагрузки, это позволяют.

Надо, наконец, узаконить температурную срезку, но обосновывать ее расчетами, а не демагогическими заявлениями о неплатежах и нехватке топлива. Грамотно подобранная температурная срезка позволит без больших затрат реализовать схемы совместной работы ТЭЦ и котельных, работающих сегодня отдельно, без строительства дорогостоящих выделенных тепловых сетей, по принципу обеспечения суммарной нагрузки от ТЭЦ и включением котельной в работу только при начале температурной срезки.

Обеспечение дополнительного расхода не от ТЭЦ, а от пиковых котельных, находящихся в зоне нагрузки, позволит обойтись существующими диаметрами

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						75
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

тепловых сетей от ТЭЦ, при существенном увеличении нагрузки, подключенной к ним.

Во многих городах для обеспечения такой схемы, оказывается, достаточно задействовать резервные переключки, уже имеющиеся в тепловых сетях.

Внедрение такой схемы можно совместить с переходом на повышенный летний температурный график для обеспечения централизованного хладоснабжения.

В газифицированных районах также важно существенное снижение потребления газа, т.к. в сегодняшних условиях существуют трудности с получением разрешений на его использование для новых источников.

Основной источник - разница в тарифах при теплоснабжении от ТЭЦ и котельных. Сложившаяся система использования программ комплексного развития как основы для расчета инвестиционной составляющей в тарифах позволяет легко учитывать эффекты экономии.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						76
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

7 ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ

Экологические проблемы Алматы являются острейшими, город находится в числе самых загрязненных в мире. Источниками загрязнения являются выбросы от автотранспорта и стационарных объектов. В Алматы, крупном мегаполисе Казахстана, в настоящее время большую актуальность приобрели вопросы организации сбора и вывоза отходов потребления – твердых бытовых отходов на утилизацию или захоронение.

Основной экологической проблемой города Алматы является загрязнение воздушного бассейна.

В воздушный бассейн города от стационарных источников поступает порядка 18 тыс. вредных веществ – эмиссии загрязнения в атмосферу от крупных объектов теплоэнергетического комплекса, от объектов среднего и малого предпринимательства, в том числе, имеющих автономные источники теплоснабжения.

Количество автотранспортных средств неуклонно растет, на сегодняшний день в городе эксплуатируется (с учетом иногороднего транспорта) порядка 570 тыс. единиц легковых и грузовых автомобилей, автобусов и других видов транспортных средств, большая часть которых со сроком эксплуатации семь и более лет с момента их выпуска. Для сравнения: в 2000 г. в городе было всего 177 000 автомобилей, из них, легковых – 161 000, т.е. за последние 7 лет парк автомашин увеличился в 2 раза, а это значит, что увеличились нагрузки на существующие городские автомагистрали.

Необходимо отметить, что проблема загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом остается наиболее важнейшим фактором в ухудшении качества атмосферного воздуха (с учетом иногороднего транспорта выбросы составляют порядка 190 тыс. т вредных веществ в год).

Анализ показывает, что за последние 3 года каждая третья-четвертая автомашина эксплуатируется с превышением норм токсичности и дымности. В основном, это транспортные средства со сроком эксплуатации более семи лет. Департамент совместно с другими госораганами с 15 мая по 15 июня т.г. провели месячник по улучшению воздушного бассейна города. По результатам проверок проверены автобусные парки, обслуживающие городские маршруты. За выявленные нарушения природоохранного законодательства юридические лица и ответственные лица были привлечены к административной ответственности на общую сумму 1 102,92 тыс. тенге.

Ввод в действие с июля 2009 года технического регламента о требованиях к выбросам вредных веществ автотранспортных средств (экологического стандарта ЕВРО-2) способствовал заводу на территорию республики автомобилей более «молодого» возраста, т.е. улучшению их технического состояния. Однако, 70% парка автомобилей, эксплуатирующихся в городе, являются морально и технически устаревшими.

Снижению выбросов от автотранспорта будет также способствовать улучшение качества автотоплива в связи с введением в действие с 1

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист 77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

сентября 2010 года технического регламента «Требования к безопасности бензина, дизельного топлива и мазута», утвержденного Постановлением Правительства РК от 01.03.2010 г. № 153.

Снижение выбросов вредных веществ от стационарных источников будет обеспечиваться посредством:

- общественного пассажирского транспорта, отвечающего евростандартам, увеличения доли используемого в городе электротранспорта, ускорения строительства метрополитена;
- разработки подзаконного акта к Закону РК «О государственном регулировании производства и оборота отдельных видов нефтепродуктов», регламентирующего порядок контроля качества нефтепродуктов;
- ТЭЦ – 1 на использование в качестве топлива только природного газа;
- полного обеспечения потребностей города Алматы в природном газе, в т.ч. полной газификации частного сектора и промышленных предприятий;
- внедрения на стационарных источниках более эффективных очистных сооружений;
- внесения изменений в Кодекс РК «Об административных правонарушениях» в соответствии с которыми ужесточить административную ответственность за эксплуатацию автотранспортных средств и других передвижных средств с превышением норм токсичности [41].

Основной проблемой в данном вопросе является тот факт, что уже сегодня ТЭЦ – 1 может полностью перейти на использование природного газа, вопрос заключается в объемах поставки из сопредельных стран.

По данным ДГКП ЦГМ «Казгидромет» за отчетный период уровень загрязнения воздуха ИЗА

В настоящее время к 5-ти действующим постам наблюдения за загрязнением атмосферного воздуха установлены новые посты – 5 наземных постов автоматизированного наблюдения «СКАТ» в районе мкр. Тастак, на территории Дендропарка, в районе аэропорта, в РУВД Турксибского района и на метеопосту в урочище Медеу, 6 постов высотного наблюдения на зданиях Института горного дела (пр. Абая-ул.Глендиева), КазНТУ (ул. Сатпаева-Масанчи); КазНУ (ул.Тимирияева, р.Есентай) и др.

Для улучшения качества атмосферного воздуха города департаментом проводится ряд мероприятий. Так совместно с УДП ДВД г. Алматы проводятся на постоянной основе работы по выявлению автотранспортных средств, эксплуатируемых с превышением норм токсичности, принадлежащих как физическим, так и юридическим лицам, занимающихся грузовыми и пассажирскими перевозками. Также осуществляется экологический контроль транспорта на посту «Медеу» при въезде в природоохранную зону.

За текущий период УДП ДВД г. Алматы в сфере осуществления контроля норм токсичности выхлопных газов автотранспорта на автомагистралях г. Алматы проверено 16910 автотранспортных средств на превышение норм токсичности и дымности выхлопных газов, более 70% автотранспортных средств

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

эксплуатировалось с превышением этих норм. За нарушение природоохранного законодательства РК спецподразделением УДП ДВД г. Алматы в соответствии со статьей 247 ч.1 КРК о АП составлено 11560 протоколов за нарушение норм токсичности и дымности выхлопных газов автотранспортных средств, наложено административных штрафов на сумму 32432,1 тыс. тенге, из них взыскано административных штрафов на сумму 18679,6 тыс. тенге.

В рамках капитального ремонта пр. Абая в городе появилась первая велосипедная дорожка. Также при реконструкции рек строятся тротуары и технические дороги, которые используются горожанами в качестве оздоровительных беговых дорожек.

В настоящее время в рамках пилотного проекта «По переводу пассажирского автотранспорта на природный газ» на основе трехстороннего Меморандума о взаимодействии между акиматом города Алматы и АО «Казтрансгаз» и компанией BG Лимитед Интернэшнл (Казахстан) введена в эксплуатацию автозаправочная газонаполнительная станция (АГНКС). Также в рамках этого же проекта открыт муниципальный автобусный парк с количеством подвижного состава до 200 автобусов, работающих на газе и внесены инициативные предложения в Правительство РК по законодательному регулированию перевода автотранспорта на природный газ и эксплуатацию работающих на газе (сжиженном и сжатом) автомобилей.

Проблема загрязнения атмосферного воздуха выбросами загрязняющих веществ от промышленных объектов и хозяйствующих субъектов, имеющих автономные источники теплоснабжения, остается одной из наиболее первостепенных. В городе насчитывается свыше 98 тыс. частных жилых домов, из которых еще не газифицировано 36277, являющихся в холодный период источником выбросов вредных веществ в приземный слой атмосферы.

За текущий период проведено строительство подводящих газопроводов среднего и низкого давления – на сумму 508,525 млн тенге в микрорайонах: Ожет, Байбесик, Дархан, Тастак-2, Улжан-1, Думан, Маяк-Бакай-Жас Канат, Кок Тобе, Кок Кайнар, Ак Булак, газифицировано 1378 частных жилых домов, 542 квартиры коллективного сектора и 17 промышленных предприятий.

Кроме того, надо отметить, что значительное воздействие на общее загрязнение атмосферного воздуха города, оказывает тепловая станция ТЭЦ-2, вблизи западной границы города. Основным используемым топливом для станции является экибастузский уголь зольностью 38,4%.

Загрязнение атмосферного воздуха (теоретические предварительные данные):

- объем общих промышленных выбросов в атмосферный воздух – 15,8 тыс. т;
- выбросов сернистого ангидрита в атмосферный воздух – 1,92 тыс. т;
- объем выбросов диоксида азота в атмосферный воздух – 1,98 тыс. т;
- объем выбросов твердых частиц в атмосферный воздух – 0,28 тыс. т;
- объем выбросов угарного газа в атмосферный воздух, – 1,27 тыс. т [42].

На территории города Алматы расположены 22 реки и 4 русловых водоема искусственного происхождения. Общая протяженность русел рек составляет 220,8 км, общая площадь зеркал водного фонда – 1116 га.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Источниками водоснабжения города являются реки Большая и Малая Алматинка и подземные источники Алматинского, Талгарского, Малоалматинского месторождений и участка «Каменское плато».

По данным ДГКП ЦГМ «Казгидромет» в отчетный период поверхностные воды рек Малая и Большая Алматинка, Есентай по качеству воды оцениваются как «умеренно загрязненные» (3 класс ИЗВ – 2,16-2,39).

Во всех реках наблюдались превышения допустимой нормы по меди в пределах 8,81-10,9 ПДК и фторидам – 1,04-1,31 ПДК. В реках Малая Алматинка и Есентай зарегистрированы также превышения по азоту нитритному содержание в них азота нитритного в пределах 2,45-3,50 ПДК.

В 1 полугодии 2011 года по сравнению с аналогичным периодом качество воды рек Большая и Малая Алматинка, Есентай ухудшилось.

Для улучшения состояния водных объектов и системы водоснабжения города ДГКП «Бастау» и ДГКП «Су желісі» проводят герметизацию колодцев (камер) на водозаборных сооружениях, ремонт оголовков и устьев скважин, устранение утечек из емкостных сооружений и по замене аварийных трубопроводов. За 1-полугодие текущего года освоено 1 877,528 тыс. тенге [43].

В целях рационального использования воды планируется установка современных приборов учета на всех основных этапах подачи и распределения воды и контроля качества питьевой воды. Из собственных средства ДГКП «Бастау» освоено 16,663 млн тенге. Работа продолжается.

Сброс стоков хозяйствующих субъектов на территории города осуществляется через централизованную систему канализации.

Общий объем сброса сточных вод Алматы, поступивших на станцию аэрации, составил 56387,23 тыс.м³, в накопитель Сорбулак сброс производился в объеме 33499,01 тыс.м³, также вода поступала на правобережный Сорбулакский канал (ПСК) в объеме 22888,22 тыс.м³.

Сточная вода, отводимая от города, поступает на очистные сооружения станций аэрации, где полностью механически и биологически очищается. Очищенные сточные воды содержат микроэлементы в количествах, не превышающих ПДК.

