

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



ОСИНЦЕВ КОНСТАНТИН ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДОЛОГИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ И ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ, ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ
И АКТИВНОГО УГЛЯ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ КАРБОНОВОГО СЛЕДА
НА БАЗЕ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Соломин Е.В.

Челябинск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Аналитический обзор современных решений для реализации энергетических комплексов нового поколения при использовании органического топлива, солнечной энергии, низкопотенциальных источников теплоты, производства активного угля на базе тепловых электрических станций.....	13
1.1. Степень разработанности проблемы создания гибридных энергетических комплексов нового поколения при использовании органического топлива, солнечной энергии, низкопотенциальных источников теплоты.....	13
1.2. Степень разработанности проблемы создания мини-ТЭЦ с использованием низкопотенциальных источников энергии и солнечной энергии.....	19
1.3. Разработанный энергокомплекс тригенерационной установки с использованием солнечной энергии как предпосылка к созданию гибридного энергетического комплекса нового поколения с использованием органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников теплоты.....	23
1.4. Использование солнечной энергии в гибридных энергетических комплексах с органическим циклом Ренкина и низкопотенциальными источниками энергии.....	27
1.5. Актуальность методологии создания энергокомплексов, работающих на органическом топливе, в составе тепловых электрических станций.....	28
1.6. Камеры сгорания энергетических котлов тепловых электрических станций для перспективных энергокомплексов активации угля.....	33
1.7. Составление предварительных принципиальных схем тепловой электростанции с надстройками по использованию солнечной энергии, низкопотенциальных источников энергии и по производству активного угля.....	40
Выводы по главе 1.....	43
Глава 2. Методологические основы моделирования процессов объединения генерации гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергии энерготехнологический комплекс.....	44
2.1. Необходимость создания методологии проектирования гибридных энергокомплексов и энерготехнологических систем.....	44
2.2. Необходимость использования интернета вещей при проектировании энергокомплексов нового поколения на базе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии.....	48
2.3. Методология моделирования гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергии в едином энерготехнологическом комплексе.....	49
2.4. Алгоритм разработки энерготехнологического комплекса на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии.....	61
2.5. Пример использования предложенной методологии для обеспечения устойчивости электроснабжения промышленного предприятия.....	63
2.6. Составление общей схемы гибридной тепловой электростанции по производству тепловой, электрической энергии и активного угля.....	72
Выводы по главе 2.....	73
Глава 3. Разработка научных основ методологии расчетов и оптимизации схем	

проектирования энергетического комплекса активации угля в составе гибридного энергетического комплекса с использованием органического топлива, солнечной энергии и низпотенциальных источников энергии.....	74
3.1. Методологический подход к решению задач тепломассообмена и газодинамики энергокомплекса активации угля	74
3.2. Концепция непрерывной среды при комбинированной выработке теплоты и активного угля в едином энергокомплексе	79
3.3. Математическая модель теплообмена запыленного газового потока...	84
3.4. Математическая модель теплообмена ограждающих конструкций при комбинированной выработке теплоты и активных частиц в едином энергокомплексе	86
3.5. Математическая модель определения начального участка гетерогенного факела и ее адаптация.....	94
3.6. Математическая модель обобщенного теплообмена в топке котельного агрегата – парадигма теплообмена.....	106
3.7. Методика использования теплоты охлаждения активного угля тепловыми насосами	119
3.8. Методика представления оптимизационной схемы энергокомплекса...	120
Выводы по главе 3.....	123
Глава 4. Разработка научных подходов к проектированию энергетических комплексов активации угля	125
4.1. Активация угля в камерах сгорания.....	125
4.2. Активация угля в аппаратах периодического действия	126
4.3. Автоматизация настройки работы энергокомплекса	129
4.4. Проектные решения по установкам активации угля	132
4.5. Использование теплового насоса или органического цикла Ренкина в полигенерационном комплексе.....	134
4.6. Повышение эффективности гибридного энергокомплекса за счет использования сбросной теплоты	137
Выводы по главе 4.....	140
Глава 5. Экспериментальная часть. Численные и натурные исследования основного теплового оборудования энергокомплекса активации угля	141
5.1. Компьютерное моделирование процессов динамики частиц.....	141
5.2. Компьютерное моделирование движения запыленного потока.....	148
5.3. Компьютерное моделирование многофункционального горелочного устройства	149
5.4. Компьютерное моделирование газодинамических течений в камере сгорания	151
5.5. Компьютерное моделирование газодинамических течений запыленного потока газов в котле.....	158
5.6. Компьютерное моделирование сжигания в слое.....	160
5.7. Компьютерное моделирование движения фреона в трубах теплового насоса.....	161
5.8. Опытное сжигание разнородных топлив в паровых котлах ЧТЭЦ-2 с использованием многофункциональных горелок	163

5.9. Результаты натурных испытаний, физического моделирования, лабораторные данные по активации углей.....	165
5.10. Опытное исследование работы системы утилизации теплоты.....	169
Выводы по главе 5.....	176
Глава 6. Прикладная часть. Контроль и диагностика работы энергокомплекса...	177
6.1. Программа по оптимизации системы энергосбережения.....	185
6.2. Программный комплекс расчета параметров возобновляемых источников энергии на основе нейросетевого алгоритма.....	186
6.3. Перспективы использования новых технологий при передаче сигналов от фотоэлектрических преобразователей.....	186
Выводы по главе 6	188
Глава 7. Экономическая оценка перевода котельных и ТЭС в гибридные энергетические комплексы, сипользующих органическое топливо и солнечную энергию, производящих электрическую, тепловую энергию и активный уголь..	189
7.1. Стратегическая направленность работы.....	189
7.2. Технологическое обеспечение реализации экономической стратегии и экологического развития РФ.....	190
7.3. Экономическая эффективность разрабатываемых мероприятий.....	192
Выводы по главе 7.....	193
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	194
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	197
ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное). Справка об использовании результатов диссертационной работы от филиала ОАО «Объединение ВНИПИэнергопром» г. Казань, Республика Татарстан	254
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (справочное). Справка об использовании результатов диссертационной работы от филиала КНТЦ «Энергия»	255
ПРИЛОЖЕНИЕ В (справочное). Справка об использовании результатов диссертационной работы от филиала АО «Электрические станции»	256
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (справочное). Справка об использовании результатов диссертационной работы в учебном процессе ЮУрГУ.....	257
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (справочное). Справка об использовании результатов диссертационной работы в научных исследованиях ЮУрГУ.....	258

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Современные теплоэлектростанции (ТЭС) и комплексы по переработке угля являются основными потребителями органического топлива, что обязывает их предпринимать попытки снижения роста потребления углеводородов. Анализ запросов угольных предприятий научному сообществу показывает, что снижение потребления угля возможно за счет перехода на новые технологии комбинированной полигенерации тепловой и электрической энергии за счет надстройки базового угольного оборудования элементами возобновляемой энергетики. Такой подход, например, с использованием солнечных фотоэлектрических термальных модулей (ФЭПиТ/PV-T), производящих как электрическую, так и тепловую энергию, а также тепловых насосов и других устройств использования сбросной теплоты, позволит сгладить график выработки энергии, особенно во время пиков потребления. При комбинации с производством активированного угля из низкосортных бурых углей такой комплекс решает одновременно несколько задач в едином энергокомплексе, осуществляя и теплоэлектрогенерацию, и производство активного угля, широко потребляемого промышленностью в виде сорбентов для повышения эффективности улавливания вредных для окружающей среды газов. Данная тема на сегодняшний день ни теоретически, ни практически в целом не проработана, а значит разработка методологических основ комбинации использования солнечной энергии и органического топлива для производства электрической энергии, тепловой энергии и активного угля с минимизацией карбонового следа на базе тепловых электрических станций является весьма актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Развитию гибридных энергокомплексов на основе традиционной и возобновляемой энергетики посвящены исследования Стребкова Д.С., Велькина В.И., Тягунова М.Г. и других известных ученых. Вопросы разработки систем утилизации теплоты автономных и сетевых энергокомплексов, от источников с низким потенциалом, нашли отражение в работах Щеклеина С.Е., F. Sorgulu, I. Dincer, A.

Khaliq, R. Kumar, M.A. Rosen. Теория горения, активации, кипящего слоя опубликованы Н.Н. Семеновым, Я.Б. Зельдовичем, Д.А. Франк-Каменецким, Д.М. Хзмяляном, Л.Н. Хитриным, Х. Кинле, Э. Бадер, А.С. Предводителейым, Н.И. Сыромятниковым, В.И. Бабием.

Анализ литературы и практика показывают, что вне зависимости от уровня потребления электрической и тепловой энергии работа угольных ТЭС сопровождается перерасходом топлива. При этом пики потребления могли бы быть нивелированы за счет возобновляемых источников, например, солнечных электростанций. Кроме этого, при сопутствующем производстве активированного угля колоссальные объемы тепла до сих пор не утилизируются, поскольку отсутствует единая методология теплообмена и газодинамики этих процессов. Все это приводит к перерасходу топлива и неконтрольным тепловым выбросам, вносящим прямой вклад в глобальное потепление.

В работе автора предлагается учесть все недостатки существующих энергетических систем и комплексов, включающих когенерацию, производство активных углей и использование ФЭП для генерации электрической энергии за счет использования солнечной радиации, рис.В.1.



Рис.В.1. Преимущества гибридного энергетического комплекса (ГЭК)

Объект диссертационного исследования – гибридный энергетический комплекс, использующий солнечную энергию и органическое топливо (ГЭК), одновременно производящий электрическую, тепловую энергию, низкопотенциальное тепло и активированный уголь (кратко когенерация и активированный уголь или КГАУ).

Предмет диссертационной работы – рабочие процессы, протекающие в энергетическом комплексе – объекте исследования ГЭК.

Цель – разработка методологических основ использования солнечной энергии и органического топлива для производства электрической, тепловой энергии и активного угля при минимизации карбонового следа на базе тепловых электрических станций.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели

1. Проведение системного анализа работы ГЭК, производящих КГАУ.
2. Разработка алгоритмов и методов создания ГЭК на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии.
3. Разработка метода расчета удельной плотности солнечной радиации в ГЭК.
4. Проведение численного моделирования тепловых потоков ФЭПиТ в составе солнечной ТЭС, движения хладагента и его кипения при внедрении системы утилизации теплоты в ГЭК, тепловых и газодинамических процессов слоевой, факельной технологий сжигания и активации бурого угля.
5. Проведение экспериментальных исследований процессов горения в ГЭК.
6. Разработка схем и систем контроля ГЭК, использующих солнечную энергию, низкопотенциальное тепло и органическое топливо, производящих КГАУ.
7. Экономическая оценка работы ГЭК, производящих КГАУ, при минимизации карбонового следа.

Научная новизна

1. Впервые предложена методология создания гибридных систем на органическом топливе, солнечной энергии и низкопотенциальном сбросном тепле в едином энерготехнологическом комплексе.

2. Разработаны новые алгоритмы и методы создания ГЭК на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии.

3. Разработан метод расчета удельной плотности солнечной радиации в ГЭК.

4. Впервые предложена новая концепция деления тепловой части ГЭК, а именно камер сгорания и камер активации на отдельные области, в которых среда представлена в виде подсистем: факел, топочный газ, окружающий факел, и ограждающие конструкции.

5. Разработан метод расчета теплообмена на участке воспламенения камер сгорания и камер активации с учетом разработанной непрерывной функции гранулометрического состава, линейно аппроксимированной функции выгорания топлива по длине факела, которые позволяют рассчитать адиабатическую температуру горения и время пребывания частиц в факеле.

6. Разработана математическая модель теплообмена в камере сгорания и активации, в которой используются приведенный коэффициент теплового излучения всех подсистем, обобщенный коэффициент теплопроводности диффузионных механизмов переноса теплоты, суммарный коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией, обобщенное число Нуссельта.

7. Впервые предложена математическая модель ФЭПиТ с предварительным подогревом за счет использования источников низкопотенциального тепла.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Проведено экспериментальное исследование констант стадий горения и активации челябинского и шубаркольского бурых углей и экспериментальное исследование времени нахождения частиц на стадиях горения, на основе которого разработаны зависимости для расчета стадий горения и активации. Результаты исследования могут быть использованы в Теории горения и активации в качестве справочных материалов, что подтверждается Справкой ЮУрГУ.

2. Проведено численное моделирование удельной плотности солнечной радиации ФЭПиТ, движения хладагента и его кипения при внедрении системы утилизации теплоты ГЭК, тепловых и газодинамических процессов слоевой, факельной

технологии сжигания и активации бурого угля. Результаты использованы в отчете гранта РФФ 22-19-2011 «Методология многопараметрической оптимизации опреснительной установки для грунтовых и морских минеральных вод на основе возобновляемых источников энергии».

3. Разработанный алгоритм и методы управления и контроля рабочих процессов в основном оборудовании ГЭК внедрены в учебный процесс ЮУрГУ, что подтверждается Справкой использования результатов.

4. Разработанные схемы гибридного энергетического комплекса, использующего солнечную энергию и органическое топливо, производящего электрическую, тепловую энергию и активный уголь, на которые получены патенты на изобретения (Пат. 2484371 РФ, Пат. 2615241 РФ, Пат. 2499035 РФ, Пат. 2499189 РФ, Пат. 2500617 РФ, Пат. 2500953 РФ, Пат. 2500954 РФ, Пат. 2502921 РФ), используются АО «Объединение ВНИПИЭнергопром» и АО «Электрические станции», что подтверждается Справками.

5. На предложенную схему охлаждения готового активированного угля с утилизацией теплоты за энергетическим комплексом при использовании низкопотенциальных источников энергии получен патент 2748628 РФ.

6. Разработана и реализована методология использования органического топлива и солнечной энергии в едином энергокомплексе, сокращающая потребление топлива и снижающая воздействие на окружающую среду, что подтверждается Актом внедрения КНТЦ «Энергия».

7. Материалы диссертационного исследования вошли в учебники и учебные пособия ЮУрГУ и внедрены в программы подготовки и профессиональной переподготовки специалистов для энергетики.

Методология и методы проведения исследования

Численное моделирование процессов теплообмена выполнено с помощью программы Ansys; моделирования – учебных версий программ AutoDesk; обработка результатов исследования – MathLab. В диссертационной работе использовались методы математического моделирования с привлечением современных

компьютерных программных продуктов. В работе использованы экспериментальные и теоретические методы исследований, в том числе Нормативный метод тепловых расчетов котельных агрегатов, методика проведения теплотехнических испытаний ОРГРЭС, поверенные измерительные приборы Testo.

Положения, выносимые на защиту

1. Методология создания гибридных систем на органическом топливе, солнечной энергии и низкопотенциальном сбросном тепле в едином энерготехнологическом комплексе.

2. Алгоритмы и методы создания ГЭК на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников.

3. Метод расчета удельной плотности солнечной радиации в ГЭК.

4. Концепция деления тепловой части ГЭК, а именно камер сгорания и камер активации на отдельные области.

5. Метод расчета теплообмена на участке воспламенения камер сгорания и камер активации.

6. Математическая модель теплообмена в камере сгорания и активации.

7. Разработанные схемы ГЭК с охлаждением готового активированного угля с утилизацией теплоты за энергетическим комплексом.

8. Результаты численного моделирования работы ФЭПиТ в части движения хладагента и его кипения при внедрении системы утилизации теплоты за энергетическим комплексом, тепловых и газодинамических процессов слоевой, факельной технологий сжигания и активации бурого угля.

9. Алгоритм контроля рабочих процессов в основном оборудовании ГЭК.

10. Результаты экономической оценки создания ГЭК на базе тепловых электрических станций при минимизации карбонового следа.

Личное участие автора заключается в постановке проблемы и формулировании задач исследования, в анализе литературных источников, руководстве экспериментами на физических моделях и натуральных агрегатах, численном моделировании, разработке математических моделей и концепций методологии.

Достоверность и обоснованность результатов

Разработанная методология и математические модели в узловых стоковых точках энергокомплекса базируются на положениях теплопередачи и газодинамики запыленных потоков. Спроектирован широкий диапазон тепловых схем агрегатов активации в составе энергокомплекса, проведены испытания в соответствии с нормами, рекомендованными для тепловых расчетов котельных агрегатов со слоевым и факельным сжиганием. Проведено численное моделирование процессов теплообмена и газодинамики в прикладных программах, в основу которых положены базовые законы физики, теплообмена и газодинамики.

Реализация результатов работы.

Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению Приволжским и Южно-Уральским филиалом АО «Внипиэнергопром», г. Казань.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Научно-практических конференциях в рамках «Горение твердого топлива» (Новосибирск, ИТ СО РАН, 2012), «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики» (Санкт-Петербург, IPDME-2017, 2018, 2019), «Машиностроение, автоматика и системы управления» (Томск, Новосибирск MEACS-2017, 2018), «Промышленная инженерия, практическое применение и производство» (Санкт-Петербург, ICIEAM -2017), «Промышленная инженерия и современные технологии» (Владивосток, 2019, 2020), «Промышленная инженерия» (Сочи, ICIE-2019), «Актуальные проблемы энергетического комплекса: физические процессы, добыча, производство, передача, переработка и охрана окружающей среды» (Москва, 2021).

Опубликовано **42** работы по теме диссертации. **Основные публикации** по теме работы представлены в **22** статьях ВАК по профильной научной специальности; **9** патентах РФ на изобретения, **2** свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ; **9** журнальных статьях в журналах Scopus.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 2.4.5. – «Энергетические системы и комплексы». В рамках работы созданы на-

учно-методологические основы разработки и создания энергетических комплексов активации угля на базе тепловых электрических станций, работающих на органическом топливе, исследованы рабочие процессы, протекающие в энергетических установках на органическом топливе, их основном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии с помощью экспериментальных методов, методов численного и математического моделирования, разработаны алгоритмы и схемы контроля скорости истечения реактивной смеси и воздуха в камеры сгорания и камеры активации.

Перечисленные исследования относятся к пунктам 1,2,3,4,7 паспорта научной специальности 2.4.5 – «Энергетические системы и комплексы».

Предлагаемая вниманию читателей диссертация посвящена вопросам – разработка методологических основ использования солнечной энергии и органического топлива для производства электрической, тепловой энергии и активного угля при минимизации карбонового следа на базе тепловых электрических станций.

1. Аналитический обзор современных решений для реализации энергетических комплексов нового поколения при использовании органического топлива, солнечной энергии, низкопотенциальных источников теплоты, производства активного угля на базе тепловых электрических станций

1.1. Степень разработанности проблемы создания гибридных энергетических комплексов нового поколения при использовании органического топлива, солнечной энергии, низкопотенциальных источников теплоты

Для выявления степени научной и практической разработанности проблемы исследования необходимы следующие действия: идентификация предмета и объектов изучения в соответствии с ключевыми словами; определение базы данных и ее ограничений; установление критериев оценки источников; количественная оценка качественных характеристик (сильных и слабых сторон научных предложений; представление результатов с выводами о степени разработанности проблемы. Автором ранее был выполнен наиболее полный обзор публикаций на тему создания методологии проектирования гибридных энергокомплексов нового поколения [1].

Многие прогнозы подтверждают известные методологические предложения Адизеса в пользу создания биоподобных структур управления «живыми» организациями. Сен и Лалу отмечают гибкие методы создания самоуправляемых команд разного профиля. Однако включение даже такого компетентного персонала в систему контроля и регулирования не решает проблем. Качество управления термодинамическими параметрами энерготехнологических установок вследствие включения в систему контроля человеческого фактора ведет к низкой скорости и надежности регулирования. Несмотря на свою практичность, они более применимы в области проектирования и инженерии. Это сужает возможности применения таких методов при формировании энерготехнологических комплексов (ЭТК) нового поколения при использовании органического топлива, солнечной энергии, низкопотенциальных источников теплоты, производства активного угля на базе тепловых электрических станций. Более конкретные прогнозы развития интеллектуаль-

ных ресурсов прогнозирует Фрумин: рост числа цифровых и сетевых компаний; ожидаемый рост к 2035 г. возможностей компьютерных систем и искусственного интеллекта в оценке их вычислительной мощности; рост высокотехнологичных и высокотехнологичных инжиниринговых услуг в инновационной экосистеме. В современных условиях Российской Федерации преобладают университеты типов 2.0 и 3.0, которые являются драйверами развития промышленности, преимущественно индустриального типа. При этом масштабы их трансформации в образовательно-научные комплексы 4.0 растут с университетами, отличающимися высокой степенью глобализации образования и использованием новых образовательных методов с использованием методов Big Data. В настоящее время общепризнанна необходимость использования обучающих цифровых симуляторов виртуальными или реальными когнитивными методами применения возможности Data Science для решения практических задач постиндустриальной экономики и энергетики. В такой цифровой экономике необходимо использовать открытые образовательные платформы, основанные на больших базах данных. Особенно они необходимы для анализа возможностей опережающего объединения ресурсов на основе организации ЭТК с включением объектов распределенной энергетики, других многоцелевых производств и участия в проектах такой трансформации научно-образовательных комплексов типа 4.0. Рассмотренные методы решают комплекс задач организации процессов высокотехнологичного развития с использованием интеграции диверсифицированных ресурсов. Однако, оценивая в целом их соответствие концепции комбинирования методов для обеспечения эффективности, можно отметить их недостаточную нацеленность на решение указанных задач исследования.

В настоящее время существует ряд промышленных и в частности энергетических объектов, которые не имеют полной связи друг с другом. К таким объектам должны относиться, прежде всего, микросети. Это связи между объектами распределенной энергетики и потребителями. Малые источники энергии работают рассредоточенно по централизованным энергосистемам. Кроме того, объекты ма-

лой энергетики могут устанавливаться на промышленных предприятиях в качестве автономных источников энергии. В этом случае также возникают трудности с передачей избыточной электроэнергии в централизованную энергосистему [1, 2]. Следует также отметить, что предприятиям, расположенным в континентальном и субарктическом климате, тепло требуется для покрытия потребностей в отоплении, вентиляции и горячем водоснабжении. Объединить малые энергетические объекты, предприятия и частных потребителей тепловой и электрической энергии в рамках стандартных технологических схем очень сложно [3, 4]. При этом целью исследования является разработка новых методических подходов к созданию единого энерготехнологического комплекса с системой диспетчеризации и управления на базе нейросетевых технологий и Интернета вещей.

Для выявления степени научной и практической разработанности проблемы исследования необходимы следующие действия [5, 6]. Во-первых, необходима идентификация предмета и объектов исследования в соответствии с ключевыми словами; во-вторых, определяется определение базы данных и ее ограничения. Кроме того, показано установление критериев оценки источников и представлена количественная оценка качественных характеристик.

В этом разделе мы представим анализ работ по теме исследования.

Салавец А. указывает на необходимость цифровизации, автоматизации и модернизации глобальных цепочек создания стоимости - субъектов фабричной экономики [7]. По мнению Ли Д.Ю., Хеймерикс Г., Алкемаде Ф., это может снизить риски использования возобновляемых источников энергии, в том числе солнечной энергетики, в отдельных странах [8]. Особое значение генерации солнечной фотоэлектрической энергии доказано Хозенуззаманом и др. [9]. Конструктивные решения в этом направлении предложены А.М. Алсайях и др. [10]. Одну из концепций развития солнечной энергетики предложили П. Г. В. Сампайо и М. О. А. Гонсалес [11].

Радикальность необходимых изменений в этих направлениях соответствует условиям своеобразия развития. Многие прогнозы подтверждают известные ме-

тодологические предложения Лалу Ф. и Мейера Дж. У. в пользу создания биоподобных структур управления «живыми» организациями [12, 13]. Они отмечают, что холакратические гибкие методы создания самоуправляемых команд разного профиля эффективны для модели спиральной динамики так называемых «бирюзовых предприятий». Однако Митрева Е., Горьков Е.П., Гёршевский Х., Туши Б. доказали, что включение даже такого компетентного персонала в систему контроля и регулирования не решает полностью проблемы управления сложными системами [14]. Особенно это касается качества контроля термодинамических параметров энергетических и технологических установок. Включение человеческого фактора в систему управления приводит к низкой скорости и надежности регулирования, по мнению Писара П., Билковой Д., поскольку не соответствует контексту Индустрии 4.0 [15]. Несмотря на свою практичность, они более применимы в области дизайна и техники. Это сужает возможности применения таких методов при формировании ЭТЦ. Более конкретные прогнозы развития интеллектуальных ресурсов прогнозируют И. Оселедец [16] и Б. Джи [17]. Увеличивается число цифровых и сетевых компаний, таких как «Amazon». Они ожидают роста к 2035 году возможностей компьютерных систем и искусственного интеллекта в оценке их вычислительной мощности. Они превысят общий аналогичный потенциал биологической системы человека). Песков Д. утверждает, что росту высоких технологий и наукоемких инжиниринговых услуг в инновационной экосистеме в современных условиях РФ университеты типов 2.0 и 3.0 препятствуют, являясь драйверами/вызовами для развития промышленности [18]. При этом масштабы их трансформации в образовательно-научные комплексы 4.0 растут вместе с университетами, отличающимися высокой степенью глобализации образования и использованием новых образовательных методов с использованием методов Big Data. В настоящее время рядом исследователей признана необходимость использования обучающих цифровых симуляторов (двойников) виртуальными или реальными когнитивными методами для применения подхода Data Science для решения практических задач постиндустриальной экономики и энергетики [19,20].

В такой цифровой экономике необходимо использовать открытые образовательные платформы, основанные на больших базах данных [21]. Особенно они необходимы для анализа возможностей расширенного объединения ресурсов на основе организации ЭТК нового поколения при использовании органического топлива, солнечной энергии, низкопотенциальных источников теплоты, производства активного угля на базе тепловых электрических станций с включением объектов распределенной энергетики, других многоцелевых производств и участие в проектах такой трансформации научно-образовательных комплексов типа 4.0 [22,23]. Рассмотренные методы решают комплекс задач организации процессов наукоемкого развития с использованием интеграции диверсифицированных ресурсов. Однако, оценивая их общее соответствие концепции комбинирования методов для обеспечения эффективности 3-Э, можно отметить их недостаточную направленность на решение данных исследовательских задач.

В период 2014-2020 гг. произошло значительное увеличение количества публикаций о взаимосвязи новых бизнес-моделей и устойчивости развития в областях комбинирования методов и ресурсов диверсифицированного состава в условиях технологической сингулярности [24 ,25]. Сочетание организационных и технических методов в комплексах объектов рассматривается как необходимое условие обеспечения устойчивости долгосрочного развития. Так, Бриксер К., Исаак П., Суарес Д., Йогель Г. назвали это состояние «новой техноорганизационной парадигмой» [26]. Этот опыт распространяется на инновационные бизнес-модели в социологии и исследовательские возможности [27,28]. Такие исследователи, как Кайнелли Г., Де Марчи В., Грандинетти Р. [29], Халфалла М., Лакх Л. [30] и Чен Р., Ли Ю.Д., Ван Ч. [31] обосновывают роль знаний в диверсификации организационного воздействия по снижению издержек в промышленности для обеспечения конкурентных преимуществ. Брито Э., Паис Л., душ Сантос Н.Р., Фигейредо С. [32], Багис М. и др. [33] доказывают возрастающую важность новых компетенций при их внедрении в систему повышения качества управления.

Необходимость использования Интернета артефактов управления, например Интернета вещей и новой архитектуры для бизнес-модели, обосновывается Роча К., Нарцизо К.Ф., Джанотти Э. [34]. Асиф М. [35], Хипп А., Бинц К. [36] пишут о возможности включения новых инструментов в структуру методов управления качеством. Значимость наших предложений по инструментам Big Data и Data Science и их включению в циклическую модель интеграции научных и образовательных ресурсов и производства подтверждена исследованиями Сяо К.З., Шаня М.Ю., Сяо Х.П., Рао С. [37], Казалет, М., Стезано Ф. [38], Клегг Б. [39] и Ван, С., Лу, В., Хунг, С.В. [40].

Создание платформы планирования процессов совместного функционирования объектов гибридной экономики обусловлено необходимостью повышения ее 3-Е эффективности. Это следует из работ Ф. Цзэна, З. Би и др. [41]. Переход к этим инструментам планирования предполагает моделирование резких и эволюционных циклических переходных процессов [42]. Также необходимо координировать совместную работу различных источников энергии. По данным Лю Ц., Ву С., Лей Ю. и др., Лю Ю., Цзян К., Шэня Дж. и др. [42,43] Для регулирования традиционных и возобновляемых источников энергии необходимы особые условия. Такие возможности исследовали Z. Wang и др., [44] и Ян Юнпин, Дуань Лицян, Ду Сяозе и др. [45]. Ван Фэньюнь, Чжан Шуан [46] и Ян Юнпин, Дуань Лицян и Ду Сяозе и др. доказали потенциал повышения эффективности при создании условий для комплементарного сочетания ресурсов гибридной системы [47].

Анализ существующих систем автоматического управления позволяет сделать выводы о недостаточной степени их совершенства. Они характеризуются сравнительно низкой надежностью по причине отсутствия резервных каналов преобразования управляющих воздействий и средств автоматического диагностирования. Недостаточны возможности воздействия систем на параметры качества организационно-экономического, межмашинного и физического взаимодействия производителей и потребителей энергии и сопутствующих продуктов объектов гибридной энергетики. Это не позволяет радикально снизить расходы первичного топлива и

загрязнение окружающей среды в формируемом энерготехнологическом комплексе, что приводит к отсутствию карбонового следа в энергетике.

1.2. Степень разработанности проблемы создания мини-ТЭЦ с использованием низкопотенциальных источников энергии и солнечной энергии

В настоящее время в развивающихся странах без централизованного энергоснабжения получают распространение электростанции с двигателями внутреннего сгорания на самых различных видах топлива – дизельном, природном газе, биогазе. Использование биогаза целесообразно при наличии поблизости комплексов по его получению, а также небольшой установленной мощности мини-ТЭС. В настоящее время все большее развитие получают системы малой альтернативной энергетики, когда наряду с крупными энергоисточниками в единой системе функционируют мини-ТЭС с установленной мощностью от 1 МВт, рис.1. Кроме того, если рассматривать дополнительные возможности утилизации теплоты КПД энерготехнологических комплексов возрастает при соединении технологических схем предприятий и мини-ТЭС. Существуют предприятия – агрокомплексы, на которых происходит как выращивание растений и животных, так и переработка и хранение готовой продукции. Хранение продукции и работа персонала в условиях жаркого климата невозможны без применения систем холодоснабжения и кондиционирования. Задача создания необходимого холода сводится к соответствующему уменьшению энтальпии воздуха. С этой целью применяют несколько способов: использование расширительной машины, использование эффекта Джоуля – Томсона, который заключается в том, что в ходе дросселирования сжатого воздуха при определенных условиях происходит понижение его температуры.

К моменту проведения обзора известны способы генерации холода на основе тягодутьевых и компрессорных агрегатов, включающий линию нагрева и испарения хладагента при его прохождении через теплообменник. При этом охлаждаемый воздух поступает в помещения и обеспечивает приемлемые по нормам условия для работы персонала предприятия. О таких способах, включающих различные виды топлива, показано в работе авторов Fatih Sorgulu, Ibrahim Dincer [48].

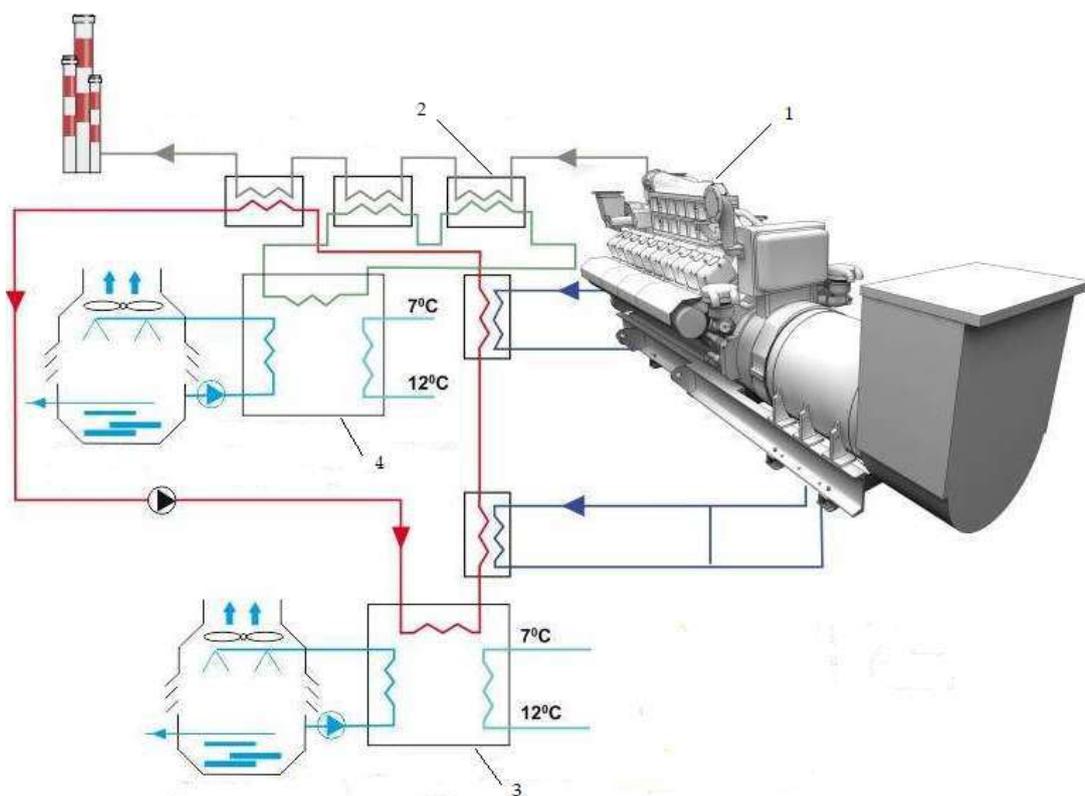


Рис. 1.1. Схема стандартной тригенерационной установки: 1 – газопоршневой агрегат, 2 – паровой котел-утилизатор, 3 – первая ступень АБХМ, 4 – вторая ступень АБХМ

О влиянии различных видов топлива, как органических стандартных, так и возобновляемых источников энергии на окружающую среду, показано в работе [49] авторов Canan Acar, Ibrahim Dincer. Влияние могут оказывать как парниковые газы, так и фреоны, химические компоненты абсорберов.

В самых последних разработках Chinmay Deheri, Saroj Kumar Acharya, Dharendra Nath Thatoi, Ambica Prasad Mohanty [50] предлагается использовать биогаз и водород в качестве основных и дополнительных компонентов горения.

Известны также установки с использованием природного газа [51]. Автор Ayse Fidan Altun приводит схему использования абсорбционных чиллеров совместно с газовой микротурбиной.

Еще более интересные виды топлива предлагают авторы Bhaskor J. Bora, Ujjwal K. Saha в своей работе [52].

Известен способ выработки электроэнергии для промышленных предприятий в установке, включающей энергетический генератор, теплоносителем в котором может быть низкокипящая жидкость. Пары жидкости подаются в турбоэлектроге-

нератор, где жидкость конденсируется и возвращается в тепловую схему [53]. Авторы A. Khaliq, R. Kumar, I. Dincer подчеркивают, что технология универсальна и применима для различных отраслей промышленности.

В работе [54] авторы Khaliq, A., and Kaushik, S. C. и в работе [55] авторы Oh, S. D., Pang, H. S., Kim, S. M., and Kwak, H. Y., как и в работе [53] показывают возможности когенерации и дальнейшего использования теплоты.

В работе [56] предприняты расчеты эксергетических потоков для установок по типу [53, 54, 55]. Авторы Khaliq, A., and Choudhary, K. Достаточно интересно подошли к решению проблемы.

В обзоре [57] авторов M.M. Aman, K.H. Solangi, M.S. Hossain, A. Badarudin, G.B. Jasmon, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, S.N Kazi показано, что в стандартном цикле могут использоваться отдельные компоненты солнечных электростанций.

Подобные обзору [57] литературные источники [58] и [59] автора Goswami, D. Y. подчеркивают важность использования солнечной энергии в комбинированных циклах.

Авторы Aqeel Ahmed Bazmi, Gholamreza Zahedi в обзоре [60] и авторы K. Hacatoglu, I. Dincer, M.A. Rosen в статье [61] показывают эффективность новых технологий и их влияние на снижение выбросов в атмосферу.

Известен способ утилизации теплоты дымовых газов на основе органического цикла Ренкина прямого нагрева [62], содержащий модуль органической турбины, которая работает на перегретом паре испаренной текучей среды. В этом способе также предлагается надстройка солнечными панелями.

Наиболее интересен способ использования солнечного излучения для нагрева низкокипящего теплоносителя параболическими зеркалами [51]. Авторы отмечают возможность применения способа для электрогенерации на промышленном предприятии, с энергетическим оборудованием в органическом цикле Ренкина установленной мощностью органической турбины 1 МВт. Недостаток способа – когенерация, без возможности применения отдельных систем холодоснабжения и горячего водоснабжения, что снижет термический КПД энергокомплекса.

Кроме того, известен похожий способ [52] комбинированной выработки электроэнергии, теплоты и холода в тригенерационном цикле работы гибридной тепловой электростанции для промышленных предприятий, включающем солнечные коллекторы, ветро- и микрогазотурбинную установки, абсорбционную холодильную машину или тепловой насос. Преимуществом такого комбинирования, безусловно, является снижение затрат на выработку электроэнергии и холода, ресурсосбережение органического топлива. Недостаток способа – повышенное энергопотребление из внешней электросети, тем самым снижается КПД всей гибридной тепловой электростанции.

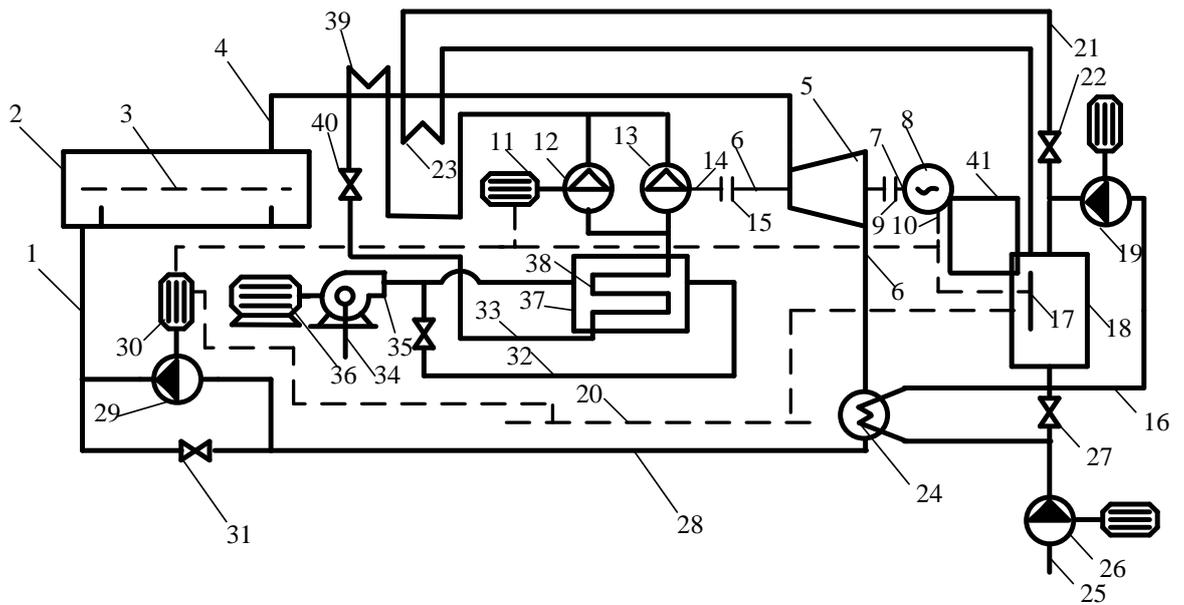
Наиболее близким аналогом является способ комбинированной выработки электроэнергии, теплоты и холода в тригенерационном цикле работы гибридной тепловой электростанции для промышленных предприятий, содержащий турбодетандер, конденсатор, испаритель и солнечный коллектор. Способ реализуется путем нагрева низкокипящего теплоносителя за счет высокой интенсивности солнечного излучения в солнечном коллекторе, направления пара низкокипящего теплоносителя в турбодетандер и преобразования потенциальной энергии пара в механическую энергию вращения вала турбодетандера и в электрическую энергию в присоединенном электрогенераторе [53, 54, 55]. Для решения поставленной задачи при осуществлении способа работы тригенерационной установки происходят следующие процессы. Нагрев низкокипящего теплоносителя за счет высокой интенсивности солнечного излучения в установленных по периметру производственного помещения трубных панелях. Затем подъем и сбор в установленный на верхней отметке помещения барабан влажного пара низкокипящего теплоносителя, отделение сепарирующими устройствами в барабане капель жидкости. Полученный насыщенный пар низкокипящего теплоносителя направляется в турбодетандер. В турбодетандере преобразуется потенциальная энергия пара в механическую энергию вращения вала турбодетандера и в электрическую энергию в присоединенном муфтой к валу электрогенераторе. После турбодетандера частично вскипает образовавшийся конденсат низкокипящего теплоносителя в испа-

рителе газовой теплообменника. В результате получается направляемый в производственное помещение охлажденный воздух за счет испарения паров хладагента в газоздушном теплообменнике системы холодоснабжения, нагрева воды электронагревателем за счет генерации электроэнергии турбодетандером.

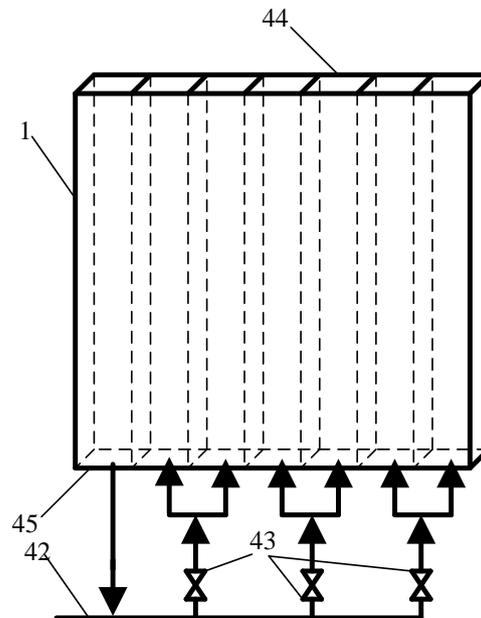
Отличительной особенностью разработки является то, что вал турбодетандера соединен с валом компрессора системы холодоснабжения помещения через муфту. При работе в дневное время избыток генерируемой электроэнергии направляется на собственные нужды производственного помещения. При работе в переходный период дня при снижении интенсивности солнечного излучения в работу частично включаются электроприводы вспомогательного компрессора и насоса рециркуляции низкокипящего теплоносителя. При работе в ночное время в условиях низкой интенсивности солнечного излучения электроприводы вспомогательного компрессора и насоса рециркуляции низкокипящего теплоносителя выводят на номинальный режим. Кроме того во всех режимах работы энергокомплекса охлаждение электрогенератора турбодетандера осуществляют низкокипящим теплоносителем, что позволяет использовать дополнительную теплоту на нагрев воды в производственном помещении.

1.3. Разработанный энергокомплекс тригенерационной установки с использованием солнечной энергии как предпосылка к созданию гибридного энергетического комплекса нового поколения с использованием органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников теплоты

Разработка поясняется схемой энергокомплекса, реализующего заявленный способ тригенерации, представленной на рис. 1.2а, и общим видом вертикального солнечного коллектора, являющегося неотъемлемой частью разработки, представленном на рис. 1.2б. Согласно рисунку 1.2 низкокипящий теплоноситель циркулирует в панельной системе трубок 1, работающей по принципу вертикального солнечного коллектора. Панели трубной системы 1 устанавливаются вдоль вертикальных стен производственного помещения. В дневное время теплоноситель поднимается вверх за счет разности плотностей.



а)



б)

Рис. 1.2. Разработанный энергокомплекс: а) схема работы тригенерационной установки, б) вертикальные трубы солнечного коллектора

В барабане 2, установленном на крыше здания, происходит отделение капель низкокипящего теплоносителя от пара в сепараторе 3. Образуется сухой насыщенный пар 4, который подается в турбодетандер 5. Вал 6 турбодетандера 5 соединен с валом 7 электрогенератора 8 через муфту 9. Электрогенератор вырабатывает электроэнергию (отвод электроэнергии показан условно пунктирной лини-

ей 10) на собственные нужды предприятия, в том числе на электропривод 11 вспомогательного компрессора 12. Основной компрессор 13 присоединен к валу 14 через муфту 15 с валом 6 турбодетандера 5 и, соответственно с валом 7 электрогенератора. Таким образом, для основного компрессора 13 приводом является турбодетандер 5, а вспомогательный компрессор 12 приводится в действие электроприводом 11, причем компрессоры могут работать как одновременно параллельно друг другу, так и отдельно, так как приводная мощность у них одинаковая.

Горячее водоснабжение (система горячего водоснабжения показана условной линией 16) осуществляется путем включения в работу электронагревателя 17, расположенного в резервуаре 18 горячей воды, циркулирующей в системе горячего водоснабжения 16 за счет работающего насоса 19 в дневное время от линии 10, в переходный период частично от линии 10, частично от внешней электрической сети 20, и в ночное время только от внешней электрической сети 20. Дополнительная линия 21 горячего водоснабжения включается в работу только в ночное время путем открытия клапана 22 и необходима для перегрева насыщенного пара низкокипящего теплоносителя в ночное время в теплообменнике 23. После турбодетандера 5 пар конденсируется в конденсаторе 24 за счет нагрева холодной воды 25, нагнетаемой насосом 26. Регулирование температуры горячей воды осуществляется клапаном 27. Охлажденный низкокипящий теплоноситель возвращается вновь в цикл по трубопроводу 28 в виде конденсата. Повышение давления конденсата происходит в насосе рециркуляции низкокипящего теплоносителя 29 (далее насос 29), а регулирование давления конденсата осуществляется электроприводом 30 насоса 29 путем изменения частоты вращения рабочих лопастей, а также количественно путем изменения степени открытия клапана 31. В дневное время и переходный период насос 29 работает частично за счет линии 10 и частично от внешней электросети 20, в ночное время только от внешней электросети 20. Схема промышленного кондиционирования состоит из двух контуров: контура охлаждаемого воздуха 32 и контура нагреваемого хладагента 33. Атмосферный воздух 34 нагнетается вентилятором 35 с электроприводом 36 и подается в испаритель-

теплообменник 37 (далее испаритель 37). Испаритель 37 состоит из трубок 38, в которых нагревается хладагент. Повышение давления хладагента происходит в компрессорах 12 и 13. Причем в дневное время работает основной компрессор 13, в переходный период дня работают оба компрессора 12 и 13 параллельно, а в ночное время работает вспомогательный компрессор 12. После компрессора сжатый пар хладагента направляется через редукционный конденсатор 39, который представляет собой теплообменник-регенератор хладагентов внешнего контура по выработке электроэнергии (органический цикл Ренкина) и внутреннего контура холодоснабжения помещения. После конденсатора давление хладагента уменьшается в редукционном клапане 40 и хладагент в жидком состоянии направляется в испаритель 37. Взаимодействие двух контуров возможно только при условии, что давление и температура хладагента во внутреннем контуре холодоснабжения выше, чем во внешнем контуре по выработке электроэнергии. Практические диапазоны работы энергокомплекса следующие: давление после компрессоров 12 и 13 во внутреннем контуре холодоснабжения не менее 1,6 МПа, температура в этой же точке цикла не менее 40°C (параметры приведены для хладагента R134a). При отклонении этих параметров в большую сторону на 10-15% становится невозможной работа конденсатора 40, а при отклонении этих параметров в меньшую сторону на те же 10-15% резко скачкообразно снижается эффективность внутреннего контура холодоснабжения. Также неотъемлемая часть изобретения – охлаждение электрогенератора турбодетандера низкокипящим теплоносителем, что позволяет использовать дополнительную теплоту на нагрев воды в производственном помещении. Линия охлаждения 41 показана на рисунке 1.2 схематично.

Для решения поставленной задачи рассматриваются два варианта работы установки: в дневное и ночное время. В дневное время при высокой интенсивности солнечного излучения низкокипящий теплоноситель, согласно законам теплообмена при свободной конвекции нагревается и при использовании вертикальных труб поднимается вверх за счет разности плотностей жидкости и пара. Вертикальные трубы выполняются с плавниками и собираются в панели, рисунок 1.2.

Форма проходного сечения и его размер зависят от типа хладагента и его массового расхода, интенсивности солнечного излучения в районе применения энергокомплекса. Высота труб зависит от конструктивного исполнения панельной системы трубок 1. В идеальном случае в горизонтальной плоскости панели устанавливаются вертикально по периметру производственного помещения, а высота панелей совпадает с высотой помещения. В нижних и верхних точках панелей установлены сборные коллекторы жидкости и насыщенного влажного пара соответственно (на рисунке 1.2 показан нижний сборный коллектор 42, группа регулирующих клапанов 43 и сами вертикальные солнечные коллекторы 44, верхний сборный коллектор не показан). Из верхних сборных коллекторов насыщенный влажный пар поднимается по перепускным трубам (на рисунке 1.2 не показаны) в барабан 2, установленный на верхней отметке помещения. Барабан 2 оснащен сепаратором 3 жалюзийного типа, в котором происходит отделение влаги от пара. Избыток влаги возвращается в нижние сборные коллекторы по отдельной вертикальной трубе 45 (вертикальная труба 45 изолирована от солнечного излучения).

1.4. Использование солнечной энергии в гибридных энергетических комплексах с органическим циклом Ренкина и низкопотенциальными источниками энергии

Рассмотрим энергетические комплексы [64-68], сочетающие тепловые насосы и использование солнечной энергии. В научной работе [69] авторы разработали систему на основе солнечной энергии для производства пресной воды и электроэнергии. Эта система состоит из солнечного модуля, цикла Ренкина на солнечной энергии, подсистемы хранения тепла и дистилляционного устройства. Морская вода, используемая для опреснения, нагревается насыщенной пароводяной смесью от паровой турбины. Использование отходящей жидкости в качестве источника тепла для перегонного устройства исключает необходимость во внешнем теплообменнике для конденсации. Авторы [69] рассчитали энергетический и эксергетический КПД, мощности по производству электроэнергии и пресной воды для

каждого элемента системы. Кроме того, было проведено параметрическое исследование с учетом условий окружающей среды.

В исследовательской работе [70] авторы проанализировали энергетический комплекс на четыре модуля, включающий солнечный гелиостат и приемник, аккумулирующее устройство, цикл Ренкина и систему опреснения. Парогенератор передает тепло в цикл Ренкина. Авторы исследования [71] приводят уравнения баланса для каждого элемента в отдельности и для всей системы в целом. Разработана математическая модель утилизации отходящего тепла цикла Ренкина. Однако авторы делают ряд предположений: химические реакции отсутствуют, потенциальная и кинетическая энергия практически не изменяются, энергетические затраты на насос пренебрежимо малы, за исключением работы в цикле Ренкина, а тепловые потери происходят только за счет поверхности резервуара с расплавленной солью и солнечного коллектора.

В [72] рассчитана скорость теплопотерь солнечного приемника. В исследовательской работе [73] после расчета разницы температур авторы проанализировали потери тепла через резервуар с расплавленной солью. Авторы работы [73] разработали математическую модель аккумуляции тепла в резервуаре. Это достаточно сложная модель, так как объем солевого расплава внутри резервуара постоянно меняется. В [74] построена математическая модель процесса опреснения морской воды. В работе [75] рассматривается энергетическая и эксергетическая эффективность системы в целом. Этого можно достичь, используя основные входы и выходы. Пока полезными выходами системы являются пресная вода и электричество, а единственным источником энергии является солнечная энергия.

Подчеркнем вклад отдельных авторов по тематике солнечной энергетики, работы которых связаны, в том числе, с численным моделированием [76-100].