Сточные воды города отводятся в накопитель Сорбулак. При транспортировке сточных вод в накопитель трасса канализационных сетей проходит через водные преграды, переходы через которые обеспечивают дюкера и эстакады. Требуется реконструкция Каскеленского дюкера, на который имеется ПСД.

В соответствии с планом работы на 2011 г. отделом лабораторно-аналитического контроля проводился ежеквартальный мониторинг качества и экологического состояния рек Большая Алматинка, Малая Алматинка и реки Есентай. Было отобрано 24 пробы по руслам рек для химического анализа. По результатам проведенных лабораторных анализов количество определений составило 288.

Для сохранения водных ресурсов малых рек города, с 2007 г. проводится реконструкция русел рек и благоустройство водоохраных полос, в т.ч. планируется реконструкция городской черты БАК им. Д. Кунаева. Проблемной

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						80
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

зоной является озеро «Сайран» – искусственный сезонный водонакопитель. Для его использования в качестве городской зоны отдыха разработана проектно-сметная документация, требуются дальнейшие меры по реализации проекта.

Кроме того, имеются проблемы, связанные с отсутствием ливневой канализации, разрушением арычной системы, недостаточным внедрением систем оборотного водоснабжения на предприятиях. Для решения указанных проблем принята программа, ведется разработка ПСД, требуется дальнейшая реализация.

Также требуется провести реконструкцию сбросного канала «Есентай» для перехвата и сбора воды с арычной сети и подтапливаемых участков города.

На канализационных очистных сооружениях города проводятся работы по внедрению мелкопузырчатой системы аэрации сточных вод, позволяющей улучшить качество очистки сточных вод, а также снизить затраты электроэнергии на обработку стоков.

В настоящее время частично очищенная сточная вода используется на орошение технических культур хозяйства – землепользователи Карасайского района Алматинской области.

Отводимые после очистных сооружений стоки необходимо более полно использовать на орошение сельскохозяйственных угодий, что позволит уменьшить или исключить сброс очищенных сточных вод в реку Или.

Общий объем образуемых отходов в городе еженедельно составляет от 11 до 12 тыс. т, объем завозимых на городской полигон, расположенный в Карасайском районе Алматинской области, в сутки пределах 800 – 1000 т, а остальные 300-500 т поступают на действующие в окрестностях города миниполигоны области.

В настоящее время вывоз ТБО осуществляются согласно Генеральной схеме на полигон, находящийся в аренде сроком на 10 лет ТОО «PlasmaEnergyInc», расположенный в Карасайском районе Алматинской области. Полигон функционирует с 1989 г. В первом полугодии 2011 г. на городской полигон поступило 75,394 тыс.т твердых бытовых отходов.

В 2010 г. площадь горполигона была увеличена постановлением Карасайского районного акимата с 33,4 га до 57,7 га. В настоящее время полигон фактически заполнен на 30%.

С развитием социально-экономической деятельности инфраструктуры мегаполиса произошли изменения по морфологическому составу ТБО. На сегодня это выглядит так: 27% макулатура, 23% пищевые отходы, 14,3% пластмасса, 9,4% строительный мусор, 8,6% стекло, 2,4% дерево, 1,6% металл, 1,3% текстиль, 1% резина, 0,2% кости, 0,1% кожа и 11,6% прочие отходы [44].

Крупнотоннажными производственными отходами являются золошлаковые отходы ТЭЦ-1 АО «АлЭС», имеющего спецполигон для размещения собственных отходов, где за период существования накоплено – 697 тыс.т золошлаковых отходов, и эти отходы не перерабатываются, в первом полугодии 2011 г. объем заскладированных ЗШО составила – 55352 т (2010г. – 76403 т). В связи с окончанием срока эксплуатации секции золоотвала, проблематичным становится утилизация ЗШО. В данное время из рекультивированной секции №1

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						81
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

зола вывозится на отвал ТЭЦ-2. Вывезено ЗШО – 916666 м³. Утилизация производственных отходов 163,3 тыс.т – 68,5%, ЗШО не утилизируется.

В Алматы развивается сектор вторичной переработки отходов, действуют около 29 предприятий, занимающиеся сбором, вывозом и переработкой вторсырья: макулатуры, пластика, стеклобоя, медицинских отходов, цветных металлов, отработанных автопокрышек, аккумуляторов, ртутьсодержащих изделий и приборов. В течение полугодия текущего года предприятиями принято и переработано 86483 т отходов, в т.ч.: медицинские отходы – 434 т; макулатура – 34175 т; пластмасса – 23 т; лом черного металла – 30921 т; лом цветного металла – 10749 т; отработанные аккумуляторы – 6329 т; текстиль – 119 т; бой стекла – 2372 т; отработанные шины – 1200 т; полиэтилен – 8,0 т; отработанные масла и нефтешламы – 100 т; переработка бытовой и оргтехники – 48 т; демеркуризация ртутьсодержащих приборов и изделий – 81609 шт. Процент утилизации отходов производства и потребления – 9% [44].

В рамках реализации мероприятий Комплексной программы по снижению загрязнения окружающей среды города Алматы на 2009-2018 годы совместно с Управлением природных ресурсов и регулирования природопользования г. Алматы, мусоровывозящие организации реализуют пилотный проект по установке заглубленных контейнеров для отдельного сбора ТБО. В Бостандыкском районе идет эксперимент. Кроме того, в течение 5 лет в жилом квартале проводится эксперимент по отдельному сбору ТБО мусоросортировочного пункта, инициатором которого является Экосоюз «Табигат».

При КГП «Алматыэлектротранс» создан муниципальный автобусный парк на 200 автобусов, работающих на газе с сетью газонаполнительных станций.

Налажена розничная реализация биотоплива. В городе реализацией биотоплива занимается компания «Биохим» через сеть автозаправочных станций «ВІОНІМ». Экологическое топливо – биоэтанол реализуется на 3-х автозаправках.

На предприятии ТОО «Кастинг», занимающегося переработкой цветного лома, внедрены экологические чистые технологии по вторичной переработке шлаков основного производства с полной утилизацией производственных отходов.

На малых реках в урочищах Медеу и АлмаАрасан внедрены каскады малых ГЭС деривационного типа для выработки электроэнергии, которые являются первичными водопользователями и имеют разрешение на спецводопользование.

Для снижения образования отходов маслихатом Алматы приняты и утверждены: «Программа по управлению коммунальными отходами города Алматы на 2008-2010 годы» и «Правила учета, утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления в городе Алматы», которые направляют работу на организацию рациональной и экологически безопасной системы сбора отходов, предусматривающую отдельный сбор, регулярный вывоз и обезвреживание, а также выполнение мероприятий по минимизации, утилизации и переработке отходов, уменьшению количества и объемов их образования, а также снижению уровня опасности отходов с применением новых технологий.

										Лист
										82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.04.01.2019.243.03 ПЗ

Основными целями регулирования отношений в сфере обращения с отходами на территории города Алматы являются:

- обеспечение экологической безопасности населения Алматы, охрана окружающей среды от вредного воздействия отходов;
- недопущение организации свалок отходов и захламления территории Алматы;
- получение готовой продукции или извлечение полезных составляющих при использовании (переработке, утилизации) отходов;
- развитие рынка вторичных материальных ресурсов и вовлечение их в хозяйственный оборот в качестве вторичного сырья.

«Поступления по коду классификации бюджета» 105316: план поступления платежей – 500,0 млн тенге, фактическое поступления составило 316 млн 319 тыс. тенге, выполнение плана составило 63,2%. В соответствии с «Комплексной программой по снижению загрязнения окружающей среды г. Алматы» на I – этапе (2009-2011) план финансирования природоохранных мероприятий на 2011 г. по городу Алматы составил 5 388 122,00 тыс. тенге из местного бюджета. Основное направление на выполнение следующих комплексных мероприятий: озеленение города, развитие объектов охраны окружающей среды, восстановительные работы (капитальный ремонт) русел рек, строительство и реконструкция ливневой канализации, модернизация существующих технологических схем канализационных очистных сооружений и т.д.

В 1-полугодии текущего года освоение бюджетных средств по финансированию природоохранных мероприятий составило – 1 911 561,00 тыс. тенге. Кроме того, за счет собственных средств природопользователей освоено 824 млн 163 тыс. 908 тенге, выполнены природоохранные мероприятия.

Таким образом, снижение выбросов и сбросов загрязняющих веществ, минимизация и утилизация промышленных и бытовых отходов в Алматы становится одним из самых важных вопросов государственного экологического контроля. В связи с этим для устойчивого развития города необходимо реализовать мероприятия Комплексной программы по снижению загрязнения окружающей среды г. Алматы, направленные на применение новых ресурсосберегающих технологий и малоотходного производства.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						83
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

8 АВТОМАТИЗАЦИЯ

Широкое внедрение методов математического моделирования в практику инженерных расчетов выявило узкое место этого процесса — большие затраты труда высококвалифицированных инженеров и программистов на разработку программ расчета. В большинстве случаев эти затраты связаны с тем, что незначительные изменения в математических описаниях моделируемых объектов требуют перепрограммирования по сути дела одних и тех же алгоритмов. Кроме того, в алгоритмах, разработанных ручным способом, последовательность расчета определяется на основании субъективных соображений инженеров и программистов, без достаточно глубокого топологического анализа схемы рассматриваемой установки. В результате разработка адекватной математической модели недопустимо затягивается.

Решение этой очень важной и сложной задачи по автоматизации высококвалифицированного инженерного и программистского труда многие авторы видят в разработке автоматизированных систем построения математических моделей исследуемых объектов. В данном разделе дается описание одной из таких систем — системы машинного построения программ (СМПП) инженерных расчетов энергетических установок. СМПП является весьма универсальной и может использоваться для построения математических моделей различных энергетических объектов. Наибольшее практическое применение СМПП нашла при построении математических моделей ТЭЦ. Объясняется это тем, что ТЭЦ имеет наиболее сложные среди энергетических установок технологические тепловые схемы и применение СМПП дает в этом случае наибольший эффект.

Описание СМПП. При создании СМПП стремились удовлетворить следующим требованиям: 1) система применима для моделирования любых энергоустановок; 2) при рассмотрении различных вариантов энергоустановки не должно требоваться программистской работы по изменению отдельных блоков системы; 3) исходная информация об энергоустановке должна быть лаконичной и должна задаваться на языке, легко усваиваемом инженерами; 4) продукцией системы должны быть программы на одном из языков высокого уровня, таких, как АЛГОЛ, ФОРТРАН; 5) программы расчета энергоустановок, полученные при помощи системы, должны легко сочленяться с другими программами, в частности с программами оптимизации параметров моделируемых установок.

В основе автоматизированного построения при помощи СМПП математических моделей и программ расчета энергетических установок лежат следующие общие соображения.

Задавая описания элементов энергоустановок в виде совокупностей отношений (например, уравнений), не обязательно ориентированных на вычисление каких-либо переменных, можно поставить задачу: на основании информации об элементном составе и связях схемы установки автоматически получить ее математическую модель в виде системы отношения; используя такую модель, построить ряд программ расчета с различными целями. Информация о

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						84
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

цели расчета при этом может быть задана, вообще говоря, двумя способами: либо указанием того, какие переменные должны быть вычислены, либо заданием списка переменных-исходных данных. Далее встает вопрос о решении полученной системы уравнений. Специфика систем отношений, описывающих энергетические установки, в большинстве случаев позволяет использовать для этой цели различные модификации метода последовательных приближений. Для его реализации каждое уравнение должно быть ориентировано на вычисление одной переменной. Следовательно, нужно иметь некоторую процедуру, которая на основании информации о цели расчета автоматически производила бы ориентацию всех отношений, т.е. разрешение их относительно некоторых переменных. Таким образом будет получен неупорядоченный набор операторов, из которых должна состоять программа расчета. Для получения этой программы операторы при помощи специальной процедуры должны быть автоматически расположены в некоторой последовательности, которая, вообще говоря, не однозначна. При построении последовательности расчета по возможности нужно учитывать факторы, влияющие на эффективность получаемой программы, в частности число итерационных циклов. Принципы, положенные в основу указанных процедур, должны быть достаточно общими, т.е. ни в коей мере не зависеть от вида установки и не требовать каких-либо указаний от исследователя по организации вычислительного процесса. В данной постановке на ЭВМ должны быть возложены сложные функции по преобразованию лаконичной входной информации в программу расчета. В соответствии с этими соображениями СМПП имеет три следующих основных входа:

1. Вход уровня описания математических моделей типовых элементов энергоустановки (базовых моделей), на котором вводится набор наименований типовых элементов и соответствующие каждому элементу наборы отношений между переменными.

2. Вход уровня описания схемы моделируемого объекта. Здесь задается информация об элементном составе и связях между элементами конкретной схемы. При этом конкретизируются отдельные экземпляры типовых элементов.

3. Вход уровня постановки задачи расчета конкретной энергоустановки, определяющий состав задаваемых и вычисляемых переменных.

Такое разделение входов системы позволяет: а) в зависимости от поставленных целей исследования и рассматриваемых объектов варьировать как составом типовых элементов, так и смыслом, вкладываемым в них; б) при фиксированном составе типовых элементов варьировать схемами; в) при фиксированном составе типовых элементов и фиксированной схеме варьировать решаемыми задачами.

Основным выходом системы является текст программы решения поставленной задачи на языке ФОРТРАН или АЛГОЛ.

Базовые модели представляют собой совокупности отношений между интересующими исследователя переменными трех видов: уравнения, операторы присваивания и операторы процедур. Уравнения могут быть алгебраическими и трансцендентными. Каждое из них записывается в виде, разрешенном

относительно какой-либо одной переменной. Описание базовых моделей делается в алголоподобном виде, однако важно подчеркнуть, что оно не является упорядоченной последовательностью операторов (программой), а представляет собой источник для построения различных программ, которые могут быть получены на основании описания модели энергоустановки и поставленной на ней задачи.

Для задания топологии схемы используются связующие отношения двух типов. Первый из них записывается в виде тождеств между переменными, характеризующими потоки энергоносителей на входах и выходах связываемых элементов. Второй тип — многопараметрические связи, при записи которых указываются обозначения связываемых элементов схемы, признаковые обозначения потоков на входе и выходе элементов и обозначение параметров, характеризующих данный поток (например, расход, энтальпия, температура).

Постановка задачи осуществляется заданием списка переменных исходных и (или) списка вычисляемых переменных. Эти списки могут быть неполными. В этом случае СМПП имеет свободу при планировании вычислительного процесса. Полные списки вычисляемых и задаваемых переменных сообщаются пользователю в процессе работы СМПП. По завершении работы СМПП вместе с программой расчета выдается также список итерационно уточняемых переменных, для которых нужно при расчете энергоустановки задавать начальные значения.

На основании описанной входной информации СМПП решает следующие основные задачи: а) по закодированной схеме и на основании информации, содержащейся в базовых моделях, строит в некотором виде модель общей системы отношений, описывающей энергоустановку; б) на модели энергоустановки планирует решение системы отношений и по полученному плану строит программу расчета энергоустановки.

При выполнении большинства операций, связанных с решением указанных задач, совсем не обязательно знание смысла переменных и связывающих их отношений. Гораздо удобнее использовать лаконичные абстрактные модели отношений и их систем в виде двудольных графов. Двудольные графы представляются в ЭВМ в виде компактных списков кодов вершин.

Каждой базовой модели СМПП ставит в соответствие графовую модель (Г-образ). При построении Г-образа системы отношений, соответствующей моделируемой энергоустановке, СМПП производит следующие действия: размножает Г-образы базовых моделей, экземпляры которых входят в данную энергоустановку; отождествляет образы переменных (вершины графа) в соответствии с информацией о связях установки; выделяет на полученном графе вершины, соответствующие переменным, заданным пользователем в качестве вычисляемых переменных и исходных данных. На полученном Г-образе системы отношений планируется решение задачи расчета энергоустановки. При этом с использованием алгоритмов построения совершенного паросочетания производится ориентация Г-образа и далее находится порядок расположения вершин графа-преобразов операторов программы расчета схемы в

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

последовательности, обеспечивающей решение поставленной задачи. В результате получается схема вычислительного процесса. На всех этапах описанного процесса путем рационального использования параллельных цепных списков и других структур, а также специальной системы ссылок сохраняется возможность вернуться к конкретному смыслу вершин графов. После построения схемы вычислительного процесса алгоритм конкретизации, используя заготовки стандартных текстов, преобразует эту схему в вычислительную программу на АЛГОЛе или ФОРТРАНе в зависимости от желания пользователя. Укрупненная схема функционирования СМПП приведена на рисунке 24.

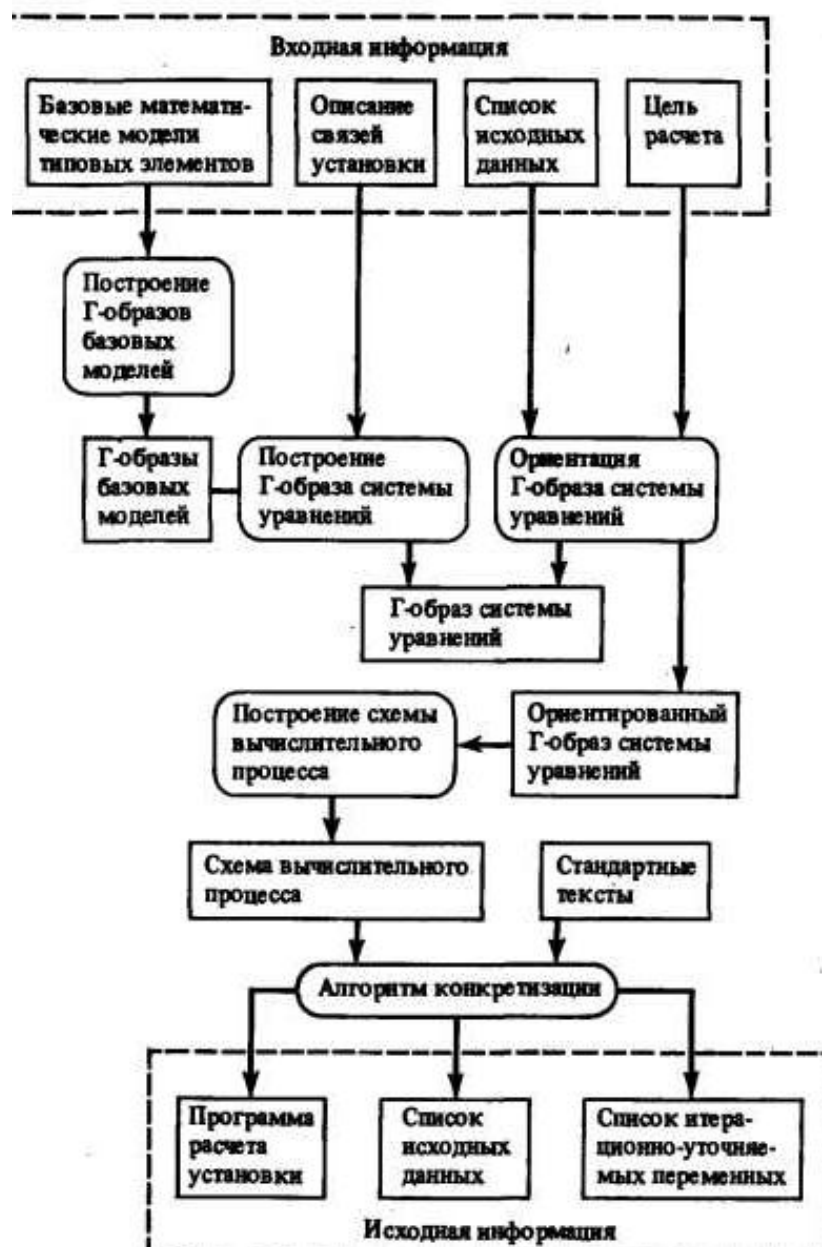


Рисунок 24 – Схема построения программы расчета при помощи СМПП

Входной язык СМПП. Большое внимание при разработке СМПП уделено созданию входного языка. Этот язык состоит из четырех частей: язык описания

моделей, язык описания задач на моделях, язык заданий на генерацию программ, язык управления сервисом СМПП.

Особенность языка описания моделей состоит в том, что в СМПП математической моделью типового элемента энергоустановки является не вычислительный блок (процедура), в котором операторы выступают в роли аналогов реальных процессов преобразований информации в соответствующем аппарате, а совокупность отношений между параметрами, характеризующими состояние типового элемента. Математическая модель энергоустановки в целом составляется из математических моделей ее элементов и также представляет собой систему отношений, а не вычислительную программу.

В СМПП модель является иерархической структурой, в которой имеются элементарные компоненты (константы, переменные, массивы), структурные компоненты (подмодели) и отношения (явные и неявные зависимости) между компонентами. Переменные делятся на собственные и несобственные. Собственные компоненты обладают значениями, зависящими от экземпляра той модели, к которой они отнесены, и не зависящими от значений других компонентов. Значения несобственных компонентов зависят (в общем случае) от значений других элементарных компонентов. Отношение может быть функциональным, определяющим компоненты-результаты в зависимости от компонентов-аргументов; неявными, в котором не указано, какой из входящих в него компонентов является результатом; связующим, предназначенным для отождествления компонентов из разных моделей.

Представление функциональных отношений может быть программным (с помощью заранее написанных подпрограмм) или операторным (в виде оператора присваивания или условного оператора). Неявные отношения представляются уравнениями.

Описание модели состоит из наименования модели и тела модели, разделенных символом. Тело модели в общем случае включает перечень подмоделей, входящих в состав данной модели, совокупность описаний элементарных компонентов, входящих в состав модели, совокупность отношений между компонентами.

Описание подмоделей включает информацию о том, какие модели из имеющихся в архиве СМПП входят в состав данной модели. Для каждой подмодели указываются наименования ее экземпляров. Например, если модель M содержит экземпляры $m1$ и $m2$ модели t , а также экземпляры $t1t1$, $t3$ модели t , то в теле M описание подмоделей выглядит следующим образом:

МОДЕЛЬ $m (m1, m2), t (t1, t2, t3)$

Заметим, что при описании подмоделей можно указывать наименования тех предметных архивов, в которых хранятся подмодели.

Описание моделей на входном языке СМПП является той базой, на основе которой СМПП может генерировать различные программы расчета стационарных состояний тех объектов, модели которых хранятся в архивах системы. Информацию о целях расчета СМПП получает на языке описания задач на моделях.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Язык описания задач в СМПП предусматривает следующие возможности:

- 1) описать несколько задач в одном задании (каждая задача при этом имеет свое имя);
- 2) перечислить элементарные компоненты, значения которых требуется найти в результате решения задачи;
- 3) перечислить элементарные компоненты, значения которых предполагаются известными при решении задачи;
- 4) указать список компонентов, которые могут выступать в роли итерационно уточняемых величин;
- 5) придать начальные значения как задаваемым, так и итерационно уточняемым компонентам;
- 6) описать действия над компонентами модели, которые являются специфическими для данной задачи и которые не включены в совокупность отношений рассматриваемой задачи.

Сама по себе постановка задачи на модели не вызывает генерацию программы решения задачи, для этого необходимо на языке заданий на генерацию программ сформулировать задание. Задание на генерацию содержит перечень наименований тех задач, программы решения которых должны быть сгенерированы. Кроме того, задание на генерацию содержит название языка программирования, на котором будет представлен алгоритм решения задачи, а также вид внешнего носителя информации, предназначенного для хранения сгенерированных текстов алгоритмов. Возможно представление программ либо на языке ФОРТРАН, либо на языке АЛГОЛ. Тексты сгенерированных программ в СМПП можно выдать на печать, перфорацию или записать на магнитную ленту.