1.5. Актуальность методологии создания энергокомплексов, работающих на органическом топливе, в составе тепловых электрических станций

Пылеугольный котел необходим для выработки пара или горячей воды. В этом устройстве происходят процессы горения угольных частиц. Теплосодержание ка-

менных углей достаточно велико, выше 24 МДж/кг. Однако, при бесперебойной выработке теплоты определяющим фактором является управление структурой факела, снижением риска возникновения зон теплонапряжения с высокой температурой или объемной плотностью теплового потока. Температуру необходимо снижать перед выходным окном топочной камеры. Содержание золы в угольной пыли в дымовых газах является причиной быстрого абразивного износа поверхностей нагрева, но не стоит забывать о дополнительной составляющей радиационного теплообмена в запыленных потоках. Нормативные документы, существующие на данный момент в РФ, предполагают тепловой расчет котла способом от частного к общему, то есть рассчитываются отдельные тепловые балансы по поверхностям нагрева, которые сводятся в единый баланс по котлу. При этом проверка осуществляется достаточно традиционно – по заданной заранее температуре уходящих газов за котлом. Такой вариант проверки подразумевает несколько итераций расчета, пока баланс не сойдется на 0,5%. Но самое главное, что нормативные документы содержат большое количество эмпирических и полуэмпирических данных, полученных на физических моделях и натуральных агрегатах. В тоже время для котлов с цепной решеткой подобные опыты практически не проводились, поскольку измерение стандартных отслеживаемых параметров для запыленного потока затруднено. Тем более не проводились измерения, даже приблизительные, для котлов, работающих в режиме производства активного угля. Таким образом, возникает научная задача – разработка инверсивной методологии, действующей в противовес существующей, – от общего к частному с построением отдельных моделей поведения элементов котла как части энерготехнологического комплекса. Кроме того, в данной методологии, должно найти отражение использование систем утилизации теплоты, как меры по резервированию источников теплоты для потребителей и повышению КПД энерготехнологического комплекса. Также требуется разработать прогнозную модель поведения котла в режимах горения-охлаждения, работающую на основе сбора данных за определенный временной промежуток – сигналов, приходящих из точек стока энерго-

технологического комплекса и котла в частности. Подобные методы управления известны в электротехнике, в частности, векторное управление электроприводами, когда помимо стандартных параметров – напряжения и тока, контролируются частота, нагрев металла и так далее. Сигналы создают векторное поле, на участках этого поля само устройство будет работать по-разному. Такую же систему управления возможно разработать и для энерготехнологических комплексов в структуре промышленных предприятий, например, для агрегатов по производству активированных углей. В настоящее время проблема экологии наиболее остро возникает на промышленных предприятиях, расположенных в пределах густонаселенных городов. В этом случае руководство предприятия вправе находится в точке экономичности и экологичности производства. Действующее законодательство РФ в области экологии и интересы предприятия начинают конфликтовать. Здесь и необходимо решить научную задачу промышленного производства, что возможно только при разработке новой инверсионной стоковой методологии относительно режимов горения-охлаждения котла с цепной решеткой, работающего на активация угля, либо на его полное сжигание. Современные системы управления технологическими процессами, особенно связанные с энергетикой, подразумевают наличие цифровых двойников отдельных устройств и агрегатов, входящих в энерготехнологический комплекс предприятия в целом. Система позволяет управлять как отдельными устройствами, так и производительностью энергокомплекса. В Челябинской области на передовых позициях находится Челябинская ТЭЦ-4.

Работа угольных котлов со слоевым сжиганием и цепной решеткой основана на сжигании кускового, дробленого и частично фракционированной угольной пыли в камерах сгорания. В процессе сжигания образуются высокотемпературные газообразные продукты сгорания, или дымовые газы. Теплота полученных высокоэнтальпийных продуктов расходуется для получения горячей воды и пара. При этом процессы теплообмена сопряжены с процессами газодинамики.

Ранее широкое распространение получила факельная технология горения угольной пыли, появление которой было связано с необходимостью повышения

единичной мощности основного оборудования [101,102]. Для организации факела в объем камеры сгорания котла вводят потоки топлива и окислителя с регулируемым расходом каждого из реагентов. Ввод потоков осуществляют через специальные устройства, получившие название «горелки», которые в зависимости от конструктивного замысла разработчиков могут размещаться на стенах, в поду, и в потолочном перекрытии [100–106].

Сжигание на ТЭС большого количества твердого топлива связано с разветвленной системой его железнодорожных поставок и складированием, подачей на котлы и пылеприготовлением. Любая технология сжигания твердого топлива предусматривает установку оборудования золошлакоудаления, организацию отвалов. Разнообразие свойств твердого топлива породило большое количество топочных конструкций, систем топливоподачи и пылеприготовления [100–111]. Большинство пылеугольных топок можно разделить на устройства факельного сжигания топлива с расплавлением зольного остатка и без его расплавления. В зависимости от этого в топках организуют жидкое и твердое шлакоудаление (рис. 1.3).

Достаточно распространены топки со слоевым сжиганием и колосниковыми решетками. Топливо подается на решетку и движется в слое в процессе горения.

Принципиальная схема топки со слоевым сжиганием и колосниковой решеткой приведена на рис. 1.4. Основные элементы топки – полотно 1, состоящее из цепей с колосниками, движущихся при помощи звездочек 2. Скорость движения топлива в слое порядка 2...16 м/ч.

Подача топлива – из загрузочного ящика 3. Высота слоя топлива настраивается шибером 4. Между зазорами в слой подается воздух. Далее используется шлакосниматель 5. Шлак удаляется в бункер 6.

Аналогичные по принципу действия топки для резкоотличных топлив – антрацита и торфа приведены на рис. 1.5.

Холодные воронки применяются для сбора золы в топках с твердым шлакоудалением. В таких топках горелочные устройства устанавливаются на вертикальных стенах.

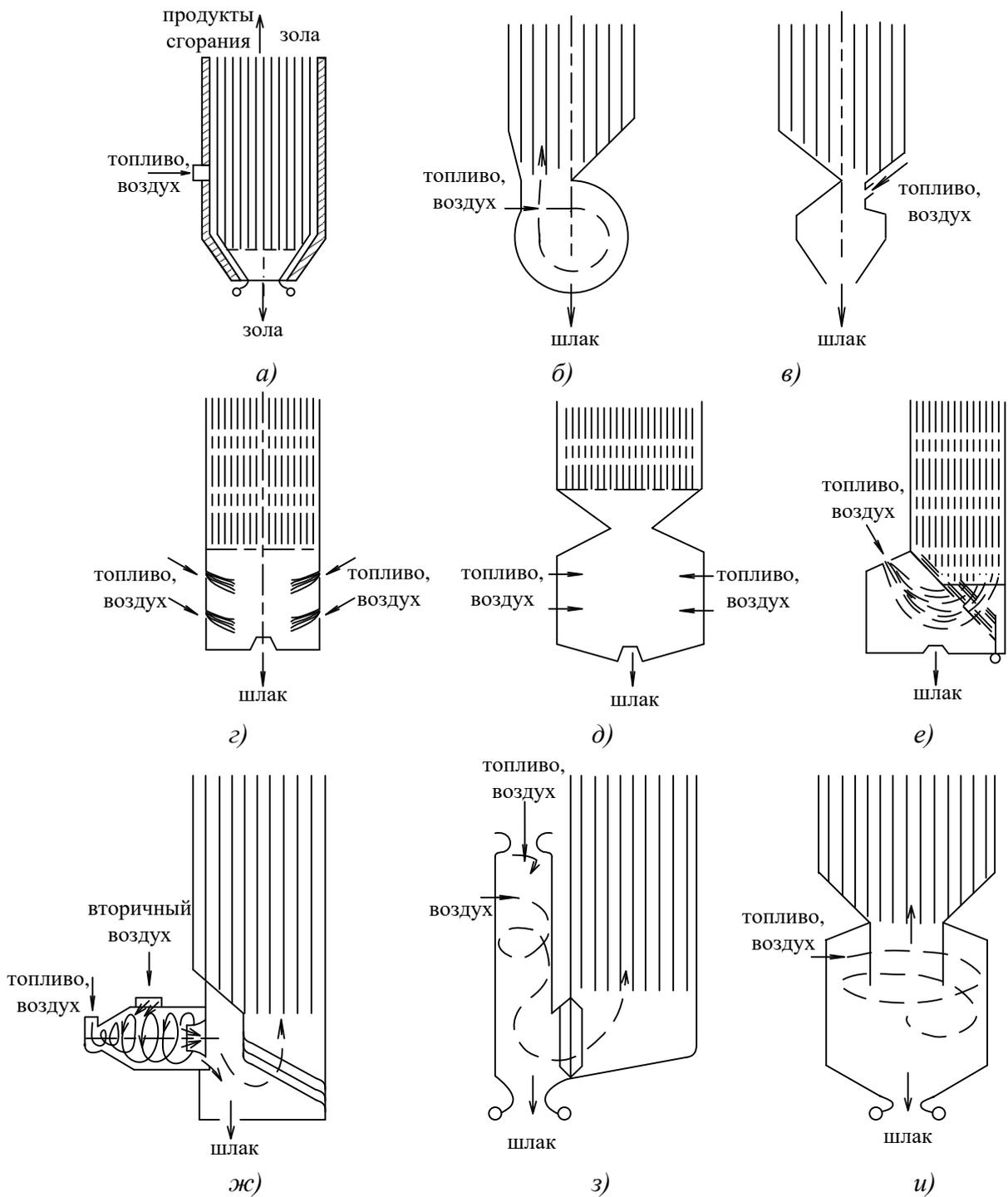


Рис. 1.3. Схемы пылеугольных факельных топок [106, 111]: а – с твердым шлакоудалением; б, в – вихревые топки с пересекающимися струями; г, д, е – с жидким шлакоудалением; ж, з, и – циклонные

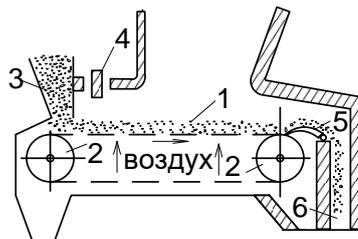


Рис. 1.4. Принципиальная схема топки с цепной решеткой [102] (обозначения по тексту)

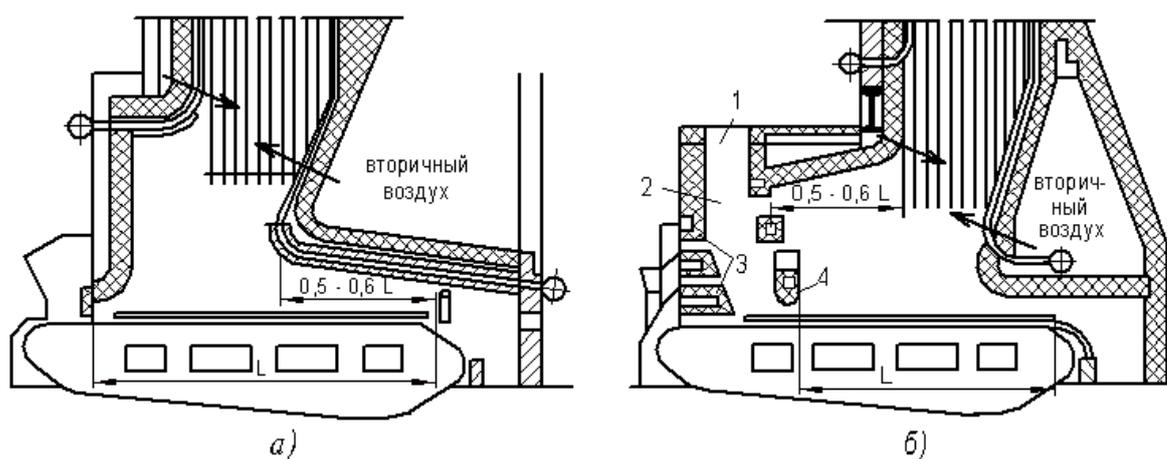


Рис. 1.5. Схемы топок с цепной решеткой: *а* – для антрацита; *б* – для торфа [102]

Однокамерные пылеугольные топки с жидким и твердым шлакоудалением и с настенным размещением горелок могут отличаться схемами компоновки и типами горелочных устройств.

Специальных топок для комбинированного сжигания угольной пыли и производства активного угля не существует. На пылеугольных котлах, как правило, с однокамерными топками либо меняют конструкцию, организующую подачу и сжигание угольной пыли.

Появление топок с жидким шлакоудалением, представленных на рис. 1.3, было мотивировано как предрасположенностью частиц породы многих видов твердого топлива к расплавлению в факеле, так и возможностью использования антрацита в качестве топлива [109]. Опыт внедрения и эксплуатации этих устройств показал, что из нижних частей топок удаляется не более 20...30 % топливной породы. Остальная зола выносится с отводимыми продуктами сгорания. В топках с твердым шлакоудалением из холодной воронки выводится 5...10 % всей массы твердотопливной породы в виде шлаковых конгломератов. Технологии сжигания топлива с низким выходом летучих в топках с жидким шлакоудалением активно развивались и совершенствовались [109].

Для сжигания топлив с высоким выходом летучих ($V^r \geq 25...28\%$) разработчики новых проектов ТЭС уже в 70–80 гг. прошлого столетия стали отдавать предпочтение топкам с твердым шлакоудалением, которые имели пониженные значе-

ния концентрации NO_x в продуктах сгорания, менее сложную технологию вывода шлака, и более эффективный теплоотвод от факела к экранам.

1.6. Камеры сгорания энергетических котлов тепловых электрических станций для перспективных энергокомплексов активации угля

В основе технической и учебной классификации камер сгорания котлов, лежит их разделение по виду сжигаемого топлива.

Камеры сгорания – это закрытые ограждением устройства, по периметру которых находятся экранные трубы. По своим конструктивным особенностям камеры сгорания различают по способу подвода реагентов и исходного материала.

Классификация пылеугольных котлов осложняется также наличием большого количества угольных котлов иностранного производства, которые в последнее время активно закупаются странами СНГ. Страны-производители котлов новых конструкций – КНР, Индия, США. Автор учел все эти особенности котлов и представил на схеме рис.1.3 основные типы камер сгорания котлов, которые используются в настоящее время в РФ и СНГ.

Для целей получения активного угля предлагается использовать имеющиеся у предприятий, добывающих уголь, или его перерабатывающих, стандартные схемы камер сгорания, рис.1.6.

На рис. 1.6 покажем стандартную схему деления камеры сгорания на композиционные части. Здесь видно, что зона горения разбита на две части – начальный участок и участок с условно постоянными параметрами.

Деление зоны горения по рис.1.6 необходимо согласно нормативной методике для определения температур продуктов сгорания в определенных сечениях камеры сгорания и газоходах котла, входящего в энерготехнологический комплекс.

Тепловой расчет котлов проводят по разным причинам, в зависимости от цели расчета – поверочный, компоновочный, проектировочный.

Поверочный расчет проводят при изменении начальных и граничных условий работы котла. Эффективность работы падает при изменении расхода, состава, температуры. В этом случае необходимо проводить поверочный расчет, взяв за

основу новые начальные и граничные параметры. В результате получают расхождение в долевом или процентном соотношении от стандартных величин теплового баланса, причем проводится оценка температуры уходящих газов и тепловосприимчивости поверхностей нагрева при неизменной величине температуры и давления перегретого пара.

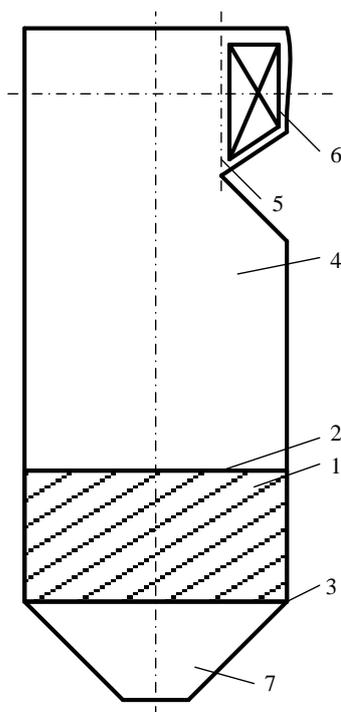


Рис. 1.6. Схема камеры сгорания котла [105]: 1 – основная зона горения; 2 – выходное окно основной зоны горения; 3 – нижнее зеркало горения; 4 – участок охлаждения; 5 – окно выхода продуктов сгорания; 6 – поверхность пароперегревателя (если присутствует по конструкции); 7 – нижняя часть камеры сгорания котла (условно)

Компоновочный расчет проводят при длительной работе котла на нерасчетных параметрах с целью вывода в ремонт и дальнейшей реконструкции поверхностей нагрева. Главный изменяемый параметр – конструкция и площадь поверхностей нагрева, они могут быть увеличены или уменьшены в зависимости от цели проводимой реконструкции. Проектировочный расчет проводят на стадии разработки новых конструкций котлов, при этом корректируется не только конструкция, но компоновка тепловой схемы котла. Таким образом, главным и определяющим параметром при проектировании котла является проектировочный расчет, который должен проводиться для оптимизации отдельных элементов и агрегата в целом.

Пылеугольные котлы используют горелки или загрузку слоем угля, подачу воздуха через сопла, исследования в области горения топлива проводились в разные временные периоды авторами и коллективами авторов специализированных институтов и предприятий [106–114, 119–122, 126–198, 201–223, 308–311].

Для эксплуатационных котельных агрегатов оказывается важной проблемой – прогнозирование температурных перепадов по объему топки и, как следствие, теплового напряжения.

Интересны работы [124, 125, 130, 195], в них исследуются математические модели, методики расчета и численного моделирования.

Отдельно следует отметить достижения МГТУ, ЮУрГУ в области разработок новых котлов различного назначения и новых технологий горения [201–280, 344–350] и научную школу СГТУ [351–353].

Исследования газодинамических процессов с оценкой влияния условий ввода реагентных потоков на характеристики факела, проводят как на уменьшенных упрощенных термогазодинамических и математических моделях [114, 141], так и на промышленных объектах [241]. При моделировании реализуют условия геометрического, кинематического, динамического и теплового подобия входных, основных и выходных участков камеры [340]. Наиболее достоверны результаты, получаемые на промышленных объектах [340], где в полной мере автоматически реализуются все отмеченные выше условия.

При отработке новых технологий сжигания топлива и конфигураций камер сгорания любые модельные исследования служат лишь исходной базой при создании промышленного образца [115–118]; при этом после обязательных натурных наладочных испытаний и конструкторских доработок в используемые математические модели вносят корректирующие поправки [354–384]. При отработке новых технологий с существующими габаритами камеры сжигания ориентируются на данные, полученные непосредственно на промышленном объекте. Основным недостатком таких исследований – отсутствие возможности подробного зондирования факела из-за больших габаритов камер сгорания и стесненности внутрицехо-

вого пространства. Здесь минимизируется количество измерений не только второстепенных, но и основных параметров в выделяемых представительных зонах и участках факела. При проведении промышленных испытаний осуществляют зондирование факела в выделяемых и фиксируемых представительных зонах, участках, точках, каждая из которых обобщает серию измерений при минимальных транспортных погрешностях и необходимой точности вторичных приборов. При построении графических зависимостей используют адекватную к условиям камеры сгорания методику обработки результатов и обычно применяют метод наименьших квадратов. Известны методы конечных и разделенных разностей, интерполяция многочленом Ньютона, сплайнами [354]. По организации измерений в топках и газоходах ОРГРЭС разработаны специальные рекомендации, действующие на территории РФ [154, 355]. Недостаток информации о характеристиках факела обычно компенсируют результатами газодинамического моделирования – вариациями температурных и скоростных полей, которые получают при подробном зондировании уменьшенных моделей камер сгорания и газоходов в зависимости от схем ввода реагентных потоков [141, 153, 202]. Накапливаемая информация о влиянии новых условий ввода реагентов на характеристики факела заносится в виде корректирующих поправок в расчетные математические модели газодинамических процессов [227].

С конца 20 – начала 21 веков возрастает интерес к разработанным на основе исследований [106–114, 119–122, 126–198, 201–223] математическим моделям процесса горения [115–118, 124, 125, 199, 200, 281–307, 329–339]; составление последних сложно даже для специалиста в области горения, систем сжигания топлива, а также экономически затратно для предприятий, находящихся во владении у частных лиц. В плане внедрения ЭВМ в практику расчета теплообмена в пылеугольных котлах следует отметить широко применяемые во всем мире интегрированные пакеты программ, в основе которых лежат разработки Д.Б. Сполдинга и С.В. Патанкара [330]. Первая такая программа, разработанная фирмой CHAM носила название PHOENICS [329–331], за ней последовали FLUENT [330, 332],

FIDAP, STAR-CD и FLOW 3D, созданные другими компаниями; в настоящее время крупнейшие из этих компаний объединились в одну американскую корпорацию ANSYS Inc [330, 333].

Так выполненные по программе FLUENT расчеты гидродинамики, теплообмена и горения позволили авторам работы [329] определить температурное поле и распределение скорости газовой среды в горизонтальных сечениях. Специалистами [329] обнаружено, что установка в приосевой области большой поверхности теплообмена и интенсификация теплообмена снижают температурный уровень газов. При этом, несмотря на низкие температуры, обеспечиваются устойчивое воспламенение и экономичное выгорание топлива. Результаты расчета достаточно надежно подтверждаются проектными параметрами и результатами опытной эксплуатации [334]. В другой работе математическое моделирование газодинамических процессов с применением пакета ANSYS рассматривалось в качестве основы НИ-ТЕСН-проектирования устройств [335]. В качестве примера разработки подобных программ в России следует отметить пакет прикладных программ FIRE 3D, разработанного в Томском политехническом университете [336]. Компьютерное моделирование позволило сравнить три варианта реализации процессов горения. Исследовались схема встречно-смещенных струй (топка МЭИ), схема ступенчатого сжигания (схема ВТИ) и схема низкотемпературного вихря (НТВ); применение пакета FIRE 3D позволило многократно снизить затраты времени и средств на выбор оптимума.

В работах ЮУрГУ–УралВТИ–МЭИ отмечается связь работающих горелок и полей температуры в выходных сечениях, рекомендованы схемы включения горелок, подачи реагентных потоков, обеспечивающих минимизацию отклонений местоположений и величин максимальной температуры факела [120].

Модель хотя и ограничена конкретным примером топки с фронтальной компоновкой горелок, но при введении дополнительных граничных условий может быть использована и для других случаев организации газодинамики. Расчет не-

равномерности может быть использован в качестве дополнительного к поверочному или конструкционному расчетам теплообмена.

Негативное влияние неравномерности тепловой структуры потока дымовых газов на тепловосприятие конвективных теплообменников в газоходах котлов исследовали сотрудники МЭИ В.А. Двойнишников, В.П. Князьков, Е.С. Чубенко [142]. В тепловых расчетах новых агрегатов предлагается учитывать снижение тепловосприятия рабочей средой, вызываемое неравномерностью скорости и температуры газовых потоков.

1.6.1 Специфика использования пылеугольных котлов для активации угля

Активный уголь – сорбент для очистки промышленных стоков, может использоваться также и в области энергетики, например, на тепловых электростанциях.

Производство активного угля на данный момент сводится к обжигу или выдержке в автоклавах. Предлагается объединить систему производства активного угля и ТЭС (котельную) в единый энергокомплекс. Для этого требуется использовать котельное оборудование в качестве не только агрегатов для выработки теплоты, но и активации угля. Важным условием будет близость предприятий по добыче угля и его переработке. Также предлагается фракционировать уголь и его пыли по составу и подавать в энергокомплекс в модернизированный котельный агрегат для выделения влаги и летучих. Установка показана на рис. 1.7.

Ранее было показано в работах [113, 254] процесс горения разбивается на периоды, соответствующие определенным химическим реакциям.

Излишняя влага и летучие выходят спустя время, с:

$$\tau_{влi} = k_{вл} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} \cdot T_{г}^{-4} \cdot \delta_i^{0,8} \quad (1.1)$$

Излишняя влага и летучие выгорают спустя время, с:

$$\tau_{гi} = k_{гi} \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot \delta_i \quad (1.2)$$

Коксовый остаток выгорает спустя, с:

$$\tau_{вкi} = k_{вк} \cdot 1,12 \cdot 10^{10} \cdot \rho_y \cdot \delta_i^{1,2} \cdot T_{г}^{-3} \cdot (21/O_2)^n \quad (1.3)$$

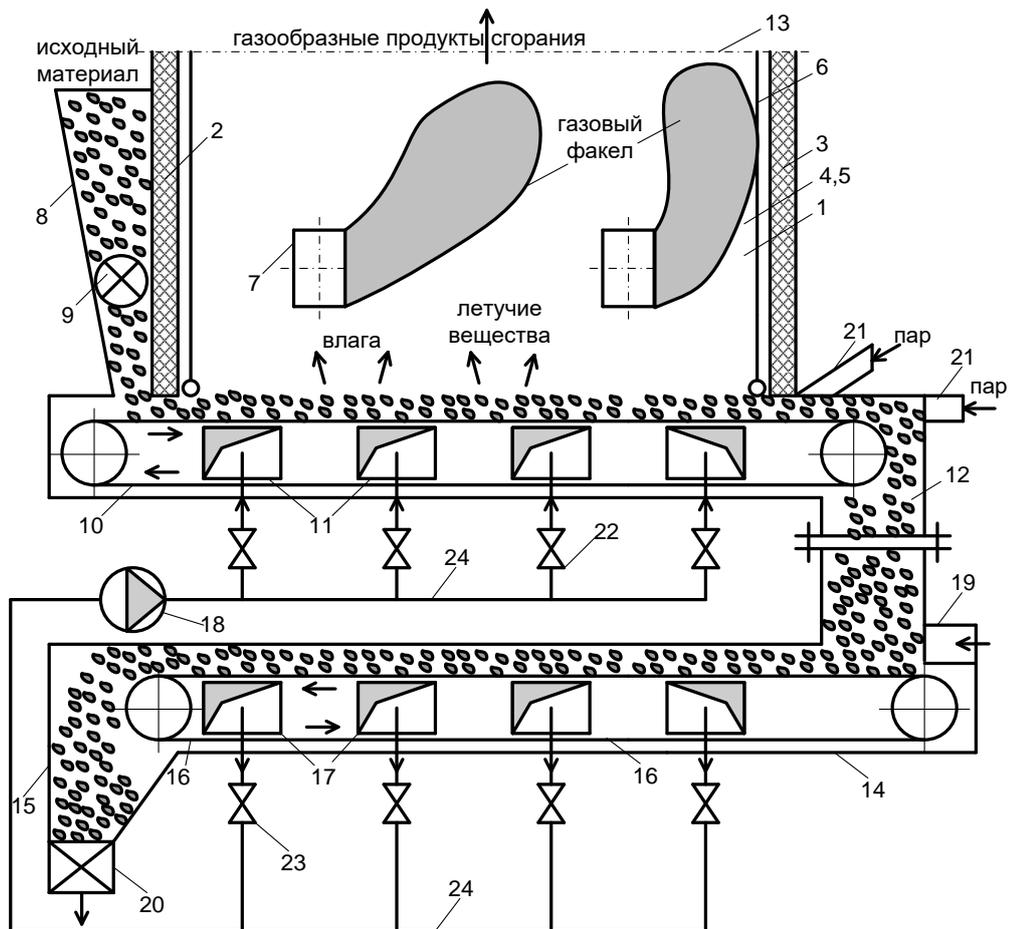


Рис.1.7. Модернизированная топка для активации угля (слоевая): 1 – топка, 2, 3, 4, 5 – стены, 6 – экраны, 7 – газогорелочные устройства, 8 – ящик или бункер для подачи исходного материала, 9 – регулятор подачи, 10 – решетка, 11 – узлы ввода смеси, 12 – вывод материала, 13 – окно топки, 14, 15 – системы охлаждения, 16 – решетка, 17 – вывод дымовых газов, 18 – вентилятор, 19 – смесь дымовых газов и воздуха, 20 – регулятор готового продукта, 21 – паровое дутье, 22, 23 – регулирование дымовых газов, 24 – газовые каналы.

Приближенные зависимости были получены автором ранее и использовались для расчета процессов горения твердого топлива:

$$\tau_{\text{вл}i} \approx \tau_{\text{вл}}^{\text{max}} \cdot (\delta_i / \delta^{\text{max}})^{0,8}, \quad (1.4)$$

$$\tau_{\text{вг}i} \approx \tau_{\text{вг}}^{\text{max}} \cdot (\delta_i / \delta^{\text{max}}), \quad (1.5)$$

$$\tau_{\text{вк}i} \approx \tau_{\text{вк}}^{\text{max}} \cdot (\delta_i / \delta^{\text{max}})^{1,2}. \quad (1.6)$$

Независимо от вида используемого топлива исследователи выделяют три основных способа организации окислительных реакций с выделением теплоты для использования на промышленных объектах: горение однородной реагентной сме-

си; диффузионное горение при отдельном вводе реагентов; горение с недостатком окислителя при последующем дожигании продуктов сгорания.

В полной мере горение первого и третьего типов сегодня реализуется в горелках заводов – изготовителей котлов и топочной техники [354-384]. Диффузионное горение в чистом виде на промышленных объектах практически не используется, а вот его комбинация с организацией постоянного притока окислителя в различных видах была использована в разработках кафедры промышленной теплоэнергетики ЮУрГУ и изложена автором в настоящей диссертации [385-455].

1.7. Составление предварительных принципиальных схем тепловой электростанции с надстройками по использованию солнечной энергии, низкпотенциальных источников энергии и по производству активного угля

На основе разработанной автором схемы согласно рисунку 1.2 необходимо составить принципиальную схему тепловой электростанции с надстройками по использованию солнечной энергии, низкпотенциальных источников энергии и по производству активного угля.

На рисунке 1.8 выявлены основные три подсистемы, а именно, 10 – подсистема фотоэлектрических панелей (солнечная электростанция), 11 – система утилизации теплоты за энергокомплексом, 12 – системы сжигания органического топлива и активации угля.

Выявленные подсистемы включают следующее оборудование: 1 – насос, 2 – тепловой насос, 3 – солнечный коллектор, 4 – устройство охлаждения активного угля, 5 – камера активации угля, 6 – энергетический котельный агрегат, 7 – паротурбоэлектрогенератор, 8 – солнечная электростанция, 9 – линия электропередач.

Отметим, что схема является предварительной с точки зрения проведения системного анализа, в следующих главах работы будут рассмотрены три подсистемы более подробно, а также составлена общая схема гибридного энергокомплекса нового поколения.

Далее, составим предварительную принципиальную электрическую схему на рисунке 1.9.

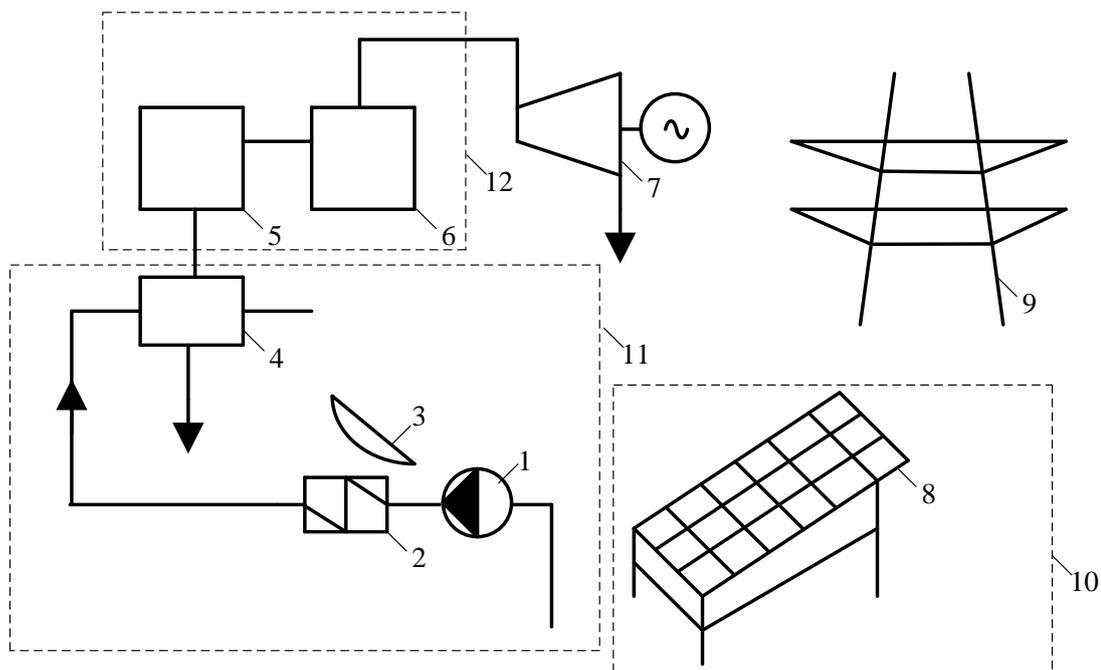


Рис. 1.8. Новая технологическая схема гибридного энергетического комплекса: 1 – насос, 2 – тепловой насос, 3 – солнечный концентратор/коллектор, 4 – устройство охлаждения активного угля, 5 – камера активации угля, 6 – энергетический котельный агрегат, 7 – паротурбоэлектрогенератор, 8 – солнечная электростанция, 9 – линия электропередач, 10, 11, 12 – выявленные подсистемы гибридного энергетического комплекса, а именно, 10 – подсистема фотоэлектрических панелей (солнечная электростанция), 11 – система утилизации теплоты за энергокомплексом, 12 – системы сжигания органического топлива и активации угля

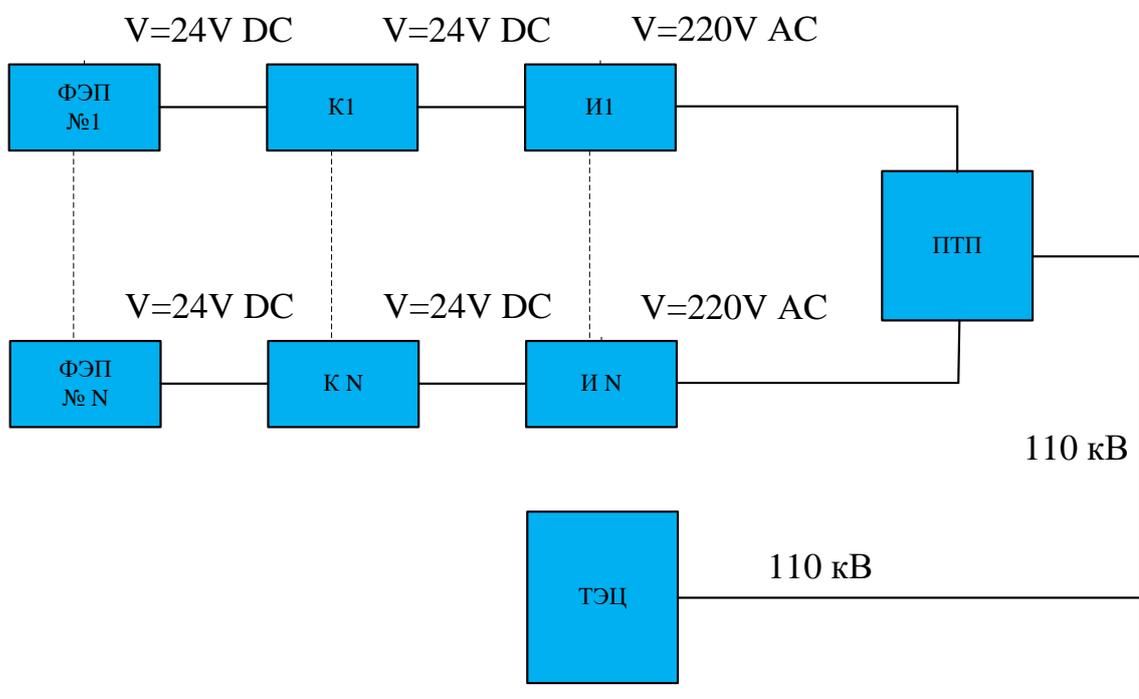


Рис. 1.9. Предварительная принципиальная электрическая схема гибридной электростанции: К – контроллер, И – инвертор, ПТП – повышающая трансформаторная подстанция, ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

Выводы по главе 1

1. В главе 1 выявлены степень научной и практической разработанности проблемы исследования, а именно, проведены: идентификация предмета и объектов изучения в соответствии с ключевыми словами; определение базы данных и ее ограничений; установление критериев оценки источников; количественная оценка качественных характеристик (сильных и слабых сторон научных предложений; представление результатов с выводами о степени разработанности проблемы.

2. Выявлены наиболее эффективные способы комбинированной выработки электроэнергии, теплоты и холода в тригенерационном цикле работы гибридной тепловой электростанции для промышленных предприятий, включающем солнечные коллекторы, ветро- и микрогазотурбинную установки, абсорбционную холодильную машину или тепловой насос. Преимуществом такого комбинирования, безусловно, является снижение затрат на выработку электроэнергии и холода, ресурсосбережение органического топлива.

3. Выявлено, что не существует методологии проектирования гибридных энергокомплексов нового поколения на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии. Кроме того, повышение эффективности использования угля как сырья для получения различных компонентов возможно при разработке новой методологии, объединяющей все участки котла для активации угля в составе энергокомплекса.

4. Необходим новый методологический подход к использованию солнечной энергии и органического топлива для производства электрической и тепловой энергии, активного угля при минимизации карбонового следа на базе тепловых электрических станций.

5. Составлена предварительная принципиальная схемы тепловой электростанции с надстройками по использованию солнечной энергии, низкопотенциальных источников энергии и по производству активного угля.

6. Составлена предварительная принципиальная электрическая схема гибридной электростанции.

2. Методологические основы моделирования процессов объединения генерации гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергии энерготехнологический комплекс

2.1. Необходимость создания методологии проектирования гибридных энергокомплексов и энерготехнологических систем

Актуальность совершенствования оценки и регулирования эффективности процессов комбинирования гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергии возрастает в условиях комбинирования источников возобновляемой и традиционной энергетики. Гибридный состав ее объектов усложняет цикл процессов измерения и аудита ее состояния и оптимизации параметров качества процессов производства и потребления энергии по критериям энергетической, экологической и экономической эффективности. Рассмотрим наиболее полную схему энергокомплекса и его энергетических систем [1]. Автор разработал схему энергокомплекса и методологию его построения.

Взаимная передача тепла и других комплементарных материальных продуктов на основе заключения договоров по энергетическим и иным транзакциям предполагается следующими видами основных объектов макросети формируемого энерготехнологического комплекса на рисунке 2.1.

Энерготехнологический комплекс (ЭТК), согласно методологии, состоит из элементов: I – среднее или крупное предприятие промышленности-потребитель двух видов энергии, например, по производству активного угля; II – полигон твердых бытовых и промышленных отходов как источник биогаза (ТБПО); III – микросеть, включающая малые промышленные, сельскохозяйственные и прочие малые предприятия, домовладения и жилые дома с возможностями производства тепловой и электрической энергии с использованием возобновляемых ресурсов тепловых насосов, микротурбин на биогазе, солнца и ветра; IV – электростанция, производящая теплую и электрическую энергию, районная или локальная котельная (отдельная или в составе другого объекта экономики) с использованием традиционных ресурсов; V – объект, рассматриваемый в качестве накопителя тепло-

вой энергии; VI – научно-образовательный центр по разработке и продажам инновационных проектов повышения 3-Е эффективности указанных объектов для внедрения инноваций по теплоэнергетике и теплотехнике.

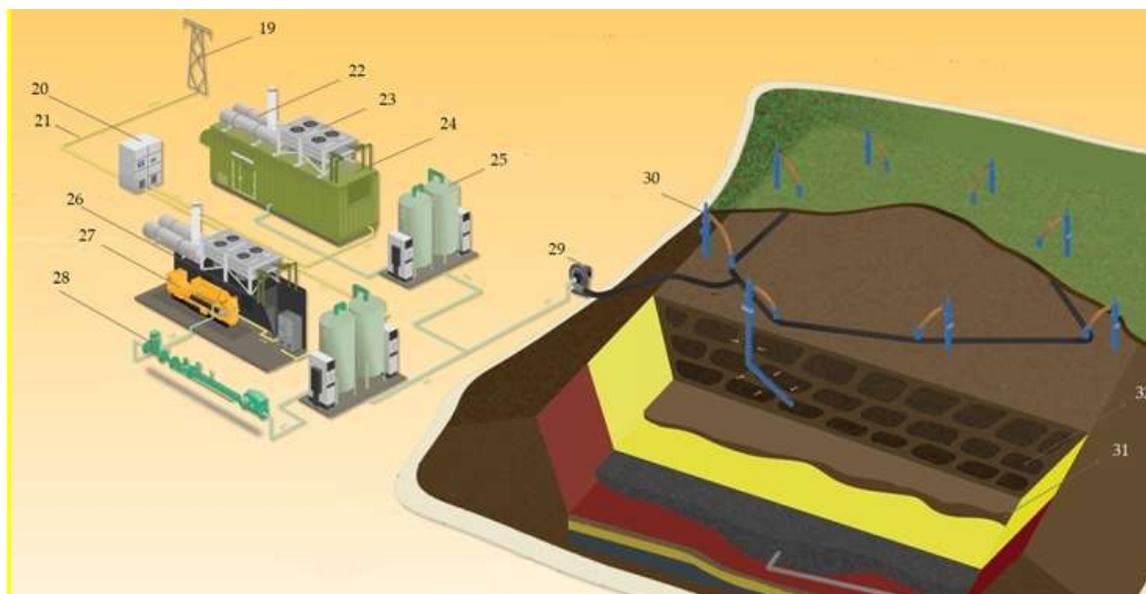
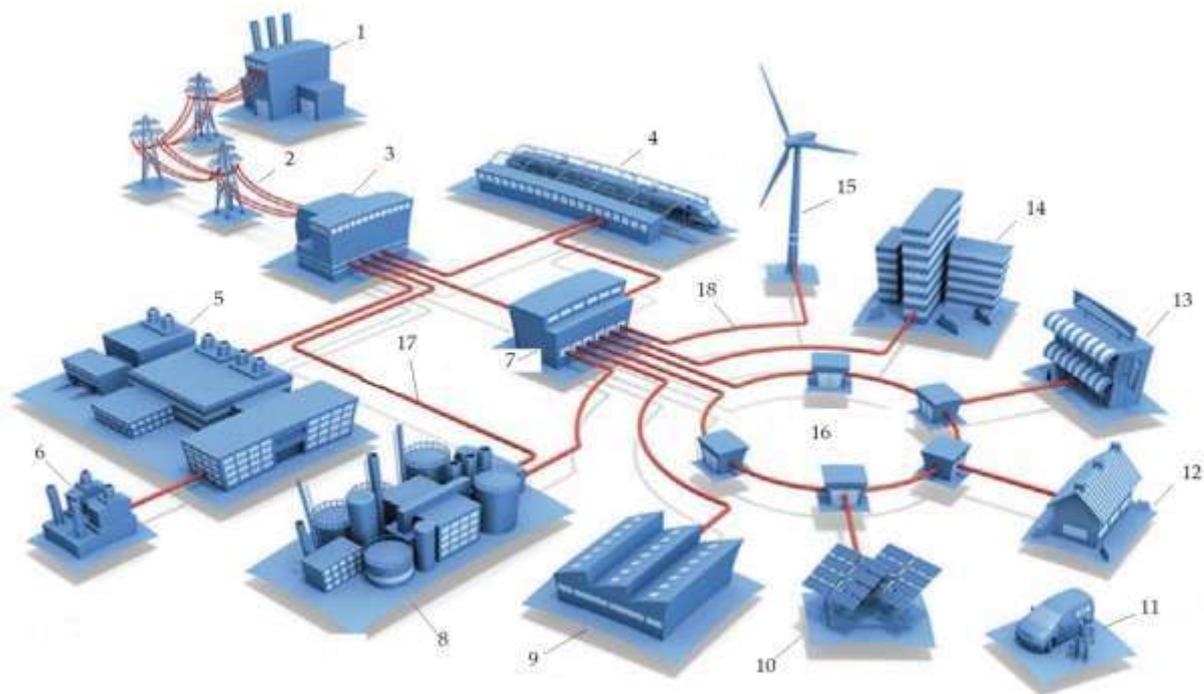


Рис. 2.1. Схема макросети отдельно функционирующих основных объектов единого энерготехнологического комплекса

Предложенный состав основных объектов включает в свою структуру объекты микросети II-V. Ставится цель организации экономического, машинного и физического взаимодействия производителей и потребителей электрической и тепло-

вой энергии с оформлением контрактов. Для этого необходимо сформировать структуру микросети и преобразовать часть ее объектов для возможностей осуществления энергетических транзакций в Интернете энергии и вещей. Центральными объектами вида III в микросети являются следующие: 6 – элементы генерации, 7 – распределительные подстанции; 10 – объекты солнечной энергетики; 11 – сервисные службы для диагностики и текущих ремонтов оборудования; 12 – домовладения и жилые здания с возможностями генерации электроэнергии; 13 – центр управления микросети с новыми возможностями экономических транзакций; 14 – коммерческие здания с локальными котельными; 15 – объекты ветроэнергетики. Для реализации физического взаимодействия необходимы: 16 – трансформаторные подстанции, понижающие напряжение для физического взаимодействия объектов; 17 – низковольтные линии электропотребления и передачи излишков энергии; 18 – высоковольтные линии передачи выработанной электроэнергии объектами малой энергетики; 19 – высоковольтные линии передачи электроэнергии, генерируемой микротурбинами локальных объектов гибридной сети полигона объекта II.

В кризисных ситуациях, например, при недостаточности ресурсов возобновляемой энергетики необходимы резервные мощности и технические средства традиционной энергетики: 1 – ТЭЦ в составе объектов микросети вида IV; 2 – высоковольтные линии электропередачи и 3 – главные подстанции преобразований параметров электроэнергии для реализации физического взаимодействия в микросети. Дополнительными источниками энергии более низкого качества и надежности могут считаться объекты видов II и V: микротурбины локальной котельной при полигоне ТБПО; накопители тепловой энергии в виде систем следующих элементов природоохранного назначения: 22 – выхлопа газов и фильтров их очистки, 23 – охлаждения жидких и твердых отходов в процессах генерации энергии, 24 – контейнеров твердых отходов; 25 – подготовки биогаза к использованию, 26 – управления сортировкой отходов в контейнерах, 27 – биогазовых генераторных установок, 28 – сети подачи биогаза, 29 – насосов, 30 – скважин сбора биогаза, 31

– изолирующие слои хранилища ТБПО, 32 – ячейки хранения неиспользуемых отходов.

Указанные мощности позволяют обеспечить надежность энергоснабжения основных потребителей объектов вида I макросети ЭТК: 5 – тяжелой промышленности; 8 – обрабатывающей промышленности; 9 – прочих индустриальных объектов. Для регулирования экономических, межмашинного и физических взаимоотношений и взаимосвязей в микросети комплементарных объектов и макросети единого ЭТК необходимо создание координирующей структуры Центра согласования интересов объектов гибридной сети (ЦСИ). В Центре должно осуществляться принятие решений по функциям следующих объектов: 20 – система управления параллельной работой линий и 21 – линии передачи управляющих сигналов для машиночитаемого взаимодействия с обменом сигналов между объектами.

Методологическое обеспечение вида VI в инфраструктурном объекте 4 разрабатывается структурами типа научно-образовательных центров по разработке и продажам инновационных. Оно необходимо для организации единого и высокотехнологичного подхода к решению проблем повышения 3-Е-эффективности при снижении дисбаланса интересов объектов традиционной и возобновляемой энергетики в ЭТК.

Схема характеризуется рядом слабых сторон: чрезмерный дисбаланс интересов объектов микро- и макросети из-за отсутствия либо недостаточной регулируемости сетевых взаимосвязей производителей и потребителей; низкая гибкость и оперативность регулирования взаимных передач мощностей или энергии. Это обуславливает необоснованные инвестиции в новые объекты энергетики при низком уровне использования установленной мощности существующих. Самостоятельное решение проблем низкой эффективности процессов отдельными объектами осуществляется преимущественно методами модернизации ограниченного числа видов их теплотехники вследствие недостатка инвестиционных ресурсов.

Учитывая теплоэнергетическую направленность исследования нами выявлены максимальные показатели энергетической и экологической эффективности отдельного функционирования объектов вида III-V (таблица 2.1).

Таблица 2.1. Максимальные современные показатели энергетической и экологической эффективности отдельного функционирования объектов макросети вида III-V, % (данные на 2023 год)

Показатели эффективности	ТЭЦ (ПГУ на природном газе)	Газопоршневая установка на биогазе	Ветро установка	Фотоэлектрические панели
Термический КПД	55,00	40,00	--	--
Коэффициент использования энергии ветра	--	--	35,00	--
Коэффициент преобразования солнечных панелей	--	--	--	18 (до 28 по данным научных статей 2021 года)

2.2. Необходимость использования интернета вещей при проектировании энергокомплексов нового поколения на базе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии

Необходима организация новой системы прогнозирования постоянных воздействий с использованием инструментария промышленного Интернета вещей и энергии объектов I-V формируемой системы ЭТК гибридного вида, рис.2.1. При этом растет потребность в контроле параметров качества регулирования согласованности взаимодействия объектов макросети.

Современные энергосберегающие методы развития промышленной энергетики в значительной мере должны определяться факторами новой промышленной революции. Главным фактором в соответствии с темой статьи является необходимость учета воздействий промышленного интернета вещей и энергии в физических системах с кибернетическими свойствами. Соответствующее направление высокотехнологичного развития определяет выбор организационно-

экономической парадигмы аналого-цифрового представления методов интеграции объектов и комбинирования методов исследования. Методы применимы к информационным технологиям распределенных (облачных) ресурсов для достижения конкурентного уровня инновационности. Прогнозы развитых стран Евросоюза показывают растущее преимущество возобновляемой энергетики: в 2050 году в Нидерландах предполагается 35% потребностей в электроэнергии обеспечить ресурсами солнечной энергии, 65% - ветровой. Совместное использование диверсифицированных ресурсов объектов гибридной энергетики является условием обеспечения эффективной устойчивости развития энергетических систем. Это определило цель исследования возможностей применения системы контроля в платформе транзакционной энергетики и сети единого ЭТК объектов гибридного типа. Необходимо решить задачи регулирования процессов повышения 3-Е эффективности по этапам цикла, отличающихся эволюционными и скачкообразными видами изменений качества параметров регулирования.

2.3. Методология моделирования гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергии в едином энерготехнологическом комплексе

Достижение цели повышения качества параметров регулирования в исследовании предлагается реализовать в концепции комбинирования организационно-экономических и математических моделей для применения системы информационных и технико-технологических методов по критерию максимизации 3Е-эффективности. Это определяет появление новой архитектуры организации с использованием информационно-технических возможностей Интернета энергии и Интернета вещей. Необходимы системы управления для реализации взаимодействия объектов микро- и макросети методами транзакционной энергетики в едином ЭТК гибридного типа. Новая архитектура и структура предполагает радикальное расширение номенклатуры автономных датчиков с многолетним сроком эксплуатации, сенсоров-измерителей разных параметров процессов и других элементов кибернетического назначения. Все эти устройства должны быть соединены сетью передачи данных телеметрии, частично показанной на рисунке 2.1. Высокая зна-

чимость таких технических средств цифровой экономики подтверждается положительной оценкой результатов исследования перспектив комплементарного использования ресурсов и распределения энергии в условиях современной промышленной революции. Доказана эффективность их использования при снижении затрат на ремонты, увеличении времени бесперебойной работы, сокращении потребностей в персонале для синхронизации процессов диспетчерами. Решаются проблемы, определенные недостаточным соответствием технологий и методов развития распределенной энергетики гибридного типа факторам промышленной революции. Выявлена недостаточная степень интеграции объектов I-V промышленной энергетики с ресурсами научных и образовательных объектов вида VI для организации высокотехнологичного развития макросети ЭТК в экономике знаний. На многих отечественных предприятиях промышленной теплоэнергетики преобладают эволюционные методы модернизации отдельных элементов оборудования с низким уровнем инновационности технологий и результатов. Инвестиционные решения по проектам нового строительства и технического перевооружения нередко принимаются без моделирования процессов перехода к технологиям и организационным методам энергосбережения по факторам новой промышленной революции.