При работе с СМПП возникает необходимость вносить разного рода исправления на отдельных этапах работы. Для этой цели используется язык управления сервисом системы. Сервис, предоставляемый пользователю СМПП, включает набор программ, позволяющих производить некоторые операции редактирования: создавать и уничтожать предметные архивы, исключать описания модулей из архива СМПП, а также распечатывать каталоги и содержимое предметных архивов системы.

Как видно из изложенного, входной язык СМПП весьма прост, лаконичен, нагляден и не требует от инженера-пользователя знаний в области программирования (умения организовывать вычислительные процессы и т.п.)

Кроме рассмотренных языков, для СМПП разработан еще язык управления работой СМПП. Его назначение — инициировать работу СМПП. Этот язык включает описание ряда заданий для системы. Так, например, одно из заданий может заключаться в формировании архива моделей, другое — в обработке описания задачи на модели из архива, третье — в формировании нового архива моделей и т.д. Каждому заданию предшествует своя системная команда, которая характеризует вид задания и одновременно является командой, настраивающей СМПП на работу того или иного блока системы.

В СМПП возможны следующие системные команды: архив, задача, генерировать, редактировать, финиш. Команда архив задает режим обработки

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						89
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

описаний моделей и размещения моделей, в которых нет синтаксических ошибок, в архиве СМПП. Команда задача определяет режим обработки описаний задач на моделях. По системной команде генерировать производится генерация программ решения задач на моделях. Команда редактировать настраивает СМПП на обработку совокупности заданий на редактирование. По системной команде финиш работа СМПП заканчивается.

Текст на языке управления работой СМПП, который будем называть системным пакетом, всегда начинается одной из системных команд и заканчивается командой: ФИНИШ, указывающей на завершение работы системы. Между этими командами размещаются сами задания. Структура системного пакета определяется синтаксисом языка управления работой СМПП.

Реализация СМПП. Система машинного построения программ инженерных расчетов состоит из пяти программных блоков, управляющей программы и архива моделей. Взаимодействие компонентов СМПП показано на рисунке 25.

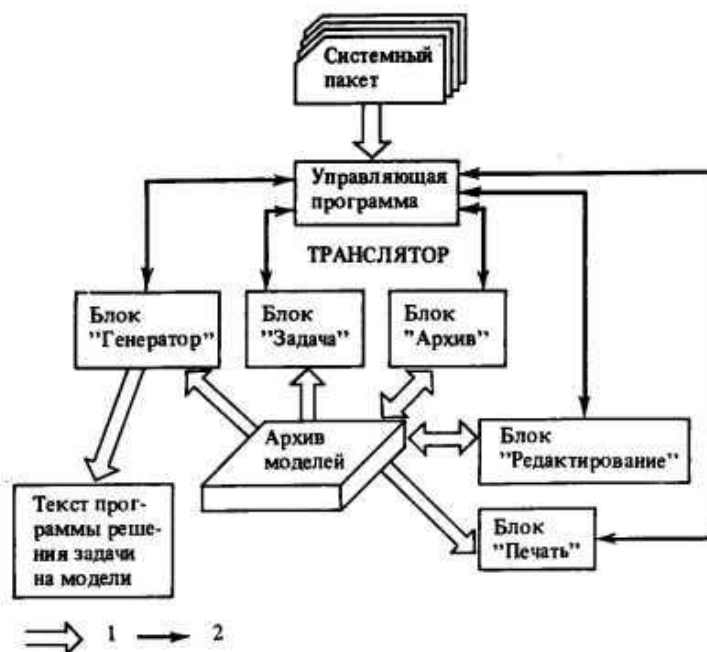


Рисунок 25 – Общая структурная схема СМПП: 1 – информационные потоки; 2 – связи между программными компонентами системы

Информация, определяющая функционирование системы, задается в виде системного пакета, который содержит одно или несколько заданий для СМПП. Задания выполняются в том порядке, в котором входят в системный пакет, и каждое из них может использовать в качестве входной информации, полученную при выполнении другого пакета или других заданий этого же пакета.

Перед каждым заданием указывается соответствующая ему системная команда. Обработку очередного задания начинает управляющая программа, которая анализирует системную команду и в зависимости от результатов анализа передает управление соответствующему блоку системы. Архив СМПП может

состоять из нескольких предметных архивов, в которых хранятся модели из разных прикладных областей. В СМПП имеется каталог предметных архивов, содержащий наименования предметных архивов и адреса этих архивов во внешней памяти. У каждого предметного архива имеется свой каталог моделей, который содержит наименования моделей, входящих в архив, и адреса моделей в архиве. Общая структура архива СМПП приведена на рисунке 26.

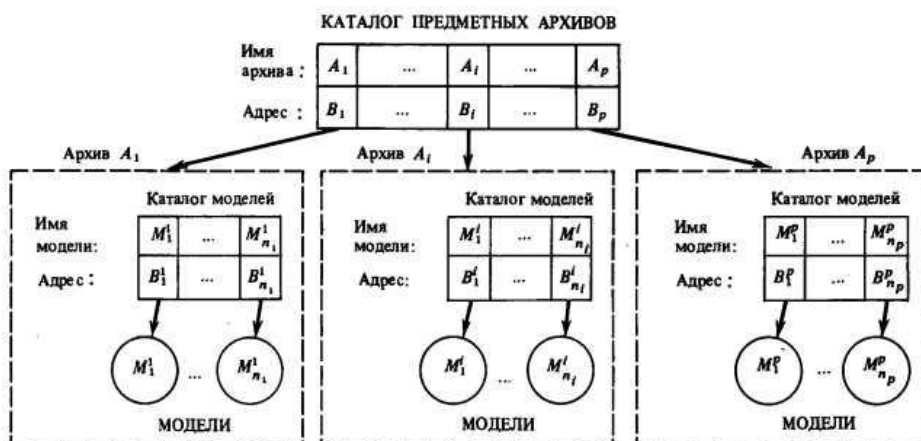


Рисунок 26 – Организация архива СМПП

Рассмотрим в общих чертах назначение программных компонентов СМПП. Блок Архив обрабатывает описания моделей и заносит в предметный архив те модели, которые не содержат ошибок. Блок Задача обрабатывает описание задачи на модели, фиксирует возможные ошибки и (в случае отсутствия ошибок) определяет, значения каких компонентов при помощи каких отношений вычисляются. Блок Генератор по описанию задачи на модели и на основе сведений о конкретных отношениях, хранящихся в предметном архиве СМПП, синтезирует процедуру решения задачи. Эта процедура представляется на языке высокого уровня (АЛГОЛ, ФОРТРАН) и в дальнейшем может использоваться для расчета и оптимизации параметров энергетической установки, модель которой включена в архив СМПП. Блок Редактирование предназначен для создания предметных архивов и проведения работ с ними. С его помощью можно завести предметный архив, уничтожить предметный архив, исключить модель из архива. Блок Печать предназначен для вывода на АЦПУ содержимого каталогов и предметных архивов системы.

На рисунке 27 приведена общая схема функционирования СМПП, согласно которой обработка системного пакета производится следующим образом. На вход управляющей программы поступает системная команда. Управляющая программа распечатывает команду на АЦПУ и проверяет ее корректность. Если системная команда корректна, т.е. является одной из команд АРХИВ, ЗАДАЧА, ГЕНЕРИРОВАТЬ, РЕДАКТИРОВАТЬ, ПЕЧАТЬ, то управляющая программа передает управление соответствующему блоку СМПП (Архив, Задача, Генератор, Редактирование, Печать). В этом случае дальнейшую обработку системного

пакета продолжает тот блок, которому было передано управление. После того как обработка задания будет завершена, управление передается управляющей программе, которая вновь читает системную команду из системного пакета, и процесс повторяется. Так продолжается до тех пор, пока на вход управляющей программы не поступает команда ФИНИШ, в этом случае работа системы завершается.

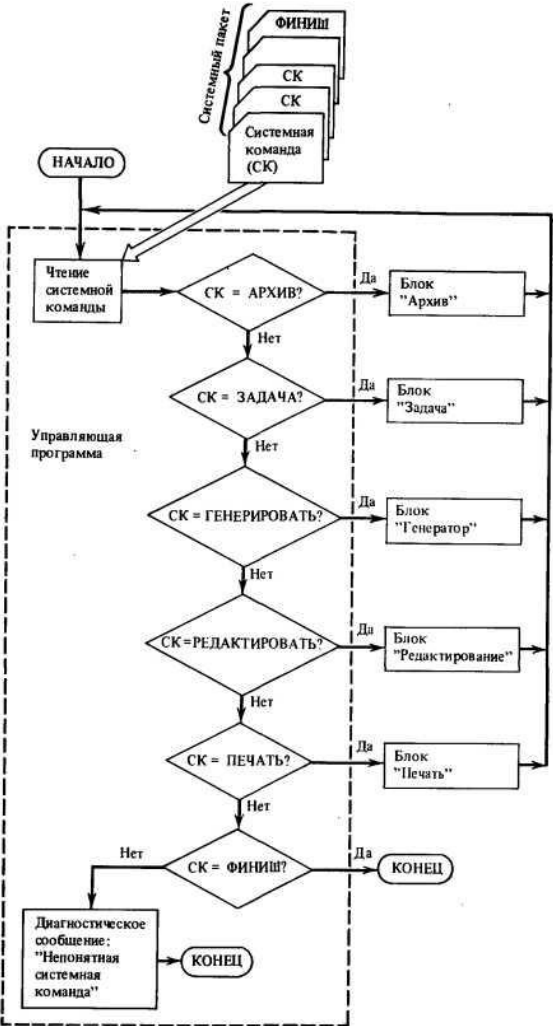


Рисунок 27 – Общая схема функционирования СМПП

Многолетний опыт использования СМПП научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими организациями для построения математических моделей ТЭЦ дал положительные результаты.

9 БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Первоначально вопросами надежности эксплуатации оборудования и охраны труда на нашем предприятии в соответствии с утвержденной штатной структурой занимались три инженера-инспектора: старший инженер-инспектор по эксплуатации и пожарной безопасности, старший инспектор по технике безопасности и инженер-инспектор по эксплуатации объектов Госгортехнадзора (ГГТН). Так, на ТЭЦ-2 появилось новое структурное подразделение - служба надежности и охраны труда, подчиненная непосредственно главному инженеру. В состав службы входят: начальник службы - старший инспектор по эксплуатации и пожарной безопасности; старший инспектор по охране труда; ИТР по надзору за безопасной эксплуатацией объектов ГГТН.

Помимо должностных инструкций инспекторского состава разработано и утверждено "Положение о службе надежности и охраны труда". Персонал службы обучен и аттестован, что обеспечивает достаточно высокую степень взаимозаменяемости и дает возможность оперативно проводить собственные комплексные проверки и другие необходимые мероприятия.

Для службы выделено отдельное помещение, оборудован кабинет охраны труда, в котором помимо необходимых нормативных документов по вопросам охраны труда имеются стенды с наглядной агитацией и образцами средств индивидуальной защиты; установлена видеоаппаратура для просмотра фильмов по охране труда. Здесь проводятся вводные инструктажи по охране труда и пожарной безопасности с персоналом, поступающим на работу, и персоналом подрядных организаций; ежегодно перед началом массовых ремонтных работ со всем производственным персоналом проводятся занятия по оказанию первой помощи пострадавшим от несчастных случаев с использованием современного компьютерного манекена-тренажера AMBU MAN.

Два компьютера оснащены программами проверки знаний персонала, информационными системами по охране труда и пожарной безопасности. На компьютере старшего инспектора по охране труда установлено также программное обеспечение АРМ СОТ и программа, обеспечивающая работу тренажера AMBU MAN.

Локальная сеть, связывающая компьютеризированные рабочие места персонала ТЭЦ, позволяет осуществлять рассылку поступающих в электронном виде информационных документов по охране труда и отраслевых обзоров травматизма по всем подразделениям.

Примененная на ТЭЦ-2 интегрированная автоматизированная система контроля и управления технологическими процессами (ИАСУ ТП) охватывает все участки производства электрической и тепловой энергии, включая удаленные и периферийные объекты, что позволяет реально снизить воздействие на обслуживающий персонал опасных и вредных производственных факторов за счет снижения времени пребывания во вредных условиях и повысить безопасность персонала при выполнении оперативных переключений в электроустановках.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						93
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

На ТЭЦ практически завершены работы по аттестации рабочих мест, выполнены все необходимые замеры, заканчивается оформление карт аттестации рабочих мест. В настоящее время ведется разработка мероприятий по улучшению условий труда, результатом которой станет снижение воздействия на персонал опасных и вредных производственных факторов. В ряде случаев это будет достигнуто за счет выполнения технических мероприятий, в остальных случаях - за счет применения дополнительных средств индивидуальной защиты или снижения времени пребывания во вредных условиях.

Инспекторский состав службы надежности и охраны труда работает по годовому плану в тесном контакте с представителем профсоюзного комитета, отвечающим за производственный сектор, и общественными инспекторами по охране труда подразделений. На ТЭЦ действует система оперативных совещаний, проводимых руководством предприятия, на которых наряду с техническими и экономическими вопросами в обязательном порядке рассматриваются вопросы охраны труда, промышленной и пожарной безопасности.

Для усиления контроля за соблюдением персоналом требований охраны труда и отраслевой нарядно-допускной системы на ТЭЦ-2 в дополнение к регулярным и внезапным проверкам, проводимым инспекторским составом СНОТ и администрацией цехов, организовано ежедневное дежурство ответственных дежурных по технике безопасности из числа ИТР производственных цехов. Результаты проводимых проверок оформляются в специальном журнале или протоколом внезапной проверки и доводятся до сведения руководства соответствующих цехов и администрации станции. В случаях выявления грубых нарушений правил охраны труда работа останавливается, производится разбор допущенного нарушения с принятием к нарушителю строгих дисциплинарных мер, предусмотренных действующим законодательством, и выпуском распорядительного документа.

В подразделениях на каждого работника заведены карточки учета нарушений техники безопасности, в которых учитываются допущенные им нарушения. На основании этого учета определяются люди, предрасположенные к нарушениям, и администрацией подразделения совместно с руководством предприятия решается вопрос о возможности дальнейшего пребывания работника на данной должности или рабочем месте.

Другим, не менее важным, направлением работы администрации ТЭЦ и службы надежности и охраны труда является осуществление комплекса мероприятий по реализации Федерального закона № 116-ФЗ “О промышленной безопасности опасных производственных объектов”.

К опасным производственным объектам (ОПО) ТЭЦ-2 относятся следующие:

- газовое хозяйство;
- котлы,
- сосуды,
- трубопроводы пара и горячей воды;
- грузоподъемные краны, лифты.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						94
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для безусловного выполнения закона нашим филиалом и генеральной дирекцией Мосэнерго выполняются следующие мероприятия:

- идентификация опасного производственного объекта;
- регистрация опасного производственного объекта в государственном реестре опасных производственных объектов;
- лицензирование конкретных видов деятельности;
- подготовка и аттестация работников в области промышленной безопасности;
- производственный контроль за соблюдением требований промышленной безопасности; экспертиза промышленной безопасности; декларация промышленной безопасности; страхование ответственности за причинение вреда при эксплуатации опасного производственного объекта.

Первоначальным шагом по реализации Федерального закона явилась идентификация ТЭЦ- 2 в целях страхования, которая была проведена в конце 1998 - начале 1999 г.

В первый период у нас возникали затруднения из-за отсутствия четких методических рекомендаций по идентификации ОПО, и, как следствие этого, отсутствие единого подхода к решению проблем со страховыми и экспертными компаниями.

Совокупная страховая премия составила сумму, в 20 раз меньшую, чем была первоначально запрошена страховой компанией. Впоследствии, после тщательного изучения методики по идентификации ОПО, удалось снизить класс опасности наших объектов и доказать, что объекты не попадают в приложение № 2 к закону и, следовательно, не подлежат декларированию. В результате размер страховой премии в 2000 г. был уменьшен еще в 6 раз. В настоящее время ежегодное страхование гражданской ответственности проводится по второму типу опасности, что означает - ТЭЦ-2 не подлежит обязательному декларированию.

В конце 1999 г. все ОПО ТЭЦ-27 были внесены в государственный реестр опасных производственных объектов за № А64-30032-019, текущая корректировка производится ежегодно.

К этому положению прилагаются ежегодно обновляемые приложения. В план мероприятий по обеспечению промышленной безопасности на текущий год включаются работы по проведению экспертиз с оформлением соответствующих заключений:

- по газовому хозяйству - на все технические устройства и проектную документацию в связи со строительством, реконструкцией, техническим перевооружением и др.;
- по подъемным сооружениям, сосудам, работающим под давлением, котлам - при окончании нормативного срока службы и выявлении дефектов, которые вызывают сомнение в прочности конструкции, а также на промежуточные работы по требованиям отраслевых нормативных документов и правил по безопасной эксплуатации.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						95
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Подготовка, аттестация и повышение квалификации руководителей и специалистов ТЭЦ-2 в области промышленной безопасности осуществляются в Московском центре подготовки кадров (МЦПК) в полном соответствии с “Положением о порядке подготовки и проверки знаний нормативных документов по технической эксплуатации, охране труда, промышленной и пожарной безопасности руководителей и специалистов энергетики”.

В заключение следует отметить, что все проверки, проводившиеся на ТЭЦ-2 инспектирующими органами, отмечали достаточно высокий уровень состояния охраны труда и промышленной безопасности нашего предприятия. Все замечания, выявленные при проверках, сразу же становились предметом тщательного анализа для разработки и выполнения необходимых мероприятий по их устранению.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						96
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

10 ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Эффективное использование энергетических ресурсов, выявление рациональных направлений развития и эксплуатации энергетического хозяйства является важной задачей для экономики промышленного предприятия. Важную роль в обеспечении эффективного развития предприятия играет принятие экономически обоснованных решений по реализации инвестиционных проектов.

Для достижения поставленной цели в ходе исследования мы составляем календарный план хода работы. По плану указаны сроки, свои задания, которые должны быть завершены во время каждого этапа (таблица 5).

Таблица 5 – Календарный план работы

Наименование задач, мероприятий по реализации задач проекта	Длительность (в месяцах)	Начало и окончание выполнения работ*	Годы реализации проекта, ожидаемые результаты реализации проекта		
			2018	2019	2020
1	2	3	4	5	6
1. Анализ различных моделей, описывающих двухфазные турбулентные течения жидких топлив в камерах сгорания при наличии горения, сравнение численных моделей разных авторов для оптимизации процессов распыла и дисперсии капель топлива.	3	03/01/2018 – 31/03/2018	Проанализированы различные численные модели турбулентных двухфазных течений для оптимизации процессов распыла и дисперсии.	-	-
2. Построение математической, физической и химической модели, описывающих процессы тепломассопереноса при распаде, дисперсии, испарении и горении жидких видов топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания при высокой турбулентности.	3	01/04/2018 - 30/06/2018	Построена математическая, физическая и химическая модели тепломассопереноса при распаде, дисперсии, испарении и горении жидких видов топлив.	-	-
3. Разработка новой статистической модели, описывающей процессы распада, дисперсии, испарения и горения капель различного вида жидких топлив.	3	01/07/2018 – 30/09/2018	Разработана новая статистическая модель распада, дисперсии и испарения капель при высокой турбулентности.	-	-

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6
4. Проведение исследования по влиянию начального давления и массы впрысков жидких топлив на процесс их горения при высокой турбулентности.		01/10/2018 – 31/12/2018	Получены распределения температуры, продуктов сгорания и паров топлива в зависимости от давления и массы впрыска. Будет проведен сравнительный анализ для различных видов жидких топлив.	-	-
5. Анализ исследования по влиянию начальной температуры окислителя на процессы распыла и дисперсии жидких топлив при высокой турбулентности.	6	03/01/2019 – 30/06/2019	-	Получены концентрационные поля паров топлива и воды в пространстве камеры сгорания в моменты воспламенения в зависимости от начальной температуры окислителя.	-
6. Проведение исследования по влиянию скорости впрыскиваемых капель двух видов жидкого топлива (октан и додекан) на процессы его распыла и дисперсии при высокой турбулентности.	6	01/07/2019 – 31/12/2019	-	Получены распределения капель по радиусам и температуре, профили скоростей и максимальной температуры в камере сгорания при изменении скорости впрыска капель.	-
7. Анализ особенностей и качества процесса горения в двигателях внутреннего сгорания с инжекторами нового поколения и разработка новой	4	03/01/2020 – 30/04/2020	-	-	Разработана модель инжектора двигателя

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6
модели инжектора для многоструйного впрыска жидкого топлива.			-	-	внутреннего сгорания и будут определены наиболее оптимальные параметры дизайна данного инжектора.
8. Получение данные исследования аэродинамики многоструйного впрыска и влияние различных явлений на его структуру.	4	02/05/2020 – 31/08/2020	-	-	Получены профили скорости, распределения Саутеровского диаметра капель и построены функций вероятностей при различных расстояниях от сопла инжектора.
9. Определение оптимальных параметров для организации процессов распыла и дисперсии различных видов жидких топлив, следовательно, анализ и формулировка основных выводов по проведенным в проекте исследованиям, заключительный отчет по проекту.	4	01/09/2020 – 31/12/2020	-	-	Получены оптимальные параметры процессов распыла и горения различных видов жидких топлив в камере сгорания. Заключительный отчет.

При формулировании работ следует использовать мероприятия из календарного плана для разработки плана реализации в форме графика Ганта.

График даёт возможность решить одну из основных задач и показать персоналу, над чем следует работать, какие ресурсы применять в процессе и с какой скоростью выполнять те или иные задачи (таблица 6).

Таблица 6 – График Ганта

Этапы	Январь-март 2018г.			Апрель-июнь 2018г.			Июль-сентябрь 2018г.			Октябрь-декабрь 2018г.			Январь-июнь 2019г.			Июль-декабрь 2019г.			Январь-декабрь 2020г.		
Анализ различных моделей, описывающих двухфазные турбулентные течения жидких топлив в камерах сгорания.																					
Построение математической, физической и химической модели.																					

Продолжение таблицы 6

Этапы	Январь-март 2018г.			Апрель-июнь 2018г.			Июль-сентябрь 2018г.			Октябрь-декабрь 2018г.			Январь-июнь 2019г.			Июль-декабрь 2019г.			Январь-декабрь 2020г.			
Разработка новой статистической модели.																						
Проведение исследования по влиянию начального давления.																						
Анализ исследования по влиянию начальной температуры окислителя на процессы распыла.																						
Проведение исследования по влиянию скорости жидкого топлива на процессы его распыла.																						
Анализ процесса горения в двигателях. Получение данные исследования аэродинамики. Анализ и формулировка основных выводов по проведенным в проекте исследованиям, заключительный отчет по проекту.																						

Расчет капитальных и текущих затрат

Общая сумма капитальных затрат составляют 90 000 тыс. тенге (таблица 6).

Для выполнения поставленных задач необходимы финансовые средства в размере 90 000 тысяч тенге, по 30 000 тысяч тенге в год, соответственно.

* Социальный налог и социальные отчисления + медицинская страховка: в тысяч тенге 12% от ФЗП 1800,0.