Технико-технологические модели должны описывать динамику физического взаимодействия объектов гибридной сети формируемого комплекса. Учитывая научные и практические результаты исследований одного, детально изучаются возможности повышения 3-Е эффективности объектов микросети энергетики гибридного типа. Преимущественно теплоэнергетический характер исследования определяет географические ограничения на масштабы формируемого комплекса: объекты II-V могут быть размещены на расстояниях не более 25 километров (максимальная возможность сетевого физического взаимодействия по допустимой 3-Е эффективности передачи тепловой энергии). Микросеть сформирована в составе ЭТК и реализует предмет научного исследования в проектной разработке инновационной идеи формирования локального рынка продаж энергии и других резуль-

татов деятельности комплекса, имеющих ценность для их производителей и потребителей. На примере микросети детально изучены системы управления производства и потребления тепловой и электрической энергии.

Создание информационных и физических возможностей для их совместного функционирования требует повышения качества параметров контроля и диспетчерирования высокотехнологичных процессов интеграции объектов ЭТК гибридной энергетики. Реализация концепции исследования направлена на обеспечение 3-Е эффективности динамики процессов по показателям снижения антропогенных нагрузок на окружающую среду. Предложено также комбинирование ресурсо- и энергосберегающих технологий и интеграции отдельных установок промышленной, большой и малой энергетики в ЭТК на рисунке 2.2.

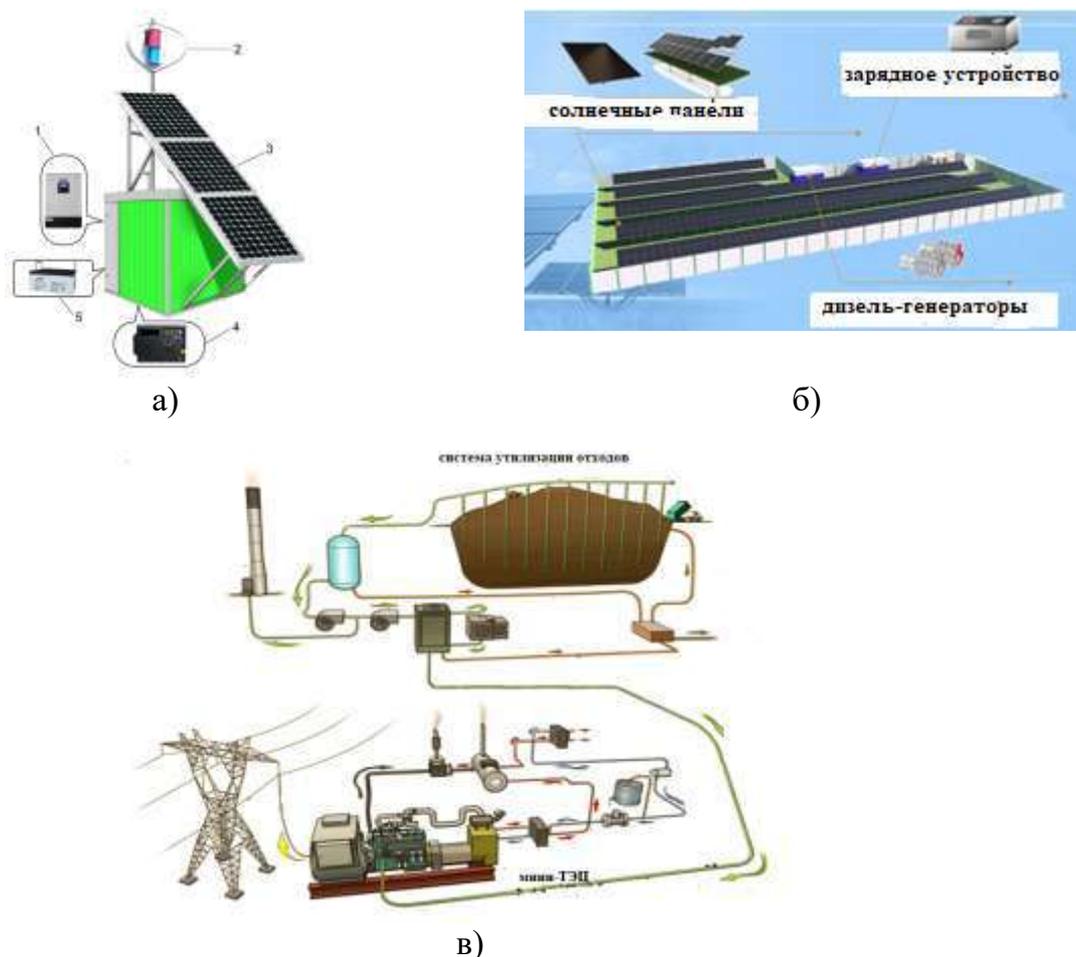


Рис. 2.2. Схема совместно функционирующих объектов микросети распределенной энергетики гибридного типа: а – совместная работа солнечных панелей, ветроустановки и дизель-генератора: 1 – многофункциональный инвертор, 2 – ветроустановка, 3 – солнечные панели, 4 – дизель-генератор, 5 – гелиевые аккумуляторы, б – совместная работа солнечных панелей и дизель-генераторов, в – выработка тепловой и электрической энергии от газа с полигона ТБО

Если рисунок 2.2 спроектирован для миниТЭЦ небольшой мощности, то на территории РФ существует гибридная солнечная электростанция, совмещающая в себе и органическое топливо за счет утилизации отходов предприятия, и гелиоактивную установку.

В Оренбургской области России имеется высокая солнечная активность и имеются благоприятные условия для строительства установок на базе использования солнечной радиации. Так, в 2015 г. введена Сакмарская солнечная электростанция (СЭС) с установленной мощностью 25 МВт. СЭС располагается в северной части г. Орска, на месте бывшего золоотвала Орской ТЭЦ-1 и находится на балансе ПАО «Т Плюс», рис.2.3. Далее мощность постепенно наращивалась. Вторая очередь – 15 МВт, третья очередь (Орская СЭС) – 25 МВт. Управление доступно удаленное, с пульта Орской ТЭЦ-1.

Отметим, что в Челябинской области солнечных дней не намного меньше, чем в Оренбургской области, а интенсивность солнечного излучения почти аналогичная, рис.2.4.

Для детальных расчетов выделена микросеть в составе единого ЭТК в следующем составе объектов распределенной энергетики гибридного типа: II- полигон накопленных ТБПО, как источник вторичных горючих ресурсов (биогаза и прочих материальных отходов) и дополнительного топлива для локальной котельной микросети; III-теплоэнергетические установки типа тепловых насосов, использующие свойство термодинамического цикла преобразования тепла в работу с помощью водяного пара. Такая организация производства энергии предложена для объектов сельского хозяйства (например, теплиц, животноводческих ферм, сушилок зерна, корнеплодов и фруктов, малых предприятий других отраслей промышленности, торговли и т.д.), домовладений и жилых домов с возможностями генерации энергии и передачи ее излишков в сеть. Для них требуется получение тепла в виде горячей воды, а также электроэнергии с применением микротурбин, использующих накопленные ресурсы биогаза полигона ТБПО.

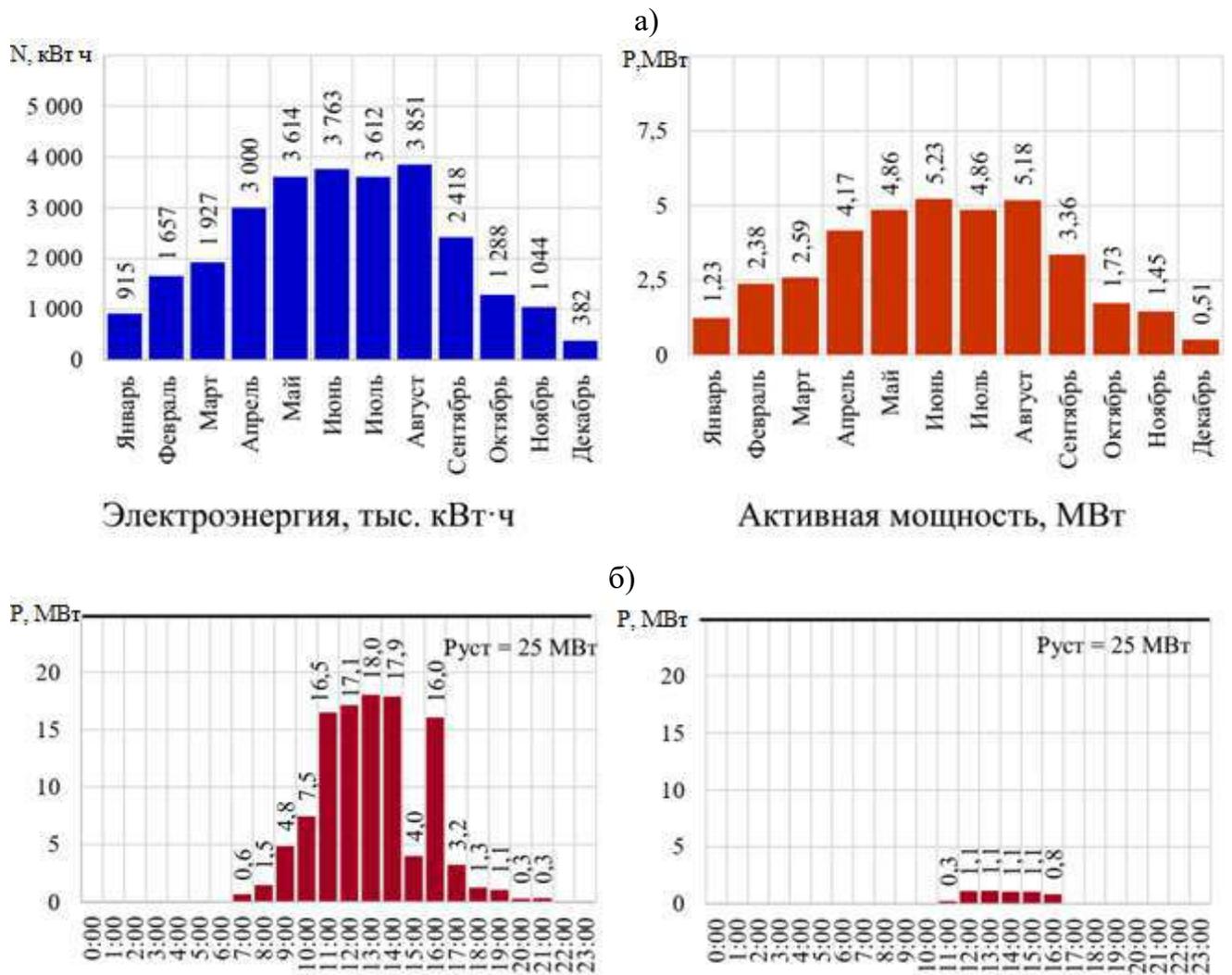


Рис.2.3. СЭС и режимы ее работы: а) общий вид Сакмарской СЭС, б) выработка электроэнергии по месяцам и ее активная мощность в) суточные графики выработки электроэнергии летом и зимой

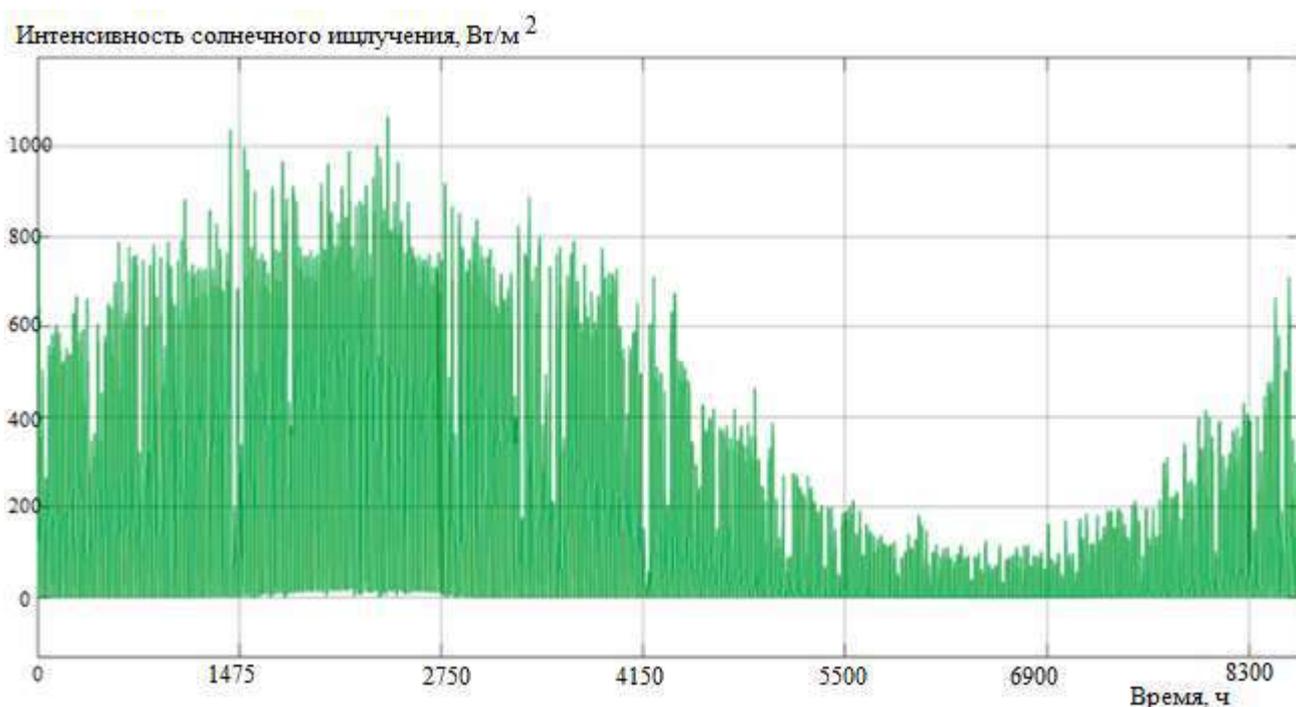


Рис.2.4. Инсоляция (Вт/м^2) в городе Челябинск, Россия в течение 2020 года, начиная с апреля

Гибридные системы могут включать, например, органическое топливо и фотоэлектрические панели. Использование альтернативной солнечной энергии повышает энергетическую независимость потребителей. Автономность позволяет продавать излишки производимой электроэнергии в микросети объекта III макросети ЭТК. Такая микросеть сочетает в себе функции автономной и сетевой,) обеспечивая резервное питание.

При достаточной солнечной интенсивности солнечные панели генерируют электричество и подают ее на гибридный инвертор, потом от него осуществляется питание. Излишки электроэнергии от инвертора поступают на аккумуляторные батареи (объект V на рисунке 2.1), подзаряжая их. Когда аккумуляторы заряжены полностью, энергия подается в сеть для продажи при наличии договора с сетевой компанией. Критерием принятия такого решения является превышение тарифа на продажу электроэнергии тарифа на покупку из сети. Когда ситуация обратная, то лучше сохранить энергию в аккумуляторах, чтобы использовать её вечером. В солнечные дни бывают периоды, когда накопители энергии уже полностью заряжены, а возможности генерации превышают текущее потребление. В этом случае

излишки также целесообразно продать по любой цене. Возможно недоиспользование мощностей традиционной энергетики и снижение 3-Е эффективности в долгосрочном периоде вследствие необоснованных инвестиций. В случае недостаточной инсоляции солнечные батареи работают не на полную мощность, тогда питание будет осуществляться из аккумуляторов объекта вида V или сети любого масштаба. При настройке инвертора 5 можно сделать приоритетными решения по выбору источника резервного питания по критериям максимальной автономности, минимального потребления электроэнергии и окупаемости за счет продажи излишков электроэнергии в солнечные дни. На рисунке 2.1 показана схема совместно функционирующих объектов традиционной централизованной и распределенной энергетики гибридного типа. Совместная работа солнечных панелей и дизель-генераторной электростанции является примером создания микросети вида III. Она предполагает комбинирование источников генерации гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергетике в едином энергокомплексе.

Микросети, встроенные в гибридную энергосистему, можно оценить по критериям нормативного качества энергии и надежности функционирования существующих распределительных и высоковольтных сетей. Поток генерируемой электрической и тепловой энергии, теплоты нагретого теплоносителя с применением возобновляемых ресурсов имеют потери. Предлагаемая методология нацелена на их снижение в процессах генерации и транспортировки до потребителей.

На рисунке 2.1 показана схема взаимодействующих объектов гибридной микросети. Она позволяет комбинировать возможности генерации энергии с применением возобновляемых ресурсов в солнечных панелях и дизель-генераторах. Кроме того, учтен обмен видами такой энергии с указанными на рисунке 1 объектами традиционной энергетики. Организация совместной работы возможна при воздействиях специальной системы управления в ЦСИ по критериям повышения надежности и 3-Е эффективности распределения потоков энергии.

На рисунке 2.1 показан состав объектов микросети. Он определяет необходимость учета как надежности работы солнечных панелей, так и эффективные ре-

жимы работы дизель-генератора. Подобные системы в последнее время регулируются при помощи прогнозного регулирования, основанного на нейросетевых алгоритмах. Контроль параметров гибридных установок проводят по органической части микросети, включающей дизель-генераторы или локальные средства генерации электрической и тепловой энергии. Возобновляемые ресурсы, например, солнечных панелей или ветроустановок контролируются минимально и работают преимущественно в автоматическом режиме.

Стандартные контрольно-измерительные приборы и автоматика не в состоянии повысить эффективность работы установки в длительной перспективе. Необходимо применение нейросетевых алгоритмов, позволяющих собирать данные Big Data, обрабатывать их и составлять прогнозный характер управления в процессах преимущественно межмашинного взаимодействия объектов микросети.

Для организации экономических взаимосвязей в форме транзакций пользователей они должны быть представлены цифровыми активами, подтверждающими взаимную передачу мощностей или продуктов производителей и потребителей. Это оформляется заключенными контрактами, документами их верификации и оплаты на основе межмашинного взаимодействия объектов.

Особую сложность для учета и моделирования представляют процессы, параметры которых меняются скачкообразно либо экспоненциально. Это вызывает необходимость применения особого математического обеспечения, применяемого, например, для представления процессов передачи сигналов. Такие особенности определяют дополнительное использование инструментария более глубокого анализа и цифрового моделирования процессов Data Science. Он основан на обеспечении контроля и регулирования в реальном масштабе времени с помощью нейросетевых алгоритмов глубокого машинного обучения с использованием искусственного интеллекта. Подобные процессы применены нами для регулирования 3-Е эффективности в энергетических установках объектов микросети ЭТК. При этом часто происходит снижение устойчивости процессов развития вследствие скачкообразных изменений процессов при переходе к новой структуре взаи-

мосвязей объектов в комплексе. Усовершенствования радикального типа отличает также сингулярность (необычность) процессов перехода к новым технологиям, методам анализа и регулирования процессов. Она может выражаться в экспоненциальной, гиперболической и даже скачкообразной (например, пилообразной форме сигналов), изменении показателей-свойств 3Э-эффективности при нулевом или минимальном времени перехода к новому их уровню.

Для обеспечения устойчивости предлагаемых процессов управления необходимо формирование модели динамического симулятора механизма комбинирования методов управления согласованием интересов объектов традиционной и возобновляемой энергетики, рисунок 2.5.



Рис. 2.5. Блок-схема регулирования динамического симулятора механизма комбинирования методов совместной выработки энергии

Уровень баланса интересов (УБ) обеспечивается регулированием индексов качества параметров регулирования (ИК) по указанным выше критериям. Соответствующие результирующие показатели оцениваются известными подходами к

термодинамическому моделированию процессов повышения энергетической и экологической эффективности для отдельно функционирующих объектов II-V возобновляемой и традиционной энергетики.

Уровень баланса интересов (УБ) обеспечивается регулированием индексов качества параметров регулирования (ИК) по указанным выше критериям. Соответствующие результирующие показатели оцениваются известными подходами к термодинамическому моделированию процессов повышения энергетической и экологической эффективности для отдельно функционирующих объектов II-V возобновляемой и традиционной энергетики (таблица 2.2).

Таблица 2.2. Методы, используемые параметры и результаты анализа расчетов 3-Е эффективности в условиях совместного функционирования объектов 2-5 микросети

Типы объектов	Преимущества	Недостатки
Тепловые насосы	Возможность работы на практически любом виде низкопотенциальной энергии	Высокая стоимость сервисного обслуживания
Фотоэлектрические панели	Применение в любом климате	Сложность обслуживания
Ветроустановки	Разнообразие типов ветроустановок	Ограничения по скорости ветра
Дизель-генераторы	Простота обслуживания	Высокое потребление топлива
Микротурбины, использующие накопленные ресурсы биогаза	Высокая частота вращения и быстрый выход на номинальные параметры работы	Эффективность зависит от состава газа
Локальные тепловые и электрические сети	Применение в любом районе, в том числе на удаленных территориях	Низкое качество электроэнергии
Комплексные линии, совмещающие все предыдущие	Использование всех видов источников энергии	Сложность системы управления

Расчеты показывают значительные приросты 3-Е эффективности при организации взаимодействия объектов вида II-V в ЭТК. Дополнительное увеличение показателя достигается в условиях интеграции с объектом вида VI. Радикальное повышение качества регулирования параметров обеспечивает предлагаемый в статье механизм. Для этого необходимо использование процессов управления энер-

гетических транзакций и повышение нацеленности технологий и методов на рациональную организацию циклов формирования ЭТК. Возможности контрактной передачи мощностей объектов друг другу могут реализоваться тремя видами взаимодействия: организационно-экономическое (разработка моделей и проектов комбинирования методов и ресурсов, оформление контрактов на энергетические транзакции и договоров на научно-исследовательские и проектные разработки и их авторское сопровождение); межмашинное (мониторинг параметров качества энергии и других товарных результатов деятельности и обмен данными); физическое (создание тепловых и логистических сетей для реализации транзакций). При этом часто растет дисбаланс указанных интересов. Концепция исследования может быть реализована применением методов методологии интеграционно-балансирующего регулирования трех указанных видов взаимодействий объектов формируемого комплекса. Наиболее результативно методы реализуются на основе энергетических транзакций в Интернете энергии с применением инструментов Big Data и Data Science. Инструментарий Data Science отличается возможностями радикального повышения оперативности принятия решений в реальном времени машиночитаемых оценок для заключения необходимых энергетических транзакций в Интернете энергии. На практике выделяют взаимосвязанные подсистемы и основные этапы методики разработки соответствующей платформы. Во-первых, формируется организационно-экономическая платформа энергетических транзакций в Интернете энергии с оценкой качества параметров регулирования 3-Е эффективности в условиях раздельного функционирования объектов (см. рисунок 2.1). Далее адаптируется особое математическое обеспечение для моделирования и алгоритмизации действий по решению задач комбинирования ресурсов в платформе. Во-вторых, разрабатываются проекты по технико-технологическим направлениям комбинирования объектов микро- и макросети единого ЭТК. Затем обосновывается применение существующих либо адаптация и разработка компьютерных программ транзакционной энергетики в Интернете энергии на основе Machine Learning методов моделирования и экспертизы прогресса проектов. Тех-

нологии нейронных сетей искусственного интеллекта делают возможным в реальном времени нескольких дней (не месяцев, как ранее) осуществление цикла мероприятий по разработке и экспериментальной реализации проектов высоко-технологичного комбинирования ресурсов на основе организации транзакций в сети объектов ЭТК. При этом расширенные возможности многовариантного и многокритериального анализа в такой цифровой платформе осуществляются без первичной фильтрации исходных данных. Метод повышает глубину и долгосрочность бизнес-аналитики на основе серии оперативных решений, без фильтрации данных. Использование нейросетевых алгоритмов глубокого машинного обучения обеспечивает возможности получения на выходе разрабатываемой системы управления передачей сигналов машино-читаемого при повышении скорости и надежности оценки и регулирования параметров взаимодействия объектов ЭТК. В-третьих, проводятся сравнительные термодинамические расчеты по оценке 3-Е эффективности по двум вариантам: в схеме управления отдельно функционирующих объектов распределенной энергетики гибридного типа; в платформе энергетических транзакций при организации взаимодействия объектов микросети после завершения последующих этапов разработки организационно-экономических и математических методов.

Разработка организационно-экономических моделей и методов согласованного взаимодействия объектов макро-и микросети направлена на создание аналоговых моделей, описывающих процессы по формированию и развитию ЭТК. Комбинирование методов и интеграция ресурсов предполагается осуществлять в платформе транзакционной энергетики как системы Интернета вещей и энергии. Она является высокотехнологичной основой функционирования вновь создаваемой координационной структуры ЦСИ сети комплементарных объектов ЭТК. Критерием повышения качества управления для регулирования должна быть максимизация 3Е-эффективности использования традиционных и возобновляемых ресурсов методами их интеграции. Поэтому назначением Центра является применение дополнительных функций контроля и диспетчирования процессов регулирования

товарно-денежных отношений производителей и потребителей диверсифицированного состава энергии и материальных продуктов. Для обеспечения согласованности интересов указанных объектов в трех указанных видах взаимодействия в дополнение к энергетическим потокам следует учитывать и логистические потоки. В данном случае - это продажи результатов научно-проектных работ и их авторское сопровождение для оперативной реализации бизнес-идей по направлениям работ объекта V в проектах повышения 3-Е эффективности гибридной энергетики. При этом для оформления энергетических транзакций должны быть определены и учтены: объемы продаж и потребления электрической и тепловой энергии (с учетом применения накопителей) разных параметров качества; комплементарные продукты, образующиеся при использовании диверсифицированных ресурсов возобновляемой и традиционной энергетики; оказание транзакционных услуг производителям и потребителям энергии (в том числе, домовладениям). Таким образом формируется и регулируется два вида рынков, географически ограниченных физическими возможностями передачи мощностей и прочих результатов деятельности ЭТК: макросеть (см. рисунок 2.1) с неограниченно масштабируемым рынком (электроэнергия и научно-проектные работы); микросеть (см. рисунок 2.2) с локальными рынками (преимущественно тепловая энергия, побочные, или вторичные продукты, незначительные объемы электроэнергии). Микросети формируются для повышения 3-Е-эффективности взаимодействия объектов распределенной энергетики гибридного типа, удаленных не более чем на 25 км.

2.4. Алгоритм разработки энерготехнологического комплекса на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии

Согласно представленной методологии представлен алгоритм разработки энергокомплекса на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии, рис.2.6.

Далее представлен алгоритм разработки и применения методики повышения качества регулирования параметров энергии по критериям 3-Е-эффективности со-

вместного функционирования объектов II-V микросети. Объекты включены в состав макросети ЭТК с учетом факторов внешней среды и новых методов аппроксимации функций. Этапы 1-8 модели соответствуют применению методологии, организационных и математических моделей и методов. Этапы 9-17 представляют практическое применение результатов математического моделирования процессов в разделах 4-8. Для этого использованы методы физического моделирования и оценки ошибок математического моделирования.

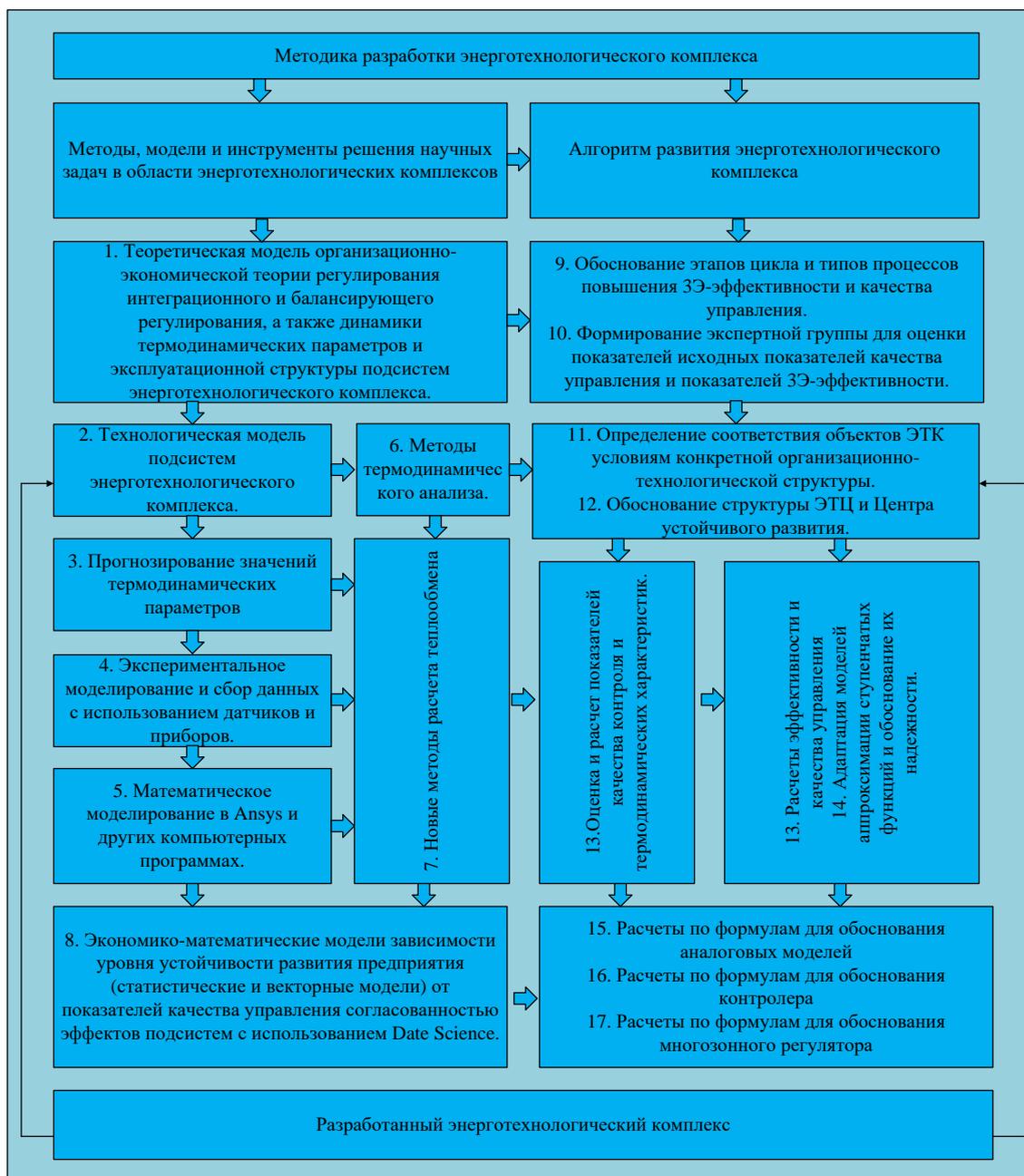


Рис. 2.6. Алгоритмическая модель методики повышения качества регулирования на основе комбинирования методов в Центре согласования интересов объектов комплекса

2.5. Пример использования предложенной методологии для обеспечения устойчивости электроснабжения промышленного предприятия

Планирование электропотребления является важной составляющей работы любого предприятия. Для уточнения планов может быть использована установка фотоэлектрических панелей, и перевод производства на систему энергообеспечения за счет возобновляемых источников энергии с предлагаемой оптимизационной моделью на основе прогнозных методов регулирования.

В России в качестве государственной политики технологического развития электро- и теплоэнергетики [76,77] рассматривается интеллектуальная электроэнергетическая система (ЭЭС) с активно-адаптивной сетью [76-79]. Концепция такой системы основывается на интеграции инновационных направлений для каждого из ее участников, от производства энергии и до ее потребления [77,80-82].

Под активно-адаптивной сетью понимают сеть, способную меняться и подстраиваться под процессы, происходящие в ней, с целью децентрализации, анализа энергопотребления и сохранения бесперебойного электроснабжения. Основными участниками такой сети являются источники генерации, как традиционные, так и возобновляемые, электрические сети и подстанции, а также потребители с источниками генерации, способными анализировать потребление и выработку электроэнергии, и выдавать в сеть избыток мощности [83].

Возобновляемая генерация, источники мини- и микрогенерации – это одна из групп, на которые можно разделить участников активно-адаптивной сети, которая на сегодняшний день практически отсутствует, в отличие от традиционных источников энергии [84]. Солнечные электростанции, строящиеся сегодня в России, не оснащаются интеллектуальными системами по выработке и накоплению энергии, поэтому не способны качественно прогнозировать количество выработанной энергии, а в часы пиковой выработки накапливать энергию и выдавать ее в сеть при провалах.

Но, помимо этого, в стране все еще очень остро стоит вопрос газификации не только населения, но и промышленных предприятий [85]. Самыми большими по-

ребителями газа являются энерговыварбатывающие предприятия, на их долю приходится порядка 60% потребляемого газа [86]. Однако не все предприятия имеют возможность подвести газ к своим цехам. Так на 2021 в Челябинской области около 7% промышленных зон предприятий не имеют доступа к газу, что заставляет предприятия пользоваться автономными системами газоснабжения. Однако, на малых предприятиях, в зависимости от сферы деятельности, газификация в принципе отсутствует. Газификация же самой Челябинской области составляет порядка 70%, что является вторым показателем по Уральскому федеральному округу, уступая только Тюменской области.

Трансформация энергетики России из угольно-газовой энергетической системы с высокими экологическими затратами к низкоуглеродной и экологически чистой энергетической системе длится уже несколько десятилетий. В последнее время произошли позитивные изменения: в Комитете по энергетике Государственной Думы России подготовлен проект закона об использовании возобновляемых источников энергии [87,88]. Концепция технической политики в тепло- и электроэнергетике России до 2030 года на экспертном уровне оценивает перспективную площадь солнечных панелей и коллекторов в 10 млн. м² [89]. Данные оценки подтверждают активное развитие солнечной энергетики на промышленном Российском рынке. Челябинск, имеет продолжительность солнечного сияния от 2000 до 2200 часов в год, такую же как южные города: Ростов-на-Дону, либо Краснодар. Поэтому можно с уверенностью утверждать, что в скором времени солнечная энергетика в Челябинской области выйдет на новый уровень. Продолжение внедрения использования солнечной энергии света будет отражено на повышенной производительности промышленных предприятий и снижении процента причинения вреда окружающей среде.

Основным фактором, влияющим на режимы работы и выработки энергии фотоэлектрическими панелями, являются погодные условия [90]. Применение алгоритмов прогнозных методов регулирования дает возможность более полного анализа энергопотребления потребителей за счёт учёта графика потребления и выра-

ботки энергии. В случае избытка выработки – накопление энергии и выдачу в сеть при дефиците мощности. Используемая нами математическая модель, построенная на принципах действия биологических нейронных сетей получая входные сигналы впоследствии будет обрабатывать их по определённому алгоритму и согласно результату обработки, передавать выходной сигнал.

Выбор нейросетевых алгоритмов обоснован возможностью обучения, в процессе которого параметры нейронной сети настраиваются посредством моделирования среды, в которую эта сеть встроена. В ходе проекта будет использован алгоритм обучения без учителя. В случае применения сигнального метода обучения Хебба и Ойя обучающее множество будет состоять лишь из входных векторов, а алгоритм подстраивает веса сети так, чтобы предъявление достаточно близких входных векторов давало одинаковые выходы [91].

На первоначальном этапе изучения проблематики прогнозных методов регулирования необходимо смоделировать тепловые процессы с помощью программы Ansys [92]. Используя пакет Ansys для анализа эффективности солнечной батареи опытной установки, мы можем выявить основные факторы, влияющие на эффективность ее работы. Это позволит найти такие оптимальные условия эксплуатации, при которых батарея будет поглощать максимальное количество солнечной энергии.

При решении задач теплопроводности используется следующая последовательность:

1. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми.
2. Значение температуры T_i в каждой точке i считается неизвестным и подлежащим определению.
3. Область определения температуры разбивается на конечное число подобластей, называемых конечными элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.
4. Искомая непрерывная величина температуры t аппроксимируется в каждом

элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений температуры T_i . Для каждого конечного элемента определяется свой полином, но эти полиномы подбираются так, чтобы сохранить непрерывность температурного поля вдоль границ элемента.

5. В пределах конечного элемента приближенное значение температуры \bar{t} в общем случае трехмерного поля представляется зависимостью:

$$\bar{t}^e(x, y, z) = \sum_{i=1}^m F_i^e(x, y, z) T_i, \quad (2.1)$$

где F_i – так называемые функции формы, зависящие от вида выбранного полинома и формы конечного элемента;

T_i – узловые значения температуры;

m – число узлов в конечном элементе;

e – индекс указывает, что величина относится к конечному элементу.

6. Соотношения типа (2.1) суммируются по элементам (2.2)

$$\bar{t} = \sum_{e=1}^E \bar{t}^e = \sum_{i=1}^m F_i^e(x, y, z) T_i, \quad (2.2)$$

что и дает выражение для приближенного решения задачи о температурном поле в данной области через узловые значения температуры T_i , которые пока неизвестны. После их нахождения из решения системы алгебраических линейных уравнений будет получено окончательное приближенное аналитическое решение задачи.

7. Искомые узловые значения температуры T_i определяются из условия ортогональности невязки к функциям формы, если вместо вариационного метода применить метод взвешенных невязок Галеркина.

В МКЭ соответствующая сумма образуется из локальных (местных) функций формы F_i^e . Глобальные функции должны не только удовлетворять главным граничным условиям, но и достаточно полно описывать геометрию, физические свойства тела и другие характеристики.

При локальной аппроксимации получаются функции более простого вида, но значительно увеличивается объем вычислений. Последний недостаток МКЭ легко преодолевается при использовании быстродействующих ЭВМ.

Для сравнения были проведены расчеты по методике, описанной в [93] и в

программе Ansys. Это сравнение было сделано для того, чтобы выяснить процент расхождения результатов полученных в программе Ansys и результатов, полученных с помощью традиционной методики, представленной в [93].

При расчете по методике [93] было сначала определено лучеиспускание:

Склонение по приближенному уравнению Купера [93]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (2.3)$$

где n – параметр, задаваемый для каждого дня месяца, согласно табличным данным

Косинус угла падения лучевого излучения (зенитного угла солнца):

$$\cos(\theta_\zeta) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (2.4)$$

где θ_ζ – зенитный угол, отсчитываемый от вертикали; φ – широта – угловое положение приёмной поверхности к северу или югу от экватора; ω – часовой угол – угловое смещение Солнца к востоку или западу от местного меридиана; δ – угол склонения Солнца – угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора.

Коэффициент пропускания атмосферы для уравнения пучкового излучения с учётом зенитного угла, высоты для стандартной атмосферы, а также поправки для четырёх типов климата:

$$\tau_b = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot e^{\left(\frac{-k}{\cos(\theta_\zeta)}\right)} \quad (2.5)$$

где α_0, α_1, k – константы для стандартной атмосферы, зависящие от высоты воспринимающей поверхности над уровнем моря (А)

$$\alpha_0 = 0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2 \quad (2.6)$$

$$\alpha_1 = 0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2 \quad (2.7)$$

$$k = 0,2711 - 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2 \quad (2.8)$$

Для учёта определённого типа климата необходимо умножить константы на соответствующие коэффициенты: соответственно r_0, r_1 и r_k согласно табличным данным.

Расчёт излучения рассчитаем по системе уравнений :

$$G_{on} = \begin{cases} G_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \\ G_{sc} \cdot (1,000110 + 0,034221 \cdot \cos(B) + 0,001280 \cdot \sin(B) + 0,000719 \cdot \cos(2B) + 0,000077 \cdot \sin(2B)) \end{cases} \quad (2.9)$$

где G_{sc} – Солнечная постоянная $= 1367 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; G_{on} – внеатмосферное излучение солнца; B – коэффициент, зависящий от порядкового номера дня года (n)

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (2.10)$$

Тепловой поток был рассчитан по методике [94]

$$q_{\text{пол}} = G_{on} - U \cdot (T_{\text{п}} - T_0) \quad (2.11)$$

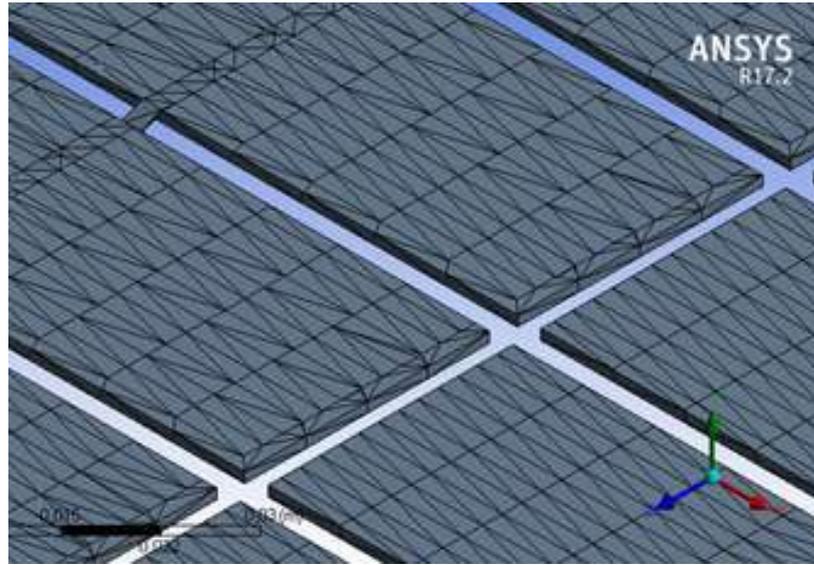
где $q_{\text{пол}}$ и $q_{\text{погл}}$ – удельные полный и поглощаемый потоки солнечной радиации, U – коэффициент потерь, $T_{\text{п}}$, T_0 – соответственно средняя температура поверхности панели и температура окружающей среды. Полный коэффициент U для большинства конструкций равен $0,5 \dots 1,0 \text{ Вт/м}^2\text{К}$

Лучеиспускание и тепловой поток были рассчитаны для оптимального для нашей широты угла наклона солнечной панели 47° . Значения температуры были получены из данных за март 2021 года для каждого дня [95]. В таблице приведены результаты расчета, таблица 2.3. Расчет теплового потока был сделан и в программном комплексе Ansys. Результаты приведены в таблице. Моделирование проводилось для аналогичных условий. Для каждого дня марта 2021 года. При решении нашей задачи были выбраны конечные элементы типа Tetrahedron рис. 2.7.

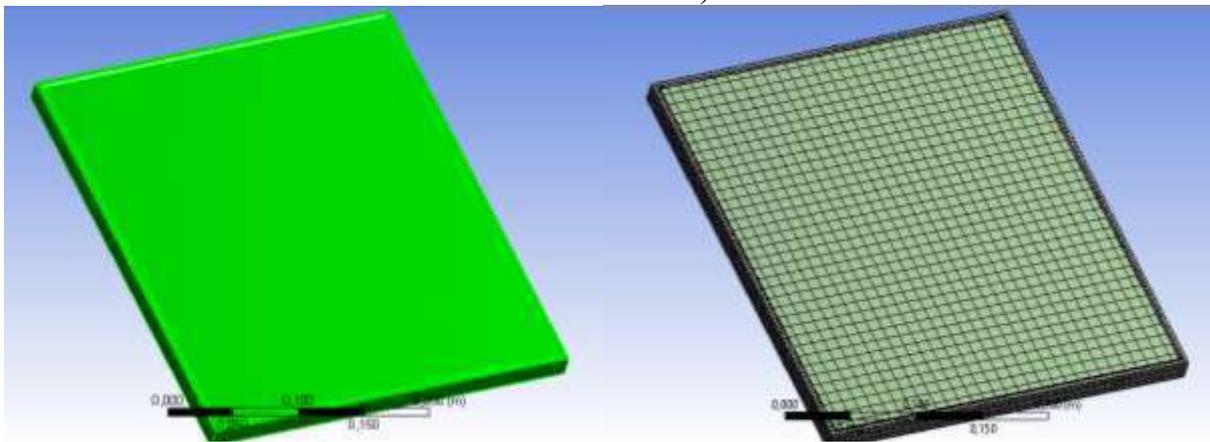
При подсчете среднего значения теплового потока в интервале температур от 9°C до -12°C для марта 2021 года получили следующие результаты. Среднее значение теплового потока, полученного по методике [94] $2854,14 \text{ Вт/м}^2$. Среднее значение теплового потока, полученного при моделировании в программе ANSYS – $3474,33 \text{ Вт/м}^2$. Изменение величины теплового потока, рассчитанного по методике [94] в рассматриваемом интервале температур составило $0,5\%$. Изменение теплового потока, рассчитанного по программе ANSYS составило $6,8\%$ в данном интервале температур.

Таблица 2.3. Расчетные значения лучеиспускания и теплового потока за март 2021 года

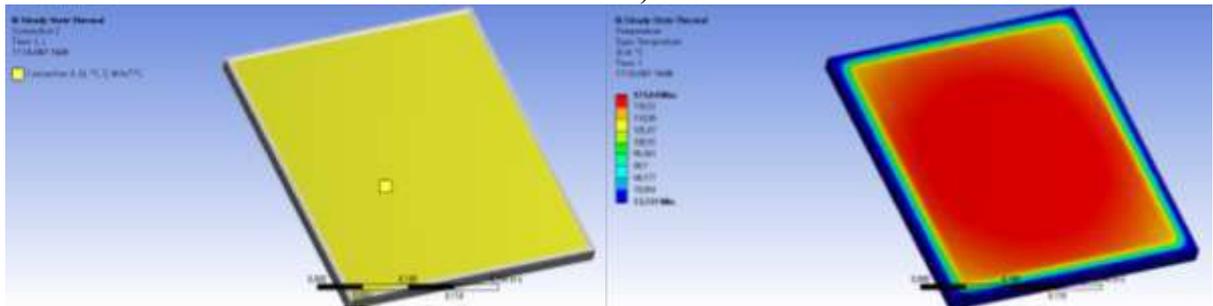
Дата	Значения температуры за 2021 г.	Угол падения солнечных лучей на фотоэлектрическую панель, °	Лучеиспускание света для чистого неба в горизонтальной поверхности, Вт/м ²	Тепловой поток расчётный, Вт/м ²	Значение теплового потока по Ansys, Вт/м ²
01.03	-12	47	231,56	2854,44	3470,38
02.03	-7	47	225,3	2860,7	3376,5
03.03	-3	47	224,92	2861,08	3370,86
04.03	-2	47	230,67	2855,33	3457,02
05.03	3	47	237,92	2848,08	3565,68
06.03	-3	47	239,84	2846,16	3594,45
07.03	-8	47	234,45	2851,55	3513,65
08.03	-9	47	227,11	2858,89	3403,68
09.03	0	47	224,24	2861,76	3360,65
10.03	-4	47	228,02	2857,98	3417,3
11.03	-12	47	235,52	2850,48	3529,7
12.03	-12	47	240,06	2845,94	3597,75
13.03	-5	47	237,07	2848,93	3552,92
14.03	-4	47	229,58	2856,42	3440,71
15.03	-2	47	224,54	2861,46	3365,16
16.03	2	47	225,92	2860,08	3385,82
17.03	1	47	232,69	2853,31	3487,29
18.03	-2	47	239,15	2846,85	3584,10
19.03	-4	47	239,03	2853,57	3582,29
20.03	0	47	232,43	2860,24	3483,39
21.03	0	47	225,76	2861,39	3382,07
22.03	-1	47	224,61	2856,17	3366,21
23.03	1	47	229,83	2848,73	3444,46
24.03	3	47	237,27	2845,97	3555,93
25.03	4	47	240,03	2850,72	3597,30
26.03	9	47	235,28	2858,21	3526,11
27.03	6	47	227,79	2861,77	3413,84
28.03	2	47	224,23	2858,68	3360,50
29.03	6	47	227,32	2851,3	3406,84
30.03	2	47	234,70	2846,1	3517,40
31.03	6	47	239,9	2846,1	3594,35



а)



б)



в)

Рис. 2.7. Процесс построения модели распределения температуры по ФЭП в Ansys: а) сетка конечных элементов в виде тетраэдров б) твердотельная модель в) задание граничных условий и итоговый результат в постпроцессинге

Расхождение результатов величин теплового потока, рассчитанного по методике и по программе ANSYS составляет 17,8 %.

Для уточнения полученных значений планируется провести натурный эксперимент с солнечным модулем Delta SM 150-12 P мощностью 150 Вт. Для замера теплового потока будет использован измеритель теплового потока ЦИТ-2 ИТП. Сравнивая полученные в ходе эксперимента значения теплового потока с рассчитанными по методике и в программном комплексе ANSYS, можно рассчитать погрешность расхождения результатов. И учитывать её при дальнейших исследованиях влияния различных параметров на количество вырабатываемой электрической энергии солнечным модулем.

После анализа полученных результатов можно сделать вывод, что в интервале температур от 9°C до -12°C величина теплового потока практически не меняется. Таким образом количество получаемой электроэнергии не зависит от температуры окружающей среды. Так как в формулу для расчета лучеиспускания входят угловые величины φ , δ , ω , которые в свою очередь зависят от положения земли относительно солнца в разное время года, то величина теплового потока будет существенно зависеть от угла наклона солнечной панели относительно падающих на неё солнечных лучей, и в меньшей степени от температуры окружающей среды. Поэтому для разных времен года для промышленного предприятия необходимо подобрать оптимальные углы наклона солнечной батареи, чтобы получить наибольшие значения теплового потока, а следовательно получить большее количество электроэнергии [96].

Использование совместно с солнечными панелями прогнозного регулирования позволяет найти ещё один подход к решению одной из самых актуальных проблем в последние десятилетия во всех сферах человеческой жизни – проблему энергоэффективности и энергосбережения [96].

Основные результаты этого раздела главы опубликованы в работах [95, 97].

Кроме того, следует отметить влияние таких статей автора, как [98, 99, 100].

2.6. Составление общей схемы гибридной тепловой электростанции по производству тепловой, электрической энергии и активного угля

1. Солнечная электростанция должна сглаживать суточные пики энергопотребления, рис.2.9.

2. Методом системного анализа выявлены три подсистемы: солнечная электростанция, низкопотенциальные источники энергии и камера активации угля, соединенная с камерой сгорания энергетического котельного агрегата.

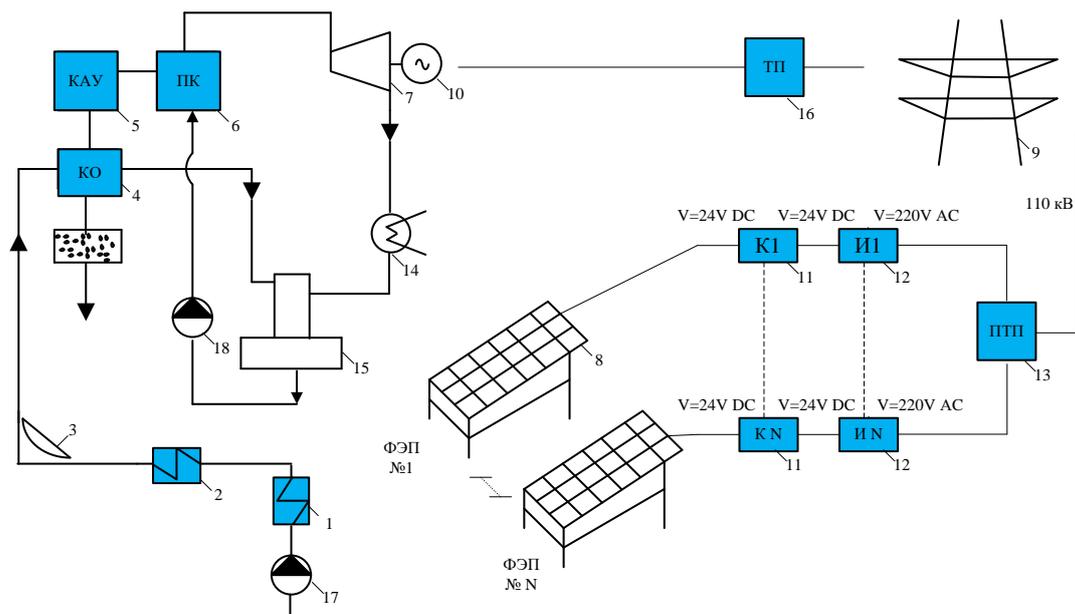


Рис. 2.8. Общая схема гибридной тепловой электрической станции по производству тепловой, электрической энергии и активного угля: 1 – тепловой насос, 2 – система химводоподготовки, 3 – солнечный концентратор, 4 – камера охлаждения активного угля, 5 – камера активации угля, 6 - паровой энергетический котел, 7 – паровая турбина, 8 – фотоэлектрический преобразователь, 9 – линия электропередачи, 10 – электрогенератор, 11 – контроллер, 12 – инвертор, 13 – повышающая трансформаторная подстанция, 14 – конденсатор, 15 – деаэратор, 16 – трансформаторная подстанция, 17 – насос исходной воды, 18 – питательный насос

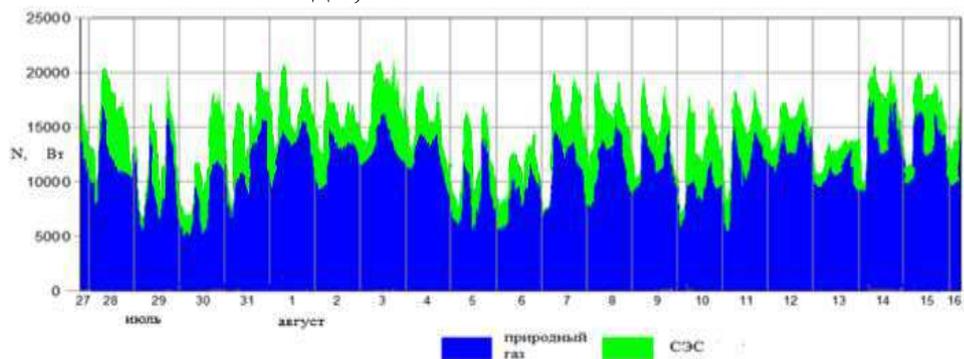


Рис.2.9. Суточный график генерации электроэнергии гибридным энергетическим комплексом, использующим солнечную энергию и органическое топливо

На основе схемы на рисунке 2.8 составлена поясняющая схема на рисунке 2.10.

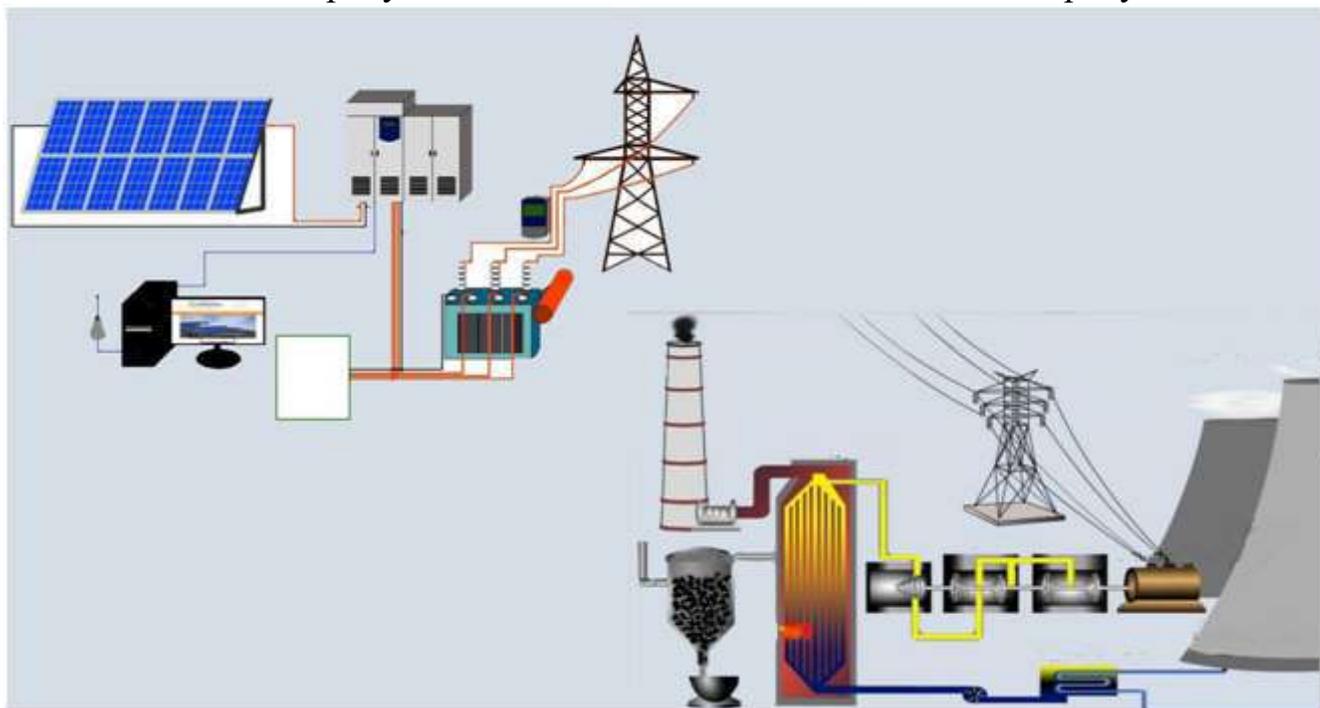


Рис.2.10. Гибридный энергетический комплекс, использующий солнечную энергию и органическое топливо, вырабатывающий электрическую, тепловую энергию и активный уголь

Выводы по главе 2

Разработаны методологические основы использования солнечной энергии и органического топлива для производства электрической, тепловой энергии и активного угля при минимизации карбонового следа на базе тепловых электрических станций, основными положениями которых являются:

- 1.Методология моделирования гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергии в едином энерготехнологическом комплексе.
- 2.Алгоритм разработки энерготехнологического комплекса на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии.
- 3.Методика вычисления падающих тепловых потоков на фотоэлектрические преобразователи.
- 4.Схемы гибридного энергетического комплекса, использующего солнечную энергию и органическое топливо, производящего электрическую, тепловую энергию и активный уголь.

3. Разработка научных основ методологии расчетов и оптимизации схем проектирования энергетического комплекса активации угля в составе гибридного энергетического комплекса с использованием органического топлива, солнечной энергии и низпотенциальных источников энергии

3.1 Методологический подход к решению задач тепломассообмена и газодинамики энергокомплекса активации угля

Автором разработана инверсионная стоковая методология исследования газодинамики и теплообмена [411,412] в котле с комбинированной выработкой теплоты и активного угля в составе единого энергокомплекса с системой утилизации теплоты [385-455].

Котел ведет взаимодействие с окружающей средой в различных режимах работы и при изменении многих параметров [479, 456]. В самом общем виде управлять такой системой можно через входной $X_{\text{ex}}(\tau)$ и выходной $Y_{\text{вых}}(\tau)$ векторы, при этом нужно синтезировать математические модели отдельных выбранных зон системы в единое целое [413-415].

Входной $X_{\text{ex}}(\tau)$ вектор представляет собой совокупность контролируемых сигналов $X(\tau)$ и управляющих сигналов $U(\tau)$.

Выходной $Y_{\text{вых}}(\tau)$ вектор представляет собой совокупность входного $X_{\text{ex}}(\tau)$ вектора и прогнозных изменяющихся с неконтролируемыми отклонениями сигналов системы $E(\tau)$. Значения $E(\tau)$ контролировать невозможно, в то время как можно относительно их построить прогноз.

В предлагаемой системе получили 1 выход $Y_{\text{вых}}(\tau)$ и 3 входа $X_{\text{ex}}(\tau)$, $E(\tau)$, $X(\tau)$. Эти сигналы формируют систему управления [104, 412].

Значения $X(\tau)$, $U(\tau)$ и $E(\tau)$ имеют размерность, отличную от измерений тех же параметров $X_u(\tau)$, $U_u(\tau)$ и $E_u(\tau)$, поскольку необходимо преобразование сигналов.

Случайные отклонения значений, по сути погрешности, оценим значениями $E_x(\tau)$, $E_y(\tau)$, $E_u(\tau)$:

$$X_u(\tau) = \Phi_x[X(\tau), E_x(\tau)], \quad (3.1)$$

$$U_u(\tau) = \Phi_u[U(\tau), E_u(\tau)], \quad (3.2)$$

$$Y_u(\tau) = \Phi_y[Y(\tau), E_y(\tau)], \quad (3.3)$$

где Φ_x , Φ_u , Φ_y – для системы измерения величин $X_u(\tau)$, $U_u(\tau)$ и $E_u(\tau)$ определенные операторы.

Получаем, что процесс управления на базе передающихся сигналов в определенный момент имеет информацию о системе:

$$J = \langle X_u, U_u, Y_u \rangle. \quad (3.4)$$

Подобная информация (3.4) весьма ограничена.

Предлагается создать инверсионную стоковую методологию, с практической точки зрения представляющую собой виртуальную машину управления процессом выработки теплоты и активного угля в едином энергокомплексе с системой утилизации теплоты.

Предполагаемая цель системы управления представляется Z_y от целевой функции Z :

$$Z_y = Z[Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau)]. \quad (3.5)$$

Оценка работы энергокомплекса количественным способом сводится к поиску критерия в разрабатываемой методологии. При правильном его выборе можно составить схему инверсионно стоковой методологии. Многокритериальную задачу необходимо свести к однокритериальной, а именно выбору обобщенного критерия, который является комбинацией частных. При этом дополнительные критерии обладают своими весовыми коэффициентами.

Частные критерии должны обеспечить в котле:

- производительность, при этом температура и давление остаются без изменения, назовем этот частный критерий технологическим [104];
- снизить температуру уходящих газов за котлом и использовать полностью теплоту охлаждения активного угля, назовем этот частный критерий экономическим [103,104];

- снизить эмиссию оксидов азота и углерода в атмосферу, назовем этот критерий экологическим [414-418];

- использовать систему утилизации теплоты, в частности, при охлаждении готового продукта – активного угля.

При «суммировании» этих частных критериев технологический, экономический и экологический факторы решают оптимизационную задачу тепловой схемы энергокомплекса [404, 416-420].

Инверсионная стоковая методология имеет свою цель – поиск максимума или минимума от функции:

$$\text{Min}(\text{max})Z[Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau)] = Z^*. \quad (3.6)$$

Разработку или синтез схемы по инверсионно стоковой методологии, таким образом, можно сформулировать как: нахождение и реализация зависимости

$$U_u^*(\tau) = \varphi[Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau), Z^*], \quad (3.7)$$

которая обеспечивает возможное приближение к значению Z^* .

По зависимости (3.7) задается вектор искомого положения системы, которое задано заранее. В этом случае Z^* :

$$Z^* = Z[\varepsilon(\tau)]. \quad (3.8)$$

В зависимости (3.8) $\varepsilon(\tau)$ – ошибка вектора выходного сигнала.

Закон регулирования сборки схемы по инверсионной стоковой методологии определяется следующим образом:

$$U^*(\tau) = \varphi[\varepsilon(\tau)]. \quad (3.9)$$

Закон формулируется при выбранном отклонении параметра [421] и обеспечении минимального значения Z^* .

Согласно инверсионной токовой схеме, рис.3.1, котел как часть энергокомплекса разбивается на 5 частей, узловые точки обозначим S_1, \dots, S_5 . Схема 3.1,а относится к котлу с цепной решеткой, схема 3.1,б – к котлу с камерным сгоранием, рис.3.1,в – к совместному охлаждению с использованием системы утилизации теплоты.

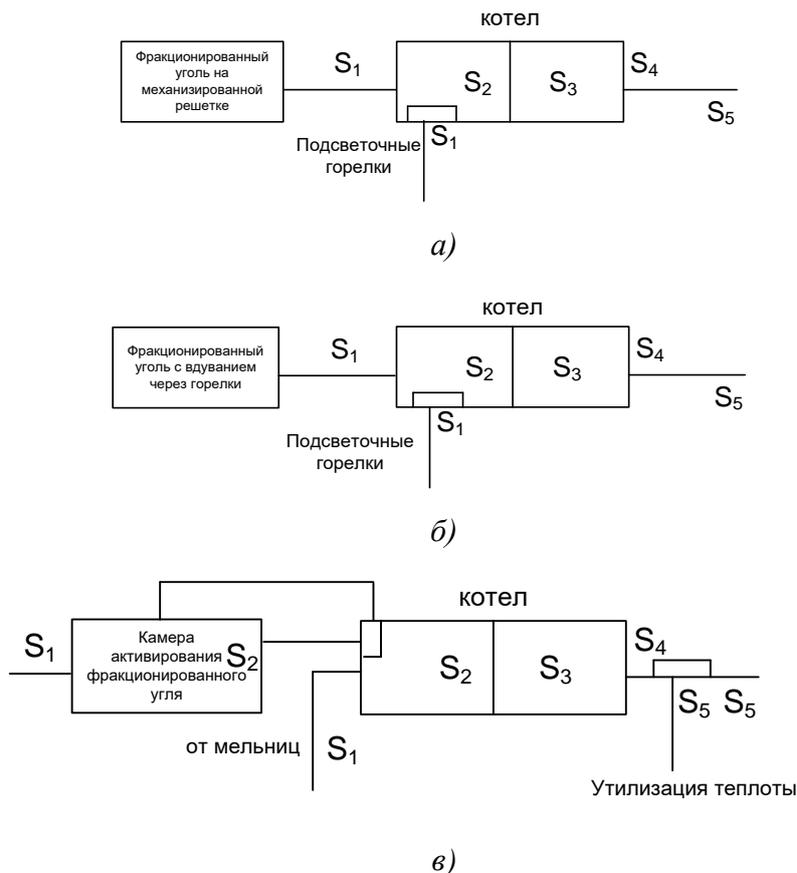


Рис.3.1. Основные положения инверсионной стоковой методологии:

a, б, в – пояснения далее по тексту

S₁ – точка соответствует подаче угля определенного состава на механизированной решетке или с прямым вдуванием. Эта точка имеет существенные ограничения [422-425], в том числе по контролируемым давлению и температуре, которые определяют тепловую мощность котла, что безусловно связано с теплотой сгорания и расходом топлива на котел [426-428].

S₂ – точка соответствует зоне активного (интенсивного) низкотемпературного горения. Эта зона формируется для разных котлов по определенной конструкции [386, 429, 430, 431]. Из этой зоны выходные сигналы – состав продуктов сгорания, их скорость и температура [385, 393, 395].

S₃ – точка соответствует объему котла после зоны интенсивного горения и до выходного окна. В этой зоне происходит разделение математической модели на две ветви. Первая относится к решению относительно уравнений тепломассообмена и газодинамики, задаваясь данными о параметрах воды и пара в котле [104,

412, 423-425]. Вторая ветвь наоборот решается относительно пара и воды с заданными значениями из уравнений теплообмена и газодинамики [432-435].

S4 – точка соответствует радиационно-конвективным поверхностям или зоне охлаждения [436, 437]. В этой зоне решающее значение имеет температура перегретого пара и локальные максимумы температуры дымовых газов.

S5 – точка соответствует поверхностям нагрева за котлом или части энергокомплекса с системой утилизации теплоты, а именно температура уходящих газов и температура охлаждения активного угля, которая определяет экономический фактор работы [386, 429-431].

При необходимости подсветки природным газом используется инверсионная стоковая схема с дополнительной точкой S2.

Для каждого отдельного узла инверсионной стоковой схемы разработаны отдельные модели поведения объектов.

Определяющей из вышеперечисленных является узловая точка S2, поскольку именно в этой точке наиболее важны выходные сигналы по температуре, скорости и концентрации. Точка S2 находится в зоне интенсивного горения. Зону интенсивного горения предлагается представить в виде трех элементов – среда факела, среда газа, внешние конструкции зоны и определить границы перечисленных элементов, рис.3.2.

Во второй главе представлена модель направленных и распределенного способов теплового излучения в зоне интенсивного горения.

Среда факела излучает в объеме зоны интенсивного горения, при этом воздействует на среду газа и внешние конструкции. Следует учитывать, что среда факела меняет свои характеристики по мере движения [437, 438].

Запыленный поток ведет себя как сплошная среда, заполняющая объем камеры сгорания котла.

Во второй главе предлагается также модель распределения пылевых частиц на входе в узловую точку S2, это новое условие учета переизлучения в зоне интен-

сивного горения, а также определения температуры как адиабатической, так и практической.

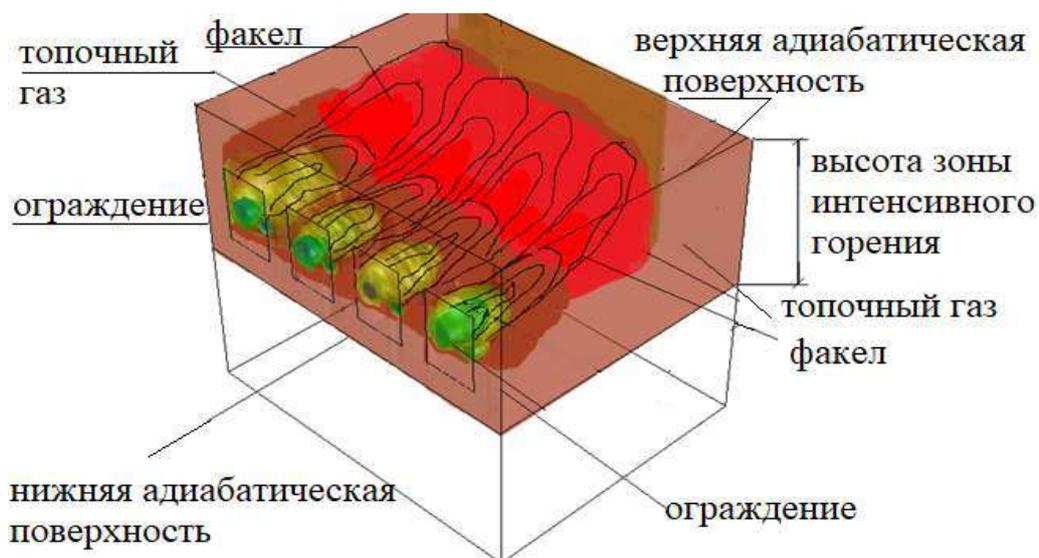


Рис.3.2. Схема на участках S2-S3 при активировании угля

3.2 Математическая модель непрерывной среды при комбинированной выработке теплоты и активного угля в едином энергокомплексе

Существующие теории теплообмена в камерах сгорания котлов не учитывают ряд важных факторов, влияющих на достоверность результатов, и методические подходы к оптимизации процессов охлаждения и горения могут быть пересмотрены с учетом пространственных и временных параметров пламени [395]. Таким образом, исследования были направлены на совершенствование фундаментальных теоретических и методологических основ изучения теплообмена в камерах сгорания котлов. Предложено расширить теорию теплообмена математическим описанием гранулометрического состава угольных частиц. То есть в разрабатываемой инверсионной стоковой методологии расширить базовые концептуальные знания в стоковых точках S1 и далее в точке S2. Кроме того, была использована разработанная математическая модель нагрева угольных частиц (пыли), основанная на непрерывной кривой гранулометрического состава в ансамбле. Математическая модель соответствует аэромеханическим и тепловым характеристикам «факела». Введено понятие континуума пламени как сплошной среды, в которой изучаются процессы горения и теплообмена на участке S2, в котором учитывают-

ся выходные сигналы участка S1. Для достижения цели исследования использовались метод зонирования камеры сгорания, уравнения стационарной и нестационарной теплопроводности, радиационного и конвективного теплообмена. Эти методы апробированы на ряде высокотемпературных агрегатов, в том числе котлоагрегатах с естественной циркуляцией, и прямоточных котлах при сжигании топлива с различными теплофизическими характеристиками. В результате доказано, что параметры гетерогенного запыленного факела зависят от математического описания гранулометрического состава угольных частиц; определены характеристики процесса горения, ранее не учитываемые в теории теплообмена; теоретически обоснованы новые методологические подходы к теории теплообмена в котле как части единого энергокомплекса. Кроме того, теоретически подтверждена возможность рассмотрения пламени как сплошной среды и показана перспективность определения адиабатического распределения температуры по длине и высоте континуума пламени в зоне интенсивного горения в камере сгорания котла. Решены концептуальные вопросы теплообмена газ-твердое тело применительно к условиям камеры сгорания. Горячие дымовые газы и трубы считаются частью единой непрерывной среды.

Исследования процессов горения топлива ведутся учеными многих стран. Одним из основных препятствий для эффективного и качественного описания является полифракционный состав угольной пыли. Здесь самое главное условие учета полного теплообмена - это количество фракций пыли. Кроме того, не следует забывать об основах теории практического охлаждения и горения, а также математического моделирования, которые развивали в двадцатом веке в мире Д.Б. Сполдинг, в странах В.В. Померанцев. Д.Б. Сполдинг представляет фундаментальные основы использования различного поведения, физического и математического горения, развития факела в котле, прогнозирования поведения факела различных конфигураций и различного топлива. В.В. Померанцев в своих исследованиях использования накопленных знаний на конкретных высокотемпературных объектах, при этом он использует данные мировых ученых, в том числе американских про-

фессора Ф.А. Уильямс. Решение задачи разработки методологических основ теплообмена в котлах невозможно без ввода новых пространственных и геометрических характеристик котельного агрегата, где предлагается математическая модель процесса горения. Ученые, сталкивающиеся на практике с неучтенным влиянием пыли в потоке, выявляют эмпирические тепловые и аэромеханические коэффициенты. Наконец, ученые пришли к выводам отдельных целесообразностей деления камеры сгорания на зоны. Недостатком всех указанных работ является рассмотрение реагентов как отдельных структурных частей топочной среды, что приводит к частным методам. В теории теплообмена необходима новая единая методология на основе математической модели, включающей конструктивные особенности котла, факельного континуума как неделимого целого, а также непрерывной функции фракционного остатка.

На основе всего вышесказанного следует отметить влияние на процесс теплообмена в котлах полифракционного состава угольной пыли. Аналитическое решение задачи этого влияния на процесс горения возможно только при разработке новых математических моделей. Кроме того, требуются специальные новые методические подходы к этой задаче, в частности разделить котел на отдельные зоны, рассматривать также топочную среду как непрерывно движущийся фактический континуум.

Предлагается следующий вариант схемы учета пылевых частиц [396] в факеле. В первую очередь, необходимо рассмотреть схему замещения существующего уравнения [397] анализа ситового остатка:

$$\frac{F[\delta/(\delta+\Delta\delta)]}{\Delta\delta} = \frac{R(\delta)-R(\delta+\Delta\delta)}{\Delta\delta} = \frac{\exp(-b\delta^n)-\exp(-b(\delta+\Delta\delta)^n)}{\Delta\delta}. \quad (3.10)$$

Существующее уравнение (3.10) практически не помогает разработчикам в анализе полного фракционного ансамбля пылевых частиц [398].

Схема замещения приводится в виде (3.11) – это уравнение учитывает среднюю арифметическую величину между двумя интервалами:

$$F_i = 0,5[F(\delta_1/\delta_2)+F(\delta_2/\delta_3)] = 0,5[\exp(-b\delta_1^n)-\exp(-b\delta_3^n)]. \quad (3.11)$$

По способу (3.11) можно получить непрерывную линию, которая будет описывать действительный характер распределения пылевых частиц.

Гауссова кривая позволяет показать плотность распределения [389] пылевых частиц с достаточной достоверностью

$$\varphi(u) = \exp(-0,5u^2) / \sqrt{2\pi}, \quad (3.12)$$

где аргумент функции – это стандарт отклонения взятый в виде $u = (\delta - \xi) / (\xi \cdot \sigma)$, соответственно δ - размер пылевой частицы, ξ - максимум размера частиц, σ - отклонение от нормального распределения. Функцию (3.12) представим в виде Гауссовой кривой на рис.3.4.

Линеаризовать логарифмически расчетное значение и кривую по уравнению (3.12) следует по уравнению (3.13):

$$y_2 = \ln \varphi(u) = -(0,92 + 0,5u^2). \quad (3.13)$$

По уравнению (3.13) определяется корреляционный коэффициент, который используется для коррекции уравнения (3.12).

Для запыленного потока газов предлагается скорость [392]:

$$w_{l,T} = 1,93w_0 (T/T_0)(l/d_0)^{-0,5}. \quad (3.14)$$

Далее необходимо определить безразмерную температуру нагрева пылевых частиц:

$$\Theta = \exp(-3BiFo), \quad (3.15)$$

где в формуле (3.15) числа Био и Фурье содержат физические параметры относящиеся к составу пылевых частиц.

Для определения времени интенсивного горения необходим параметр m :

$$m = 1 + \alpha\delta/2\lambda(\zeta + 2) = \alpha[1/\alpha + 0,5\delta/\lambda(\zeta + 2)] = 1 + 0,5Bi/(\zeta + 2). \quad (3.16)$$

Представив пылевые частицы условными сферами, можно использовать значения $\zeta = 3$.

Тогда определим время интенсивного горения:

$$\tau_{инт} = [\delta\rho c m / (2\alpha\zeta)] \ln(\theta_0 / \theta_{инт}), \quad (3.17)$$

где θ_0 и $\theta_{инт}$ - разности температур среды газа и начальной у пылевой частицы, а также среды газа и интенсивного горения.

Пылевые частицы охлаждаются последовательно от наиболее мелких фракций до наиболее крупных, поэтому применим интеграл (3.18) как функцию, отвечающую за количество теплоты:

$$\Phi(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\delta_{\max}} \exp\left\{-0,5\left[(\delta-\xi)/(\sigma\cdot\xi)\right]^2\right\} d\delta = \Phi_u(U). \quad (3.18)$$

Учитывая соотношения между интегралом (3.18) и функцией ошибок [389], получим уравнение (3.19):

$$\Phi_u(U) - 1/2 = 0,5\text{erf}(U/\sqrt{2}) = \Phi(U). \quad (3.19)$$

Температуру в любом сечении начального участка факела в зоне интенсивного горения определим по формуле:

$$T = T_{инт} + L_{\phi}(T_{кон} - T_{инт}). \quad (3.20)$$

Кроме того, не забудем учесть факторы [392], влияющие на скорость движения факела в зоне интенсивного горения:

$$w_{\phi} = w_0 k_F k_V k_T, \quad (3.21)$$

где k_F, k_V, k_T - влияющие на скорость факторы: площадь сечения, расходная характеристика и температура:

$$k_F = \frac{1}{(1 + 0,2l_{\phi}/d_0)^2}, \quad (3.22)$$

$$k_V = \frac{1}{\left[1 + L_{\phi} \left(\frac{V_{\Gamma}^{\alpha}}{V_{\text{В}}^{\alpha}} - 1\right)\right]}, \quad (3.23)$$

$$k_T = T_{\phi}/T_0. \quad (3.24)$$

3.3 Математическая модель теплообмена запыленного газового потока

В этой главе с учетом разработок автора [385] необходимо сформулировать и предложить варианты решения совместной задачи газодинамики и теплообмена в выделенной области камере сгорания котла.

Необходимо выявить специфические факторы, влияющие на теплообмен, горение, а также определить влияние оградительных конструкций [385].

Как было сказано ранее, согласно инверсионной стоковой методологии, существует несколько наиболее важных стоковых точек. На рисунках 3.2 и 3.3 показаны схемы деления камеры сгорания на отдельные области, причем внутри этих областей подсистемы все вместе рассматриваются как сплошная неделимая среда согласно главе 3.2.

Первая подсистема – среда газа, вторая – среда факела, третья – оградительные элементы. Первые две считаем имеющими свойства газов, третью – твердой поверхностью.

Среда газа однородна и имеет условно постоянную температуру в узловой точке S2. Состав среды газа – это продукты сгорания, а в случае запыленного потока, еще и угольная пыль, на выходе из стоковой точки S2. Перечисленные параметры, а именно концентрация (состав) продуктов сгорания и температура наиболее важны для определения свойств излучения.

Согласно общепринятым представлениям о теплообмене для среды газа ее свойства – это степень черноты, которая зависит для угольных частиц от концентрации углекислого газа, а для горения природного газа еще от концентрации водяных паров; температура и парциальное давление среды газа; оптическая длина (толщина) слоя газа. По известным данным $\varepsilon = 0,12 - 0,20$, причем меньшие значения относятся к пыли, большие – к природному газу. Среда факела непостоянна по своим свойствам на участке интенсивного горения. Запыленный поток ведет себя как сплошная среда, заполняющая объем камеры сгорания котла.

Далее приведем некоторые особенности построения математической модели теплообмена в стоковой точке S2. Среда факела при горении природного газа в проницаема для теплового излучения и не отражает тепловое излучение. В этом случае возникает вопрос как рассчитать эффективное излучение – как сумму теплового излучения пропущенного и теплового излучения собственного.

В случае запыленного газового потока задача отыскания эффективного излучения усложняется. Часть теплового излучения в таком факеле поглощается, а часть рассеивается, но и ослабляется пылевыми частицами.

Для вышеприведенных случаев горения природного газа и запыленного потока расставим коэффициенты, характеризующие тепловое излучение по закону Бугера [104, 386, 387].

Для самого общего случая:

$$k_{осл} = k_{погл} + k_{рас}. \quad (3.25)$$

В формуле (3.25) $k_{осл}$, $k_{погл}$, $k_{рас}$ - коэффициенты ослабления, поглощения, рассеивания теплового излучения.

Для горения природного газа:

$$k_{рас} = 0. \quad (3.26)$$

$$k_{осл} = k_{погл}. \quad (3.27)$$

$$A = \varepsilon. \quad (3.28)$$

$$k_{погл} = A. \quad (3.29)$$

$$k_{осл} = \varepsilon. \quad (3.30)$$

В этом случае имеем самый простой вариант теплового излучения, следовательно, собственное тепловое излучение среды газа:

$$E = \varepsilon C_0 \theta^4. \quad (3.31)$$

Коэффициент излучения АЧТ известен и равен $C_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$, а температура среды газа, деленная на 100, обозначена θ .

Так как для среды газа ε находится в диапазоне $0 \dots 1$, то внешнее тепловое излучение на границе среды газа определится по формуле:

$$E_{пр} = E_{над} \cdot (1 - \varepsilon). \quad (3.32)$$

Запыленный поток содержит частицы пыли, поэтому тепловое излучение ослабевает по закону Бера.

$$B_{и} = 0,25 F_{нов} \mu l_{эф}. \quad (3.33)$$

В формуле (3.33) μ - концентрация пылевого потока.

При определении оптической длины излучения (толщины слоя) для запыленного потока следует применить совместное уравнение законов Бугера и Бера:

$$\varepsilon_{z+\theta} = a_{z+\theta} = 1 - e^{-(Bu_z + Bu_\theta)}. \quad (3.34)$$

Свойства CO_2 и дополнительно при горении природного газа для H_2O , исследуют по графикам или по аналогичным формулам нормативной методики [387].

При появлении значительных долей различных газов, кроме углекислого и паров воды, а для запыленного потока это именно так, то в этом случае их учитывают по формуле:

$$\varepsilon_z = a_z = 1 - \prod_i (1 - \varepsilon_i). \quad (3.35)$$

Возможно использование формул известных авторов [286]:

$$Bu_z = (0,8 + 1,6 p_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot (1 - 0,00038T) \cdot (p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}})^{0,5} \cdot l_{\text{эф}}^{0,5}. \quad (3.36)$$

При использовании запыленных потоков можно использовать формулы [387]:

- для частиц при $\mu l_{\text{эф}} \leq 20 \text{ г/м}^2$

$$Bu_\theta = 0,04 \cdot T^{0,5} \cdot \mu \cdot l_{\text{эф}} \cdot d_{\text{cp}}, \quad (3.37)$$

- для частиц при $\mu l_{\text{эф}} \approx 120 \text{ г/м}^2$

$$Bu_\theta = 0,015 \cdot (T \cdot d_{\text{cp}}^{-1})^{0,33} \cdot \left(1 - \frac{0,65}{1 + 1000 \cdot (\mu \cdot l_{\text{эф}})^{-2}} \right). \quad (3.38)$$

В (3.37) и (3.38) d_{cp} – условный средний по размеру диаметр частиц, мкм.

Запыленный газовый поток имеет пыль различных фракций, в предыдущей главе показано, что применение Гауссовой кривой с коэффициентами корреляциями удовлетворяет условиям последовательного горения и охлаждения частиц пыли [388, 389].

Следовательно, данные полученные по формулам глав 3.2 встраиваются в формулы для расчета теплообмена [390, 391] главы 3.3.

Положения касательно теплообмена оградительных конструкций вынесем в отдельную главу 3.4.

3.4. Математическая модель теплообмена ограждающих конструкций при комбинированной выработке теплоты и активированных частиц в едином энергокомплексе

Согласно рисунку 3.2 камера сгорания разделена на две газовых подсистемы – среды газа, факела и одну твердотельную подсистему – ограждающие конструкции. Необходимо сформулировать адаптационные правила применения разработанной методологии для ограждающих конструкций [393, 394].

Первое адаптационное правило – разделение зоны горения на участки с индивидуальными способами теплообмена.

Ограждающие конструкции характеризуются постоянным интегральным значением $\varepsilon_{ог}$, которое зависит от геометрических характеристик камеры сгорания. В нормативной базе [104] предлагаются несколько вариантов учета особенностей камер сгорания, но в реальных условиях охлаждения или горения в котле справочные полуэмпирические данные могут резко отличаться и дать погрешность в расчетах.

Ограждающие поверхности вогнуты, что добавляет в расчеты самооблучение. Адиабатические оболочки в газовой среде – разработка автора, они виртуальны, через них не проходит тепловое излучение. Такие оболочки необходимы, чтобы соблюдать физические условия существования температурных, скоростных и концентрационных полей между стоковыми точками S1, S2, S3 согласно разработанной инверсионной стоковой методологии.

Среда газа, как было сказано ранее в главе 3.3, обладает значением $\varepsilon_2 = \varepsilon$ [386]. Среда газа и адиабатические оболочки показаны на рис. 3.2.

На рисунке 3.2 представлена схема горения и получения активного угля согласно разработанной методологии. Здесь следует отметить, что схема отличается от существующих аналогов, является новой в технике. В этом варианте учитывается движение пылевых частиц в ансамбле. Кроме того, новым является использование адиабатических поверхностей сверху и снизу зоны интенсивного горения. Под газовой средой понимается среда с повышенным содержанием компонентов

воздуха в потоке за счет присосов в камере сгорания и образующимися за счет химических реакций продуктами сгорания.

Среда факела характеризуется площадью F_ϕ , температурой T_ϕ , значением степени черноты ε_ϕ . Оградительные конструкции имеют площадь F_{oz} , температуру T_{oz} . Среда газа имеет температуру T_z , значение степени черноты ε_z . При таких обозначениях в общем виде баланс по тепловому излучению на условной поверхности факела (с учетом адиабатических оболочек) и на оградительных поверхностях имеет вид:

$$q_\phi F_\phi = q_z^\phi \cdot F_\phi + Q_{oz} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot \varphi_{oz,\phi} - Q_\phi. \quad (3.39)$$

$$q_{oz} F_{oz} = q_z^{oz} \cdot F_{oz} + Q_\phi \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot \varphi_{\phi,oz} - Q_{oz}. \quad (3.40)$$

В формулах (3.39), (3.40) q_ϕ , q_{oz} – плотности тепловых потоков (результатирующих) на 1 м^2 среды факела и оградительных конструкций, q_z^ϕ , q_z^{oz} – плотности теплового излучения среды газа на 1 м^2 среды факела и оградительных конструкций, Q_ϕ , Q_{oz} – тепловое излучение среды факела и оградительных конструкций.

После преобразований формул (3.39), (3.40) получим значение q_ϕ

$$q_\phi = q_z^\phi + (1 - \varepsilon_z) \cdot q_z^{oz} + Q_\phi / F_\phi \cdot [(1 - \varepsilon_z)^2 \cdot F_\phi / F_{oz} - 1] + (1 - \varepsilon_z) \cdot [Q_{\phi,oz} / F_{oz} - q_{oz}]. \quad (3.41)$$

Из уравнения (3.41) получим зависимость, что величина q_ϕ зависит от нескольких основных параметров, а именно q_z^ϕ , q_z^{oz} , ε_z и, наконец, от величины $\varphi_{\phi,oz} = F_\phi / F_{oz}$, которая называется угловым коэффициентом, в данном случае для теплового излучения со стороны оградительных конструкций на среду факела.

Величина плотности теплового излучения от среды газа определяет три режима нагрева:

№1. $q_z^\phi = q_z^{oz}$ – распределенное равномерно тепловое излучение,

№2. $q_z^\phi > q_z^{oz}$ – направленное прямое тепловое излучение,

№3. $q_z^\phi < q_z^{oz}$ – направленное косвенное тепловое излучение.

Режим №1 соответствует установившемуся условно стационарному (квазистационарному) режиму горения с использованием механизированной решетки.

Режим №2 соответствует повышению температуры в камере сгорания при горении в факеле.

Режим №3 соответствует режиму горения в факеле, использования подсветочного топлива и использования системы утилизации теплоты.

Рассмотрим все 3 режима более подробно для возможности составления математической модели теплового излучения в камере сгорания котла.

Режим №1. Режим подразумевает однородность параметров среды газа в объеме между стоковыми точками S1,S2,S3. При этом интенсификация теплообмена зависит от степени черноты среды газа ε_2 и величины $\varphi_{ог.ф} = F_{ф} / F_{ог}$.

Собственное тепловое излучение среды газа определяется по закону:

$$q_2^{\phi} \cdot F_{\phi} = \sigma_2 \cdot F_{\phi} \cdot T_2^4. \quad (3.42)$$

В уравнении (3.42) величина σ_2 определится следующим образом:

$$\sigma_2 = \sigma_0 \cdot \varepsilon_2. \quad (3.43)$$

Тепловое излучение на ограждающие конструкции:

$$Q_{рез.ог} = q_{ог} \cdot F_{ог}. \quad (3.44)$$

Кроме того, на ограждающие конструкции попадает часть эффективного потока теплового излучения среды факела, которая прошла через слой среды газа:

$$q_{ф}^{ог} = Q_{ф} \cdot (1 - \varepsilon_2). \quad (3.45)$$

Ограждающие конструкции вогнуты, поэтому переизлучение следует учесть по формуле:

$$\begin{aligned} Q_{вз.ог} &= Q_{ог} \cdot \varphi_{ог.ф} \cdot (1 - \varepsilon_2) = \\ &= \left[\sigma_{ог} \cdot F_{ог} \cdot T_{ог}^4 + Q_{ог} \cdot F_{ог} \cdot (1 - \varepsilon_2) + Q_{ог}^{\phi} \cdot F_{ог} \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot (1 - \varepsilon_{ог}) \right] \cdot (1 - \varphi_{ог.ф}) \cdot (1 - \varepsilon_2) \end{aligned} \quad (3.46)$$

В уравнение (3.46) входят тепловые излучения: собственное ограждающих конструкций, среды газа, среды факела, которые отражены ограждающими конструкциями.

Ограждающие конструкции представляют собой экраны и обмуровку. Тепловой поток для этого случая определим как:

$$Q_{рез.ог} = q_{ог} \cdot F_{ог}. \quad (3.47)$$

Формулу (3.47) используем для определения теплового излучения на огражденные конструкции:

$$Q_{oz} = [\sigma_z \cdot F_{oz} \cdot T_z^4 + Q_\phi \cdot (1 - \varepsilon_z) + q_{oz} \cdot F_{oz}] \cdot [1 - (1 - \varphi_{oz,\phi}) \cdot (1 - \varepsilon_z)]. \quad (3.48)$$

Собственное тепловое излучение среды газа на среду факела:

$$q_z^\phi \cdot F_\phi = \sigma_z \cdot F_\phi \cdot T_z^4. \quad (3.49)$$

Тепловое излучение ограждающих конструкций на среду факела:

$$Q_{oz}^\phi = Q_{oz} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot \varphi_{oz,\phi} \quad (3.50)$$

Ранее оговаривалось, что эффективным тепловым излучением среды факела является сумма собственного теплового излучения среды газа, отраженного теплового излучения среды газа, собственного теплового излучения ограждающих конструкций, отраженного теплового излучения ограждающих конструкций.

$$Q_\phi = \sigma_\phi \cdot F_\phi \cdot T_\phi^4 + \sigma_z \cdot F_\phi \cdot T_z^4 \cdot (1 - \varepsilon_\phi) + Q_{oz} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot (1 - \varepsilon_\phi) \cdot \varphi_{oz,\phi}. \quad (3.51)$$

Результирующее тепловое излучение на поверхность среды факела:

$$Q_\phi^{pez} = q_\phi^{pez} \cdot F_\phi. \quad (3.52)$$

После нескольких математических преобразований, получим значение результирующего теплового излучения:

$$Q_\phi^{pez} = \sigma_z \cdot F_\phi \cdot \varepsilon_\phi \cdot T_z^4 + Q_{oz} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot \varphi_{oz,\phi} \cdot \varepsilon_\phi - \sigma_\phi \cdot F_\phi \cdot T_\phi^4. \quad (3.53)$$

Уравнение (3.53) преобразуем к виду:

$$Q_\phi^{pez} = C_{z,oz,\phi} \cdot F_\phi \cdot [\theta_z^4 - \theta_\phi^4]. \quad (3.54)$$

В уравнении (3.54) $C_{z,oz,\phi}$ – коэффициент теплового излучения, приведенный к системе среда факела – среда газа - ограждающие конструкции, если раскрыть все множители, получим:

$$C_{z,oz,\phi} = C_0 \cdot \varepsilon_z \cdot \varepsilon_\phi \cdot \frac{1 + \varphi_{oz,\phi} \cdot (1 - \varepsilon_z) - \frac{(q_{oz} - q_{вз.оз}) \cdot (1 - \varepsilon_z)}{C_0 \cdot \varepsilon_z} \cdot \frac{F_\phi}{F_{oz}}}{\varphi_{oz,\phi} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot [\varepsilon_\phi + \varepsilon_z \cdot (1 - \varepsilon_\phi)] + \varepsilon_z}. \quad (3.55)$$

Величина коэффициента теплового излучения, приведенного к системе среда факела – среда газа — ограждающие конструкции с применением инверсионной

стоковой методологии и новой математической модели теплообмена на участке S1,S2,S3 в частности:

$$C_{z.oz.\phi} \equiv C_{np}. \quad (3.56)$$

Значение $C_{z.oz.\phi}$ зависит от ε_z , от соотношения площадей среды факела и ограждающих конструкций $\varphi_{oz.\phi}$, от величины ε_ϕ .

Площадь ограждающих конструкций для эксплуатируемого котла постоянна, а для проектируемого может быть изменена, что относится к процессу оптимизации тепловой схемы на основе разработанной инверсионной стоковой методологии. В тоже время величина ε_z не зависит от площади ограждающих конструкций и от ε_ϕ . Впрочем, можно будет уточнить эти положения при анализе оптической длины теплового излучения.

Согласно существующей нормативной методике [104] величину q_{oz} определяется через эффективность тепловосприятия и рассеивание теплоты в окружающую среду:

$$q_{oz} = \Psi_s / \varphi. \quad (3.57)$$

Плотность теплового излучения, возвращаемого в замкнутую систему обозначается $q_{вз.оз}$. Результирующее тепловое излучение с учетом введенных положений методологии преобразуем к виду разделенному на тепловое излучение и конвективный теплообмен:

$$Q_\phi^{рез} = \frac{\varepsilon_\phi \cdot F_\phi \cdot \left[\frac{F_\phi}{F_{oz}} \cdot (1 - \varepsilon_z) + 1 \right] \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_z \cdot [\theta_z^4 - \theta_\phi^4] - (q_{oz} - q_{вз.оз}) \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot \frac{F_{oz}}{F_\phi}}{\frac{F_\phi}{F_{oz}} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot [\varepsilon_\phi + \varepsilon_z \cdot (1 - \varepsilon_\phi)] + \varepsilon_z}. \quad (3.58)$$

Из формулы (3.58) следует, что результирующее тепловое излучение на среду факела может быть повышено при увеличении температуры среды газа T_z , увеличении значений ε_z и $\varphi_{oz.\phi}$, причем особенно сильное влияние имеют уменьшение ε_z ниже 0,4, и уменьшение $\varphi_{oz.\phi}$ до 0,7.

Также приведем соотношения в критических точках, то есть при $\varepsilon_2 \rightarrow 0$ температура ограждающих конструкций. И, наоборот, при $\varepsilon_2 \rightarrow 1$ температура ограждающих конструкций $T_{oz} \rightarrow T_2$.

Результирующее тепловое излучение на ограждающую поверхность можно определить из соотношения:

$$q_{oz} = q_{над} \cdot x \cdot \zeta / (1 - \varphi_n). \quad (3.59)$$

В формуле (3.59) x – угловой коэффициент для поверхностей нагрева, ζ – коэффициент закрытия поверхностей нагрева (применяется не всегда), коэффициент сохранности теплоты

$$\varphi_n = 1 - q_5 / (q_5 + \eta_{к.а}). \quad (3.60)$$

Разработанная инверсионная стоковая методология позволяет на базе уже сделанных математических моделей преобразовать уравнение (3.55) таким образом, что в правой части появится коэффициент сохранности теплоты:

$$C_{2.оз.ф} = \frac{C_0 \cdot \varphi_n \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_\phi \cdot [\varphi_{оз.ф} \cdot (1 - \varepsilon_2) + 1]}{\varphi_{оз.ф} \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot [\varepsilon_\phi + \varepsilon_2 \cdot (1 - \varepsilon_\phi)] + \varepsilon_2}. \quad (3.61)$$

Проверим достоверность математических формул и уравнений главы 3.4.

Для этого необходимо рассмотреть точки максимума функции (3.61).

Если предположить, что для среды газа $\varepsilon_2 = 1$, то из уравнения (3.61) получим:

$$C_{2.оз.ф} = C_0 \cdot \varphi_n \cdot \varepsilon_\phi. \quad (3.62)$$

При подстановке значений в формулу (3.62):

$$C_{2.оз.ф} = 5,67 \cdot 0,95 \cdot \varepsilon_\phi = 5,3865 \cdot \varepsilon_\phi. \quad (3.63)$$

Из уравнения (3.63) получим, что приведенный коэффициент $C_{2.оз.ф}$ зависит от степени черноты среды факела ε_ϕ .

Изобразим зависимость (3.63) на графиках рис.3.3 при различных значениях ε_ϕ . Из этих графиков можно определить ε_2 при заданных значениях ε_ϕ и $\varphi_{оз.ф}$.

Рассмотрим значение ограждающих конструкций на участках S1,S2,S3. Тепловое излучение от ограждающих конструкций определим по формуле:

$$Q_{oz} = C_0 \cdot \varepsilon_{oz} \cdot \theta_{oz}^4 \cdot F_{oz} = \frac{\varphi_n \cdot [C_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot \theta_2^4 \cdot F_{oz} + C_0 \cdot \varepsilon_\phi \cdot \theta_\phi^4 \cdot F_\phi \cdot (1 - \varepsilon_2)]}{1 - (1 - \varphi_{oz,\phi}) \cdot (1 - \varepsilon_2)} \quad (3.64)$$

откуда

$$\frac{\varepsilon_{oz} \cdot \theta_{oz}^4}{\varphi_n} = \frac{\varepsilon_2 \cdot \theta_2^4 - \varepsilon_\phi \cdot \theta_\phi^4 \cdot \frac{F_\phi}{F_{oz}}}{1 - \left(1 - \frac{F_\phi}{F_{oz}}\right) \cdot (1 - \varepsilon_2)} \quad (3.65)$$

Уравнение (3.65) после математических преобразований приведем к виду:

$$\Psi_{oz} = \frac{\varphi_n \cdot (\Psi_2 - \Psi_\phi \cdot \varphi_{oz,\phi})}{\varphi_{oz,\phi} + \varepsilon_2 \cdot (1 - \varphi_{oz,\phi})} \quad (3.66)$$

Зависимость (3.66) позволяет определить основное условие для перехода среды факела к излучению при условии нейтральных ограждающих конструкций:

$$\Psi_2 = \Psi_\phi \cdot \varphi_{oz,\phi} \quad (3.67)$$

Направленные режимы №2 и №3.

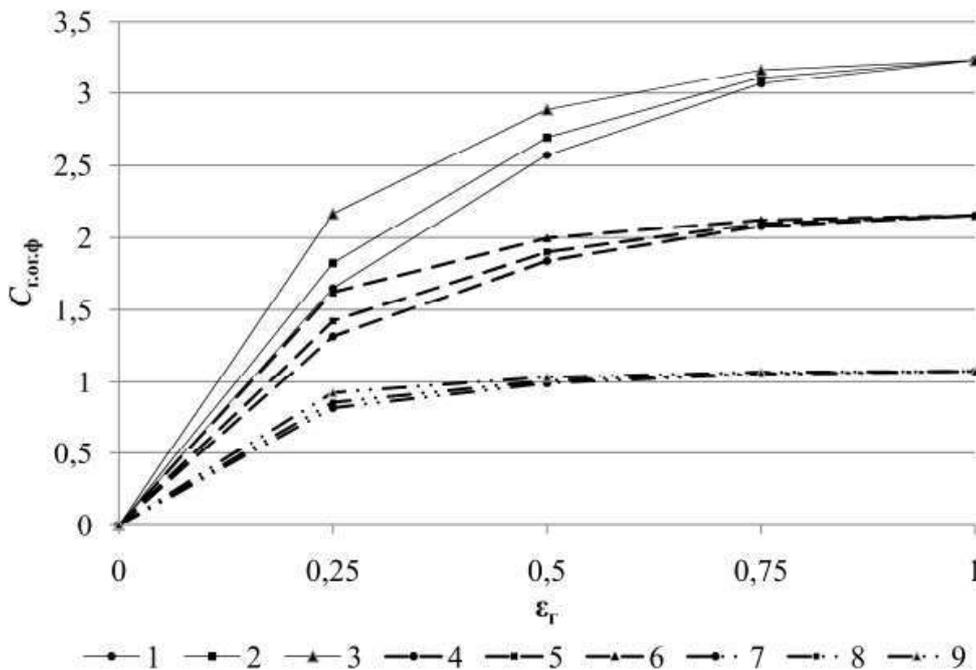


Рис. 3.3. Графики зависимостей $C_{г,ог,ф} = f(\varepsilon_2)$ по уравнению (3.63): 1 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,5$; $\varepsilon_\phi = 0,6$; 2 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,0$; $\varepsilon_\phi = 0,6$; 3 – $\varphi_{oz,\phi} = 0,5$; $\varepsilon_\phi = 0,6$; 4 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,5$; $\varepsilon_\phi = 0,4$; 5 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,0$; $\varepsilon_\phi = 0,4$; 6 – $\varphi_{oz,\phi} = 0,5$; $\varepsilon_\phi = 0,4$; 7 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,5$; $\varepsilon_\phi = 0,2$; 8 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,0$; $\varepsilon_\phi = 0,2$; 9 – $\varphi_{oz,\phi} = 0,5$; $\varepsilon_\phi = 0,2$

При горении в факеле возникает направленный прямой режим теплового излучения, а при дополнительной подсветке тепловое излучение направлено на отдельные элементы системы, то есть наблюдается косвенное тепловое излучение.

Обозначим Ψ''_z – коэффициент эффективности тепловосприятия слоя среды газа, который примыкает к среде факела и Ψ'_z – коэффициент эффективности тепловосприятия слоя среды газа в пространстве между средой факела и ограждающими конструкциями.