Таблица 7 – Смета капитальных затрат для реализации НИР (тыс.тенге)

Наименование статей затрат	Затраты на 2018 год в тыс. тенге	Затраты на 2019 год в тыс. тенге	Затраты на 2020 год в тыс. тенге	Затраты на весь срок реализации проекта
1. Заработная плата (в том числе налоги и другие обязательные платежи в бюджет*)	15 000	16 800	16 800	48 600
2. Научные командировки	7000	7000	7000	21 000
3. Услуги сторонних организаций	4000	4000	4000	12 000
4. Приобретение материалов	1000	1000	1000	3000
5. Приобретение оборудования и программного обеспечения	2300	500	500	3300
6. Расходы по научно-организационному сопровождению	500	500	500	1500
7. Эксплуатационные расходы оборудования и техники	200	200	200	600
Итого	30 000	30 000	30 000	90 000

Структура капитальных затрат включает в себя:

1. Заработная плата разработчиков проекта представлена в таблице 7.

2. Командировочные расходы

7000 тыс. тенге на 2018 год: - стажировка молодых ученых в Институте энергетики и технологии системных процессов Технического университета г.Брауншвайга, Германия; - участие в конференциях: ICPSET 2018: 20th International Conference on Physical Science, Engineering and Technology (Jan 25-26, 2018, Innsbruck, Austria); ICCEAM 2018: 20th International Conference on Civil Engineering and Applied Mechanics (March 15-16, 2018, London, United Kingdom); XI International Conference on Computational Heat and Mass Transfer (May 21-24, 2018, Cracow, Poland);

7000 тыс.тенге на 2019 год: - стажировка молодых ученых в Чешском Техническом университете, г.Прага, Чехия; участие в работе ICMRAM 2019: 21st International Conference on Mathematical Physics and Applied Mathematics (Jul 9-10, 2019, Prague, Czechia); ICETCBAS 2019: 21st International Conference on Engineering and Technology, Computer, Basic and Applied Sciences (Oct 17-19, dubai, UAE); ICFMT 2019: 21st International Conference on Fluid Mechanics and Thermodynamics (June 4-5, 2019, New York, USA);

7000 тыс.тенге на 2020 год: - стажировка молодых ученых в Университете г. Лион, Франция, в Институте теплофизики СО РАН, г.Новосибирск, Россия и в Чешском Техническом университете, г. Прага, Чехия; участие в конференциях: ICCETEE 2020: 22nd International Conference on Clean Energy Technologies and Environmental Engineering (Sept 14-15, 2020, Saint Petersburg, Russia); ICPA 2020 : 22nd International Conference on Physics and Astronomy (June 21-22, 2020, Venice,

Italy); ICCEAS 2020: 22nd International Conference on Computational Engineering and Applied Sciences (Jul 14-15, 2020, Amsterdam, Netherlands);

Возмещение командировочных расходов не превышает нормы возмещения командировочных расходов, установленных Правилами о служебных командировках в пределах Республики Казахстан работников государственных учреждений, содержащихся за счет средств государственного бюджета, а также депутатов Парламента Республики Казахстан, утвержденным постановлением Правительства Республики Казахстан от 22 сентября 2000 года № 1428, а также постановлением Правительства Республики Казахстан от 6 февраля 2008 года № 108 «О возмещении государственным служащим расходов на заграничные командировки за счет средств республиканского и местных бюджетов».

3. Услуги сторонних организаций организационные взносы для участия в зарубежных конференциях, услуги. На эти цели затраты составят 4000 тыс.тенге в год.

4. Приобретение материалов: оборудование для усовершенствования плазмотрона, газовый анализатор, цифровой пирометр, анемометр – 1000 тысяч тенге в год.

Таблица 8 – Заработная плата разработчиков проекта

Должность	Категория	Коэффициент	Должностной оклад, тенге	Добав. Коэф.	Оклад, (тен)	Кол-во единиц	ФЗП месяц тенге	Срок работы, месяц	ФЗП Годовой, тысяч тенге
1. ГНС, рук-ль	B1-1	6,03	106712,91	80034,683	186747,593	0,99	185,0	12	2220,0
2. СНС	B1-3	5,07	89723,79	67292,843	157016,633	0,95	150,0	12	1800,0
3. СНС	B1-3	4,62	81760,14	61320,105	143080,245	1,05	150,0	12	1800,0
4. СНС	B1-3	4,98	88131,06	66098,295	154229,355	0,97	150,0	12	1800,0
5. НС	B1-4	4,05	71672,85	53754,638	125427,488	1,11	140,0	12	1680,0
6. МНС	B1-5	3,48	61585,56	46189,17	107774,73	4,4	475,0	12	5700,0
ИТОГО									15 000

В таблице 8 представлены затраты на приобретение оборудования и программного обеспечения.

5. Приобретение оборудования и программного обеспечения. В связи с быстрым моральным износом компьютеров необходима регулярная модернизация компьютерного парка, его обслуживание, а также обновление программного обеспечения и т.д. Экспериментальный стенд является металлоемкой

конструкцией, поэтому в проекте предусмотрены средства на покупку материалов для его модернизации. На эти цели затраты составят 2300 тыс.тенге в год.

6. Расходы по научно-организационному сопровождению – расходы на подготовку публикаций и опубликование результатов исследований, издание монографий, учебников и учебных пособий, патентный поиск, расходы на получение охранных документов - 500 тысяч тенге в год.

7. Эксплуатационные расходы оборудования и техники - расходы на ремонт измерительного оборудования и офисной техники: – 200 тыс. тенге в год.

Таблица 9 - Приобретение оборудования и программного обеспечения

Наименование	Назначение	Количество	Цена за единицу, тыс.тенге	Итого, тыс.тенге
1. Intel® Core™ i7-950 x64 (3.06GHz, 8MB), 3x 1024MbDDR3 1333MHzPC-10600 (KIT), 1000GB 5400rpm 32MB SATA2, GeForce N580GTX 1536MB/384bit, DVD±RW-SuperMilti, Карт-ридер 16 in 1, USB, внутренний 1010 Ватт, active PFC, 80Plus (Brand FSP) Стандартная гарантия 3 года	Проведение вычислительных экспериментов	2	1150	2300
ВСЕГО		2	1150	2300

Смета текущих затрат

1. Годовые расходы на топливо в камере сгорания, спроектированной без использования компьютерного моделирования конвективного теплопереноса при горении пылеугольного топлива (27243,37 т_{у.г.}/год) определены ниже:

Годовой расход теплоты на отопление для жилых и общественных зданий, ГДж/год (104):

$$Q_{o.ж}^{год} = n_{от} \times Q_o^{cp} \times 3600 \times 24 \times 10^{-3}, \quad (104)$$

где $n_{от}$ – продолжительность отопительного периода, в нашем случае $n_{от} = 199$ суток = 4776 ч;

Q_o^{cp} - суммарное среднее потребление теплоты на отопление, МВт.

Q_o^{cp} определяется по выражению (105):

$$Q_o^{cp} = Q_o' \cdot \frac{t_{Bp} - t_H^{cp.o}}{t_{Bp} - t_{Hp}}, \text{ МВт} \quad (105)$$

Тогда $Q_o^{cp} = 23,4 \cdot \frac{18 - (-3,5)}{18 - (-27)} = 10,61$ МВт.

Определим годовую нагрузку на отопление жилых и общественных зданий:

$$Q_{o.ж}^{год} = 208 \times 10,61 \times 86,4 = 190674,432 \text{ ГДж/год.}$$

Годовой расход теплоты на отопление промышленного предприятия, ГДж/год (106):

$$Q_{ошт}^{год} = 3,6 \left[Q_o^{cp} \cdot (n_o \cdot z + Q_o^D (24 - z) \cdot n_o \right], \quad (106)$$

где $z_{п.п}$ – число часов работы промышленного предприятия в сутки, примем $z_{п.п} = 16$ ч/сут;

Q_o^D – расход теплоты на дежурное отопление, МВт, определяется по формуле (107):

$$Q_o^D = Q_o \frac{t_{в}^D - t_{н}^{cp.o}}{t_{ep} - t_{np}}, \quad (107)$$

где $t_{в}^D$ – температура воздуха внутри помещения во время работы дежурного отопления, °С; в соответствии с [35] принимается равной 5 °С, тогда

$$Q_o^D = 16,5 \cdot \frac{5 - (-3,5)}{16 - (-27)} = 3,26 \text{ МВт.}$$

Определяем годовой расход теплоты на отопление промышленного предприятия

$$Q_{ошт}^{год} = 3,6 \cdot [10,61 \cdot 208 \cdot 16 + 3,26 \cdot (24 - 16) \cdot 208] = 146644,992 \text{ ГДж / год}$$

Суммарный годовой расход теплоты на отопление:

$$Q_o^{год} = Q_{o.ж}^{год} + Q_{ошт}^{год} = 190674,432 + 146644,992 = 337319,424 \text{ ГДж / год}$$

Определяется годовая нагрузка на вентиляцию в жилых и общественных зданиях (108):

$$Q_{в.ж}^{год} = Q_{в}^{cp} n_{в} \times z \times 3600 \times 10^{-3}, \quad (108)$$

где z – усредненное за отопительный период число часов работы системы вентиляции общественных зданий в течение суток (при отсутствии данных принимается равным 16 ч) [35];

где $Q_{в}^{cp}$ – суммарное среднее потребление теплоты на вентиляцию жилого района

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						04
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

МВт, которое определяется по формуле (109):

$$Q_B^{cp} = Q_B' \cdot \frac{t_{B_p} - t_H^{cp.o}}{t_{B_p} - t_{H_p}}, \text{ МВт} \quad (109)$$

$$Q_B^{cp} = 2,806 \cdot \frac{18 - (-3,5)}{18 - (-27)} = 1,22 \text{ МВт}$$

Тогда по формуле (108)

$$Q_{вж}^{\text{год}} = 1,22 \times 208 \times 16 \times 3,6 = 14616,576 \text{ ГДж/год.}$$

Годовой расход теплоты на вентиляцию на промышленном предприятии, ГДж/год (110):

$$Q_{e_{n,n}}^{200} = 3,6 \left[Q_{e_{n,n}}^{cp} \cdot z \cdot n_o + Q_{o_{n,n}}^d (24 - z) n_o \right] \quad (110)$$

где $Q_{B_{шт}}^{cp} = Q_{B_{шт}}' \cdot \frac{t_{B_p} - t_H^{cp.o}}{t_{B_p} - t_{H_p}} = 4,1 \cdot \frac{16 - (-3,5)}{16 - (-27)} = 1,86 \text{ МВт.}$

$$Q_{B_{шт}}^d = Q_{B_{шт}}' \cdot \frac{t_e^d - t_n^{cp.o}}{t_{e_p} - t_{n_p}} = 4,1 \cdot \frac{5 - (-3,5)}{16 - (-27)} = 0,81 \text{ МВт.}$$

$$Q_{B_{шт}}^{\text{год}} = 3,6 \cdot [1,86 \cdot 16 \cdot 208 + 0,81 \cdot (24 - 16) \cdot 208] = 27136,512 \text{ ГДж / год}$$

Тогда суммарный годовой расход теплоты на вентиляцию:

$$Q_B^{\text{год}} = Q_{B_{ж}}^{\text{год}} + Q_{B_{шт}}^{\text{год}} = 14616,576 + 27136,512 = 41753,088 \text{ ГДж / год}$$

Годовая нагрузка на горячее водоснабжение:

$$Q_{ГВ}^{\text{год}} = Q_{ГВ_{ж}}^{\text{год}} + Q_{ГВ_{шт}}^{\text{год}},$$

где $Q_{ГВ_{ж}}^{\text{год}}$ - годовой расход теплоты на ГВС в жилом микрорайоне,
 $Q_{ГВ_{шт}}^{\text{год}}$ - годовой расход теплоты на ГВС промышленного предприятия.

Годовой расход теплоты на горячее водоснабжение жилых районов (111):

$$Q_{z.g}^{200} = 86,4 \cdot \left[Q_{z.g}^{cp} n_o + Q_{z.g}^{cp} (n_y - n_o) \right] \quad (111)$$

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						05
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

где n_y – расчетное число суток в году работы системы горячего водоснабжения.
При отсутствии данных следует принимать 350 суток [35].

$$Q_{ГВС,ж}^{ГОД} = 86,4 \cdot [4,54 \cdot 208 + 2,88 \cdot (350 - 208)] = 116923,392 \text{ ГДж/год.}$$

Годовой расход теплоты на горячее водоснабжение промпредприятия:

$$Q_{ГВ,III}^{год} = T \cdot n_0 Q_{ГВ,III}^{сп.з} \cdot 3,6 + Q_{ГВ,III}^{сп.л} (n - n_0) 3,6 \cdot T$$

Так как вода подается только на душевой разбор, который работает в течении двух часов в смену, то общее время использования: $T=4$ часа.

$$Q_{ГВ,III}^{ГОД} = 4 \cdot 208 \cdot 5,8 \cdot 3,6 + 4,64 \cdot (350 - 208) \cdot 3,6 \cdot 4 = 26860,032 \text{ ГДж/год.}$$

$$\text{Тогда } Q_{ГВ}^{год} = 116923,392 + 26860,032 = 143783,424 \text{ ГДж/год.}$$

Годовой расход теплоты на технологию (112):

$$Q_{Т,III}^{ГОД} = 3,6 \cdot Q_{Т,III} \cdot z_{ГОД} \quad , \quad (112)$$

где $z_{год}$ – годовое число часов использования максимума технологической тепловой нагрузки, ч/год, принятое значение соответствует 2^x-сменному режиму работы:

$$z_{год} = 5600 \text{ ч/год;}$$

$$Q_{Т,III}^{ГОД} = 3,6 \cdot 9,7 \cdot 5600 = 195552 \text{ ГДж/год.}$$

Суммарное годовое потребление теплоты:

$$Q^{год} = 337319,424 + 41753,088 + 143783,424 + 195552 = 718407,756 \text{ ГДж/год.}$$

Годовой расход топлива:

$$B^{год} = \frac{718407,756 \cdot 10^9}{29,3 \cdot 0,9 \cdot 10^6 \cdot 10^3} = 27243,37 \text{ Т.т./Год.}$$

$$\text{Годовой расход на топлива: } 27243,37 * 14967 = 40775151 \text{ тт/год}$$

2. Амортизационные отчисления 575000 тт [46];

$$A = 25\% * 2300000 = 575000 \text{ тт}$$

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		06

3. Зарплата эксплуатационного персонала 15360000 тг [таблица 10] .

Таблица 10 – Зарплата эксплуатационного персонала

Должность	Категория	Коэффициенты	Должностной оклад	Добав. Коэф.	Оклад, тенге	Кол-во единиц	ФЗП месяц тенге	Срок работы, мес.	ФЗП Годовой, тыс. тенге
1. Гл. инженер	Г1-1	6,03	106712,91	80034,683	186747,593	0,99	200,0	12	2400,0
2. Инженер 1 кат.	Г1-3	5,07	89723,79	67292,843	157016,633	0,95	180,0	12	2160,0
3. Инженер 2 кат.	Г1-3	4,62	81760,14	61320,105	143080,245	1,05	160,0	12	1920,0
4. Машинист	Г1-3	4,98	88131,06	66098,295	154229,355	0,97	140,0	12	1680,0
5. Машинист	Г1-4	4,05	71672,85	53754,638	125427,488	1,11	140,0	12	1680,0
6. Разнорабочий	Г1-5	3,48	61585,56	46189,17	107774,73	4,4	460,0	12	5520,0
ИТОГО									15 360

Экономическая эффективность НИР рассчитывается по формуле 113:

$$\mathcal{E}_{\text{НИР}} = \frac{\Delta B_{\text{т}} C_{\text{т}} - I}{K_{\text{НИР}}} \quad (113)$$

где $\Delta B_{\text{т}}$ – экономия топлива при повышении энергетической эффективности элемента, 7269,2 т/ год [47];

КПД турбинной установки:

$$\eta_{\text{т}} = 342/781,1 = 0,437$$

$$\Delta E = 3,6 * 38,63(1 - 0,437) = 78,5 \text{ ГДж/ч.}$$

КПД_{ТЭЦ} – эксергетический:

$$\eta_{\text{ТЭЦ}} = 0,437 * 0,85 * 0,99 = 0,368$$

									Лист
									07
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.04.01.2019.243.03 ПЗ

Полный-относительный КПД_{ТЭЦ}:

$$\eta_{ТЭЦ}^p = 0,85 * 0,99(342 + 78,5) / 781,1 = 0,453$$

Полная и удельная экономии топлива:

$$\Delta B = 123 * 38,63(1 - 0,437) / 0,368 = 7269,2 \text{ т/год}$$

C_t – цена топлива, 14 967 тг/т [48];

I – годовые текущие затраты на проведение НИР;

$K_{НИР}$ – единовременные (капитальные) затраты на проведение НИР, тыс.тенге.

$$K_{НИР} = K_{ЭКС} + K_{ПП} + K_{ЗП} + K_{НОС} + K_{УСЛ} + K_{МАТ}, \quad (114)$$

$$K_{НИР} = 200 + 2300 + 15000 + 500 + 7000 + 4000 + 1000 = 30000 \text{ тыс.тенге}$$

где $K_{ЭКС}$ – эксплуатационные расходы оборудования и техники;

$K_{ПП}$ – приобретение оборудования и программного обеспечения;

$K_{ЗП}$ – оплата труда руководителя и участников НИР за период разработки и реализации;

$K_{НОС}$ – расходы по научно-организационному сопровождению;

$K_{КОМ}$ – командировочные расходы;

$K_{УСЛ}$ – услуги сторонних организаций;

$K_{МАТ}$ – приобретение материалов.

$$I = I_{ТОП} + I_{ЗП} + I_{АО} \quad (115)$$

$$I = 40775151 + 575000 + 15360000 = 56710151 \text{ тг/год}$$

где $I_{ТОП}$ – годовые расходы на топливо, тенге/год;

$I_{ЗП}$ – амортизационные отчисления, тенге/год;

$I_{АО}$ – зарплата эксплуатационного персонала тенге/год;

$$\Theta_{НИР} = \frac{7269,2 * 14967 - 56710151}{30000000} = 1,736$$

Исследование по НИР считается экономически эффективным по критерию (113), что соответствует нормативному сроку окупаемости 5 лет:

$$\Theta_{НИР} \geq 0,20 \quad (116)$$

$$1,736 \geq 0,20$$

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						08
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Полученные научно-технические результаты могут быть использованы инженерами-техниками при разработке двигателей внутреннего сгорания, которые позволят уменьшить затраты на их проектирование и организовать процесс сжигания твердого топлива эффективно, повысить надежность работы двигателя, снизить вредные выбросы выхлопных газов в атмосферу.

Модель SWOT – анализ системы компьютерного моделирования топлива в котле

Модель используется для качественного анализа вариантов технических решений и определения долгосрочного направления повышения энергетической эффективности котла. Сравнительный анализ вариантов проектных решений осуществляется методом SWOT.

Для этого составляются минимум две матрица, в квадрантах которых приводятся сильные (S), слабые (W) стороны каждого варианта, его возможности (O) и угрозы (T) во внешней среде [36].

В таблице 9 приведен SWOT-анализ проекта.

Таблица 9 – SWOT-анализ проекта

<p style="text-align: center;">Сильные стороны (S)</p> <p>1) Низкий расход топлива позволяет снизить затраты на энергоресурсы; 3) Простота обслуживания и ремонта; 4) Автоматическое вычисление и регулирование подачи воздуха и топлива; 5) Система автоматизации обеспечивает устойчивое горение и полноту сгорания топлива; 6) Снижение текущих затрат на энергетическое обслуживание системы автоматизированной подачи воздуха и топлива</p>	<p style="text-align: center;">Слабые стороны (W)</p> <p>2) Необходимость повышения квалификации персонала при работе на новом оборудовании.</p>
<p style="text-align: center;">Возможности (O)</p> <p>1) Появление на рынке более совершенного теплоэнергетического оборудования; 2) Поддержка со стороны властей.</p>	<p style="text-align: center;">Угрозы (T)</p> <p>1) Высокая стоимость трудовых ресурсов; 2) Рост цен на оборудование; 3) Повышение цен на энергоресурсы и на их транспортировку; 4) Низкий уровень инвестиций в стране.</p>

На основании проведенного анализа можно утверждать, что установка системы компьютерного моделирование топлива в котле имеет больше сильных сторон и возможностей и меньше слабых сторон и угроз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

– Проведено численное исследование процессов тепломассопереноса при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического объекта при начальном уровне турбулентности 10 % в трехмерном стационарном приближении.

– Получены распределения характеристик процесса в виде полей скорости, температуры, концентраций продуктов сгорания угля (в том числе CO , CO_2) по всему топочному пространству для разных сечений топочной камеры.

– Показано, что в плоскости подачи топливной смеси и в плоскости симметрии топочной камеры наблюдается максимальный конвективный перенос; в температурном поле наблюдается неполная симметрия.

– Наиболее резкие изменения все величины претерпевают в местах расположения горелок, где расположено ядро факела и происходят наиболее интенсивно химические реакции между компонентами, участвующими в процессе горения, с наибольшим выделением здесь тепла и наибольшим уровнем турбулентности. В поясе горелок в распределениях наблюдаются также максимумы турбулентных пульсаций скорости, однако последующее удаление от сопла сопровождается резким падением их интенсивности и затуханием химических реакций.

– Проведено численное исследование влияния степени турбулентности на процессы тепломассопереноса при сжигании пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического объекта. Получены подробные характеристики полей скорости, температуры, концентраций продуктов сгорания угля (в том числе и вредных CO , CO_2) по всему топочному пространству для разных для различных степеней турбулентности $T_u=0.05$ и $T_u=0.1$. Численное моделирование процесса сжигания пылеугольного топлива проводилось на основе трехмерных уравнений переноса с учетом химических реакций. Это система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных состоит из уравнений неразрывности и движения вязкой среды, уравнений распространения тепла и диффузии для компонентов реагирующей смеси и продуктов реакции с учетом многофазности среды, уравнений k - ϵ - модели турбулентности, а также уравнений химической кинетики, определяющих интенсивность нелинейных источников энергии и вещества.