Плотность теплового излучения от среды факела:

$$q_{nao}^{\phi} = \Psi''_z + \Psi'_z \cdot (1 - \varepsilon''_z) + q_{nao}^{oz} \cdot \varphi_n \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z). \quad (3.68)$$

где

$$q_{nao}^{oz} = \Psi'_z + \Psi''_z \cdot (1 - \varepsilon'_z) + \Psi_{\phi} \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z). \quad (3.69)$$

Получим при подстановке (3.68) в (3.69):

$$q_{nao}^{\phi} = \Psi''_z \cdot [1 + \varphi_n \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z)] + \Psi'_z \cdot [(1 - \varepsilon''_z) + \varphi_n \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z)] + \Psi_{\phi} \cdot \varphi_n \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z). \quad (3.70)$$

Возникает определенная разность между значениями плотностей теплового излучения при режиме №1 и режимах №2, 3:

$$\Delta q_{nao}^{\phi} = q_{nao}^{\phi, \text{напр}} - q_{nao}^{\phi, \text{распр}}. \quad (3.71)$$

Результат от применения режимов №2 и №3:

$$\frac{\Delta q_{nao}^{\phi}}{q_{nao}^{\phi, p}} = \frac{(\Psi''_z - \Psi'_z) \cdot [1 + \varphi_n \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z)]}{\Psi'_z \cdot [(1 - \varepsilon''_z) + 2\varphi_n \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z) + 1] + \Psi_{\phi} \cdot \varphi_n \cdot (1 - \varepsilon'_z - \varepsilon''_z)}. \quad (3.72)$$

Подставим значения параметров в уравнение (3.72):

$$\varepsilon'_z = \varepsilon''_z = \varepsilon_{\phi} = 0,4, \quad T'_z = 1500K, \quad T''_z = 1700K, \quad T_{\phi} = 1000K, \quad \varphi_n = 0,95.$$

Получим, что $\frac{\Delta q_{nao}^{\phi}}{q_{nao}^{\phi, p}} = 0,277$. Из этого соотношения следует, что применение ре-

жима №2 повышает плотность теплового излучения в 1,277.

Основные выводы по приведенному примеру сводятся к следующему: для увеличения ε_z необходимо увеличить размеры камеры сгорания, так как это позволяет увеличить длину участка интенсивного горения. Кроме того, поверхность факела может быть увеличена при увеличении числа газодинамических потоков,

истекающих в камеру сгорания при использовании подсветочного топлива, или увеличении числа факелов при горении природного газа путем изменения конструкции горелочных устройств и их числа. Об этих возможностях повышения эффективности работы котла и оптимизации его тепловой схемы будет сказано в следующих главах работы. При реализации режима № 3 участки с повышенным тепловым излучением должны располагаться вблизи оградительных конструкций. Такое расположение позволяет управлять количеством образующихся оксидов углерода и азота.

3.5. Математическая модель определения начального участка гетерогенного факела и ее адаптация [400]

В теории горения энергетических топлив общепризнанными являются математические модели с критическими условиями самовоспламенения в нестационарной и стационарной постановке, связанные с работами советских академиков Я.Б.Зельдовича и Н.Н.Семенова [401,402]. Эти модели построены на анализе основных соотношений теплопереноса в объеме предварительно перемешанных компонентов горения при различных условиях адаптации к реальным схемам. Причем нестационарная теория рассматривает распространение пламени в закрытом объеме, что соответствует в основном нештатным ситуациям в энергетике, а стационарную теорию можно применить к устойчивому процессу горения в движущейся смеси компонентов горения. Обе теории содержат рекомендации по управлению процессом горения при воспламенении от внешнего источника. Изложенный ниже материал дополняет ряд данных по математическому описанию различных элементов процесса горения топлива, начиная с участка, где смесь нагревается до условий воспламенения.

Процессы в начальном участке факела

Недостаточная изученность вопросов горения топлива связана со сложностью процесса, который основан на фундаментальных законах переноса субстанций – теплоты, массы, импульса с включением основных законов химической кинетики.

Воспламенение, переходящее в устойчивое горение, возможно при благоприятном сочетании факторов химической, аэромеханической и тепловой природы.

При классификации способов воспламенения горючих смесей с учетом классических методов можно условно выделить три схемы: нагрев объема смеси до температуры самовоспламенения t_{cv} ; зажигание от контакта с пламенем, имеющим температуру $t_{nl} > t_{cv}$, но при этом температура смеси может быть ниже t_{cv} ; зажигание от нагретой твердой поверхности при $t_{нов} > t_{cv}$.

В основе всех трех схем лежит не сформулированное в явном виде допущение, что горючая смесь находится в пределах воспламенения – нижнего, соответствующего «бедным» смесям, и верхнего, соответствующего «богатым» смесям. На основе анализа теплофизических соотношений можно полагать, что выход за верхний предел воспламенения связан с устойчивостью горящего факела, а для задачи определения начального участка определяющим является нижний предел воспламенения. При этом существенны схемы с зажиганием, но возможна и схема горения предварительно перемешанных компонентов горения, тогда определяющей становится схема с нагревом объема смеси до температуры t_{cv} . Возможны и более сложные схемы, которые можно анализировать по сформулированным выше принципам и схемам.

При определении зависимости температуры факела от его длины $T_{\phi}(L_{\phi})$ посредством предложенной ранее интегральной функции тепловыделения $\Phi(L_{\phi})$ начало горящего гетерогенного факела размещается в плоскость воспламенения $L_{\phi} = 0$, но эта плоскость отстоит от выходного сопла горелочного устройства на расстоянии l_n , м. Таким образом, для согласования геометрических размеров факела с функцией тепловыделения необходимо определить протяженность начального участка и сформулировать систему физико-математических соотношений для определения факторов, влияющих на l_n , что и является задачей настоящей работы.

На рисунке 3.7 изображены термо-гравиметрические кривые, построенные по данным [385,397], где показано изменение выхода продуктов термической дест-

рукции природного твердого топлива, относящегося к категории гумолитов, в процентах на сухую беззольную массу.

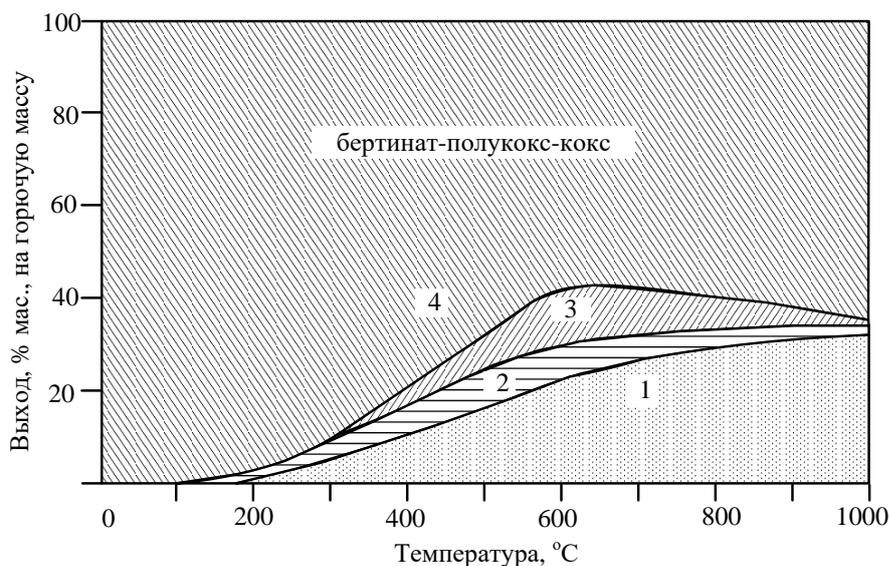


Рис. 3.4. Выход продуктов термического разложения в зависимости от температуры: 1 – газ; 2 – пирогенетическая вода; 3 – смола; 4 – твердый остаток

В первой стадии выделяется небольшое количество газообразных продуктов разложения $\sim 3,0\%$ от исходной массы, с низкой теплотой сгорания. При определении начального участка факела эту стадию можно не учитывать, тем более, что продукты газификации в первой стадии учитываются в составе второй стадии. Температурные функции выделения трех компонентов летучих веществ – газовой фазы $V_{газ}^z$, пирогенетической воды $V_{не}^z$ и смолистых веществ $V_{см}^z$ на горючую (сухую беззольную) массу можно описать следующими аппроксимациями

$$V_{газ}^z = 3,0 + 6,17 \cdot 10^{-2} \Delta t; \quad (3.73)$$

$$V_{не}^z = 3,0 + 1,5 \cdot 10^{-2} \Delta t; \quad (3.74)$$

$$V_{см}^z = 3,7 \cdot 10^{-2} \Delta t. \quad (3.75)$$

Начальный участок факельного континуума протяженностью l_n , м, от выхода смеси из горелочного устройства до плоскости воспламенения определяет стабильность процесса горения и частично его эффективность; на этом участке всем явлениям переноса субстанций свойственна четко выраженная трехмерная пространственная структура.

Применение концепции факельного континуума [385] позволяет рассматривать задачу в двух измерениях – с учетом продольной l и поперечной r координат. Причем теплофизические свойства факельной среды считаются постоянными в направлении r , ступенчато изменяющиеся к свойствам топочного газа на границе факела. Задача для начального участка включает не только определение его длины l_n , но и определение возможности применения управляющих воздействий в направлении изменения основных его характеристик.

При определении начального участка гетерогенного факела существенную роль играет динамика выхода летучих веществ из топливных частиц при нагреве. Суммарный эффект выхода летучих веществ определяется сложением уравнений (3.73)–(3.75), а перевод в измерение в процентах от рабочей смеси – умножением на $(100 - A^p - W^p)/100$, в результате получается уравнение

$$V^p = 3,480 + 6,595 \cdot 10^{-2} \Delta t \quad (3.76)$$

или в массовых долях

$$V^p = 0,0348 + 0,6595 \cdot 10^{-3} \Delta t. \quad (3.77)$$

Уравнения (3.76)–(3.77) связывают количество выделяемых летучих веществ с уровнем нагрева частиц топлива в интервале температур 300–600 °С, причем $\Delta t = t - 300$. При получении уравнений (3.76)–(3.77) приняты средние значения балластных составляющих бурого угля $A^p = 7,0 \%$, $W^p = 35,0 \%$.

При выборе алгоритма определения начального участка факела от выхода дисперсного потока из горелочного устройства до начала воспламенения l_n необходимо выделить несколько схем по принципу учета влияния определяющих факторов, на основе идентификации которых разрабатываются математические модели расчета l_n . Предлагается следующая схема классификации:

- расчет на основе определения температуры интенсивного выхода летучих веществ $t_{инт}$, которая косвенно соответствует температуре воспламенения;
- расчет на основе определения концентрации летучих веществ в смеси с воздухом $\mu_{см}$, которая формируется динамикой нагрева топливных частиц и соответствует нижнему пределу воспламенения газоз-воздушной смеси $\mu_{см} = \mu_n$;

- применение стандартной методики расчета взрывобезопасных концентраций топливной пыли в системе подготовки и транспорта топливной пыли [385];
- использование экспериментальных данных по времени воспламенения летучих веществ в неподвижном окислителе [397];
- использование данных, полученных на экспериментальной установке по сжиганию пыли каменных углей месторождения в Питтсбурге.

Все перечисленные алгоритмы относятся к аналитическим методам; возможен также численный расчет всех параметров факела, например, с помощью пакета ANSYS. Выбор того, или иного метода зависит от цели исследования и имеющимся в распоряжении исследователя теоретическим или экспериментальным материалом. В настоящей статье ставится задача сопоставить пять перечисленных аналитических методов с целью выработки достоверных выводов.

Математическая модель определения l_n на основе расчета t_T

Для учета динамики нагрева частиц топлива размером δ , м, можно применить критериальное уравнение для термически тонких тел

$$\ln \Theta = -3Bi \cdot Fo, \quad (3.78)$$

где $Bi = \alpha\delta/\lambda$ – число Био, $Fo = \alpha t/\delta^2$ – число Фурье, $\Theta = \theta_n/\theta_0$ – безразмерная температура топливной частицы. На рисунке 3.5 представлена номограмма.

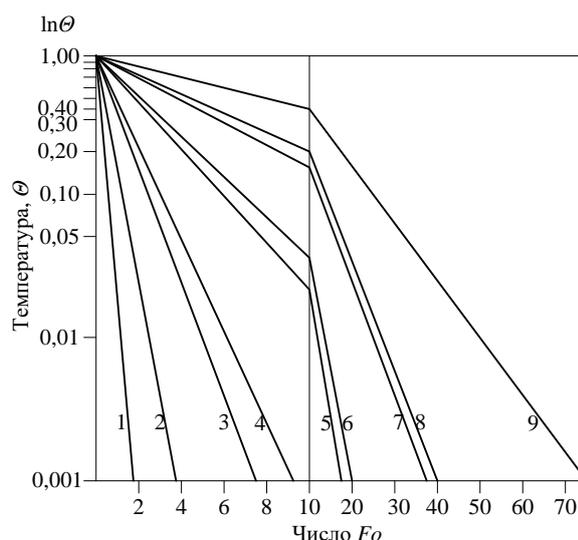


Рис. 3.5. Номограмма по определению безразмерного времени процесса нагрева Fo для частиц размером δ по числу Bi : 1 – $Bi = 0,18$; 2 – $Bi = 0,091$; 3 – $Bi = 0,045$; 4 – $Bi = 0,0364$; 5 – $Bi = 0,0182$; 6 – $Bi = 0,01164$; 7 – $Bi = 0,0091$; 8 – $Bi = 0,0082$; 9 – $Bi = 0,0045$

Номограмма построена по уравнению (3.78) и позволяет быстро определить безразмерное время процесса нагрева Fo для частиц размером δ , причем область больших значений числа $Fo > 10$ относится к частицам меньшего размера δ .

Зависимость (3.78) преобразуется с учетом коэффициентов массивности $m = 1,003 - 1,067$ для самых мелких и самых крупных частиц топливной пыли и формы $\zeta = 3,0$

$$\tau = [\delta \rho c m / (2 \alpha \zeta)] \ln(\theta_0 / \theta_l), \quad (3.79)$$

где $\theta_0 = t_m - t_{нач}$ – начальный температурный перепад; $\theta_l = t_m - t_g$ – температурный перепад соответствующий выделению летучих веществ в количестве, достаточном для воспламенения при нижнем пределе μ_n ; также t_T , $t_{нач}$, t_g – температура топочных газов, начальная температура топливных частиц и температура воспламенения летучих веществ соответственно, $^{\circ}\text{C}$. Температуре t_T присваивается смысл такого нагрева топливной пыли, который приводит к выделению летучих веществ в количестве, достаточном для воспламенения.

Применение ограничено условиями внешнего нагрева частиц пыли с интенсивностью результирующей теплоотдачи α , $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{ К}$. После воспламенения результирующий тепловой поток определяется с учетом собственного излучения частицы.

Выделение летучих веществ и их смешение с воздухом в количестве $V_\alpha = \alpha_g V_0$, $\text{м}^3/\text{кг}$ топлива, приводит к образованию газо-воздушной смеси, состав которой можно определить в соответствии с (3.77) в массовых долях по формуле

$$\mu_{см} = V^p / (V^p + \rho_g V_\alpha). \quad (3.80)$$

Этой концентрации газо-воздушной смеси соответствует динамика выделения летучих веществ, определяемая с учетом (3.77) по формуле

$$\mu_{см} = \frac{(0,0348 + 0,6595 \cdot 10^{-3} \Delta t)}{(0,0348 + 0,6595 \cdot 10^{-3} \Delta t + \rho_g V_\alpha)}; \quad (3.81)$$

при получении обратной функции

$$\Delta t = \frac{\mu_{см} (0,0348 + \rho_g V_\alpha) - 0,0348}{0,6595 \cdot 10^{-3} (1 - \mu_{см})}. \quad (3.82)$$

При достижении газо-воздушной смесью концентрации, соответствующей нижнему пределу воспламенения $\mu_{см} = \mu_{вс}$, температура соответствует температурному перепаду воспламенения $\Delta t_{вс} = t_{вс} - 300$, а $\theta_l = \theta_{вс} = t_T - \Delta t_{вс}$ и с заменой концентрации и температуры на таковые при воспламенении можно в (3.79) подставить вместо $\theta_l = \theta_{вс}$, что дает возможность определить время воспламенения при $m \approx 1,0$ и $\zeta = 3,0$

$$\tau_{вс} = \left[0,4 \cdot 10^6 \delta / 6\alpha \right] \ln(\theta_0 / \theta_{вс}), \quad (3.83)$$

где δ – размер топливной частицы, м; α – коэффициент суммарной теплоотдачи на поверхность частицы топливной пыли, Вт/м²·К, $\theta_0 = t_m - t_{нач}$.

С учетом (3.78), (3.83), а также аэромеханического коэффициента увеличения поперечного сечения факела $k_F = (1 + 0,21 l_n / d_0)^{-2}$, можно получить

$$l_n = w_0 k_F \tau_{вс} \quad (3.84)$$

и далее

$$l_n^3 + 9,5238 d_0 l_n^2 + 11,3379 d_0^3 l_n = 56,44 w_0 d_0^2 / \alpha, \quad (3.85)$$

где принято: $t_m = 1220$ °С, $t_{нач} = 20$ °С, $t_{вс} = 650$ °С.

Уравнение (3.85) можно решить методом Кардано или численно-графическим методом с помощью построения соответствующего графика. На рисунке 3.6 изображен график.

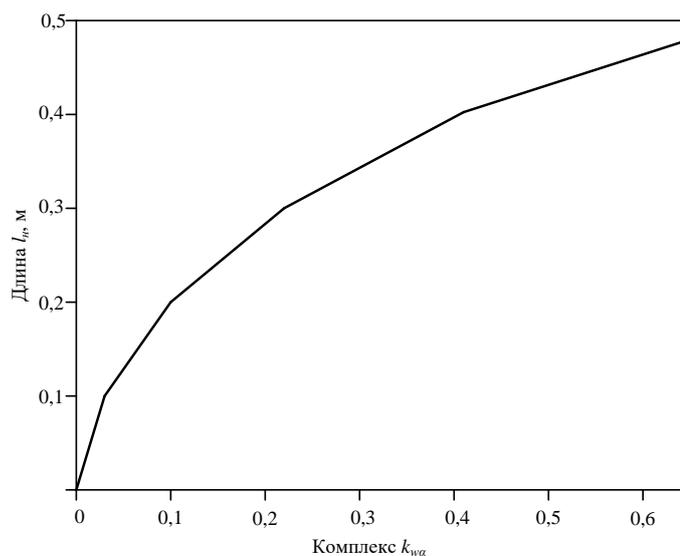


Рис. 3.6. График для определения начального участка факела l_n по значению комплекса $k_{w\alpha} = 2,2576 w_0 / \alpha$

График позволяет определить l_n в соответствии с уравнением (3.85), значения левой части которого нанесены на ось ординат в функции искомого l_n , а значения правой части уравнения (3.85), которые не зависят от l_n , соответствуют абсциссе.

График на рисунке 3.6 построен для значения $d_0 = 0,20$ м, если на практике определяется длина начального участка для горелочного устройства с диаметром выходного сопла d_{np} , отличным от d_0 , к определенному по графику значению l_n^{zp} вводится поправка, равная $4,375d_\phi$, то есть, $l_n^\phi = 4,375d_\phi \cdot l_n^{zp}$. Если значение правой части уравнения (3.85) не совпадает с нанесенными на линии числами, то можно применить интерполяцию, или рассчитать индивидуальное значение числа правой части для конкретных условий. При определении l_n для тестовых значений $w_0 = 10$ м/с, $d_0 = 0,20$ м, $\alpha = 150$ Вт/м²·К получаем по графику $l_n = 0,212$ м, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

Математическая модель определения l_n на основе расчета μ_n

Температура начала выхода летучих веществ зависит от степени метаморфизма исходного угля и изменяется от 170 °С для бурых углей до 380 °С для антрацита [397]; завершается выход летучих веществ при температуре 800–1000°С. Приняв, как и ранее, интервал 300–600°С основным для определения состава газовой фазы и пределов воспламенения, можно отметить, что процесс нагрева частиц угольной пыли в этом интервале температур аналогичен начальному периоду нагрева угольной шихты при получении кокса.

Основные технологические отличия в рамках поставленной задачи заключаются в следующем: состав газовой фазы при факельном сжигании твердого топлива соответствует динамике процесса нагрева частиц топлива, а состав первичного коксового газа изменяется при смешении в коллекторах газовых объемов с разных ячеек коксовой батареи и в процессе очистки от каменноугольной смолы и сопутствующих веществ. Поэтому справочные данные по пределам воспламенения для промышленного коксового газа должны быть ниже таковых для газовой фазы в факеле угольной пыли.

Пределы воспламенения смесей различных газов с окислителем по методике ЭНИН [108] можно определить, поделив сумму объемных концентраций индивидуальных газов на сумму отношений этих концентраций к пределам воспламенения индивидуальных газов. При разбавлении газовой смеси инертными примесями (N_2 , CO_2) расчет пределов воспламенения ведется по той же методике, но с учетом содержания инертных газов, причем горючие компоненты газовой смеси группируются с балластом пропорционально объемному содержанию горючего компонента.

Изменение пределов воспламенения смеси с инертными компонентами определяется по экспериментальным графикам ЭНИН [108]. Как показывают расчеты пределов воспламенения по методике ЭНИН, при переходе от промышленного коксового газа к факельному газу, который считается аналогичным первичному коксовому газу, нижний предел воспламенения μ_n в объемных процентах возрастает в 1,352 раза от 5,70 % до 7,71 %, а верхний предел воспламенения снижается в 0,816 раз от 29,4 % до 24,0 %. Перевод объемных процентов в массовые доли производится согласно простой зависимости $\mu_n = 7,71 \cdot \rho_d / (100 \cdot \rho_{см}) = 0,07$. При этом значении μ_n по формуле (3.82) получаем $\Delta t_{вс} = 570$ °С и $\theta_{вс} = 1220 - 570 = 650$ °С и соответствие с предыдущим расчетом, отличие заключается в определении температуры воспламенения через расчет нижнего предела воспламенения по данным ЭНИН.

Адаптация стандартной методики определения взрывобезопасных концентраций топливной пыли

В теплоэнергетике принято определять взрывоопасность пыли природных твердых топлив при наличии источника зажигания, которая зависит от состава топлив, химической активности компонентов летучих веществ, содержания кокса золы. Для оценки взрывоопасности природных твердых топлив используется критерий взрываемости K_m , определяемый расчетным путем как отношение объема летучих веществ на сухую массу топлива V^c к нижнему пределу воспламеняемо-

сти с учетом кокса и золы $\mu_{лб}^H$: $K_m = V^c/\mu_{лб}^H$. По величине K_m энергетические твердые топлива разделены на четыре группы от $K_m \leq 1,0$ до $K_m \geq 3,5$.

Методика определения нижнего предела воспламенения основана на расчете теплоты сгорания летучих веществ на сухую беззольную массу, которая также корректируется с учетом кислорода топлива и называется «кислородной массой». Теплота сгорания летучих веществ определяется по разности между теплотой сгорания исходного топлива и теплотой сгорания углерода кокса.

Нижний предел воспламенения определяется в двух вариантах: первый расчет достаточно обоснован, так как $\mu_{л}^H$ определяется делением экспериментальной константы $1,26 \cdot 10^5$ на теплоту сгорания летучих веществ. Второй расчет производится с учетом твердого нелетучего остатка (кокса и золы), что вызывает сомнения, так как оставшийся после выхода летучих веществ твердый остаток почти не влияет на воспламенение смеси летучих веществ с воздухом.

Эти данные не предоставляют возможности использовать определенные в [403] K_m для расчета начального участка факела, так как в основе определения критерия взрываемости лежит не расчет нижнего предела воспламенения смеси летучих веществ с воздухом, а расчет $\mu_{лб}^H$, что не соответствует физико-химической природе воспламенения.

Но применить результаты работы [403] можно в отношении $\mu_{л}^H$, но при этом необходимо произвести пересчет с сухой беззольной массы на рабочую массу. Такой расчет для тестовых условий (Назаровский бурый уголь марки Б2) дает 7,23 массовых %, что хорошо согласуется с данными, рассчитанным по методике ЭНИН. Подстановка значения $\mu_{л}^H = 7,23 \cdot \rho_{л}/(100 \cdot \rho_{см})$ в формулу (3.82) дает возможность определить по описанной выше методике и по графику: $l_{н.} = 0,21$ м.

Определение $l_{н}$ по экспериментальным данным для времени нагрева топливной пыли до воспламенения летучих веществ

В работе [113] опубликованы результаты экспериментального исследования характеристик широкой гаммы энергетических твердых топлив в отношении воспламенения и выгорания частиц топливной пыли. В методическом и физико-

техническом плане опыты тщательно проработаны и исполнены с применением специально изготовленной аппаратуры. В части определения длины начального участка факела приводится обобщенная зависимость времени воспламенения летучих веществ $\tau_{в.л}$ в секундах как функция ряда факторов: температуры топочной среды T_c , К, размера частиц топлива δ , м, и опытного коэффициента пропорциональности $k_{в.л}$, индивидуального для каждой марки угля [113]

$$\tau_{в.л} = 5,3 \cdot 10^{14} k_{в.л} T_c^{-4} \delta^{0,8}. \quad (3.86)$$

При расчете по формуле (3.86) для тестовых значений Назаровского угля марки Б2 при $k_{в.л} = 1,0$ получаем $\tau_{в.л} = 0,04$ с. При переходе к формуле (3.84) и учете аэромеханического коэффициента расширения факельной струи в виде $k_F = (1 + 0,21l_n/d_0)^{-2}$ получаем $l_n = 0,25$ м. Отклонение от аналогичных данных составляет +15...+18 %, что легко объясняется тем фактом, что в экспериментальных данных [113] приводятся данные, полученные при относительной скорости потока окислителя около 0.1 м/с, в то время как в реальном факеле, особенно в начальном участке, относительная скорость значительно выше. Поэтому согласование вышеприведенной методики с практическими данными [113] удовлетворительно.

Определение l_n по экспериментальным данным для Питтсбургского угля [404]

В работе [404] приводятся данные экспериментального изучения показателей процесса горения угольной пыли из Питтсбургского битуминозного угля – по терминологии РФ из угля марки Ж. Опыты проводились на специальной установке, оборудованной устройством для отбора проб твердой и газообразной фаз. Содержание летучих веществ в исходном угле составляло 36 % на сухую массу, выводы акцентировались на частицы размером 200 мкм, несмотря на то, что основное число частиц располагалось в области 0 – 60 мкм.

Гетерогенный факел принимался одноразмерным, так как в нем отсутствовали рециркуляционные течения. Теплообмен факела с окружающей средой считался радиационным, конвекция и теплопроводность не учитывались. Проба газодисперсной факельной среды малого объема на анализ по содержанию летучих

веществ отбиралась на определенном расстоянии от горелочного устройства, это расстояние пересчитывалось во время движения от горелки по известному распределению скорости потока.

Содержание летучих веществ в массовой доле от начальных 100 % определялось по содержанию влаги, золы и расчетному углероду; на временной абсциссе также фиксировалось расположение фронта воспламенения $\tau_{в.л} = 0,051$ с. Эти данные позволяют адаптировать результаты работы [404] к параметрам решаемой задачи.

Решена аналогичная задача для условий работы [113]; в эти данные необходимо внести изменения, связанные с марками углей: для марки Б2 было принято $k_{в.л} = 1,0$, для марки Ж необходимо ввести $k_{в.л} = 0,85$. Поэтому фактическое скорректированное время до воспламенения летучих веществ угля марки Ж составляет $\tau_{в.л} = 0,051 \cdot 0,85 = 0,04335$ с и длина начального участка $l_n = 0,25 \cdot 0,04335 / 0,04 = 0,27$ м. Расхождение следует признать удовлетворительным с учетом всех погрешностей, связанных с экспериментами в работах [113,404]. Сформулирована математическая модель определения начального участка гетерогенного факела, позволяющая связать интегральную зависимость выгорания топлива с пространственными координатами факельного континуума $\Phi(u) = F(L_\phi)$.

Разработанная математическая модель адаптирована к результатам теоретических и экспериментальных работ в этом направлении. Сравнение численных решений и экспериментальных данных с предложенной моделью показало достаточно удовлетворительное согласование, что подтверждает достоверность предложенной математической модели и надежность расчетов по ней для определения основных характеристик факела в зоне интенсивного горения.

3.6. Математическая модель обобщенного теплообмена в топке котельного агрегата – парадигма теплообмена [405]

Совершенствованию характеристик котельного оборудования мировая энергетика уделяет постоянное внимание, выделяя значительные средства для повышения качества материалов и разработки методов расчета и проектирования котель-

ных агрегатов (КА), так как эти вопросы тесно связаны с экономическими и экологическими показателями работы электростанций. Эта тенденция отражена в международной программе THTRMY – II и работах ведущей фирмы ALSTOM [306], где основные теоретические направления – это усовершенствование конструкций КА с помощью комплекса программ ANSYS и свойств термостойких материалов [333]. В РФ приняты нормативные методики расчета КА [104], разработанные В.Н.Тимофеевым (ВТИ) с учетом работ А.М.Гурвича (ЦКТИ) и С.Н.Шорина (ЭНИИ); за более чем полувековую практику применения нормалей они неоднократно уточнялись и усовершенствовались на основе обширной экспериментальной и производственной практики.

В области численного моделирования процессов в КА в РФ известны работы Томского политехнического университета [336] под названием FIRE – 3D, а также работы, выполненные в Казахстане и Новосибирске в отношении Hi – Tech проектирования [335]. Однако использование мощных вычислительных средств в решении этих задач наталкивается на значительные трудности, связанные со сложностью математической формулировки реальных явлений. В этом случае рационально использование методов системного анализа, позволяющего производить декомпозицию сложной математической модели на более простые части, сформулировать математическое описание в конкретных условиях, установить связь между отдельными частями сложной системы, а затем синтезировать частные решения в направлении полного решения задачи [385, 393, 395, 407, 408]. Ниже излагается этот метод в применении к разработке математической модели основного объема топки КА.

Формулировка задачи и получение дифференциального уравнения температурного поля в топке

Закон сохранения энергии в виде баланса тепловых потоков для объема топочной среды V в канале топки котельного агрегата для условий стационарного во времени теплового режима можно записать в виде

$$\operatorname{div}\vec{q}_k + \operatorname{div}\vec{q}_m + \operatorname{div}\vec{q}_l = 0. \quad (3.87)$$

В этом уравнении: $\vec{q}_k = \vec{w}\rho c_p T_{об}$ - вектор конвективного переноса энтальпии топочной среды, Вт/м²; $\vec{q}_m = -\lambda_m \nabla T_{об}$ - вектор диффузионного переноса энергии теплопроводными турбулентным и молекулярным механизмами, Вт/м², $\vec{q}_l = -\lambda_l \nabla T_{об}$ - вектор диффузионного лучевого (радиационного) переноса энергии топочной среды, Вт/м². Коэффициентами теплопроводного и лучевого переноса являются $\lambda_m = \lambda_{мол} + \lambda_{турб}$, Вт/м·К, и $\lambda_l = 16\sigma_0 T^3 / 3k_{cp}$, Вт/м·К, где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/м²·К⁴, - коэффициент излучения абсолютно черного тела, k_{cp} - средний по объему топочной среды коэффициент ослабления, 1/м. Перенос теплоты также возможен совместно с переносом массы вещества в условиях температурного градиента $\nabla T_{об}$ с коэффициентом переноса $D\rho c_p \equiv \lambda_m$, Вт/м·К, при этом плотность теплового потока составит $\vec{q}_m = -\lambda_m \nabla T_{об}$, Вт/м², D - коэффициент массовой диффузии, м²/с. Это позволяет все диффузионные механизмы объединить с помощью равенства $\lambda_{об} = \lambda_{мол} + \lambda_{турб} + \lambda_l + \lambda_m$, тогда $\vec{q}_{об} = -\lambda_{об} \cdot \nabla T_{об}$.

Первое слагаемое уравнения (3.87) характеризует дисперсионный механизм прихода энергии в объем V , два других относятся к диссипативным механизмам, связанным с потерями энергии, что и отражено знаками минус. Поступление энергии в основной объем топки с конвективным потоком из зоны интенсивного горения (ЗИГ) идет с температурой T_n , скоростью w_x и степенью химического недожога ξ . Начальная температура связана с коэффициентом сохранения теплоты в ЗИГ $\varphi_{ЗИГ}$ и может быть определена по зависимости $T_n = \varphi_{ЗИГ} T_{ад}$, где $T_{ад}$ - адиабатическая температура горения, определяемая по теплоте сгорания топлива и дополнительному внешнему поступлению теплоты с компонентами горения. Коэффициент $\varphi_{ЗИГ}$ определяется расчетом теплообмена в ЗИГ, согласно [385]; степень химического недожога ξ можно определить по методике [393].

Таким образом, с учетом принятых уточнений уравнение энергии (3.87) преобразуется к виду

$$\rho c_p \vec{w} \nabla T_{об} - \text{div}(\lambda_{об} \nabla T_{об} + \rho c_p D \nabla T_{об}) = 0. \quad (3.88)$$

Далее, при делении на ρc_p , замене \vec{w} на w_x и введении относительной температуры $\theta = T_{об} - T_{ст}$, где $T_{ст}$ - температура тепловоспринимающих поверхностей в

этой части топки КА, возможен переход к каноническому виду дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{w_x}{a_{об}} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0. \quad (3.89)$$

В уравнении (3.89) $a_{об} \equiv \lambda_{об}/\rho c_p$ – обобщенный коэффициент температуропроводности, м²/с. Кроме того, принято, что изменение температуры вдоль координаты y связано только с градиентно-диссипативным вторым слагаемым в (3.77), а изменение $T_{об}$ вдоль координаты x связано только с конвективно-дисперсионным первым слагаемым в (3.88).

Изложенная выше методика формирования уравнения энергии допускает расширенное применение в виде включения других источников или стоков энергии в потоке топочной среды. Главным критерием отнесения дополнительных источников к конвективно-дисперсионной или к градиентно-диссипативной части уравнения (3.88) является не знак источника (плюс или минус), а форма его участия в уравнении (3.88) – с $grad T_{об}$ или с $div \cdot grad T_{об}$. Аддитивная форма уравнения энергии также позволяет учесть подачу потока газов рециркуляции путем разделения всей длины канала топки на участки, причем выходные из первого участка параметры являются входными для второго с учетом материального и теплового баланса места ввода.

Решение полученного уравнения энергии методом Фурье

В допущении принципа мультипликативного представления искомой температурной функции $\theta = \theta_x \cdot \theta_y$ можно применить метод разделения переменных, что приводит к системе из двух линейных дифференциальных уравнений с решениями

$$\theta_x'' - \frac{w_x}{a_{об}} \theta_x' + k^2 \theta_x = 0; \quad \theta_x = C_1 \exp(\gamma_1 x) + C_2 \exp(\gamma_2 x); \quad (3.90)$$

$$\theta_y'' - k^2 \theta_y = 0; \quad \theta_y = C_3 \sin(ky) + C_4 \cos(ky); \quad (3.91)$$

Константы $C_{1,2,3,4}$ и k определяются условиями однозначности, а параметры γ_1 и γ_2 – по формуле $\gamma_{1,2} = w_x/2a_{об} \pm (w_x^2/4a_{об}^2 + k^2)^{0,5}$.

Первым условием однозначности следует принять симметричность относительно оси x процесса распространения энергии вдоль оси y

$$\left. \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad (3.92)$$

что приводит к выводу относительно константы $C_3 = 0$, и общее решение уравнения энергии будет иметь вид

$$\theta = \theta_x \cdot \theta_y = C_1 C_4 \exp(\gamma_1 x) \cos(ky) + C_2 C_4 \exp(\gamma_2 x) \cos(ky). \quad (3.93)$$

Вторым условием однозначности принимается граничное условие III рода на поверхности тепловосприятия $y = \delta$

$$\left. \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right|_{y=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda_{об}} \theta_{y=\delta}, \text{ откуда } \frac{k\delta}{Nu_{об}} = \text{ctg}(k\delta). \quad (3.94)$$

Граничные условия III рода в форме (3.94), решаемые графически или численно, дают возможность при известной глубине топки 2δ и числе Нуссельта $Nu_{об} \equiv \alpha\delta/\lambda_{об}$ определить константу разделения k . Корни уравнения (3.94) $k\delta = \mu_i$ представляют сходящийся ряд собственных чисел краевой задачи при $i = 1, 2, 3 \dots n$; решения уравнения (3.94) достаточно подробно изучено в математическом анализе в применении к краевым задачам теплопроводности. Единственным параметром, влияющим на решение уравнения (3.94) является число $Nu_{об}$, в задачах теплопроводности таким фактором является число Bi ; при замене числа Bi на число $Nu_{об}$ можно воспользоваться обширным справочным материалом [386] по ряду корней при $n \leq 6$, при $n > 6$ можно воспользоваться рекуррентным соотношением $\mu_{n+1} \approx \mu_n + \pi$.

По определению число Нуссельта представляет собой отношение двух сопротивлений переносу теплоты: внутреннего по отношению к топочной среде $\delta/\lambda_{об}$ и внешнего $1/\alpha_c$, связанного с теплоотдачей на поверхность тепловосприятия. $Nu_{об} = (\delta/\lambda_{об})/(1/\alpha_c)$. Численное значение $Nu_{об}$ определяет характер распределения температуры и условий теплопереноса по объему топки КА: при низких значениях $Nu_{об} < 1,0$, что означает $1/\alpha_c > \delta/\lambda_{об}$, появляется необходимость интенсификации тепловосприятия поверхности охлаждения, то есть увеличения α_c . При $Nu_{об} > 1,0$,

когда $1/\alpha_c < \delta/\lambda_{об}$, необходимо либо уменьшать размер δ , например, размещением ширм или двухсветных экранов в объеме топки, либо увеличивать $\lambda_{об}$, что представляет определенные теплофизические трудности.

Теплоотдача на экранную поверхность α_c , Вт/м²·К, происходит двумя механизмами – излучением α_l и конвекцией α_k : $\alpha_c = \alpha_l + \alpha_k$; так как в топках основная роль принадлежит излучению, рационально вклад конвекции привести к радиационному теплопереносу с помощью системы корректирующих множителей. Достаточно обширный и достоверный материал в этом направлении отражен в котельных нормах в виде рекомендаций по расчету коэффициента тепловой эффективности экранов $\psi_э$, учитывающего их загрязнение и участие в поверхностном теплообмене $\psi_э = (q_{над} - q_{отп})/q_{над}$. Результирующий тепловой поток на экранную поверхность, таким образом, определяется по зависимости $q_{рез} = \psi_э \cdot q_{над}$, Вт/м², а суммарный коэффициент теплоотдачи рассчитывается по формуле $\alpha_c = q_{рез}/(T - T_{cm})$. Далее, результирующий тепловой поток рационально определять через радиационный q_l с учетом вклада конвекции $q_{рез} = q_l(Bo + 1)$, где $Bo = q_k/q_l$ – число Больцмана.

Для радиационного теплового потока излучающей среды на экран с поглощательной способностью A_{cm} можно применить формулу [409, 410]

$$q_l = \frac{\sigma_0(T^4 - T_{cm}^4)}{(1/A_{cm} - 1/2)}, \quad (3.95)$$

и с учетом изложенных выше выводов

$$q_{рез} = \frac{\psi_э \sigma_0(T^4 - T_{cm}^4)(Bo + 1)}{(1/A_{cm} - 1/2)} \quad (3.96)$$

получаем зависимость для определения суммарного коэффициента теплоотдачи на поверхность топочных экранов

$$\alpha_c = \frac{\psi_э \sigma_0(Bo + 1)(T^4 - T_{cm}^4)}{(1/A_{cm} - 1/2)(T - T_{cm})} = \frac{\psi_э \sigma_0(Bo + 1)T^3}{(1/A_{cm} - 1/2)} F(T), \quad (3.97)$$

где $F(T) = [1 + (T_{cm}/T) + (T_{cm}/T)^2 + (T_{cm}/T)^3]$. В работах [409, 410] отмечается, что многочлен $F(T)$ близок к единице и его можно не учитывать, но численный анализ

показывает, что величина этого множителя снижается от 3,75 до 2,75 при увеличении $\theta = T - T_{cm}$ от 0 К до 400 К; поэтому можно принять среднее значение $F(T)_{cp} = 3,25$, так как введение функции $F(\theta) = 3,75 - 2,5 \cdot 10^{-3} \theta$ делает задачу нелинейной. Также рационально A_{cm} заменить на ψ_3 и привести $\lambda_{об}$ к λ_l посредством коэффициента $b_{об} = \lambda_{об}/\lambda_l$, где $\lambda_{об}$ может включать все диссипативные механизмы, описываемые диффузионными соотношениями типа законов Фурье и Фика. Таким образом, число Нуссельта можно определить по формуле

$$Nu_{об} \equiv \frac{\alpha_c \delta}{\lambda_{об}} = \frac{3}{16} \frac{\psi_3 k_{cp} \delta (Bo + 1) \sigma_0 T^3 F(T)_{cp}}{(1/\psi_3 + 1/2) \sigma_0 T^3 b_{об}} = 0,61 B\bar{u} \frac{\psi_3}{(1/\psi_3 + 1/2)} \frac{(Bo + 1)}{b_{об}}. \quad (3.98)$$

Полученное соотношение для $Nu_{об}$, где в число Бугера введено давление в топке p , МПа, $B\bar{u} = k_{cp} p \delta$, позволяет определять $Nu_{об}$ с использованием нормативных методов расчета [104].

При введении граничного условия при $x = 0$ определяется температура среды $T = T_n$ или $\theta_n = T_n - T_{cm}$, подстановка этих условий в решение (3.90) дает

$$C_1 + C_2 = \theta_n, \quad (3.99)$$

и решение уравнения (3.99) при $C_3 = 0$ с учетом совокупности корней μ_i приобретает вид

$$\theta_n = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\mu_i Y), \quad \text{где } Y = y/\delta. \quad (3.100)$$

Коэффициенты A_i определяются при подчинении решения (3.99) условию $\theta_n = const$ с учетом четности функции косинуса

$$A_i = \frac{\theta_n \cdot 2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i}, \quad (3.101)$$

при этом решение уравнения (3.99) приобретает вид

$$\theta_y = \theta_n \sum \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \cos(\mu_i Y). \quad (3.102)$$

Для получения констант $C_{1,2}$ необходимо ввести граничные условия при $x = 0$ и $x = h$, где h – расстояние от выхода из ЗИГ до середины выходного окна топки, м. При $x = 0$ получено решение $C_1 + C_2 = \theta_n$, при $x = h$ граничные условия III рода

$$\left. \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right|_{x=h} = -\frac{\alpha_c}{\lambda_{об}} \theta_{x=h} \text{ или } \theta_{x=h} = -\frac{\lambda_{об}}{\alpha_c} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)_{x=h}, \quad (3.103)$$

что при подстановке в уравнение дает

$$C_1 \gamma_1 \exp(\gamma_1 h) + C_2 \gamma_2 \exp(\gamma_2 h) = -\frac{\alpha_c}{\lambda_{об}} [C_1 \exp(\gamma_1 h) + C_2 \exp(\gamma_2 h)]. \quad (3.104)$$

Совместное решение уравнений относительно C_1 и C_2 дает

$$C_1 = -\frac{\theta_n (\beta_2 / \beta_1) \exp(\gamma_2 h)}{1 - (\beta_2 / \beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1) h}, \quad (3.105)$$

$$C_2 = \theta_n - C_1 = \frac{\theta_n}{1 - (\beta_2 / \beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1) h} \quad (3.106)$$

и решение для распределения температуры по оси x будет иметь вид

$$\theta_x = C_1 \exp(\gamma_1 x) + C_2 \exp(\gamma_2 x) = \theta_n \exp(\gamma_2 x) \frac{1 - (\beta_2 / \beta_1) \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)(h - x)]}{1 - (\beta_2 / \beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1) h}. \quad (3.107)$$

В решении (3.107) введены сокращения: $\beta_1 = \alpha_c / \lambda_{об} + \gamma_1$; $\beta_2 = \alpha_c / \lambda_{об} + \gamma_2$, где γ_1 и γ_2 определяются из условий, а θ_x и θ_y – из соотношений, причем $A_i = \theta_n D_i$. Таким образом, общее решение в безразмерном виде определяется перемножением θ_x и θ_y и делением на θ_n^2

$$\Theta = \frac{\theta_x \theta_y}{\theta_n^2} = \sum_{i=1}^n D_i \cos(\mu_i Y) \exp(\gamma_2 x) \frac{1 - (\beta_2 / \beta_1) \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)(h - x)]}{1 - (\beta_2 / \beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1) h}. \quad (3.108)$$

Изложенную выше математическую модель процессов теплообмена в топке, включающую только основные факторы влияния, можно классифицировать как парадигму теплообмена в топках КА. Последующие анализ и адаптация основных положений модели к условиям реальных процессов позволяют выявить достоверность и надежность математической модели.

Анализ и адаптация математической модели

При подстановке предельных значений аргументов x и y решения должны приводить к исходным условиям однозначности. При подстановке $x = 0$ решение дает очевидный результат $\theta_x \equiv \theta_n$. В выходном сечении топки при $x = h$ получается температура, которая в принятых методиках расчета определяется как «темпера-

тура газов в конце топки t''_T , но для более точной адаптации этого фактора необходимо определить среднюю по сечению выходного сечения температуру.

Средняя по сечению температура при заданных условиях однозначности определяется интегрированием функции распределения температуры по координате y

$$\bar{\theta}_y = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \cos(\mu_i y / \delta) dy = \frac{\sin \mu_i}{\mu_i} \quad (3.109)$$

и далее определяется безразмерная средняя температура по выходному сечению топки при $x = h$

$$\Theta_{cp} = \sum_{i=1}^n \frac{2 \sin^2 \mu_i}{\mu_i^2 + \mu_i \sin \mu_i \cos \mu_i} \left[\exp(\gamma_2 h) \frac{1 - \beta_2 / \beta_1}{1 - \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)h] \beta_2 / \beta_1} \right]. \quad (3.110)$$

Определенная по формуле (3.110) температура $t_{cp} = \theta''_n \cdot \Theta_{cp} / \theta_x + t_{cm}$ должна в той или иной мере соответствовать размерной температуре t''_m .

Для адаптации полученного решения (3.108) к реальному температурному полю топки КА необходимо граничные условия III рода привести к безразмерному виду

$$-\frac{\partial \Theta}{\partial Y} \Big|_{Y=1} = Nu_{об} \Theta_{Y=1}. \quad (3.111)$$

Причем производная по безразмерной температуре на поверхности теплоотдачи имеет собственный знак минус, так как в направлении y температура топочной среды снижается, и продолжение касательной к температурной кривой пересекает плоскость $\Theta = 0$ в точке A , расположенной на расстоянии Y_A от поверхности теплоотдачи. Так как эти соображения построены без учета продольной координаты x , то следует признать, что все касательные к температурным кривым пересекаются в одной точке A . Определив тангенс угла наклона касательных через геометрическое отношение $(\Theta_{Y=1}) : Y_A$, получим

$$Nu_{об} \Theta_{Y=1} = \Theta_{Y=1} / Y_A \text{ и далее } Y_A = 1 / Nu_{об}. \quad (3.112)$$

Из соотношения (3.112) следует важный вывод: обобщенное число Нуссельта оказывает существенное влияние посредством расположения точки схождения всех касательных к температурным кривым – точки A , рис.3.7, на форму темпера-

турных кривых в топке и характеризует эффективность теплообмена в топке КА. При низких числах Нуссельта $Nu_{об} \rightarrow 0$ координата точки A стремится к бесконечности $Y_A \rightarrow \infty$ и все изотермы в топке стремятся стать параллельными прямыми; это говорит о низких значениях α_c и поперечного размера топки δ , а также о высоких значениях обобщенного коэффициента теплопроводности $\lambda_{об}$. При высоких значениях $Nu_{об} \rightarrow \infty$ все изотермы в топке сходятся в одну точку, расположенную на поверхности теплоотдачи при ее пересечении с линией $\Theta = 0$, то есть при $t = t_{cm}$. Рекомендации относительно α_c , δ и $\lambda_{об}$ при этом противоположны предыдущим.

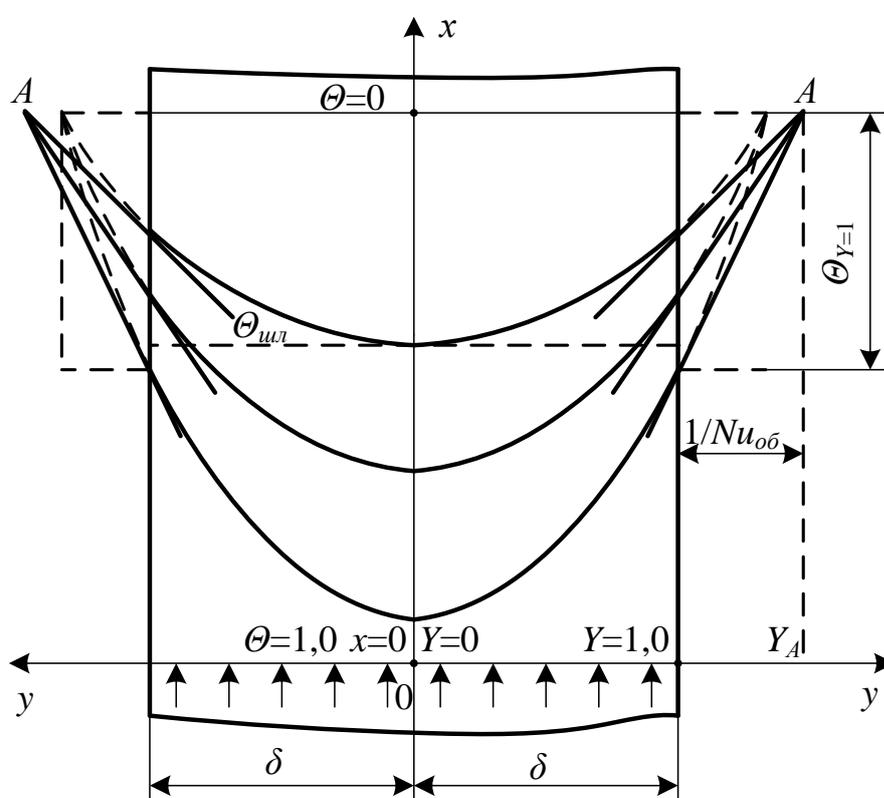


Рис. 3.7. Температурное поле в топке котельного агрегата в стационарном режиме: $\Theta = \theta_x \theta_y / \theta_n^2$, $Y = y/\delta$, $x = h_k$ – координата выходного сечения топки (симметричная задача)

Для предотвращения шлакования поверхностей нагрева в пароперегревателе при сжигании твердого топлива ограничивается температура на выходе из топки t_m , на газомазутных котлах эту температуру ограничивают по условиям надежной работы металла пароперегревателя и по экономическим соображениям. Разрабо-

танная математическая модель теплообмена позволяет достаточно быстро определить надежную относительно шлакования высоту топки $h_{шл}$. При определении $\Theta_{шл} = (t_{шл} - t_{cm}) / (t_n - t_{cm})$ можно сформулировать условие отсутствия шлакования так: $\Theta_{шл} \geq \Theta^{x=h}_{y=0}$ так как максимальная температура наблюдается на оси потока при $y = 0$, а условие $x = h$ соответствует выходному сечению топки. При подстановке этих условий в соотношение (3.108) и решение его относительно h получается зависимость

$$h_{шл} = \ln[\Theta_{шл} - M_1 \exp \gamma_2 - M_2 \exp(\gamma_2 - \gamma_1)] - \ln(M_1 + M_2), \quad (3.113)$$

где $M_1 = D_1[1 - (\beta_2/\beta_1)]$, $M_2 = \Theta_{шл}(\beta_2/\beta_1)$; также содержание величин γ_1 , γ_2 , β_1 , β_2 раскрывается в зависимостях. Примененный в формуле (3.113) первый корень уравнения (3.90) точно соответствует малым числам Нуссельта, при увеличении $Nu_{об}$ появляется необходимость учета корней $\mu_2 \dots \mu_n$.

Решение для топок призматической и цилиндрической форм

Разработанная математическая модель (3.108) описывает стационарное двумерное температурное поле в объеме топки $t = f(x, y)$ при условии отсутствия теплоотвода в направлении оси z , чтобы учесть теплоотвод в этом направлении по аналогии с осью y , необходимо установить ряд условий. Геометрия размещения поверхностей тепловосприятия в направлении z должна быть аналогична таковой в направлении y , но коэффициенты теплоотдачи в общем случае могут быть разными $\alpha_{c,z} \neq \alpha_{c,y}$. Температуры поверхностей тепловосприятия должны быть одинаковыми $t_{cm,z} = t_{cm,y}$, так же как и начальные температуры потока среды $t_{n,z} = t_{n,y}$, иначе не соблюдается естественный масштаб температур. При соблюдении этих условий температурное поле в направлении оси z можно описать уравнением, аналогичным уравнению (3.98),

$$\theta_z = \theta_n \sum_{i=1}^n \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cdot \cos \mu_i} \cos(\mu_i Z) = \theta_n F(z). \quad (3.114)$$

Корни характеристического уравнения, иначе собственные числа краевой задачи μ_i , можно определить при $Nu_{об,z} = Nu_{об,y}$ по зависимости (3.90), если числа Нуссельта по осям y и z различаются, то нет формальных препятствий для расчета

$Nu_{об.z}$ и решения уравнения, аналогичного (3.90), но для оси z . В результате трехмерное температурное поле в топке призматической формы можно описать зависимостью

$$\theta = \theta_x \theta_y \theta_z = \theta_h^3 F(x)F(y)F(z), \quad (3.115)$$

или в безразмерном виде

$$\Theta = \frac{\theta_x \theta_y \theta_z}{\theta_h^3} F(x)F(y)F(z), \quad (3.116)$$

где функции координат определяются по зависимостям

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \exp(\gamma_2 x) \frac{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)(h-x)]}{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1)h}, \quad (3.117)$$

$$F(y) = \sum_{i=1}^n \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \cos(\mu_i Y), \quad (3.118)$$

$$F(z) = \sum_{i=1}^n \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \cos(\mu_i Z). \quad (3.119)$$

Для осесимметричного потока среды в канале цилиндрической топке КА дифференциальное уравнение переноса теплоты имеет вид

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{w_x}{a_{об}} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0, \quad (3.120)$$

что дает возможность написать с применением метода разделения переменных уравнение для θ_r вместо (3.87)

$$\theta_r'' + \frac{1}{r} \theta_r' + k^2 \theta_r = 0 \quad (3.121)$$

с решением

$$\theta_r = C_5 I_0(kr) = C_5 I_0\left(\frac{\varepsilon r}{r_0}\right). \quad (3.122)$$

В этих зависимостях координаты цилиндрической системы: $0 \leq x \leq h$ – продольная координата, $0 \leq r \leq r_0$ – радиальная координата, угловая координата ψ не учитывается, так как температура по окружности не изменяется вследствие осевой симметрии $\partial\theta/\partial\psi = 0$. Для θ_x сохраняются форма уравнения и решение (3.75).

В уравнении (3.115) I_0 – четная функция Бесселя первого рода нулевого порядка, в аргумент которой входит корень ε , $= kr_0$, определяемый граничными условиями III рода на цилиндрической поверхности охлаждения при $r = r_0$

$$\left. \frac{\partial \theta_r}{\partial r} \right|_{r=r_0} = -\frac{\alpha_c}{\lambda_{об}} \theta_{r=r_0}. \quad (3.123)$$

При подстановке в уравнение (3.123) решения (3.122) получаем характеристическое уравнение для определения констант ε , что приводит к сходящемуся ряду чисел ε_i , определяемых через фактор $Nu_{об} = \alpha_c r_0 / \lambda_{об}$

$$\varepsilon_i = Nu_{об} \frac{I_0(\varepsilon_i)}{I_1(\varepsilon_i)}. \quad (3.124)$$

В знаменателе уравнения (3.124) записана нечетная функция Бесселя первого рода первого порядка, определяемая по зависимости $I_1(\varepsilon_i) = -\partial I_0 / \partial r$. Все отмеченные выше особенности чисел μ_i характерны и для ε_i .

Рассмотренная математическая модель основана на процессах в однородной топке, имеющей неизменное сечение по оси x с однородными граничными условиями. Нет формальных препятствий для расширенного применения при рассмотрении неоднородных по оси x - необходимо высоту топки разбивать на зоны с однородными условиями по схеме, предложенной в [408] и реализованной в [385, 393, 395, 407]. Уравнения допустимо использовать для определения высоты топки и по другим, кроме вопросов шлакования, ограничениям – по термической стойкости металла в поверхностях теплообмена, по режиму теплообмена пароводяной среды в трубах, по технико-экономическим соображениям при оптимизации.

Применение нового метода математического описания теплообмена в основном объеме топки КА, определяемого как парадигма теплообмена в топках, позволило сформулировать и решить двух- и трехпараметрическую математическую модель теплообмена, связанную с коэффициентами переноса и температурным полем в объеме топки.

Идентификация основных характеристик температурного поля как расчетных параметров нормативного метода [104] позволяет достоверно определить эти ха-

рактические характеристики для различных типов КА и видов применяемого топлива. Обобщенное число Нуссельта определяет характер температурного поля и интенсивность теплообмена в объеме топки КА; в качестве расширенного применения парадигмы теплообмена показано применение ее для топок призматической и цилиндрической форм.

3.7 Методика использования теплоты охлаждения активного угля тепловыми насосами

В качестве топлива используется пылевоздушная смесь. Расчет теплообменника производился по представленной методике. Представленная методика помогла оценить эффективность установки теплообменника и использования воздуха или воды для охлаждения активированных продуктов, рис.3.8.

Теплопроизводительность установки по рекуперации тепла Q_U (кВт):

$$Q_U = G_{FG} \cdot (I_1 - I_{FG}) \quad (3.125)$$

Количество нагретой воды или воздуха G_W (кг/с):

$$G_W = Q_U \cdot [C_W \cdot (t_{W2} - t_{W1})]^{-1} \quad (3.126)$$

Средний перепад температуры Δt :

$$\Delta t = (\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}) \cdot \ln^{-1} \left(\frac{\Delta t_{\max}}{\Delta t_{\min}} \right) \quad (3.127)$$

Характеристический показатель теплопередачи теплообменника K (Вт/(м²·°С):

$$K = (\alpha'_{FG} + \delta \cdot \lambda^{-1} + \alpha_{IN}^{-1})^{-1} \quad (3.128)$$

Поверхность теплопередачи блока рекуперации тепла F (м²):

$$F = Q_U \cdot K^{-1} \cdot \Delta t^{-1} \quad (3.129)$$

Количество полезно используемого тепла теплообменника Q_{UU} (кДж/с):

$$Q_{UU} = G_W \cdot C_W \cdot (t_{W2} - t_{W1}) \quad (3.130)$$

Определим КПД котла без установки утилизации тепла при высокой теплопроизводительной способности:

$$\eta_B = Q_B \cdot B^{-1} \cdot Q_{HV}^{-1} \cdot 100\% \quad (3.131)$$

Повышение КПД котла с помощью установки рекуперации тепла $\Delta \eta$:

$$\Delta \eta = Q_B \cdot B^{-1} \cdot Q_{HV}^{-1} \quad (3.132)$$

Суммарный КПД одного котла η_T (%):

$$\eta_T = \eta_B + \Delta\eta \quad (3.133)$$

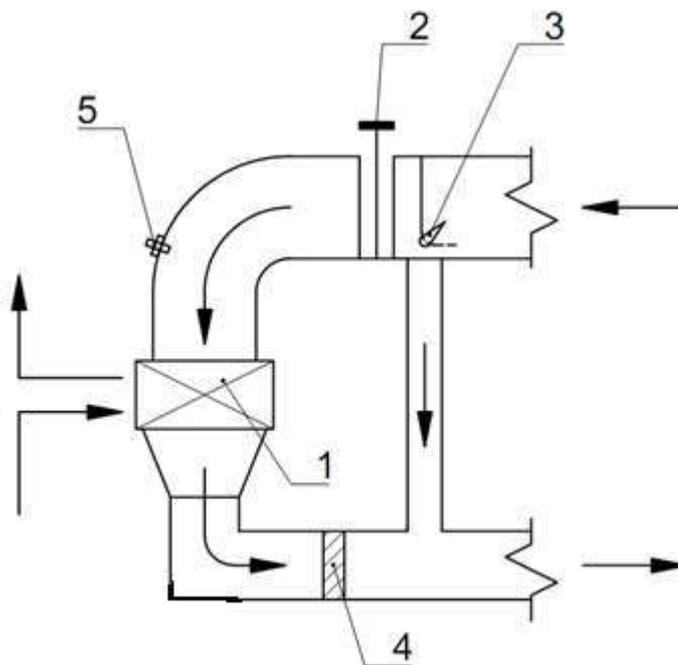


Рис. 3.8. Схема повторного использования тепла охлаждаемого активного материала: 1 – поверхность теплообменника; 2 – шибер для перекрытия потока; 3 – шибер для регулирования потоков; 4 – фильтр в период продувки; 5 – смотровое окно

Таким образом, можно выделить общий диапазон повышения максимальных значений КПД котла, рассчитанных по предлагаемой методике. Полученные расчеты показали, что мощность котла не влияет на повышение КПД котла. Среднее значение повышения КПД котла составляет 1,2 %. Установка теплообменника, рис.3.8, является одним из наиболее доступных методов повышения эффективности работы энергокомплекса, что особенно актуально в настоящее время с высоким спросом на высокоэффективное оборудование.

Нагретые таким образом воздух или газ используются далее в качестве источника теплоты для теплового насоса. Расчет экспериментальной установки теплового насоса будет показан в одной из последующих глав.

3.8 Методика представления оптимизационной схемы энергокомплекса

Результаты оптимизации можно представить совершенно различными способами. Наиболее простой – это графики функций представленные на одной плоскости. В качестве графиков выбираются функции основных контролируемых па-

раметров во время эксплуатации котла, данные собираются из стоковых точек тепловой схемы. Графики могут изменяться с течением времени, либо выбирается условно стационарный режим для стоковой точки, для которой происходит обработка данных. Кроме того, графики функций имеют разнонаправленный характер и могут пересекаться в нескольких точках на плоскости, образовывать сектора, точки максимума. При сопоставлении графиков выбирается или конкретная точка, характерная для оптимального режима работы, или область на плоскости, которая ограничивает несколько оптимальных режимов.

Более комплексный вариант представления оптимизационной схемы – выявить определенную зависимость параметров друг от друга, построить кривую, которая бы достоверно описывала характер изменения наиболее важных параметров. Затем найти взаимосвязь между оптимизационными кривыми и построить двух- или трехмерную фигуру – объем которой бы представлял множество возможных оптимальных вариантов. Такой подход возможен для проектировочных расчетов.

Рассмотрим изменение температуры вдоль траектории движения факела.

В качестве примера приведем рассчитанные в программе по предложенной методологии температуры, относящиеся к участку S3,S4. Графики в некоторых областях отличаются, необходимо провести корреляцию и дальнейшее выявление общей закономерности изменения по зависимости линейной, нелинейной и т.д.

Представленные графики зависимостей температуры по длине газохода достоверно могут быть описаны уравнением логарифмической спирали.

$$r = a \cdot e^{k\varphi}. \quad (2.134)$$

Например, процесс охлаждения газового потока на участке S3,S4:

$$\theta = \theta_m'' \cdot e^{-(0,1+u)p}. \quad (2.135)$$

где $u=0,03-0,20$, p – безразмерная координата.

Представим пример отыскания оптимальной кривой температуры на рис. 3.9.

На рис. 3.10-3.12 показаны примеры использования результатов расчетов по применяемой инверсионной стоковой методологии на эксплуатируемом и проектируемом котлах.

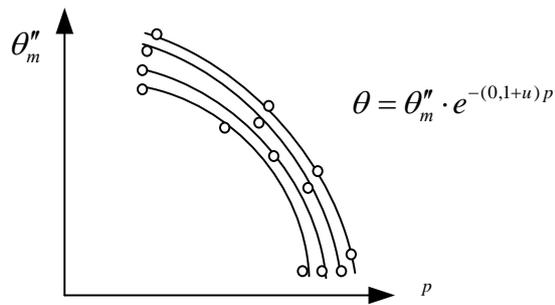


Рис.3.9. Зависимость температуры по газоходам от безразмерной координаты на основе расчетов

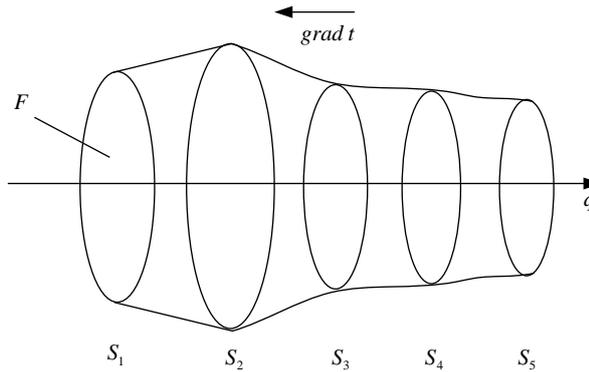


Рис. 3.10. Построение объемной схемы тепловыделения

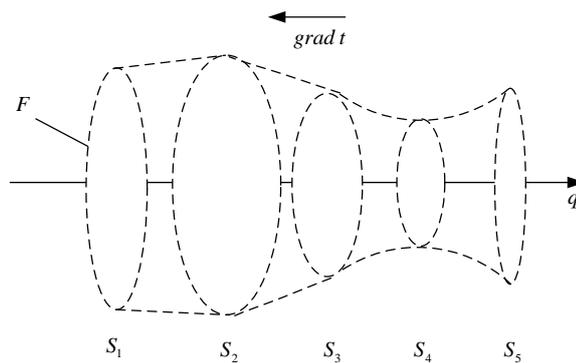


Рис.3.11. Изменение температуры и соответствующее изменение теплового потока в энергокомплексе

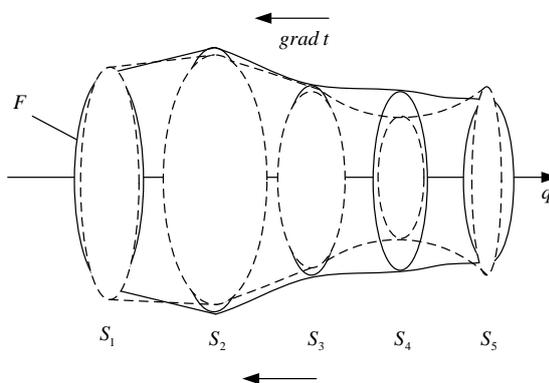


Рис.3.12. Сопоставление данных, полученных на эксплуатируемом энергокомплексе

Разработанная инверсионная стоковая методология при ее использовании на эксплуатируемом энергокомплексе может быть использована для управления параметрами факела на длительном периоде времени.

Использование системы утилизации теплоты должно быть проверено экспериментально, что описано в последующих главах. Здесь возможно применение тепловых насосов с различными комплектациями оборудования.

Выводы по главе 3

Разработана инверсионная стоковая методология газодинамических расчетов котлов с комбинированной выработкой теплоты и активного угля в составе энергокомплекса.

Оценка работы котла количественным способом сведена к поиску критерия в разрабатываемой методологии. Многокритериальная задача является однокритериальной, а именно представляет собой выбор обобщенного критерия, который является комбинацией частных. При этом дополнительные критерии обладают своими весовыми коэффициентами.

Частные критерии должны обеспечить в котле:

- производительность, при этом температура и давление остаются без изменения, назовем этот частный критерий технологическим;
- снизить температуру уходящих газов за котлом, назовем этот частный критерий экономическим;
- снизить эмиссию оксидов азота и углерода в атмосферу, назовем этот критерий экологическим;
- обеспечить возможность использования системы утилизации теплоты.

При «суммировании» этих частных критериев технологический, экономический и экологический факторы решают оптимизационную задачу тепловой схемы энергокомплекса.

Основные результаты теоретической части работы можно свести к следующим положениям:

1. Впервые предложена методология исследования газодинамики котлов на базе принципов тепло- и массообмена факельной и газовой сред в присутствии третьей составляющей – оградительной конструкции, кроме того применены ранее не используемые в научной практике узловые точки модели тепловой схемы котла в составе энергокомплекса. Разработанную методологию автор назвал инверсионно стоковой.

2. Разработана базовая концепция непрерывной среды, а также на ее основе математическая модель, включающая конструктивные особенности котла, факельного континуума как неделимого целого, а также непрерывной функции фракционного остатка.

3. Разработана математическая модель на основе схемы деления камеры сгорания на отдельные области, причем внутри этих областей подсистемы все вместе рассматриваются как сплошная неделимая среда, причем первая подсистема – среда газа, вторая – среда факела, третья – оградительные элементы; теплообмена оградительных конструкций.

4. Разработана модель теплообмена в камере сгорания с учетом критерия Нуссельта всех трех подсистем.

5. Разработаны формулы расчета характеристик факела на начальном участке

6. Разработана математическая модель использования теплообменника в системе утилизации теплоты в газоходе котла энергокомомплекса при активировании угля.

4 Разработка научных подходов к проектированию энергетических комплексов активации угля

4.1 Активация угля в камерах сгорания

В существующих системах химводоподготовки и очистки сточных вод ТЭС необходимо использовать качественные, но недорогие материалы. Одним из таких материалов может быть активированный уголь [342, 343]. Этот продукт получают в результате термообработки исходных угольных частиц мелких фракций горячими потоками газовой смеси и паром (см. главу 1). Описание химических процессов укладывается в существующие методики и модели, однако требует создания отдельной методологии (см. главу 2). Рассмотрим один из возможных вариантов совместной выработки теплоты и активного угля в едином энергокомплексе, рис. 4.1, при использовании паровых котлов с камерным сгоранием.

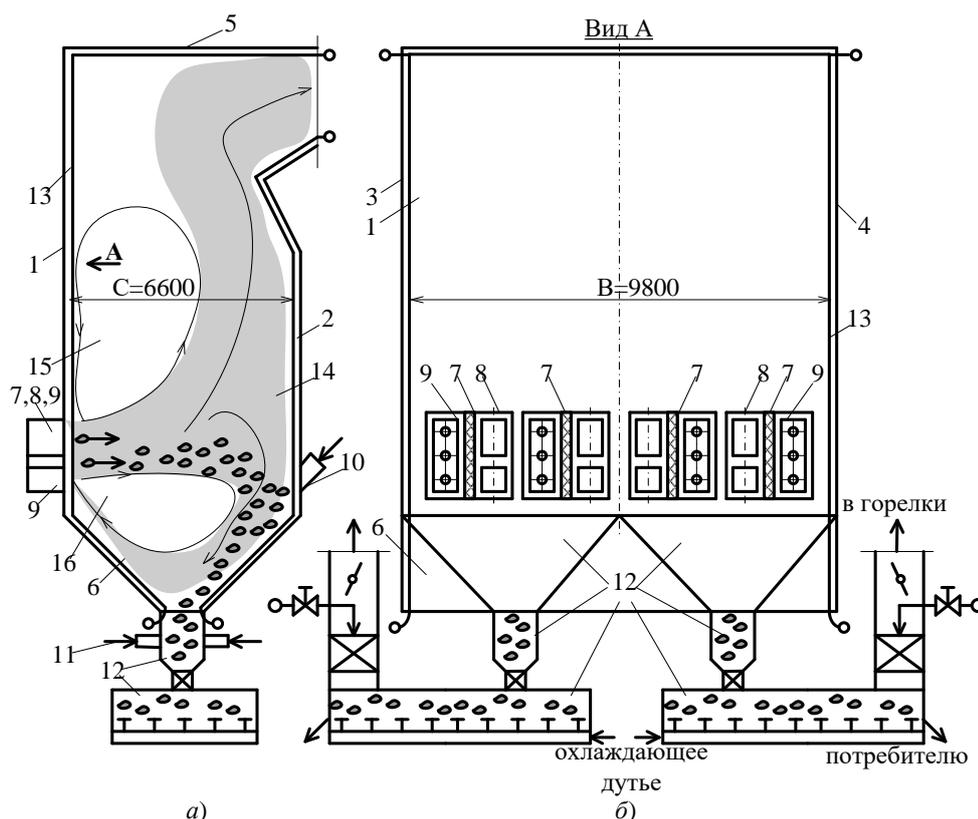


Рис. 4.1. Система активации угля (использование многофункциональных горелочных устройств): *а* – разрез установки, *б* – горелочные устройства; 1, 2, 3, 4 – экраны, 5 – свод, 6 – под, 7 – горелочные устройства, 8 – подача материала, 9 – природный газ и воздух, 10 – сопловые отверстия воздуха, 11 – сопловые отверстия пара, 12 – охлаждение готового продукта, 13 – экраны; 14 – объем камеры; 15, 16 – частичная циркуляция потоков

Анализ сепарирующих в холодную воронку частиц размером ≥ 2000 мкм, отобранных из топочной камеры (использование многофункциональных горелочных устройств) загрузленной пыли бурого угля в чередующейся системе спутных газо-пылеугольных факелов, показал наличие у них сорбционных свойств, характерных для активного угля. Для рационализации топочного процесса с выходом дополнительной продукции был выполнен оценочный анализ его технологических параметров [105, 113, 234, 245].

Основные выводы по применению низкотемпературной факельной технологии в процессе активирования угля:

1. Предлагаемая технология активации угля реализуется в топке парового котла путем нагрева потоков исходных частиц системой спутных газовых факелов на горизонтальных участках воспламенения и интенсивного горения.

2. При организации спутного ввода газоздушных и нагреваемых угольных потоков в качестве примера использованы многофункциональные горелки [211, 219, 234, 245, 261, 263]. При выполнении проекта модернизации котлов могут рассматриваться иные системы ввода реагентов и активируемых частиц угля.

3. Рассмотреть возможность предварительного разделения угольной пыли на крупные и мелкие фракции.

4. Запуску технологии активации должна предшествовать ее наладка, в процессе которой выбираются предельные размеры частиц, скорость их вывода в межфакельное пространство с корректировкой выходных сечений пылеугольвыводящих каналов. При этом следует учитывать индивидуальность характеристик активации частиц различных углей и необходимость переналадки при переходе к другому виду исходного материала.

5. Учитывать первостепенность генерации пара котельным агрегатом.

4.2 Активация угля в аппаратах периодического действия

При необходимости активировать небольшие порции угольных частиц 100 – 1600 кг целесообразно перейти к аппаратам периодического действия автоклавного типа. В данном разделе рассмотрен пример использования существующего

оборудования топливоподачи и многофункциональных горелок, размещенных на фронтальной стене топки.

Рассмотрим несколько вариантов систем активации угля.

Например, на рис.4.2 показана система периодической работы камеры.

На рис.4.3 показана работа камеры по рис.4.2 в составе единого энергокомплекса.

На рис.4.5 показана схема работы камеры без использования подсветочного топлива.

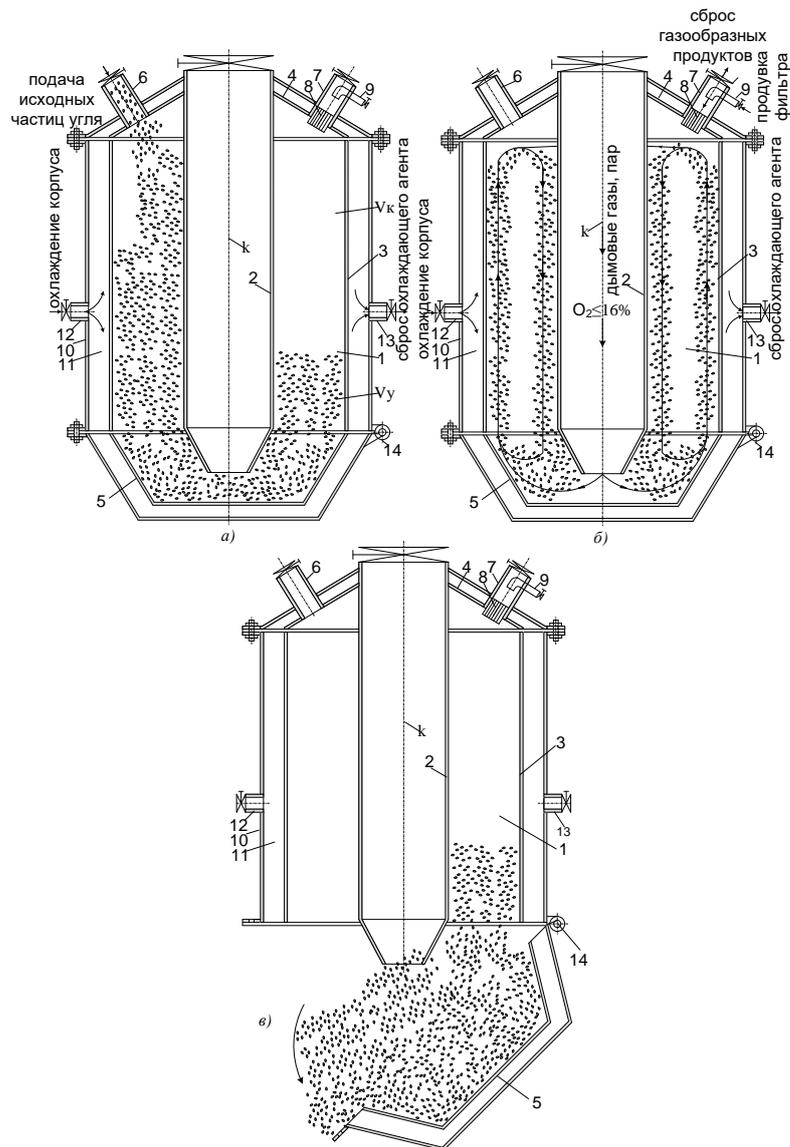


Рис.4.2. Схема система периодической работы камеры: а, б, в – последовательные периоды работы; обозначения: 1 – кольцевая полость, 2 – патрубкок, 3 – стена, 4, 5 – потолочное и подовое перекрытия, 6 – патрубкок подачи, 7 – патрубкок вывода газов, 8 – фильтр, 9 – система продувки фильтра, 10 – охлаждение, 11 – зазор для хладагента, 12, 13 – патрубки ввода и сброса хладагента, 14 – опрокидывающее устройство

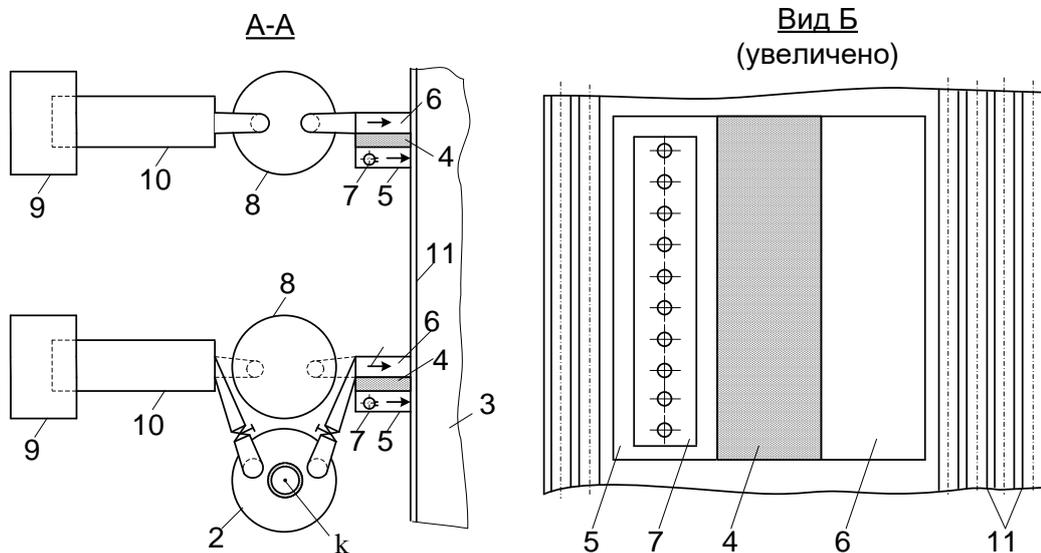
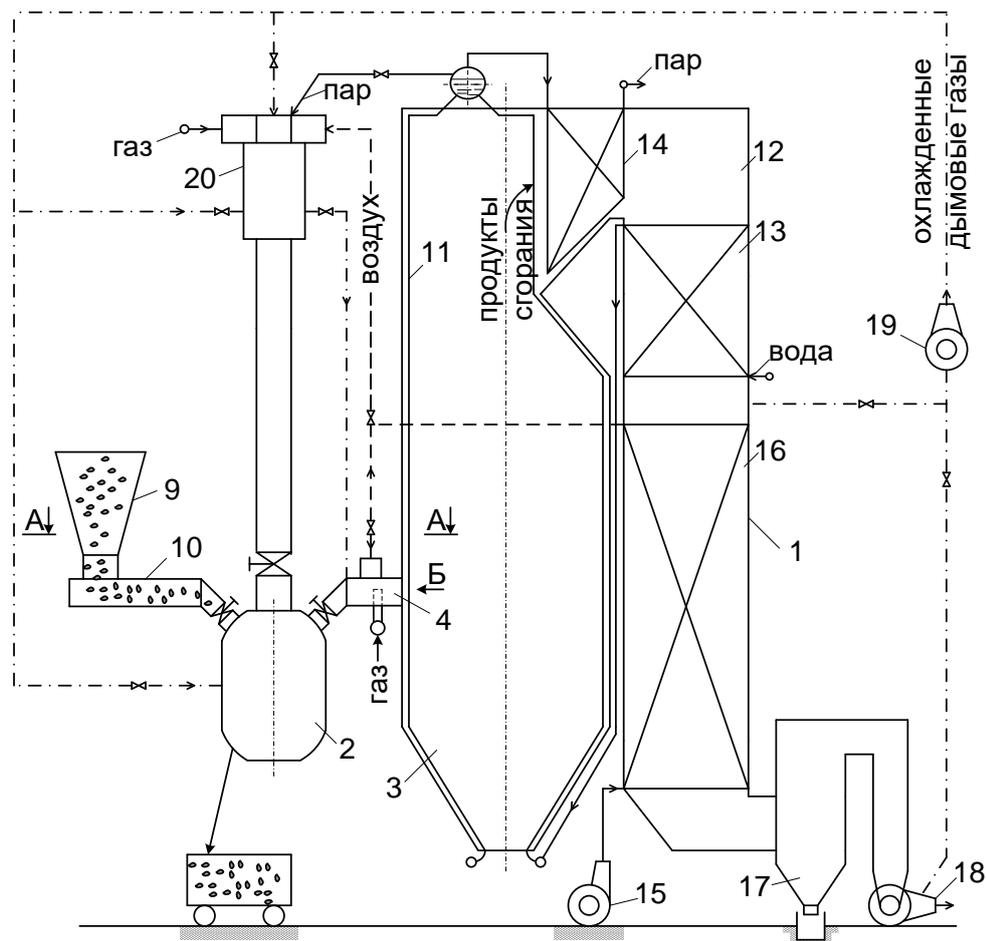


Рис.4.3. Система работы камеры в составе единого энергокомплекса, обозначения:

1 – котел, 2 – камера, 3 – топка, 4 – многофункциональные горелочные устройства, 5, 6 – каналы ввода газозвоздушной и пылевоздушной смесей, 7 – сопла природного газа, 8 – мельницы, 9 – бункеры, 10 – питатели, 11 – экраны, 12 – газоход, 13 – водонагреватель, 14 – пароперегреватель, 15 – вентиляторы, 16 – воздухоподогреватель, 17 – газозолоочиститка, 18 – дымососы, 19 – вентилятор, 20 – горелочно-смесительное устройство.

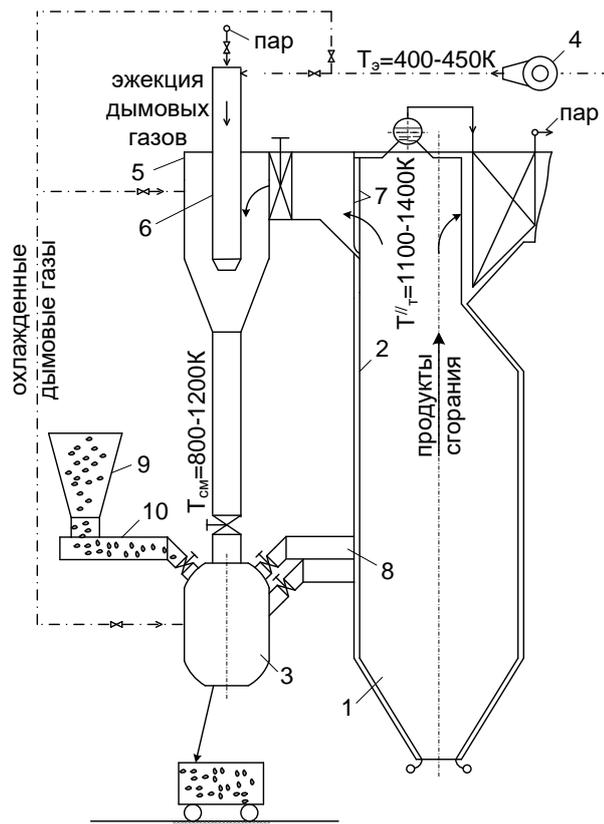


Рис. 4.4. Энергокомплекс с камерой, но без подсветочного топлива: 1 – топочная камера; 2 – экранные трубы; 3 – камера; 4 – нагнетатель высокошго напора; 5 – устройство мешения; 6 – узел эжекции; 7 – окно ввода газов; 8 – многофункциональные горелочные устройства; 9 – емкость исходного продукта; 10 – регулятор подачи исходного продукта

4.3 Автоматизация настройки работы энергокомплекса

Основной задачей современных котлов ТЭС является выработка и отпуск тепловой энергии системам теплоснабжения и электрогенерации [236]. Теплоту выделяют в топочных камерах при факельном сжигании топлива с воздушным окислением непосредственно в синтезируемые продукты сгорания. Реагентные потоки топлива и окислителя подают в горелки, устанавливаемые на ограждающих топку конструкциях. Отвод теплоты нагреваемым потокам воды и пару производят как в самих топках через поверхности экранярующих труб, так и в примыкающих газоходах через поверхности труб в конвективной части газохода.

Котельные агрегаты изначально проектируются под конкретный вид топлива, характеристики которого могут изменяться в течение срока эксплуатации. Однако, характерны случаи отказа от проектного топлива и переход на новый вид, резко отличающийся от исходного по свойствам и теплотворной способности.

Тоже касается и энерготехнологического комбинирования. В этом случае в топке с фиксированными габаритами необходимо получить и готовый активированный уголь, и провести процесс сжигания или дожигания основного топлива. Здесь возникает ряд сложностей эксплуатации, в связи с чем необходимо разработать алгоритм настройки параметров факела, топки и энерготехнологического комплекса в целом.

Ранее автором проводились исследования сжигания отходов электродного производства, это топливо по свойствам представляет собой обгоревший без влаги и летучих коксовый остаток с примесью силикатного железа, образующегося в процессе нагара кокса на электрод [234, 245].

Про комбинирование выработки теплоты, электроэнергии и готового активного продукта ранее было сказано в главах 1-3, а также в статьях автора [216, 342].

На рис. 4.5, 4.6 показана схема для настройки параметров факела в котле с факельной технологией сжигания.

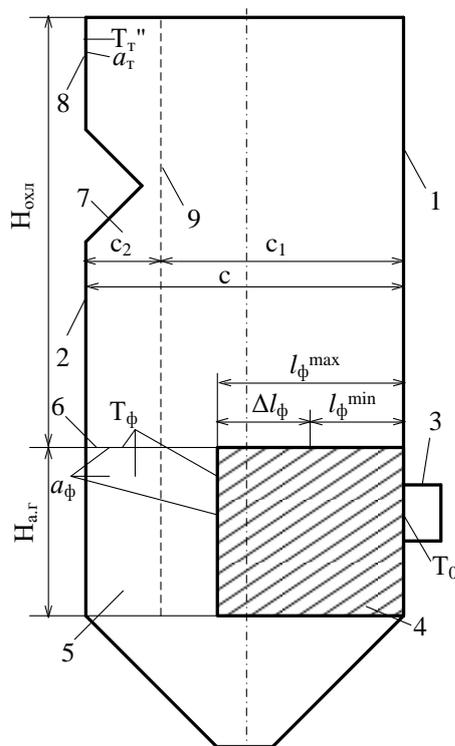


Рис.4.5. Система деления топки на зоны для настройки факела: 1, 2 – экранированные стены, 3 – горелочные устройства, 4 – начальный участок, 5 – участок с условно постоянным и максимальным значением теплосодержания, 6 – сечение или окно выхода с участка с условно постоянным и максимальным значением теплосодержания, 7 – зона охлаждения, 8 – окно выхода из зоны охлаждения, 9 – плоскость, принятая к расчету развития неравномерности

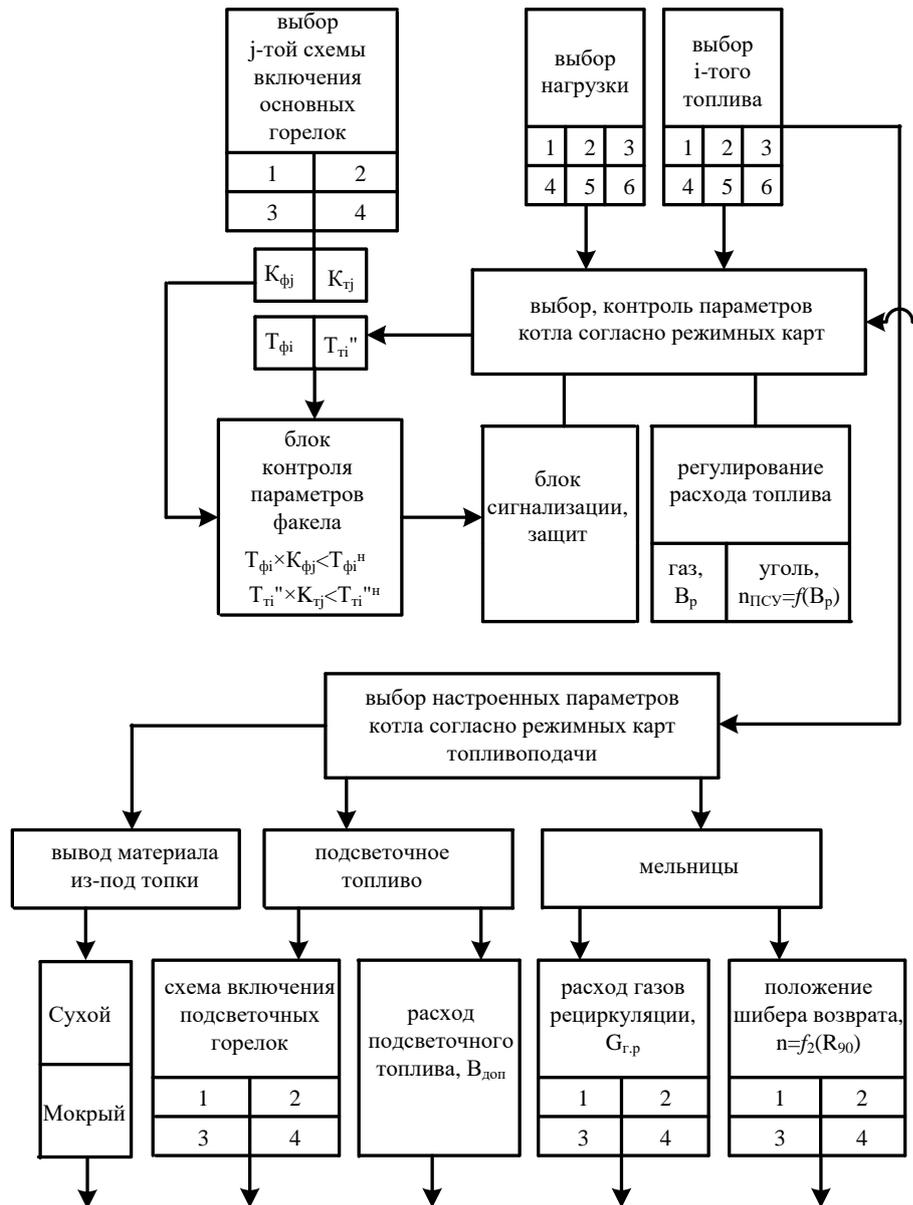


Рис.4.6. Алгоритм настройки факела на новый вид топлива или перевода на комбинированную выработку теплоты и активного продукта

Разработанный алгоритм расчета:

$$dq_T = dq_B + dq_{доп} - dq_{отв} - dq_W - dq_A - dq_p - dq_{рец}, \quad (4.1)$$

$$\Delta \bar{T} = (T - T_0) / (T_{\phi} - T_0) = (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/m}, \quad (4.2)$$

$$\bar{a} = a/a_{\phi} = (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/n}, \quad (4.3)$$

Уравнение (4.1):

$$dq_T = -\frac{d}{dl} \left(\lambda \frac{dT}{dl} F \right) = -\frac{d}{dl} \left[\frac{1}{m} \frac{12\xi - 24\xi^2 + 12\xi^3}{(6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1-1/m}} \lambda \frac{T_{\phi} - T_0}{l_{\phi}} F \right] d\xi =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{d}{d\xi} a_{\phi} (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/n} Q_0 B_0 d\xi + \frac{d}{d\xi} Q_{\text{доп}} B_{\text{доп}} d\xi - \frac{d}{d\xi} \sigma a_T T_{\text{cp}}^4 \sum_{i=1}^n \Psi_i F_i d\xi - \\
&\quad - \frac{d}{d\xi} (2500 W^p + c_{pW} \Delta t_W W^p + c_{pH} \Delta t_H W^p) B_0 d\xi - \frac{d}{d\xi} c_{pA} \Delta t_A A^c B_0 d\xi - \\
&\quad - \frac{d}{d\xi} (V^c c_{pV} + (1-V^c) c_{pK} + \alpha V^0 c_{pB}) \Delta t' B_0 d\xi - \frac{d}{d\xi} (I_{\phi} - I_0) r B_p d\xi, \quad (4.4)
\end{aligned}$$

Средняя температура факела:

$$T_{\text{cp}} = \frac{1}{l_2 - l_1} \int_{l_1}^{l_2} T dl = \frac{T_0}{\xi_2 - \xi_1} \Big|_{\xi_1}^{\xi_2} + \frac{T_{\phi} - T_0}{\xi} \int_{\xi_1}^{\xi_2} (6\xi^2 - 8\xi^3 + 3\xi^4)^{1/m} d\xi, \quad (4.5)$$

4.4 Проектные решения по активированию угля

Предприятию-заказчику проектных изысканий предложены варианты №1 (рис.4.7), №2 (рис.4.8) и №3 (рис.4.9) установок активации угля.

В отсутствии котла с механической решеткой минимальные затраты возложены предприятием – заказчиком работ на пилотный вариант №3 (рис.4.9). Его рекомендуется к рассмотрению и реализации в первую очередь. Режимы работы показаны на рис.4.10.

Во всех случаях, в том числе, по варианту 3, необходимо использование дополнительного дымососа (вентилятора) газов рециркуляции (дымовых газов).

Организация фракционирования может быть организована в любом месте (не обязательно вблизи пилотного объекта).

Сбор фракционированных частиц может быть организован в мешки.

Последовательность продувки: - газы рециркуляции с $t=600-800^{\circ}\text{C}$, - паро-продувка, - газы рециркуляции с $t=100-150^{\circ}\text{C}$, - воздух с $t=20^{\circ}\text{C}$.

Время продувки зависит от размера частиц. При первичном опробовании можно ориентироваться на расчетный график продувки горячими газами.

Анализ исходных и готовых частиц после пилотной установки, а также сравнение с нормами качества провести в независимой лаборатории.

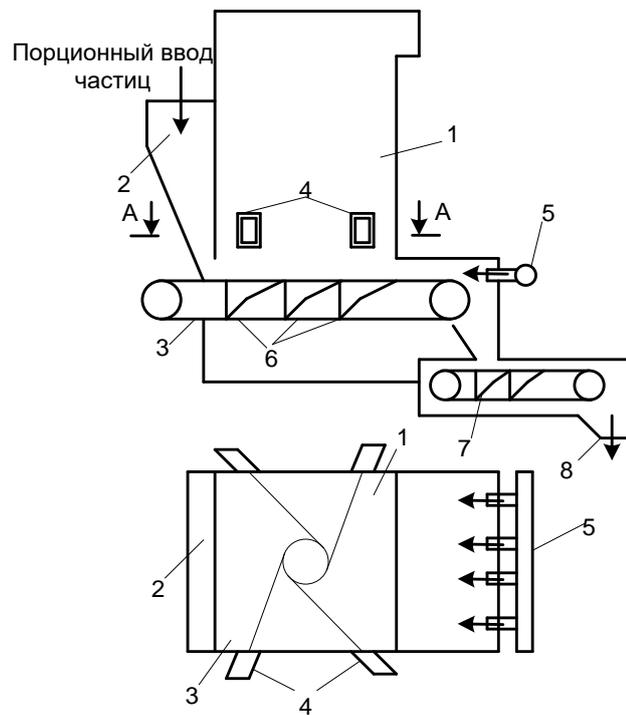


Рис. 4.7. Пилотная установка по варианту 1: 1 - Топка парового котла , 2 - Бункер исходных частиц, 3 - Механическая решетка, 4 - Горелки коксового газа , 5 - Система паро-продувки , 6 - Система продувки решетки, 7 - Система охлаждения дымовыми газами, 8 - Бункер сбора активированных частиц

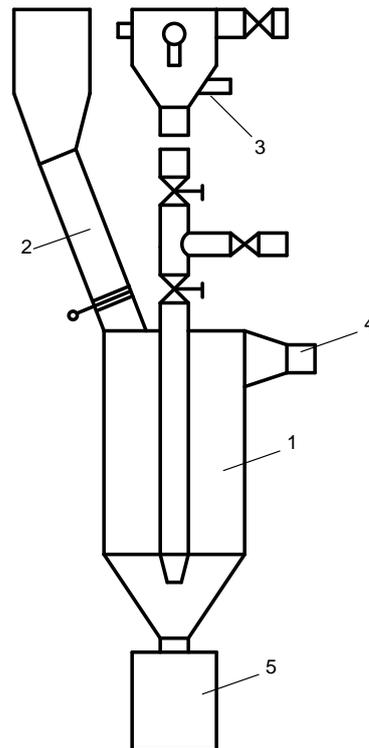


Рис. 4.8. Пилотная установка по варианту 2: 1 – автоклав, 2 – система ввода исходных частиц, 3 – горелка коксового газа, 4 – система сброса грязных газов в топку, 5 – система сбора готовой продукции

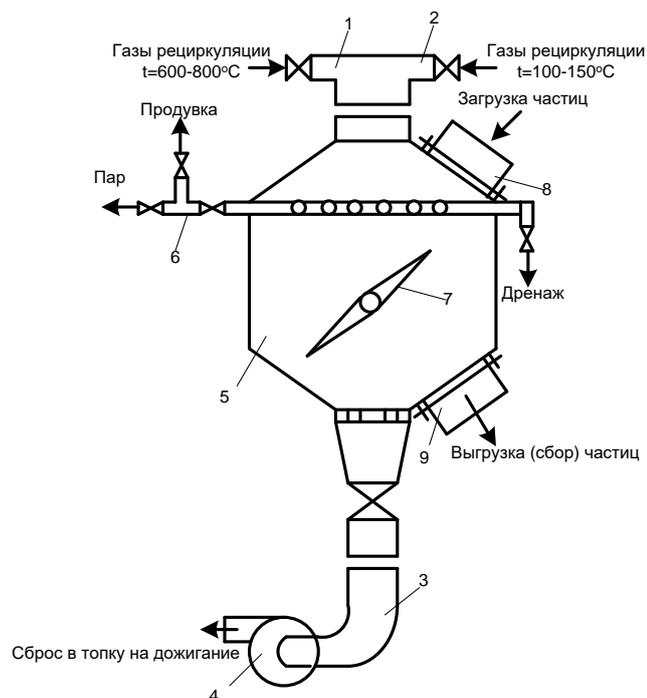


Рис. 4.9. Пилотная установка по варианту 3: 1, 2 – система соединительных газопроводов, 3 – сбросной газопровод, 4 – дополнительный дымоход (вентилятор), 5 – стакан с обрабатываемым материалом, 6 – система пароподогрева, 7 – механический ворошитель, 8 – система загрузки исходных частиц, 9 – система сбора готовой продукции

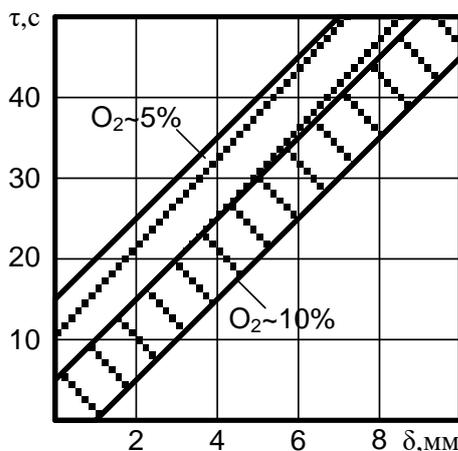


Рис. 4.10. График выдержки частиц

4.5. Использование теплового насоса или органического цикла Ренкина в полигенерационном комплексе

Органический цикл Ренкина наиболее подходит для небольших электростанций, обычно, для электростанций мощностью несколько МВт и менее, поскольку на малых электростанциях нет возможности использования регулярных операторов. Циклы имеют несложную конструкцию и не имеют необходимости в сложных компонентах для производства. Тем самым, цикл становится пригодным

для распределенного производства тепловой и электроэнергии. Подходит паровой цикл, кроме источников теплоты в большом диапазоне мощностей. В настоящее время не существует технологии, сочетающей комплекс по производству активного угля и органический цикл Ренкина.

Увеличение КПД энергокомплекса зависит от увеличения начальных или конечных параметров (давления и температуры). Современные электростанции работают с КПД 54-57%. Использовать биогаз как нетрадиционный источник энергии имеет смысл только в том случае, если поблизости есть комплекс по производству биогаза, а установленная мощность мини-ТЭЦ невелика [456, 457]. В настоящее время разрабатывается децентрализованная энергосистема, в которой мини-ТЭЦ установленной мощностью 103 кВт работает в одной системе с большим источником энергии [458, 459]. Можно сделать вывод, что дополнительные ресурсы для утилизации тепла на ТЭЦ, повышение эффективности на 2-3% можно ожидать в циклах и установках по обработке, очистке воды при получении кокса или активного угля. В частности, строительные, металлургические и химические заводы образуют энерготехнологический комплекс. Используя несколько методов, можно значительно увеличить их эффективность. Задача состоит в том, чтобы создать правильные условия и температуры и соответствующим образом снизить энтальпию отработанных или готовых продуктов.

Учитывая, что при комбинировании производства тепловой энергии, электроэнергии и активного угля, энергокомплекс должен находиться вблизи потребителей теплоты для снижения потерь. Распределение горячей воды сложнее и дороже, чем распределение электроэнергии, поэтому полигенерация ведет к децентрализованному производству электроэнергии. В то же время, чем ближе к потребителю, тем ниже затраты на транспортировку и распределение. Полигенерация направлена на оптимизацию использования вторичной энергии и максимальное повышение энергоэффективности топлива.

Энергоэффективные тепловые насосы - геотермальные и грунтовые тепловые насосы. По прогнозам Всемирной энергетической комиссии, к 2020 году доля

геотермальных тепловых насосов на рынке достигнет 75%. Их продолжительность работы также составляет 25-50 лет. В США федеральный закон требует использования геотермальных тепловых насосов в новых общественных зданиях. На тепловые насосы также приходится 50% всего отопления в Швеции. Геотермальные тепловые насосы используют тепло, накопленное под землей под воздействием солнца или других источников тепла.

В целом, тепловой насос - это система охлаждения, основной функцией которой является нагрев теплоносителя. Для того чтобы цикл охлаждения начался, необходимо выполнить определенную внешнюю работу. Эта работа связана с эксплуатацией компрессоров и другого оборудования, сжимающего жидкие хладагенты. Вся эта работа может быть преобразована в тепло, например, при обогреве помещения с помощью электрического обогревателя. Преимущество тепловых насосов перед другими системами отопления заключается в следующем, что они могут доставить в отапливаемое помещение больше тепла, чем другие методы отопления, за ту же энергию, потребляемую тепловым насосом.