– Для выполнения вычислительного эксперимента и получения расчетных данных, наиболее полно описывающих процессы тепломассопереноса, происходящих в реальных условиях в топочной камере действующей энергетической установки, в настоящей работе был выбран котел ПК-39 Ермаковской ГРЭС. Построенная модель, позволила разработать алгоритм расчета для численного исследования конвективного тепломассопереноса при различных степенях турбулентности.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

– Проведен сравнительный анализ указанных режимов работы камеры сгорания. Проведено сравнение результатов с экспериментальными данными. Показано, что при увеличении степени турбулентности происходит лучшее перемешивание смеси в камере сгорания, что в свою очередь приводит к уменьшению выбросов вредных веществ пагубно влияющих на здоровье человека. Полученные результаты моделирования позволяют оптимизировать процесс сжигания высокозольного пылеугольного топлива с целью уменьшения выбросов вредных веществ и позволяют создать электростанции на "чистом" и эффективном использовании угля

Исследования компьютерное моделирование конвективного теплопереноса при горении пылеугольного топлива в камере сгорания на основе трехмерных нелинейных уравнений Навье-Стокса и уравнений теплопереноса с учетом нелинейных эффектов теплового излучения и двухфазности среды, с использованием современных моделей турбулентности, а также модели горения, учитывающей оптимальное количество промежуточных химических реакций горения топлива в Казахстане отсутствуют. В то же время решение таких задач является острой необходимостью не только для нашей страны, но и проблемой общемирового масштаба, о чем свидетельствуют аналогичные исследования, проводящиеся в странах СНГ, Европейского Союза и США.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 WCI (2005), Coal Facts, 2005 Edition with 2004 data, World Coal Institute, London, <http://www.wci-coal.com>.
- 2 BP (2002), British Petrol Statistical Review of World Energy, June 2002, British Petrol, London, www.bp.com.
- 3 IEA (2003a), Key World Energy Statistics 2003 Edition, International Energy Agency, OECD/IEA, Paris, www.iea.org.
- 4 Cletcins K. World power policy. Using a technology of a three-stage combustion for NOx suppression on solid fuel boilers in Europe and CIS // Opening Rep. Europ. Commission for Power Engineering and Transport. – Moscow: Russian J.S.Co. б.м. : “United Power System of Russia”. All-Russian Technical Institute. – 2000. – P. 4-17.
- 5 Энергетическое топливо СССР: Справочник. –М.: Энергия, 1986. –С. 676.
- 6 Химия и переработка угля / Под ред. Липовича, В.Л. –М.: Химия, 1988. – С.336.
- 7 Хофман, Е. Энерготехнологическое использование угля. –М.: Энергоатомиздат. 1983. –С.328.
- 8 Singer S. Pulverized Coal Combustion. (Recent Developments). Noyes Publications, New Jersey, USA. 1984. – 184 p.
- 9 Носач, В.Г., Чмель, В.Н., Прохоренко, К.К. Интенсификация сжигания низкосортных углей в парогенераторе // Плазменная активация горения. Алма-Ата.-1989.- С.21-31.
- 10 Дьячков, Б.Г., Блинова, В.А., Нефедова, М.Г. Эффективность топливно - электрических процессов. -М.: Энергоатомиздат -1989.- 136 с.
- 11 Сеулин, Н.А., Видин, Ю.В. Пылеугольные растопочные горелки с электрозапальным устройством резисторного типа // Теплообмен в парогенераторах: Всесоюз.конф.- Новосибирск -1988.- С.187-190.
- 12 Дьячков, Б.Г., Полонский, И.Я., Салимов, М.А. и др. Интенсификация факельных процессов электрическим разрядом.-М.:Энергоатомиздат -1976.-87с.
- 13 Blackburn, P.R. Ignition of pulverized coal with Arc Heated Air// Energy.-1980.- Vol.4, № 3.-P. 98-99.
- 14 Blackburn, P.R. Pulverized coal heated igniter system// Pat. №1585943 (B).- 1982.-№ 3.
- 15 Cioffi, P.L., Barsin, A.A., Tattoli, O.R. Plasma arc ignition of pulverized coal. Winter Meeting ASME.-Wascington. Nowember 15020. 1981.- P.5-9.
- 16 Tuppeny, W.H. Effect of changing coal supply an steam generator design // Proc. American Power Conference. -1978.-V.40.- P.367-380.
- 17 Мессерле, В.Е., Сакипов, З.Б. Термохимический метод подготовки к сжиганию твердых топлив с использованием низкотемпературной плазмы // Химия твердого топлива. -1988.-№ 4.- С.123-127.
- 18 Вдовенко, М.И., Ибраев, Ш.Ш., Мессерле, В.Е. и др. Плазменная газификация с утилизацией минеральной части// Плазменная газификация и пиролиз низкосортных углей.-М., 1987.-С.59-71.

13.04.01.2019.243.03 ПЗ

Лист
12

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

19 Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б., Аскарова, А.С., Нагибин, А.О. Горение пылеугольного факела в топке с плазменно-топливной системой // Теплофизика и аэромеханика, 2010, том 17, № 3, с.467-476.

20 Мессерле, В.Е., Сакипов, З.Б., Сейтимов, Т.М. К расчету электрической мощности плазмотрона, предназначенного для воспламенения и стабилизации горения пылеугольной смеси // Топочный процесс при сжигании низкосортных углей. М.- 1988.- С.90-100.

21 Мессерле, В.Е., Сакипов, З.Б., Трусков, Б.Г. Удельные энергозатраты при высокотемпературной газификации низкосортных углей //Изв. СО АН СССР. Сер.техн.наук 1988.-№ 18.-Вып.5.- С.95-98.

22 Мессерле, В.Е. Метод определения удельных энергозатрат при плазмохимической подготовке низкорекреационных углей и оценка экономической эффективности ее использования для воспламенения и стабилизации горения пылеугольных факелов на ТЭС. б.м. : // Техничко - экономические оценки плазмохимических процессов переработки углей и углеводородов. Иркутск-1989.- С.4-10.

23 Нигматуллин, Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч.1. – 464 с.

24 Messerle, V., Karpenko, E., Ustimenko, A., Askarova, A. Computer simulation of pulverized coal incineration with plasma activation // The Proceedings of the 28-th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel systems. б.м. : //Clearwater, Florida, USA. –Published by U.S. department of Energy & Coal Technology association of USA. – 2003.-p. 111-122.

25 Аскарова, А.С., Мессерле, В.Е., Карпенко, Е.И., Устименко, А.Б., Тютеебаев, С.С. Моделирование процесса сжигания пылеугольного топлива, активированного низкотемпературной плазмой. б.м. : // Сб. материалов II Межд. симпозиума «Горение и плазмохимия» (17-19 сентября 2003г.). г. Алматы, КазНУ им. аль-Фараби, с. 175-180.

26 Аскарова, А.С., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Плазменно-энергетические технологии воспламенения, сжигания и газификации твердых топлив. б.м.: // Тезисы докладов 3-Межд. научной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование» (1-3 октября 2003 г.) г. Алматы, КазНУ им. аль-Фараби, с. 81.

27 Аскарова, А.С., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б., Локтионова, И.В. Трехмерное моделирование двухступенчатого сжигания экибастузского угля в топочной камере котла ПК-39 Ермаковской ГРЭС // Теплоэнергетика, №8, 2003, С.22-26.

28 Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б., Аскарова, А.С., Карпенко, Е.И., Локтионова, И.В. Оптимизация процесса сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий // Теплоэнергетика, №6, 2004, С.60-65.

29 Аскарова, А.С., Карпенко, Е.И., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Моделирование сжигания угля с использованием плазменной технологии // Сборник тезисов докладов 1-й научно-практической конференции «Угольная

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист 13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития». б.м. : (24-30 сентября 2004г.). г. Алушта, с 58-60.

30 Аскарлова, А.С., Карпенко, Е.И., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Плазмохимическая активация горения и газификации угля // Труды 4 Международного симпозиума по теоретической и прикладной плазмохимии (ISTAPS-2005). Иваново, 2005, С. 35-41.

31 Аскарлова, А.С., Лаврищева, Е.А., Локтионова, И.В., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Оптимизация процессов сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий // Сб. материалов II Межд. симпозиума «Физика и химия углеродных материалов ». б.м. : 18-20 сентября 2002г.). г. Алматы, КазНУ им. аль-Фараби, С. 64-67.

32 Аскарлова, А.С., Карпенко, Е.И., Лаврищева, Е.И., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Компьютерное моделирование горения углей в котлах с плазменно-топливными системами // Сб. материалов III Межд. симпозиума «Горение и плазмохимия» (24-26 августа 2005г.). б.м. : г. Алматы, КазНУ им. аль-Фараби, с.317-321.

33 Аскарлова, А.С., Карпенко, Е.И., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Плазмохимическая активация горения твердых топлив // Химия высоких энергий, 2006. Т. 40, № 2. - С. 141-148.

34 Аскарлова, А.С., Карпенко, Е.И., Лаврищева, Е.И., Мессерле, В.Е., Тютеебаев, С.С., Устименко, А.Б. Моделирование процесса сжигания пылеугольного топлива, активированного низкотемпературной плазмой // Вестник КазНУ. Сер.физическая. 2004, №1 (16), С.139-144.

35 Аскарлова, А.С., Карпенко, Е.И., Лаврищева, Е.И., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Трехмерное моделирование горения твердых топлив в котлах с плазменно-топливными системами // Горение твердого топлива: Сборник докладов VI Всероссийской конференции. б.м. : (с участием иностранных ученых), Новосибирск, 8-10 ноября 2006г., Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. - Часть 1. – С.88-96.

36 Аскарлова, А.С., Лаврищева, Е.И., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Влияние плазменно-топливных систем на аэродинамику камеры сгорания и образование NOx при сжигании пылеугольного топлива. б.м. : // Программа и материалы IV Международного Симпозиума «Горение и плазмохимия» Алматы, 12-14 сентября 2007г. Алматы: Казахский национальный Университет-2007. С. 147-150.

37 Аскарлова, А.С., Лаврищева, Е.И., Мессерле, В.Е., Устименко, А.Б. Комплексное исследование плазмохимической активации горения и газификации угольной пыли. б.м. : // 4-я Международная научная конференция «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование», Казахстан, Алматы, 5-7 октября 2005 г. Сб. тезисов, С.8.

38 Messerle, V., Karpenko, E., Ustimenko, A., Askarova, A. Modeling of plasma – fuel systems and coal incineration in the furnaces of the power boilers. // Abstracts Invited and Contributed Papers of International Conference on Physics of low Temperature Plasma . б.м. : 03// Kiev, Ukraine, 2003. – p. 3-18-76.

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

39 Askarova, A., Karpenko, E., Messerle, V., Ustimenko, A. Simulation of low-temperature Plasma interaction with pulverized Coal for incineration improvement // Proceedings of Seventh International Conference on Energy for a Clean Environment. б.м. : // Lisbon, Portugal, 2003. – CD of Proceedings – №32.08; Book of Abstracts – p. 170.

40 Askarova, A.S., Karpenko, E.I., Lavricsheva, E.Y., Messerle, V.E., Ustimenko A.B. Numerical investigation of low-temperature plasma interaction with coal-dust fuel for combustion process optimization. б.м. : Тезисы докладов 3-Межд. научной конференции «Современные достижения физики и фундаментальное физическое образование» (1-3 октября 2003 г.) г. Алматы, КазНУ им. аль-Фараби, с. 67.

41 Askarova, A., Karpenko, E., Messerle, V., Ustimenko, A. Simulation of Coal Plasma Ignition and Combustion in a Furnace Chamber // Proceedings of the 31st EPS Conference on Plasma Phys. London, 28 June - 2 July 2004, ECA. Vol.28G, - P-1.022.

42 Концепция перехода Республики Казахстан к устойчивому развитию на 2007-2024 годы от 14 ноября 2006 года [Электронный ресурс] // www.zakon.kz/60291-konceptsiya

43 Указ Президента РК «О концепции экологической безопасности Республики Казахстан на 2004-2015 годы» от 3 декабря 2003г. // Казахстанская правда. – 10 декабря 2003г. – С. 6-8.

44 Национальный доклад Республики Казахстан для КУР «РИО+20» [Электронный ресурс] // www.cbd.int/kz-nr-04-ru.pdf

45 Информационно-аналитический отчет по контрольной и правоприменительной деятельности экологической инспекции по г.Алматы за I-полугодие 2011г. – МООС РК, Комитет экологического регулирования и контроля, Балхаш-Алакольский департамент экологии по г.Алматы.

46 Рассчитать амортизацию основных средств:

https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=35520851#pos=3;-166

47 Цоколаев, И.Б., Расчет показателей энергетической эффективности ТЭЦ // Новости теплоснабжения. № 2. 2009. С. 66-69.

48 Цены на уголь в Казахстане: <https://www.pulscen.kz/firms/040603-ugol>

					13.04.01.2019.243.03 ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		