На рис. 4.11 представлена комбинация вышеперечисленных элементов с системой получения активного угля.

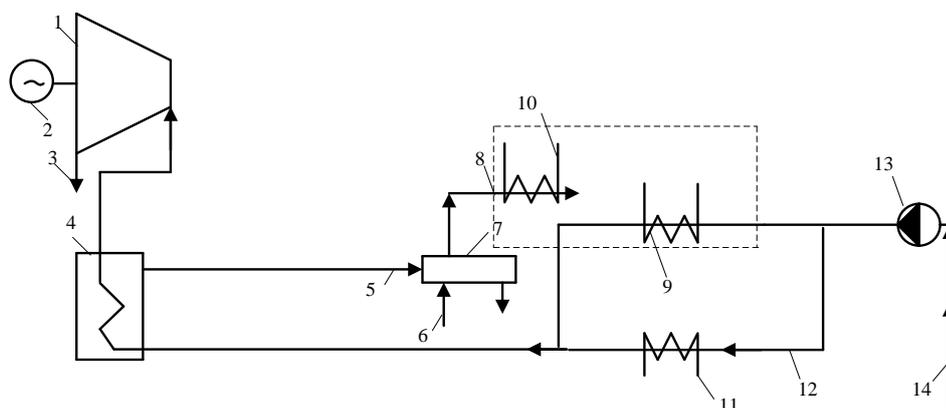


Рис. 4.11. Технологическая схема энергокомплекса с системой утилизации теплоты: 1 – турбина, 2 – электрогенератор, 3 – отработанный пар, 4 – котел с комбинированной выработкой теплоты и активированных частиц, 5 – вывод готового материала, 6 – ввод холодной воды, 7 – камера охлаждения, 8 – нагретая вода, 9 – конденсатор и 10 испаритель теплового насоса, 11 – подогреватель воды, 12 – химочищенная вода, 13 – насос, 14 – исходная вода

В итоге системы охлаждения активного угля обеспечивают максимальное использование топливных ресурсов. Типичное производство электроэнергии связано с тепловыми потерями при производстве и транспортировке теплоты. При использовании теплоты готового продукта повышается рентабельность тепловых насосов. Такая система делает общую стоимость дешевле, чем использование отдельной системы охлаждения и подогревателей. Относительно высокие капитальные затраты ограничивают широкое применение этой системы. Производительность насоса исходной воды обычно зависит от производительности котлов. Технологии с меньшим коэффициентом охлаждения обычно требуют большего расхода охлаждающей воды.

Системы прямого нагрева включают газ или другое топливо, которое сжигается непосредственно в устройстве. Системы непрямого нагрева используют пар или хладагенты для подачи тепла от источника тепла. Например, источником может быть бойлер. Гибридные системы также включают тепловые насосы и когенерационные установки, работающие на природном газе и поставляющие тепло и электроэнергию. Использование гибридной системы оптимизирует нагрузку на электросеть и экономит ресурсы [460, 461]. Разработаны технологии, сочетающие ОЦР с циклом производства активного угля в единой энерготехнологической системе. К тому же, практически показано повышение КПД ТЭС по сравнению с типовыми схемами.

4.6. Повышение эффективности гибридного энергокомплекса за счет использования сбросной теплоты

Объем сбросной теплоты, образующейся на крупных предприятиях, практически постоянен в течение всего года. Зимой температура воды выше, чем наружного воздуха. [462, 463]. Наиболее распространенной системой является использование тепловых насосов. Такие системы концентрированно извлекают, что приводит к значительной экономии энергии.

В целях снижения себестоимости электрической и тепловой энергии большое внимание уделяется недорогим малозатратным технологиям, которые можно вве-

сти в эксплуатацию в короткие сроки. В основном это технологии повышения эффективности котельных на вторичных энергоресурсах [464]. Большинство очистных сооружений требуют реконструкции или ремонта. Очистные сооружения часто требуются переоснащение и ремонт. Стандартные решения, реализованные в проектах, не применяются. Модернизация - это процесс, в ходе которого необходимо решить сложные проблемы для улучшения энергетических и экономических характеристик канализационной системы [465, 466]. Качество воды также контролируется специализированными лабораториями. Механическая обработка воды в настоящее время является недостаточной. Развитие очистных сооружений не только улучшает качество воды до стандартов, но и означает снижение потребления энергии. Правильное использование источников энергии и снижение тепловых потерь приобретают все большее значение в промышленности и повседневной жизни. Рост цен на энергоносители стимулирует использование низкоуглеродных источников энергии. Одним из таких источников являются промышленные сбросы, в том числе при охлаждении готовых продуктов, например активного угля. Теплота охлаждения имеет низкий потенциал.

Для повышения энергоэффективности установок очистки сточных вод необходимо эффективно использовать это тепло, также как тепло охлаждения активного угля. Решение этой проблемы открывает возможность развития распределенной генерации энергии. Термодинамическое преобразование низкопотенциальной тепловой энергии включает в себя различные циклы. В циклах (органических) Ренкина используют часто рабочие жидкости с гораздо более высокой температурой, чем вода. Системы с органическим циклом Ренкина используют сточные воды или нагретый воздух в качестве низкопотенциального источника тепла (рис. 4.12, рис.4.13). Вода передает тепло рабочей жидкости в теплообменнике. Когда хладагент достигает температуры насыщения, он начинает кипеть, поступает в поршневой цилиндр расширителя, расширяется при движении поршня, и тепловая энергия используется для механического перемещения ротора генератора. Отделенная рабочая жидкость поступает в конденсатор, где она охлаждается и

конденсируется проточной водой. Охлаждающая жидкость сжижается и подается обратно в теплообменник с помощью насоса, приводимого в действие двигателем. Компания способна использовать энергию, полученную при вращении ротора, для своих целей.

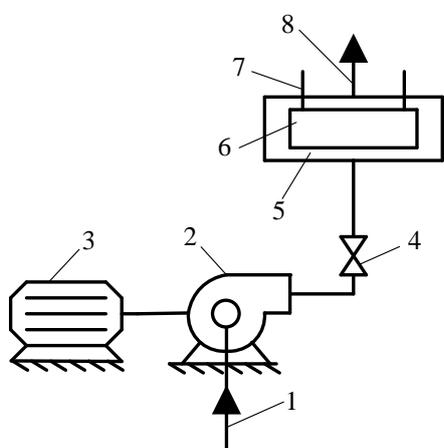


Рис. 4.12. Технологическая схема с использованием теплообменника труба - в трубе: 1 – газы; 2 – газовый вентилятор; 3 – электропривод; 4 – клапан; 5 – газоход; 6 – бак для воды; 7 – ввод воды; 8 - газ вышел

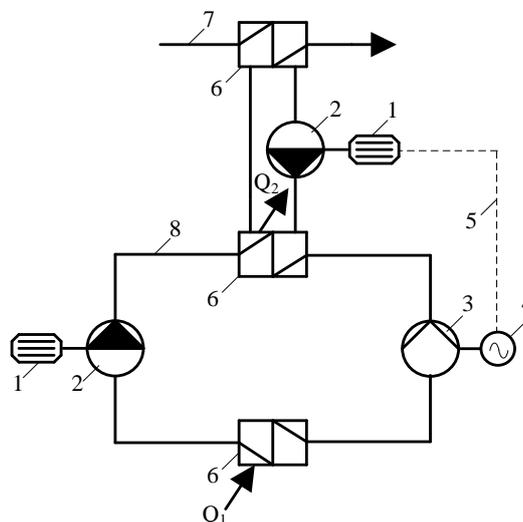


Рис. 4.13. Технологическая схема с использованием теплового насоса или ОЦР: 1 – электропривод; 2 – насос; 3 – детандер; 4 – электрогенератор; 5 – электрический кабель; 6 – теплообменник; 7 – вход воды, 8 – основной цикл теплового насоса

Преимущество цикла Ренкина перед циклами Стирлинга, Брайтона и состоит в том, что он адаптируется к различным тепловым ресурсам, ценовой общедоступности оборудования и простоте в реализации. Также система может функционировать в бинарных циклах (высокотемпературных и низкотемпературных). Промышленность выбрасывает в атмосферу большое количество тепловой энергии, которая образуется из продуктов сгорания при относительно низких температурах. Это часто наносит большой вред, поскольку загрязняет окружающую среду и вызывает изменение климата.

Блок ТЭЦ использует только 37% энергии топлива, это означает, что 63% топлива безвозвратно потеряно. По этой причине повторное использование отработанного тепла на промышленных предприятиях и выработка электроэнергии из отработанного тепла становятся все более популярными в последние годы.

Большая часть объема трехатомных дымовых газов попадает в атмосферу, утилизация этих газов является сложным процессом. Проведен анализ метода охлаждения дымовых газов для повышения КПД. Этот метод можно использовать на агрокомплексах с большим энергопотреблением, а также в мини-ТЭЦ небольшой мощности [467, 468]

Существует несколько вариантов конструкции теплообменников для снижения температуры дымовых газов. Их можно разделить на две группы. Первая группа – это теплообменники контактного типа, применявшиеся в прошлом. Ко второй группе относят конденсационные поверхностные теплообменники.

Поверхностный теплообменник лучше, чем контактный. Они обладают улучшенными техническими характеристиками. Использование контактного теплообменника осложнено поглощением водой углекислого газа и кислорода. При этом вода приобретала коррозионно-агрессивные свойства. Использование конденсирующей поверхности теплообменников позволяет избежать этого.

Выводы по главе 4

Проекты энергокомплексов по активированию угля и использованию систем утилизации теплоты нашли свое применение в современной энергетике.

1. Разработаны проекты энергокомплексов активации угля на основе факельной технологии сжигания в энергокотлах, установленных на тепловых электрических станциях и котельных крупных предприятий по добыче и переработке угля.

2. Рассмотрены возможности использования систем утилизации теплоты на тепловых электростанциях и энергокомплексах по комбинированной выработке активированного угля и теплоты.

3. Рассмотрены наиболее приоритетные к внедрению проекты установок по активированию угля в составе энергокомплексов.

5 Экспериментальная часть. Численные и натурные исследования основного теплового оборудования энергокомплекса активации угля

5.1 Компьютерное моделирование процессов динамики частиц

5.1.1 Газодинамика

Рассмотрим алгоритм создания новой математической модели течения газа

1. Построение геометрической модели

Перенесем созданный блок Fluent в рабочее пространство проекта и начнем задавать геометрические данные с помощью SpaceClaim (также геометрию можно построить в DesignModeller). Создадим геометрическую модель – рабочим пространством будем считать объем цилиндра (1000 мм длиной и диаметром 100 мм). С одного торца дополнительно выделим поверхность, ограниченную окружностью 80 мм – входное сечение, через которое пропускается природный газ. Площадь кольца, ограниченного окружностями 80 мм и 100 мм – входное сечение подачи воздуха. Торцевое сечение напротив – выход смеси продуктов сгорания из рабочей зоны. Построим геометрическую модель, рис.5.1, а.

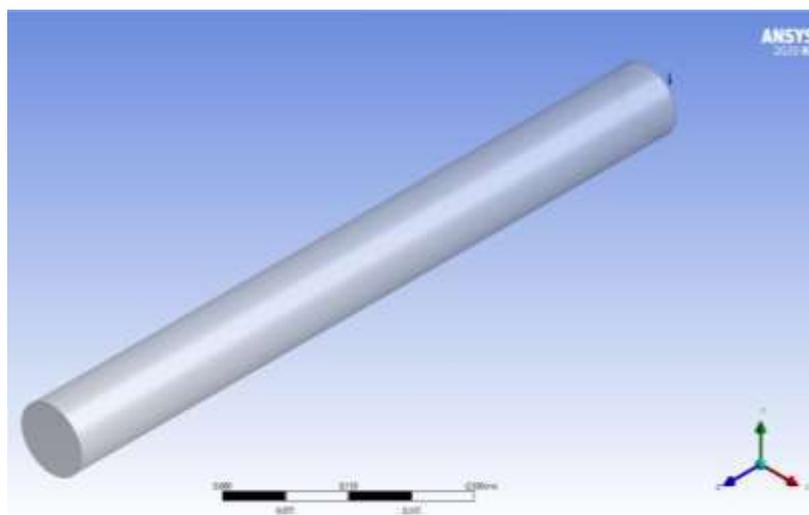
2.Задание сетки

При автоматической генерации создается грубая, неточная сетка, рис.5.1,б. Для улучшения её качества выберем метод построения сетки Sweep. Данный метод позволяет создать осесимметричную сетку, рис.5.1,в.

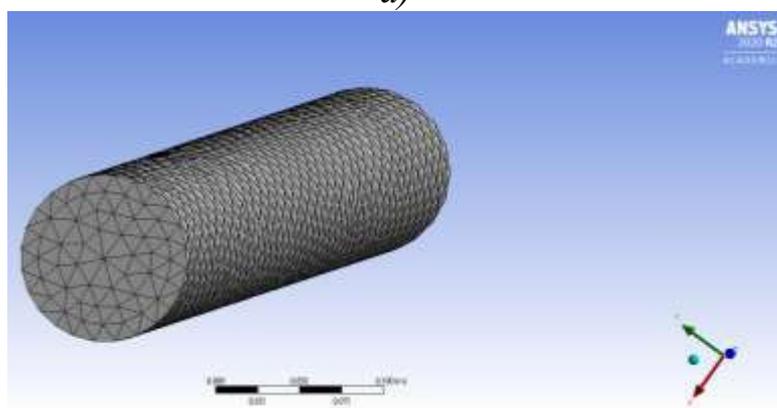
Также у входной границы рабочего пространства разобьем сетку на более мелкие элементы с помощью инструмента Face Sizing, рис.5.2, а.

В результате получим сетку требуемого качества, рис.5.2, б.

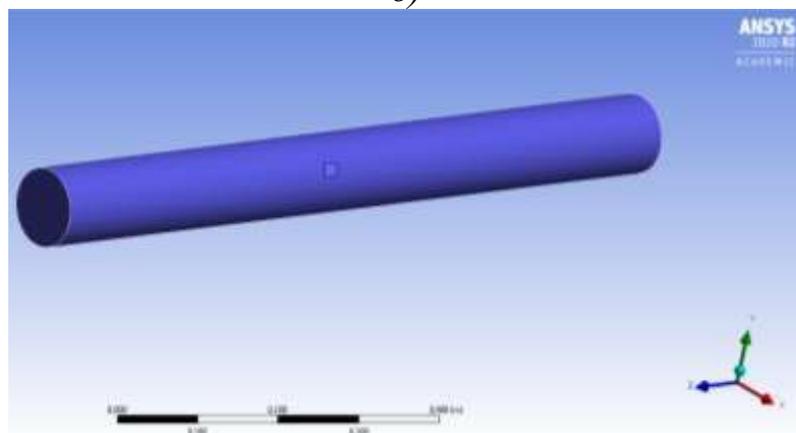
Проименуем области геометрии для входа газа, входа воздуха, выхода смеси и ограничивающих стенок как показано на рис. 5.2, в.



а)

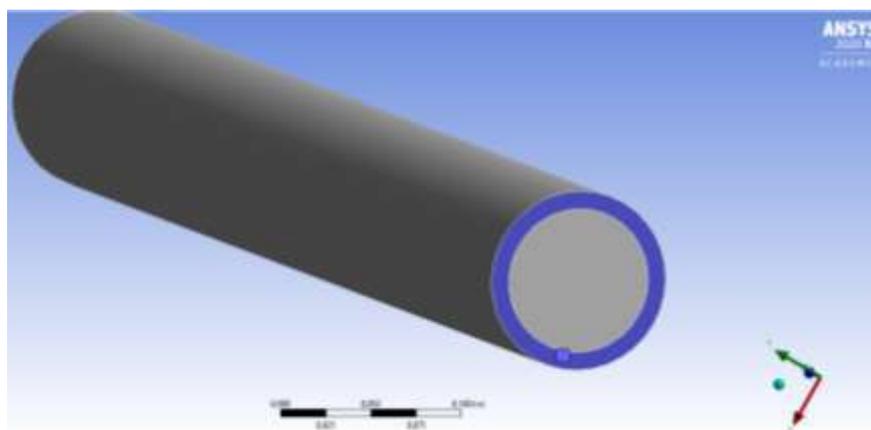


б)

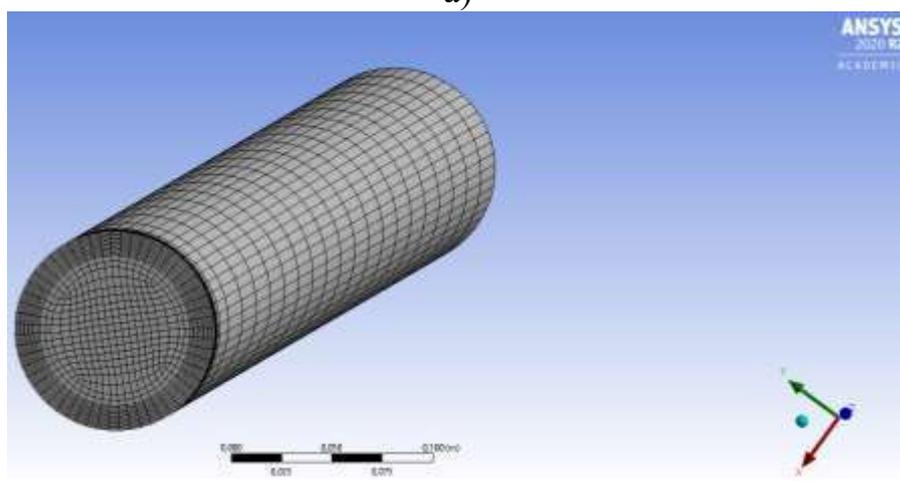


в)

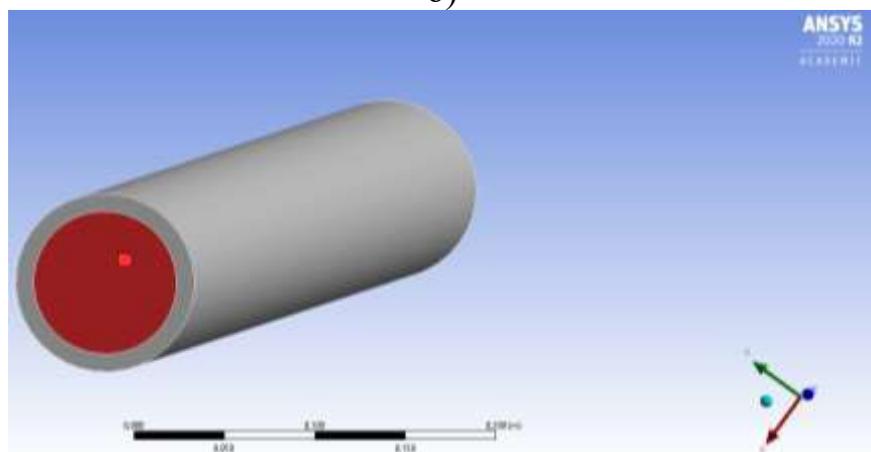
Рис. 5.1. Геометрические данные модели (а), неточная сетка, нанесенная на геометрическую модель (б), создание осесимметричной сетки (в)



а)



б)



в)

Рис. 5.2. Построение сетки: а) разбиение сетки на мелкие элементы, б) сетка требуемого качества, в) построение проинменованных областей

Для моделирования смещения и течения газов достаточно высокой точностью при расчете поля скоростей потока будет обладать модель $k-\epsilon$ realizable. Модель $k-\epsilon$ standard экономична по вычислительным ресурсам и применима для широкого класса течений. Используются функции, учитывающие трение жидкости о стенки.

Пригодна для турбулентных течений, способна учитывать эффекты сжимаемости и естественной конвекции. Модель *realizable* – модернизированная модель *k-ε standard*, подходит для большинства задач, особенно задач о взаимодействии текучих сред и о зонах отрыва потока. Подходит для группы задач «газ действует на газ: смешение газовых потоков». Однако решение задачи связано не только с течением газа, но и теплообменом – выберем модель турбулентного течения *k-ω SST*. Данная модель хорошо описывает течение вблизи твердых стенок, а также теплоотдачу на стенке. Обладает меньшей диффузией, нежели *k-ε standard*. Модель учитывает скорость диссипации энергии. *k-ω SST* учитывает переходы в турбулентность, также её затухание. Включим модель *k-ω SST*, так как задача состоит в перемешивании газов. Так как в модели исследуется процесс горения, то включим уравнение энергии. Выберем поля, отвечающие за течение смеси (*Species Transport*), её сжигание (*Eddy-Dissipation*) в объеме рабочего пространства (*Volumetric*) и примем условия (*Apply*). Только после этого из выпадающего меню выбираем модель сжигания газа (метана, которого в природном газе содержится 95...98%, в данном примере допустим 100% содержание метана) и воздуха (смесь кислорода и азота в пропорциях 23% и 77%). Далее во вкладках редактируется реакция горения природного газа.

Далее следует отредактировать граничные условия для входного сечения подачи воздуха: величина скорости 0,05 м/с, вектор располагается нормально по отношению к входному сечению (*normal to boundary*); температура воздуха на входе в рабочее пространство: 300 К; массовая доля содержания кислорода 23% (оставшиеся 77% программа автоматически заполнит не участвующим в реакции горения азотом). Аналогично зададим условия подачи газа: величина скорости 10^{-3} м/с, вектор располагается нормально по отношению к входному сечению (*normal to boundary*); температура метана на входе в рабочее пространство: 300 К; массовая доля содержания метана 100%. Граничное условие для выходного сечения задается как *Outflow*, то есть истечение из пространства модели наружу (программа задает избыточное давление на выходе равным нулю, то есть считается, что исте-

чение происходит в пространство с давлением 1 атм). Как вариант можно вручную задать условие pressure-outlet и задать избыточное давление (gauge pressure) равным 0 Паскалей. Однако по возможности для экономии вычислительной мощности рекомендуется в задачах на транспортировку смесей ставить выходное граничное условие Outflow. Это возможно в случаях, когда значения параметров смеси (скорости, давления, массовые доли) не будут сохраняться и рассматриваться далее в каких-либо задачах. В нашем случае мы рассматриваем только процесс горения в рабочем пространстве, какие-либо исследования и манипуляции с уходящими газами в данном эксперименте мы не проводим. Поэтому задаем выходное граничное условие Outflow. Для решения задачи с достаточно точной сходимостью зададимся методом Coupled. Зададим второй порядок дискретизации для степени рассеивания турбулентности (Turbulent Dissipation Rate) и расчета турбулентной кинетической энергии (Turbulent Kinetic Energy), что позволит быстрее добиться сходимости решения. Также поставим галочку в поле Pseudo-Transient (Псевдо-нестационар), что позволит рассмотреть процесс стабилизации пламени во времени. Для создания анимации выделим среднее сечение рабочего пространства. Создадим две анимации – одну для мониторинга температуры пламени (изначально рабочее пространство заполнено воздухом с температурой 300 К), а вторую – для мониторинга массовой доли метана в рабочем пространстве (изначально в рабочем пространстве нет метана, поэтому массовая доля его равна нулю). Также необходимо построить среднее сечение рабочего пространства, рис.5.3.

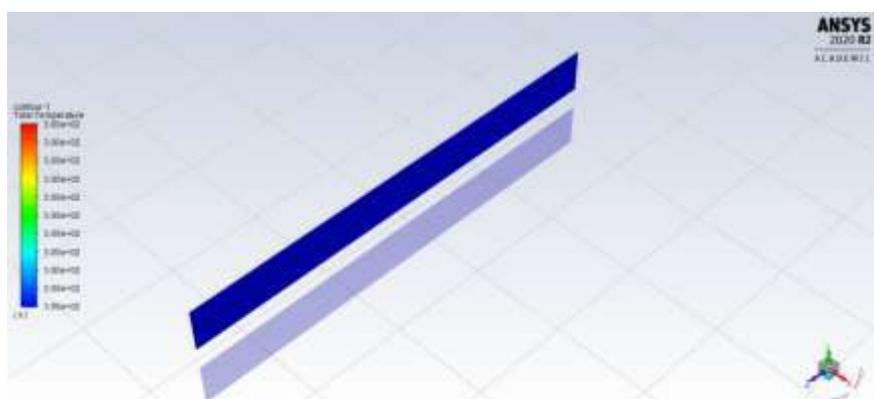


Рис.5.3. Построение среднего сечения рабочего пространства

Далее запускается процесс инициализации. Эта процедура необходима каждый раз при задании условий. В том числе это требуется делать при задании новых условий, чтобы программа стерла старые данные и начала считать модель без учета предыдущего эксперимента. Перейдем к запуску расчетов (Run calculation). Поскольку метан очень быстро начнет гореть, то уменьшим в 5 раз течение времени эксперимента (0.2 в Time Scale Factor),. Задаем некоторым числом итераций (в данном примере возьмем 600). Запускаем расчет кнопкой Calculate. После того как невязки расчётов (скорости диссипации кинетической энергии, векторов скоростей и т.д.) упадут на несколько порядков (приблизительно на e^{-3}) – расчет будет автоматически закончен, то есть было найдено стабильное решение (устоявшийся режим пламени). В этой работе получим следующее количество итераций при расчете, рис.5.5.

Результаты моделирования получены следующие, рис.5.5, 5.6, 5.7.

Так как каждый кадр анимации соответствует 0,2 секунды, а сходимость была получена на 52-й итерации, то время стабилизации пламени занимает приблизительно 10,4 секунды. Результат также можно рассмотреть подробнее в пост-процессинге CFD-Post, рис.5.8, 5.9.

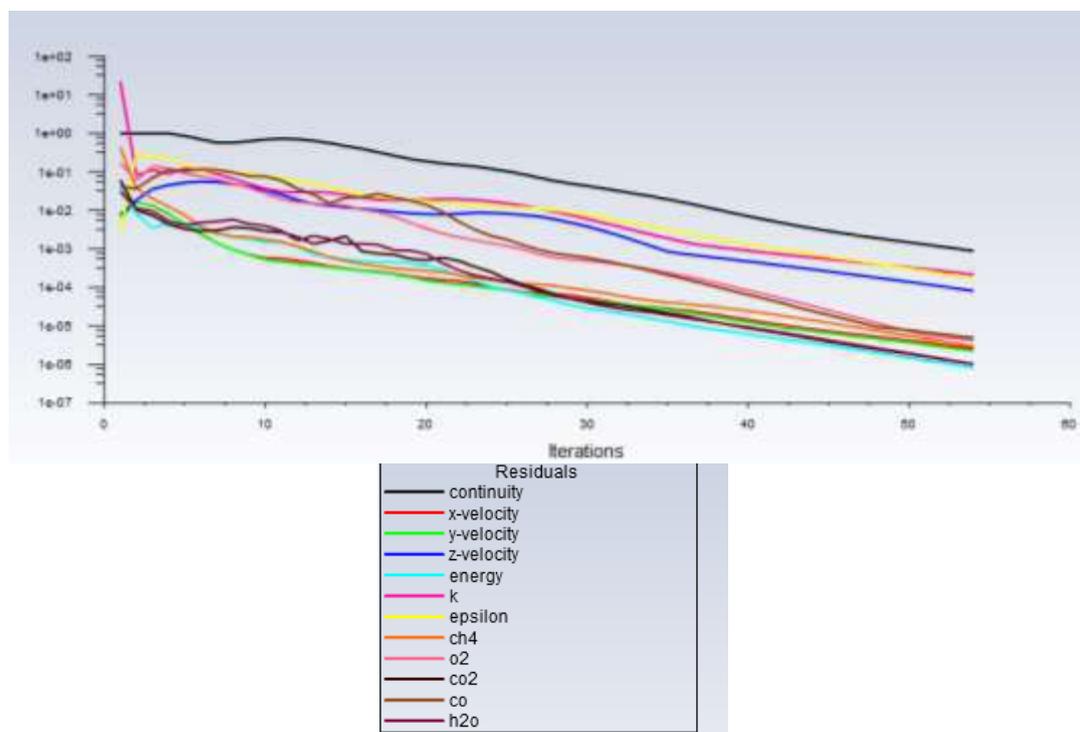


Рис. 5.4. Количество итераций при расчетах

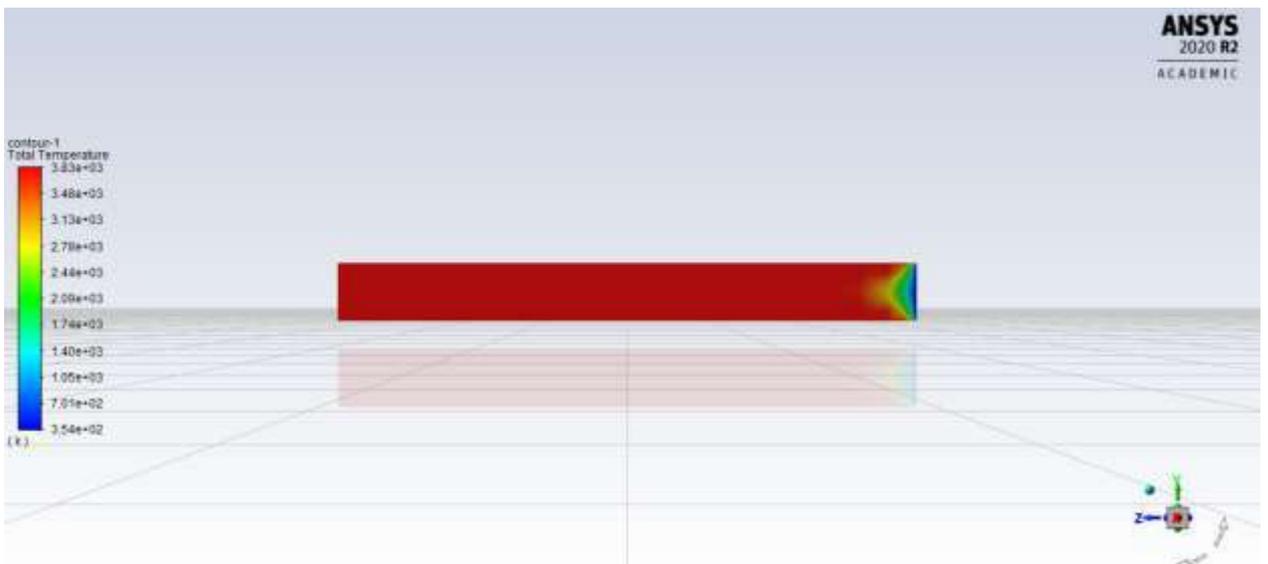


Рис.5.5. Моделирование в момент времени: $\tau = 0$ с (начало горения)

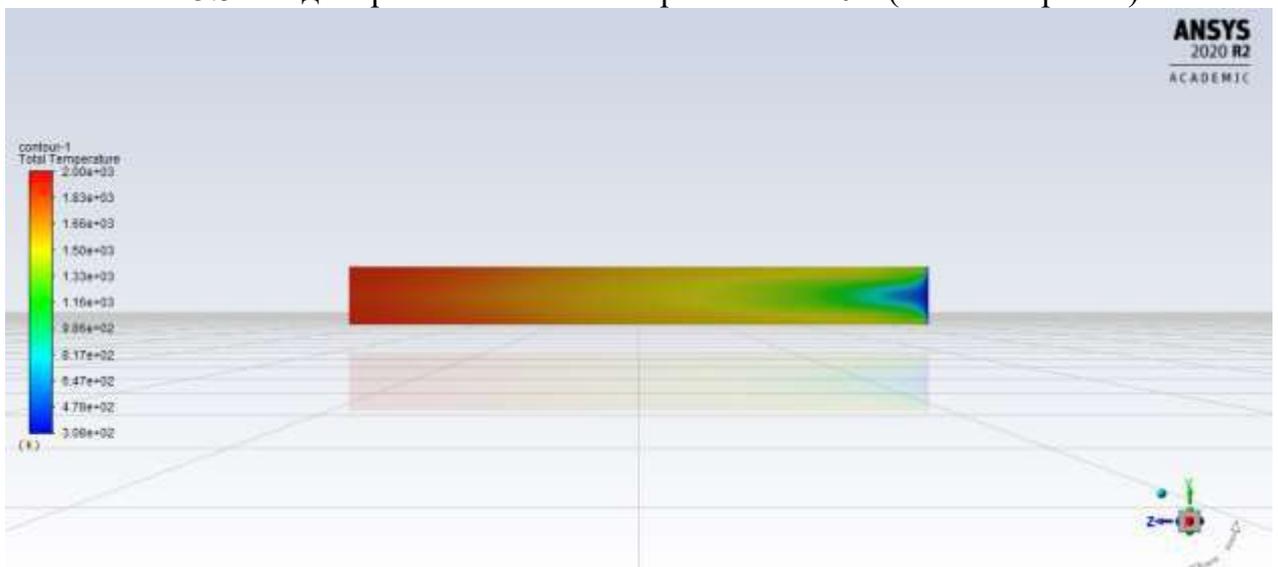


Рис.5.6. Моделирование в момент времени: $\tau = 1$ с

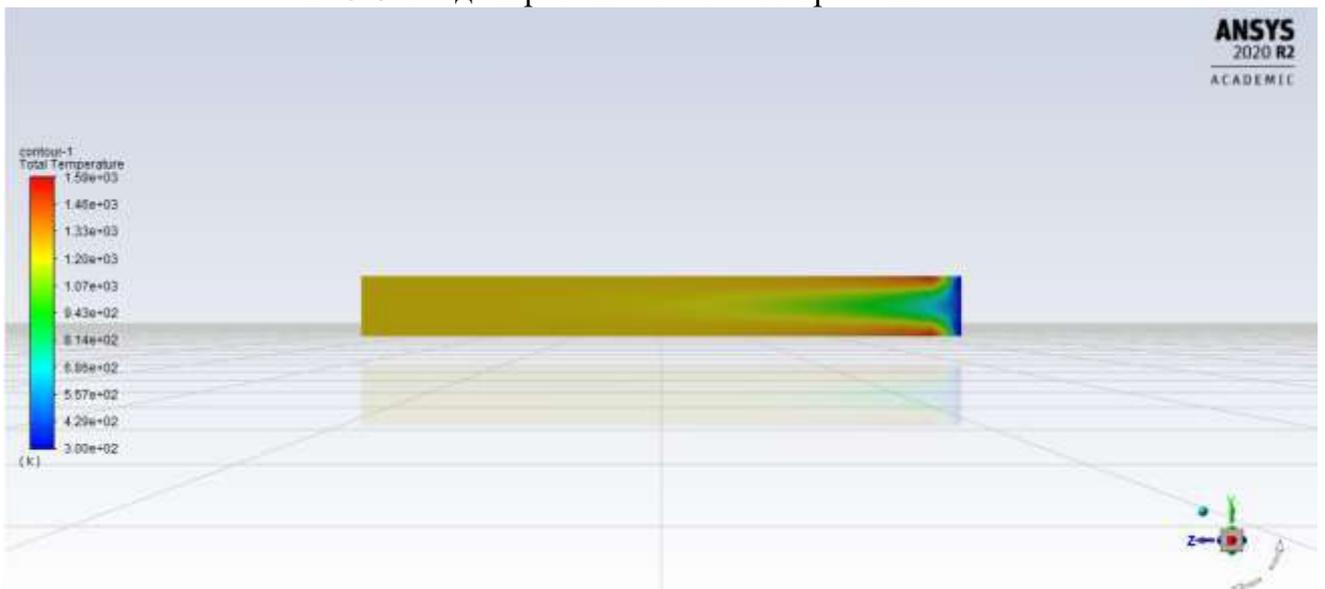


Рис.5.7. Моделирование в момент времени: $\tau = 3$ с

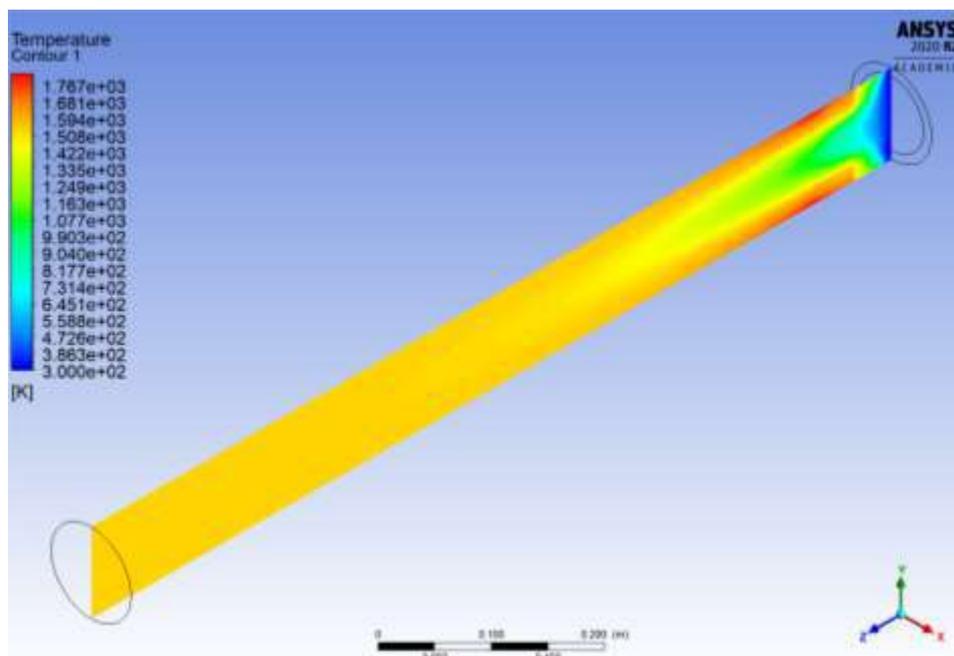


Рис.5.8. Моделирование в пост-процессинге

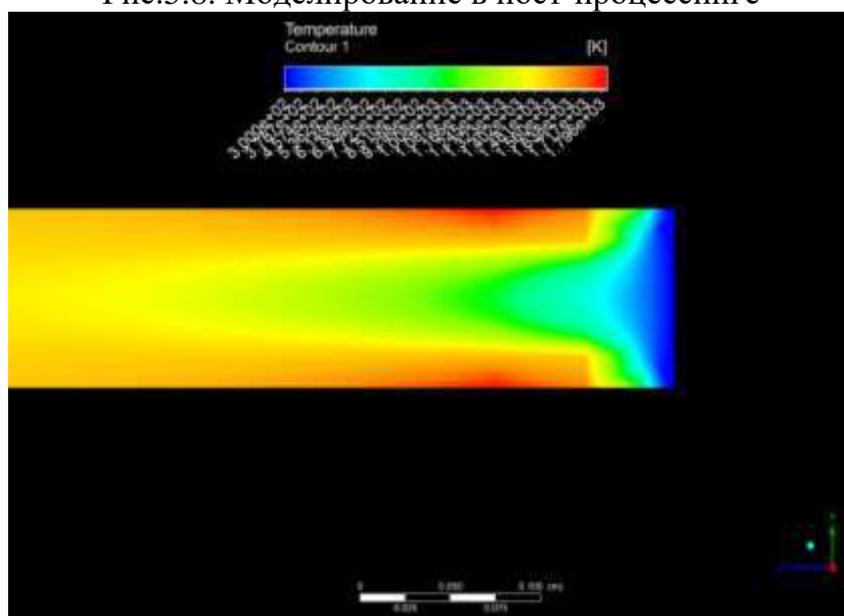


Рис.5.9. Результаты моделирования горения природного газа

5.2. Компьютерное моделирование движения запыленного потока

Движение запыленного потока в программной среде Ansys задается на этапе ввода граничных условий. Условия принимаем аналогичными пункту 5.1 настоящей главы. После принятия модели (Apply) появится возможность посмотреть и отредактировать в модели. В результате получим следующую модель движения запыленных газов, рис.5.10.

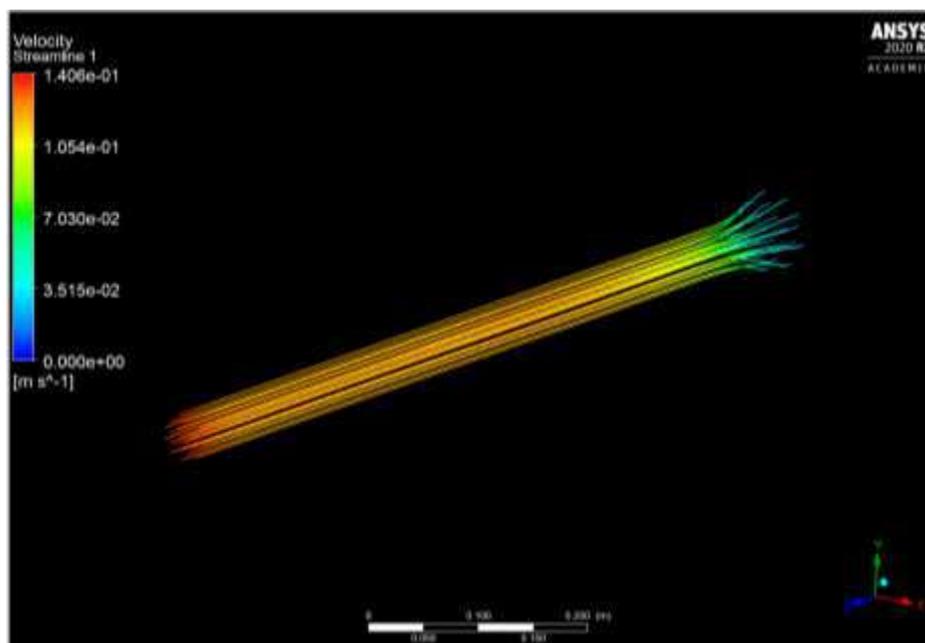


Рис. 5.10. Модель движения запыленного потока. Поле скоростей

5.3. Компьютерное моделирование многофункционального горелочного устройства

Построим геометрическую модель горелочного устройства, рис.5.11.

Внутреннее пространство заполняется объемом автоматически нажатием кнопки “Volume Extract”. Отключаем в меню справа не интересующие нас в данной модели ограничивающие стенки. Создаем сетку, рис.5.12.

Задаем граничными условиями, перейдя во вкладку Boundary Conditions: скорость подачи воздуха для сжигания угольной пыли: 3,4896 м/с; скорость подачи угольной пыли: 3,7778 м/с; скорость подачи воздуха для сжигания газа: 23,2639 м/с; скорость подачи газа: 0,5833 м/с. Перейдем к запуску расчетов (Run calculation), рис.5.11. Вводим количество итераций (для данного класса задач требуется приблизительно 300...500), рис.5.14. Запускаем расчет кнопкой Calculate.

Сохраняем результаты. Результаты можно рассмотреть в пост-процессинге CFD-Post. Пример итогового вида поля скоростей в объеме сжигания газа (плоскость проходит через сечение отверстий), рис.5.15.

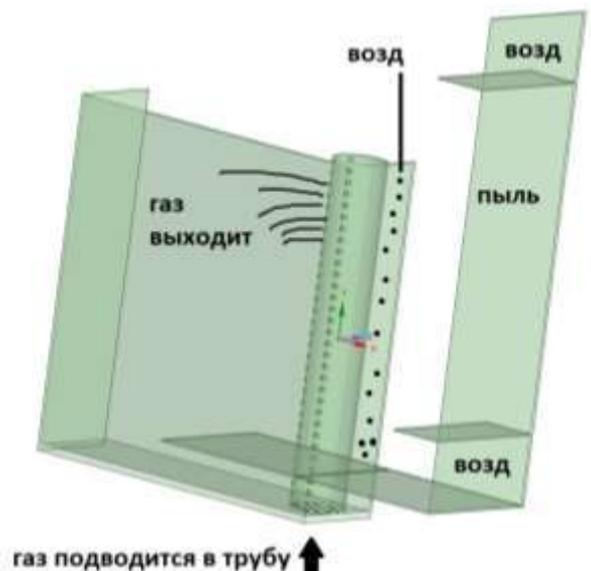


Рис.5.11. Схематичная модель подачи потоков реагентов в горелку

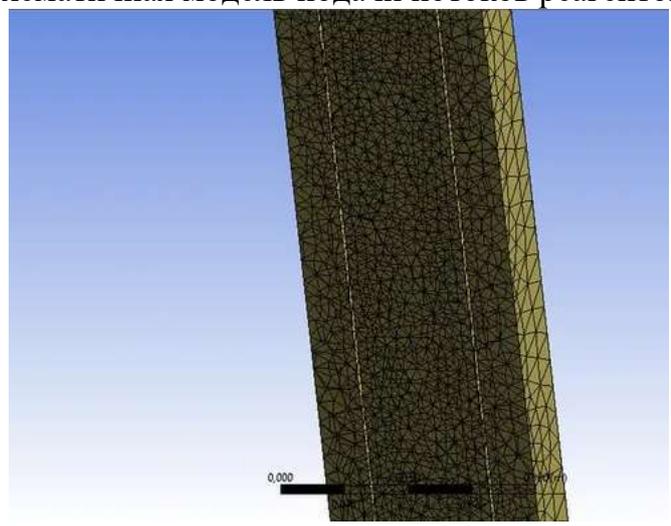


Рис.5.12. Построение сетки для горелочного устройства

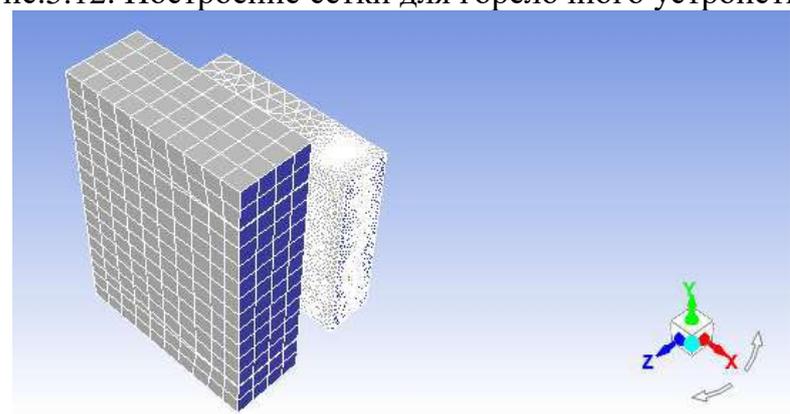


Рис. 5.13. Вид модели горелочного устройства перед расчетом

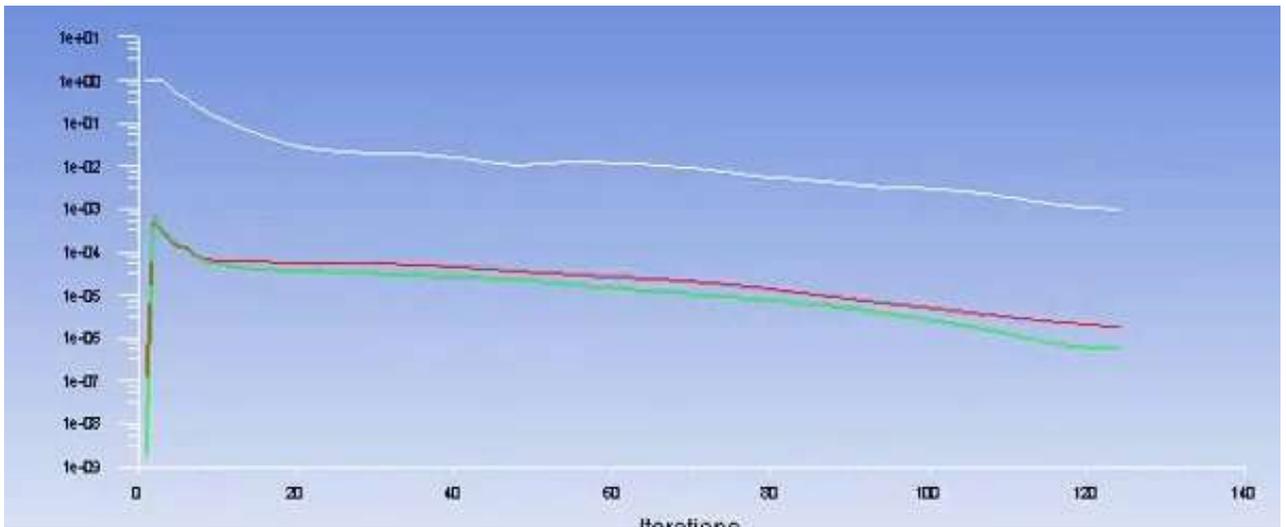


Рис. 5.14. Количество итераций для расчета модели

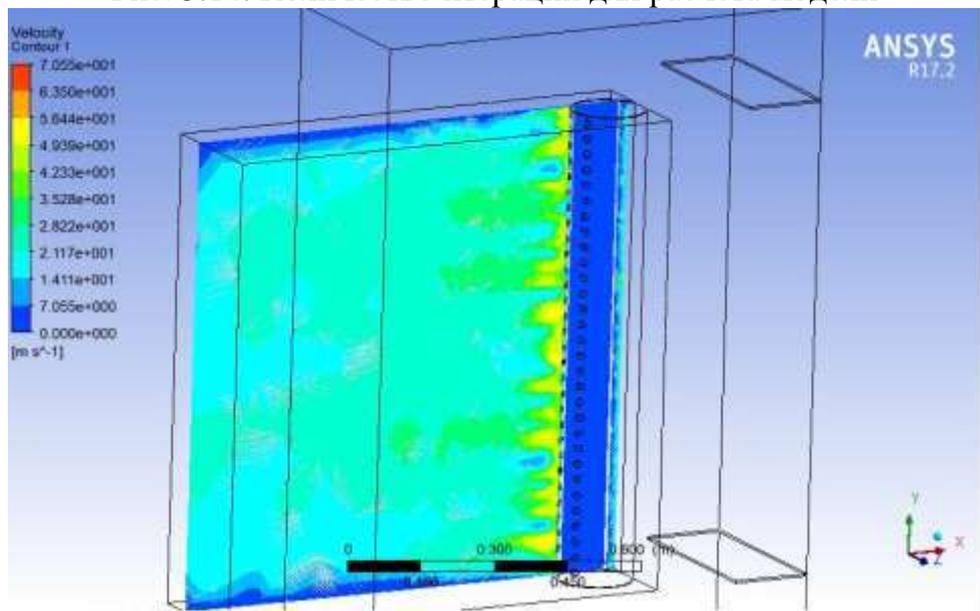


Рис. 5.15. Результаты моделирования газодинамики природного газа и воздуха из горелочного устройства

5.4. Компьютерное моделирование газодинамических течений в камере сгорания

Проведем компьютерную симуляцию (сжигание природного газа) и движения запыленного потока газов. В поле standard state enthalpy содержащаяся теплота в килограмме топлива всегда домножена на молекулярный вес частиц, таблица 5.1.

Таблица 5.1 Граничные условия

Сжигание газа	Сжигание пыли
Скорость газа = 0,528 м/с	Скорость газа = 0 м/с
Скорость пыли = 0 м/с	Скорость пыли = 1,7638 м/с
Скорость воздуха (для газа) = 0,66 м/с	Скорость воздуха (для газа) = 0 м/с
Скорость воздуха (для пыли) = 0 м/с	Скорость воздуха (для пыли) = 2,3458 м/с
Удельная теплота сгорания 50,11 (МДж/кг)	Удельная теплота сгорания 12,0 (МДж/кг)

Сохраняем результаты. Результаты можно рассмотреть в пост-процессинге CFD-Post. Пример итогового вида поля скоростей в объеме сжигания газа (плоскость проходит через сечение отверстий).

5.4.1 Эксперимент №1 – природный газ

Результаты исследований представим в пост-процессинге, рис.5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20. По результатам моделирования средняя температура камеры сгорания: 1277 К (1004°C).

5.4.2. Эксперимент №2 – запыленный поток

Результаты исследований представим в пост-процессинге, рис.5.21, 5.22, 5.23, 5.24.

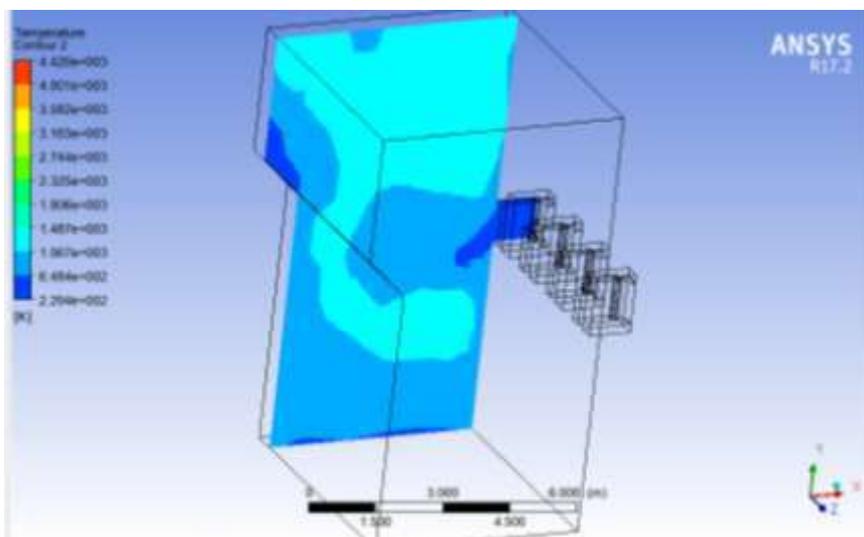


Рис. 5.16. Моделирование горения природного газа в объеме котла (однорядное расположение горелок, в сечении горелки №4)

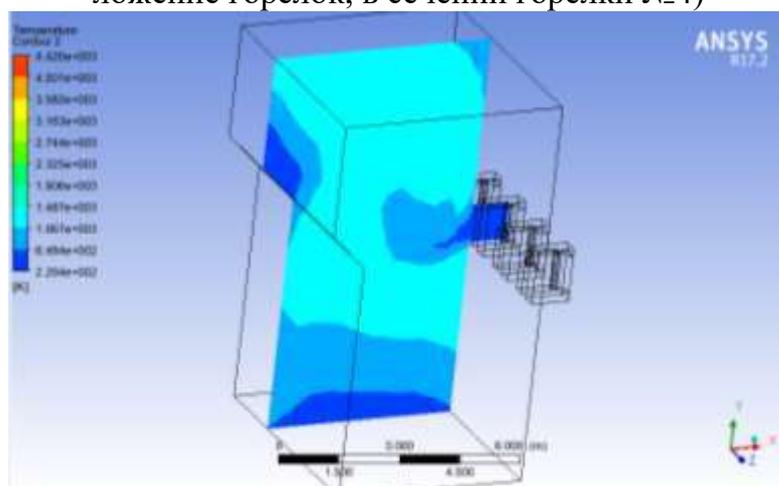


Рис. 5.17. Моделирование сжигания природного газа в объеме котла (однорядное расположение горелок, в сечении горелки №3)

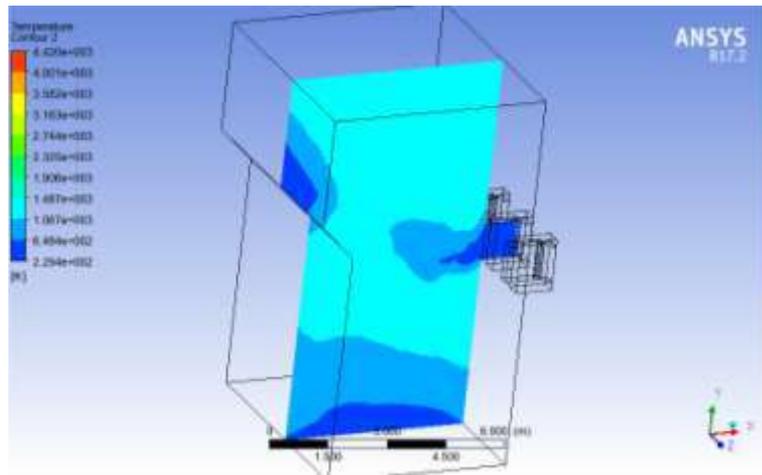


Рис.5.18. Моделирование сжигания природного газа в объеме котла (однорядное расположение горелок, в сечении горелки №2)

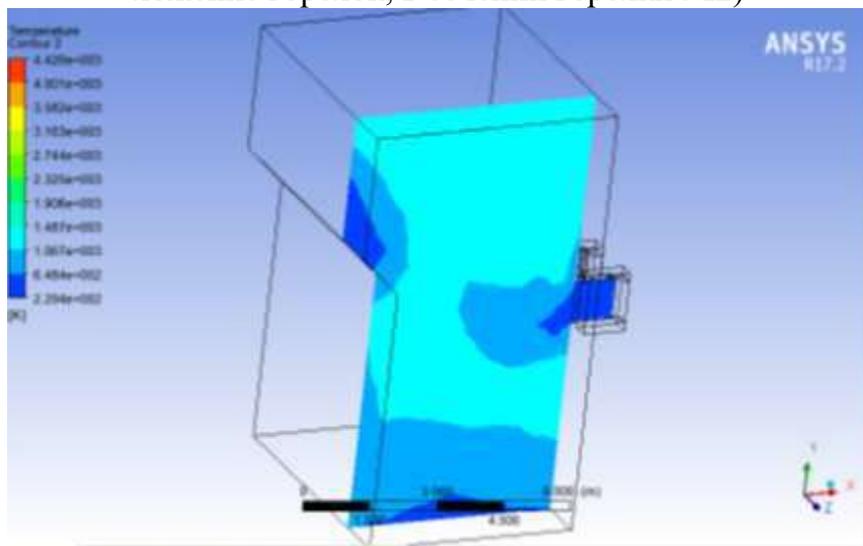


Рис.5.19. Моделирование сжигания природного газа в объеме котла (однорядное расположение горелок, в сечении горелки №1)

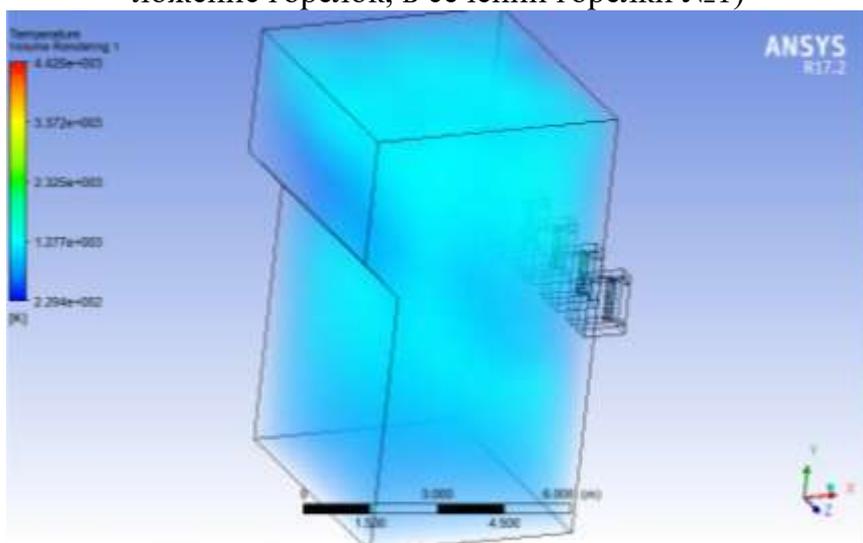


Рис.5.20. Моделирование сжигания природного газа в объеме котла

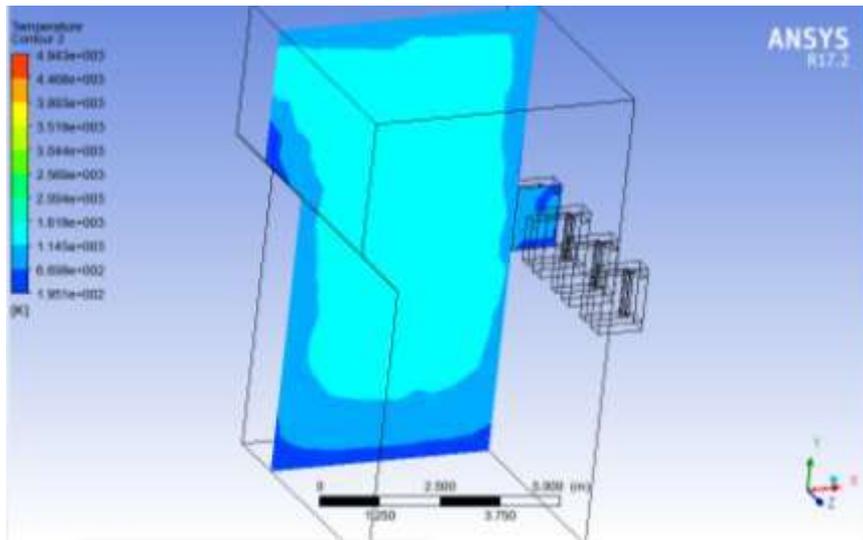


Рис.5.21. Моделирование запыленного газового потока с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

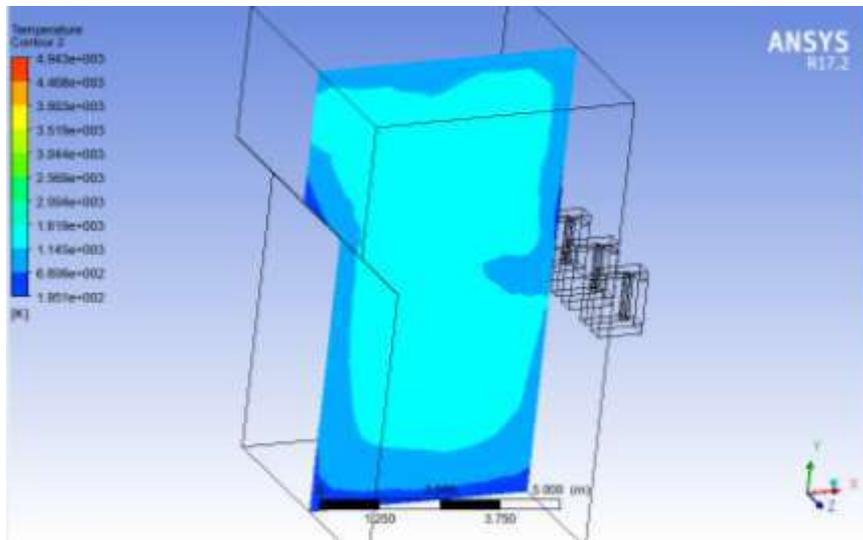


Рис.5.22. Моделирование запыленного потока газов с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

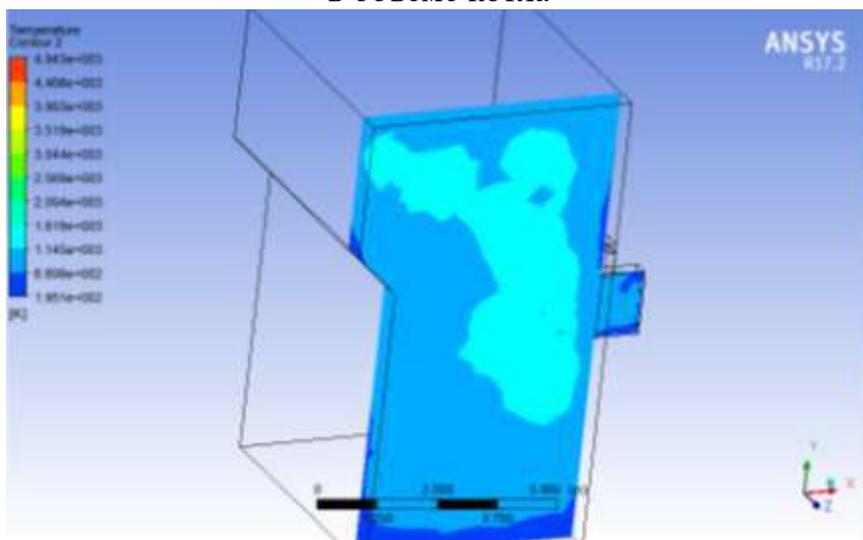


Рис. 5.23. Моделирование запыленного потока газов с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

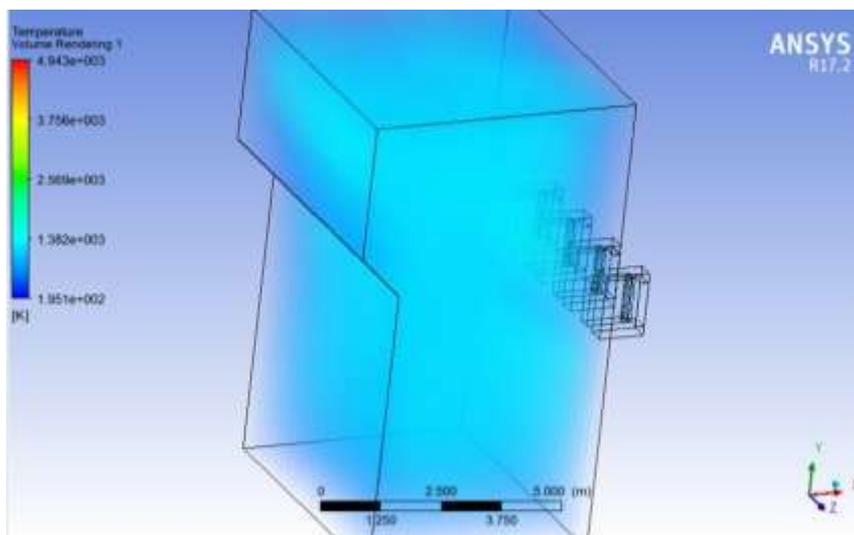


Рис. 5.25. Моделирование запыленного потока газов с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

По результатам моделирования в эксперименте №2 средняя температура котла при движении запыленного потока с характеристиками из таблицы 5.1 составила 1382 К (1109°C).

5.4.3 Эксперимент №3 – запыленный поток с подсветкой

Результаты исследований представим в пост-процессинге, рис.5.25, 5.26, 5.27, 5.28.

По результатам моделирования в эксперименте №3 средняя температура котла с характеристиками угля из таблицы 5.1 составила 1357 К (1084°C).

Результаты по изменению параметров факела по длине факела и в объеме котла представим в виде графиков 5.29, 5.30, 5.31, 5.32.

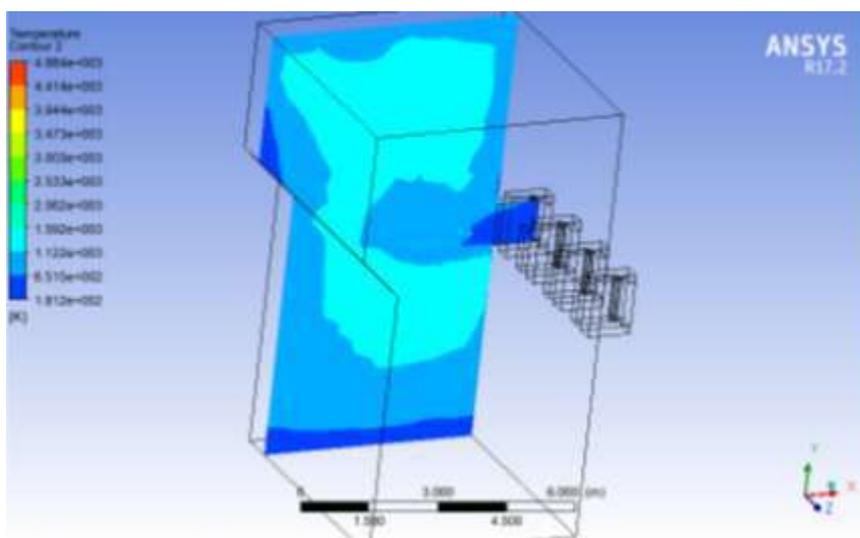


Рис. 5.25. Моделирование запыленного потока газов с подсветкой с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

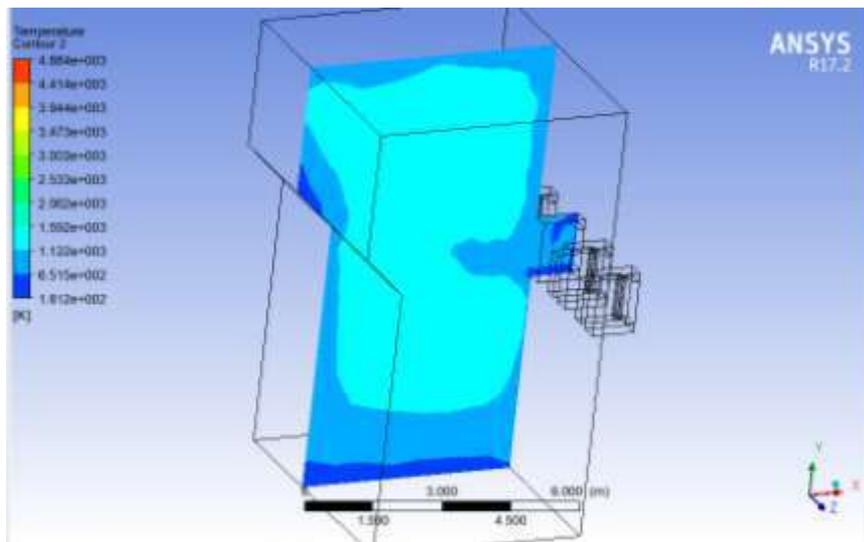


Рис. 5.26. Моделирование запыленного потока газов с подсветкой с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

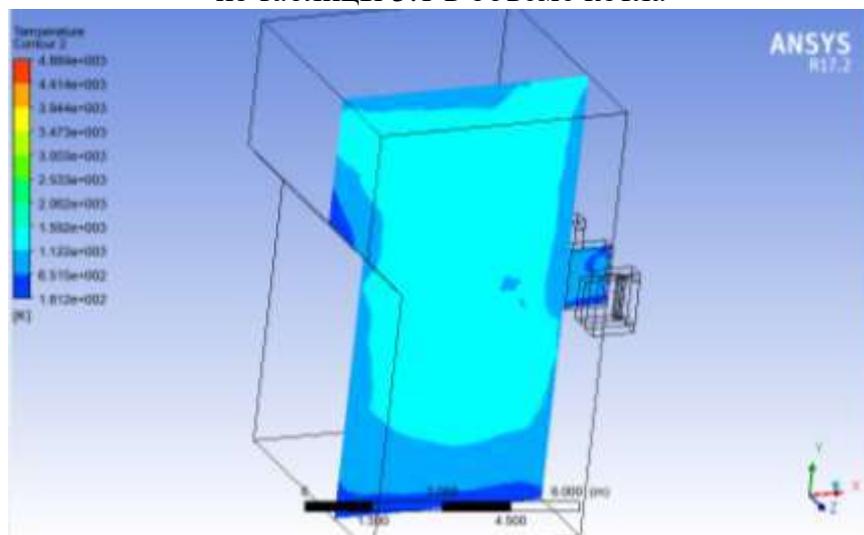


Рис. 5.27. Моделирование запыленного потока газов с подсветкой с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

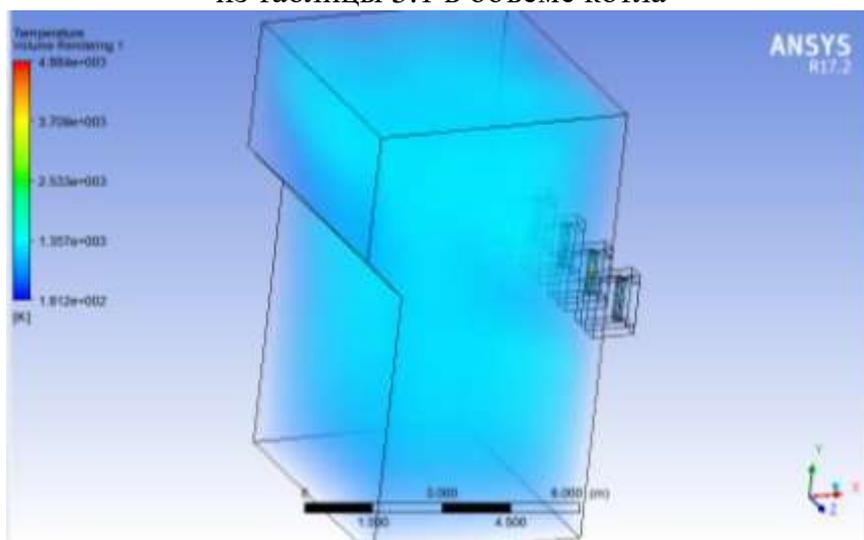


Рис. 5.28. Моделирование запыленного потока газов с подсветкой с характеристиками из таблицы 5.1 в объеме котла

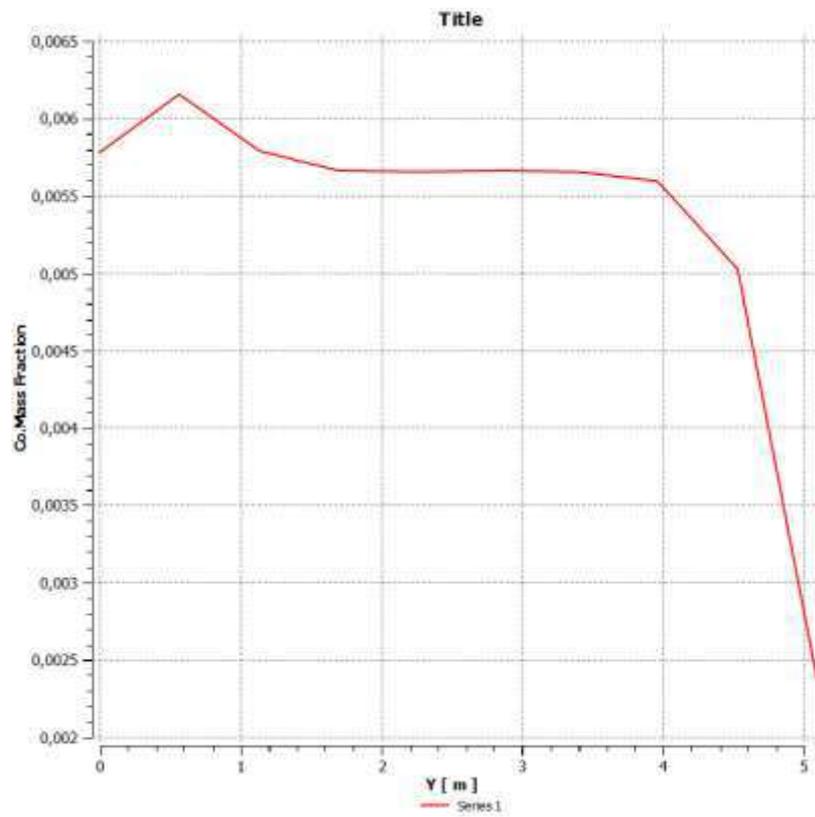


Рис. 5.29. Зависимость концентрации CO по длине факела

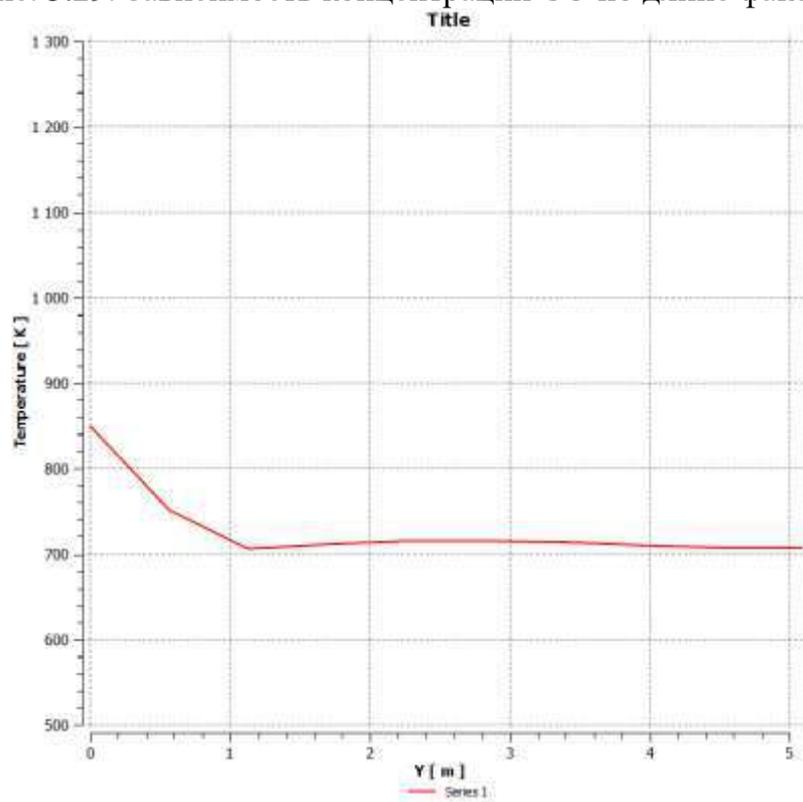


Рис. 5.30. Зависимость температуры в газоходе за котлом

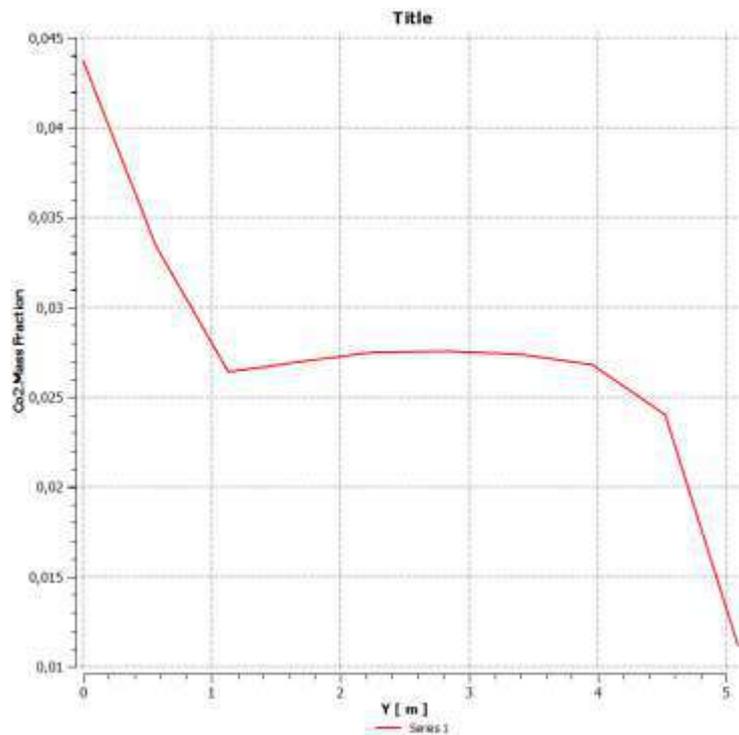


Рис. 5.31. Зависимость концентрации CO₂ по длине факела

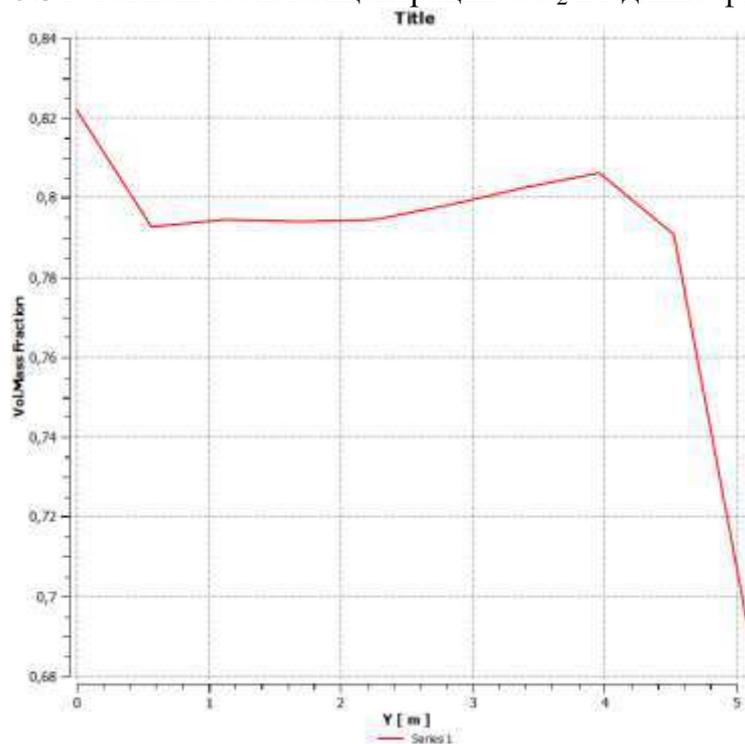


Рис. 5.32. Зависимость пылесодержания газов в зависимости от размеров камеры сгорания

5.5. Компьютерное моделирование газодинамических течений запыленного потока газов в котле

Аналогично ранее проведенным экспериментам, рассмотрим течение запыленного потока газов заданного состава, рис.5.33-5.36.

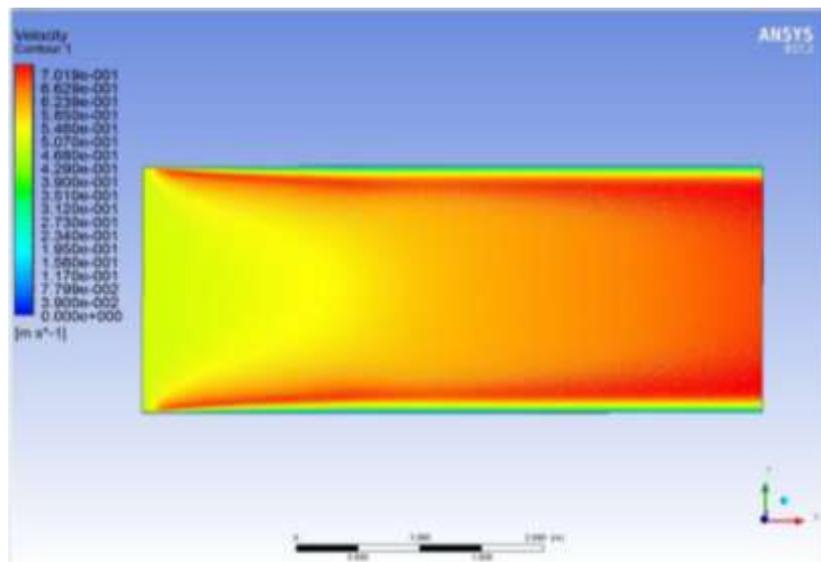


Рис. 5.33. Распределение скоростей при движении запыленного потока в канале

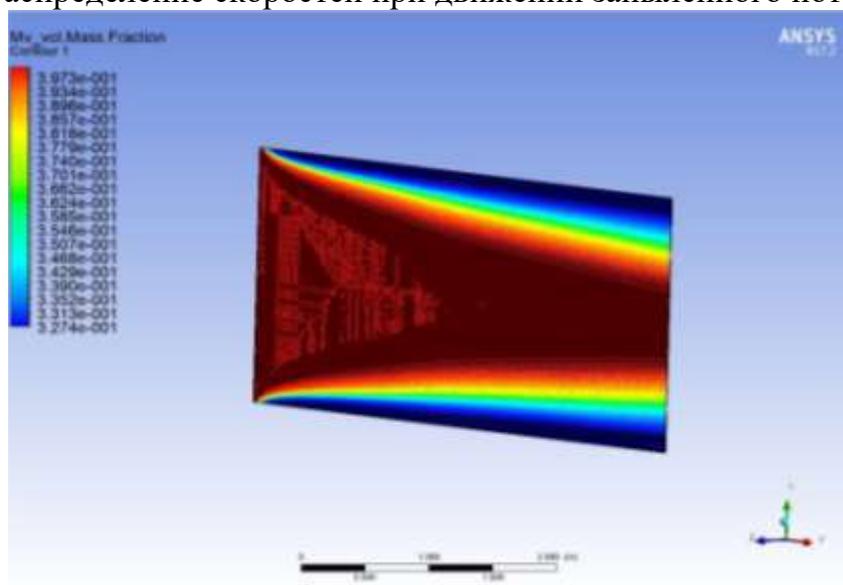


Рис. 5.34. Распределение астиц в движущемся запыленном потоке

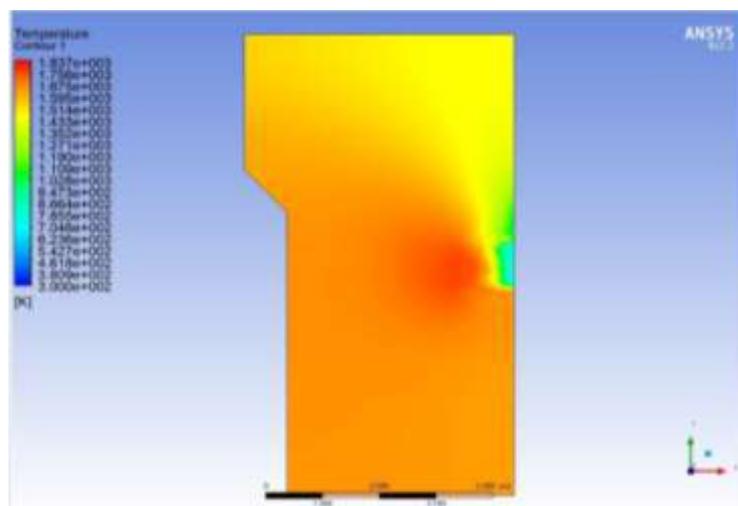


Рис. 5.35. Распределение температур при сжигании запыленного потока

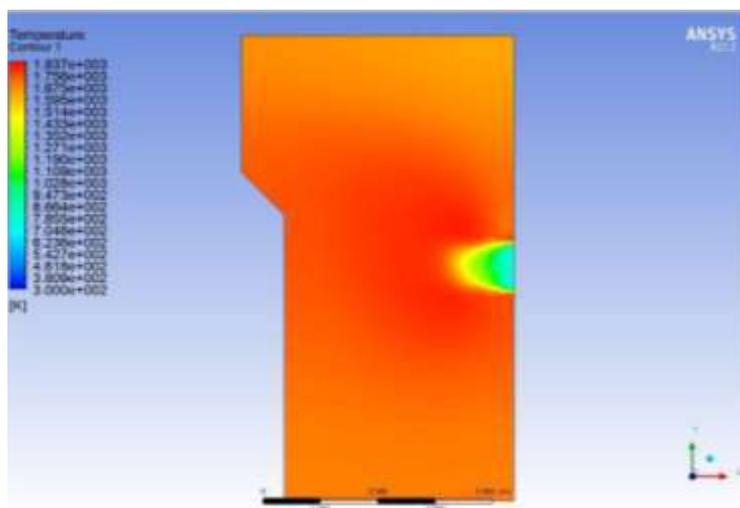


Рис. 5.36. Распределение температур при сжигании запыленного потока
 Анализ данных компьютерной симуляции показал расхождение с расчетными данными 3-4%, а с экспериментальными 5-6%.

Приведем таблицу сравнения данных разными методами.

Таким образом, основные функции параметров для компьютерного моделирования смеси природного газа и воздуха k - ω могут быть уточнены новым методом расчета, ранее не использовавшимся в мировой практике.

В результате было получено, что с помощью новых методов расчета и анализа отклонений расхода запыленного потока в канале могут быть получены данные с большей точностью. В частности, представлено трехмерное распределение отклонений при расчете скорости потока [339-342].

Развитие методологии применительно энерготехнологическим комплексам на базе котельных агрегатов представлено автором в работах [343-355].

Таблица 5.2. – Сравнение результатов газодинамики

Параметр	Расчет по стандартным методикам	Расчет по новой методологии	Результаты компьютерного моделирования
Температура на выходе из камеры сгорания, °C	1050	1035	1046
Скорость истечения, м/с	1,72	1,75	1,76

5.6. Компьютерное моделирование сжигания в слое

Активирование может проводиться в топках паровых котлов со слоевым сжиганием.

Рассмотрим пример распределения концентрационных полей в топках подобного котельного агрегата.

Начальные и граничные условия соответствуют условиям активации фракционированного угля условного размера 3 мм.

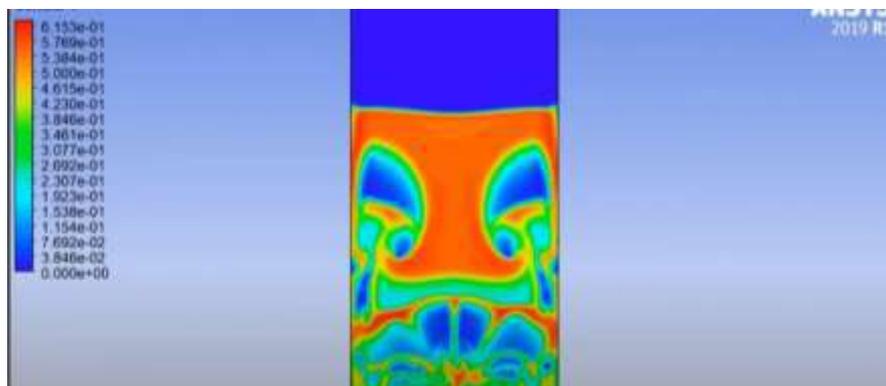


Рис. 5.37. Моделирование слоевого сжигания

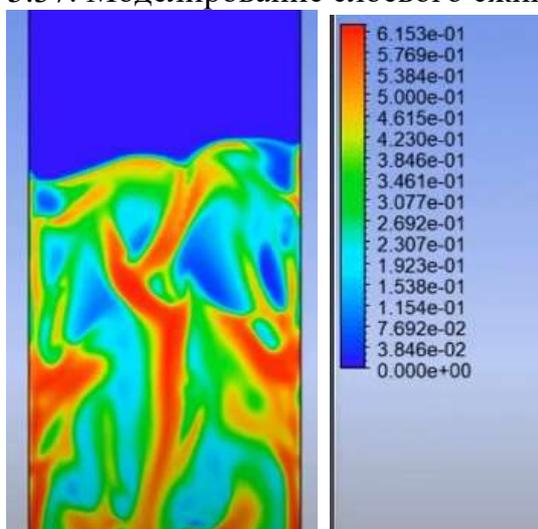


Рис. 5.38. Моделирование сжигания в слое

5.7. Моделирование движения фреона в трубах теплового насоса

Для работы теплового насоса важное значение приобретает движение фреона в трубках, также как и определение температурных и скоростных полей.

Исходные данные:

Скорость фреона: 0,344 м/с

Плотность 1138 кг/м³

Теплоемкость 1535 Дж/кг*К

Теплопроводность 0.085 Вт/м*К

Вязкость 0.000000152 Па·с

Также температура на входе 15 °С.

Внутренний диаметр трубки 3 мм, внешний 5 мм. Алюминиевая трубка.
Результаты моделирования показаны на рис.5.39.

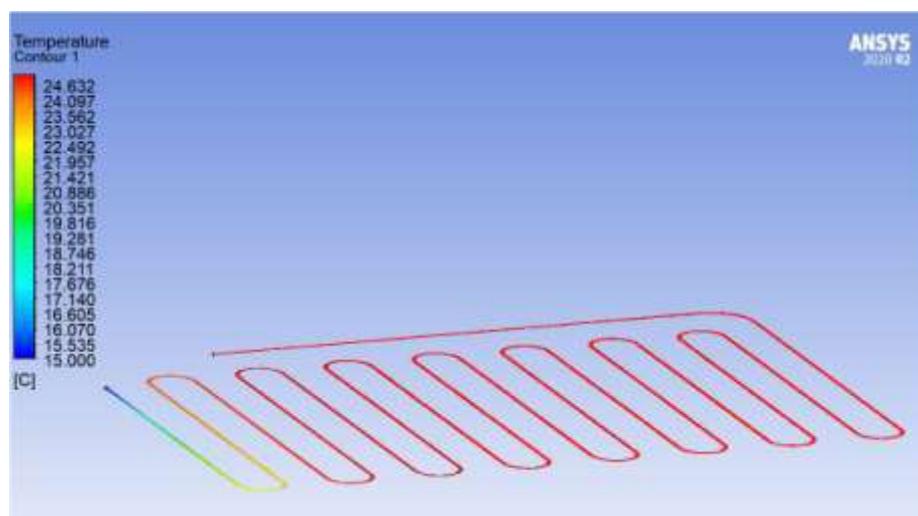


Рис. 5.39. Распределение температур в змеевике при движении фреона

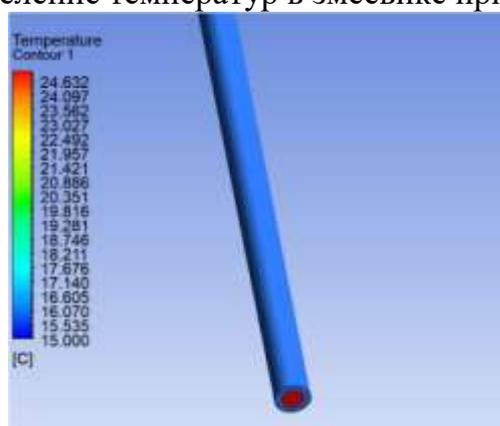


Рис.5.40. Распределение температур в сечении трубки с фреоном

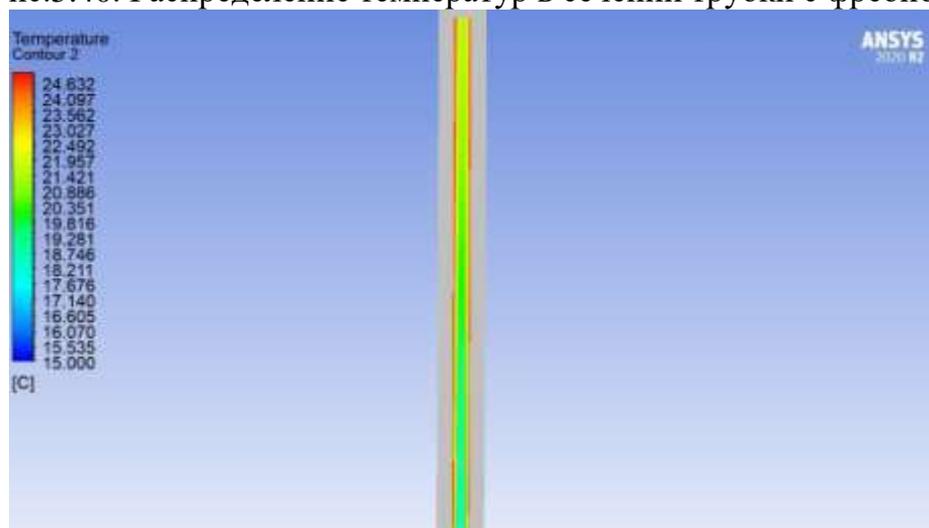


Рис.5.41. Распределение температур на начальном участке змеевика

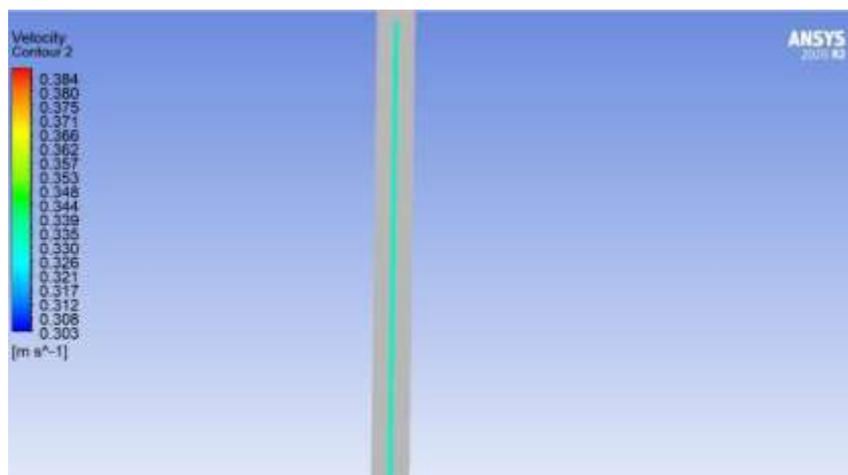


Рис. 5.42. Распределение скоростей на начальном участке змеевика

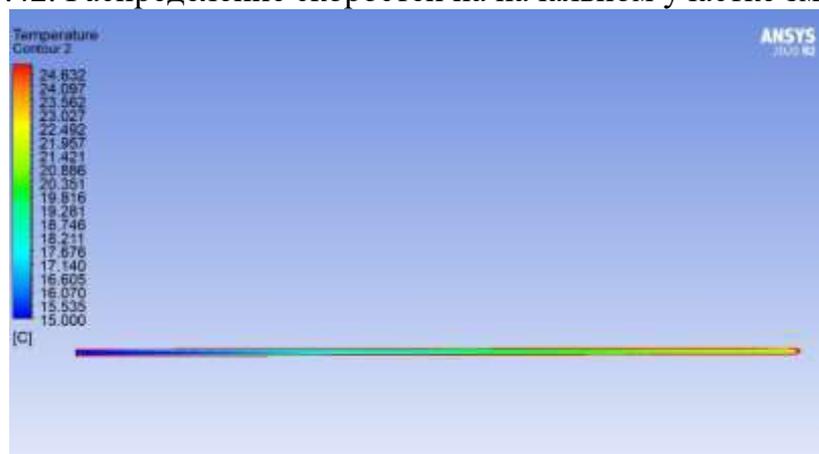


Рис. 5.43. Распределение температур на прямом участке

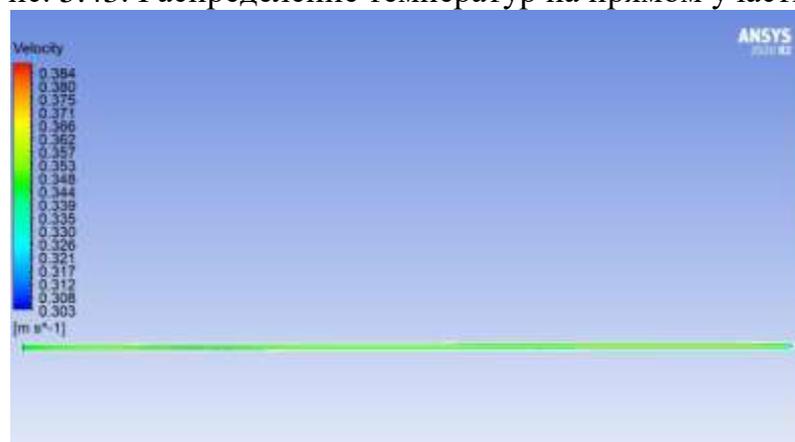


Рис. 5.44. Распределение скоростей на прямом участке

5.8. Опытное сжигание разнородных топлив в паровых котлах ЧТЭЦ-2 с использованием многофункциональных горелок

Из предыдущих исследований глав 3 и 4, определяют характер протекания экзотермических окислительных процессов в топках, в том числе изменение температурного уровня на участках воспламенения и горения при уравновешенном теплоотводе в отсутствии дополнительно организуемой подсветки и ввода балласт-

ных потоков инертных газов и влаги определяют геометрические и режимные параметры горелок. Горелочная конструкция – основной элемент технологии топливного сжигания, отвечающая за надежность, экономичность, экологические характеристики котельного оборудования.

Разработка высоконадежной низкоэмиссионной конструкции горелки стала завершающим этапом улучшения системы сжигания разнородного топлива на паровых котлоагрегатах БКЗ-210-140Ф первой очереди ЧТЭЦ-2.

Техническим заданием на конструирование новой горелки были выдвинуты следующие требования:

- исключить пересечение газового и пылеугольного факелов на участках их воспламенения (это условие распространялось как на основные, так и на подсветочные режимы сжигания природного газа);
- растянуть участок факельного воспламенения пыли и газа с размещением максимума температуры $T_{ф0}$ в объеме топки на расстоянии $l_{ф}=1,5\dots 2,5$ м;
- обеспечить температурный уровень на участке с уравновешенным теплоотводом $K_1 \cdot T_{ф0} \leq T_{а.г}^{нн}$, где $T_{а.г}^{нн}$ – температура факела в конце зоны интенсивного горения, нормированная по условиям шлакования [105]; K_1 – коэффициент неравномерности;
- обеспечить устойчивое горение и максимальное выгорание топлива;
- обеспечить необходимый рабочий диапазон регулирования системы пароохладительного впрыска конденсата в пароперегреватель;
- обеспечить температурный уровень продуктов сгорания в выходном окне топки $K_2 \cdot K_3 \cdot T_{т} \leq T_{т}^{нн}$, где $T_{т}^{нн}$ – температура факела, нормированная по условиям бесшлаковочной работы пароперегревателя [105]; K_2, K_3 – коэффициенты неравномерности по ширине и высоте выходного окна топки;
- обеспечить минимальные облучение и температуру в амбразурах горелок;
- минимизировать выход оксидов азота с продуктами сгорания;
- предусмотреть возможность подачи в топливные каналы пыли разнородного топлива.

Понятно, что главное требование об исключении струйно-турбулентного взаимодействия газового и пылеугольного факелов на участках воспламенения могло быть выполнено только при спутном выходе потоков реагентов из горелочных каналов в топку. Последнее было реализовано организацией подачи воздуха и газа по одному каналу, а пыли – по другому; газовые сопла развернуты в направлении амбразуры горелочного устройства; каналы выполнили вертикально-целевыми с конфузорной формой выхода реагентов в амбразурах; амбразурный пристенок в выходном сечении экранирован топочными трубами с пароводяной средой. Горелки разместили в один горизонтальный ряд на фронтальной стене топки. Конструкцию и работу горелки защитили патентами Российской Федерации [261, 263]. Патентная версия названия горелки – «многофункциональное горелочное устройство или многофункциональная горелка» [263]. Результаты сжигания углеродосодержащего материала представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты испытаний и исследований

Характеристики	Топливо
	Углеродосодержащий материал
Теплотворная способность, Q^p_n , МДж/кг	18,0/22,2
Влага топлива, W^p , %	3,0/1,0
Зола топлива, A^p , %	43/40
Летучие горючие, V^r , %	–
Доля подсветки, g_r	~0,6/0,4
Постоянные *):	
$k_{вл}$	–
$k_{гл}$	–
$k_{вк}$	~2,5/2,3
$k_{гк}$	$\geq 2,5/2,0$
Безразмерный остаток 90 мкм, $\bar{R}_{90} = R_{90}/R_{90}^{ЧУ**})$	0,5/0,7
Безразмерный размер вступивших в реакции частиц **):	
$\bar{\delta}_{лф} = \delta_{лф}/\delta_{лф}^{ЧУ}$	–/–
$\bar{\delta}_{кф} = \delta_{кф}/\delta_{кф}^{ЧУ}$	0,3/0,35
Безразмерная координата факела **): $\bar{l}_ф = l_ф/l_ф^{ЧУ}$	1,6/1,0
Безразмерная доля частиц вступивших в реакции на начальном участке факела **):	
$\bar{D}_{лф} = D_{лф}/D_{лф}^{ЧУ}$	–
$\bar{D}_{кф} = D_{кф}/D_{кф}^{ЧУ}$	0,8/0,82

*) данные ПИ ЮУрГУ

**) параметры в знаменателе с индексом «ЧУ» относятся к проектному углю с влажностью $W^p \approx 13...16\%$; размерами $\delta_{лф}^{ЧУ} \approx 1000$ мкм; $\delta_{кф}^{ЧУ} \approx 200$ мкм; длиной начального участка $l_ф^{ЧУ} = 1,5$ м; долей вступивших в реакции частиц $D_{кф}^{ЧУ} = 0,6$; $D_{лф}^{ЧУ} = 1,0$.

5.9. Результаты натурных испытаний, физического моделирования, лабораторные данные по активированию углей

В главе представлены результаты натурных испытаний. Отработка технологий пылевидного топлива с модернизацией горелочных устройств проводилась на котлах БКЗ-210-140Ф первой и второй очереди Челябинской ТЭЦ-2. Основным объемом исследований выполнен силами ЮУрГУ и ЧТЭЦ-2 с участием автора, для оценки технико-экономических характеристик котлов привлекались специалисты ОАО «ИДЦ».

Замеры температуры факела в предварительных опытах по оценке эффективности известных схем сжигания осуществляли по переносному пирометру типа «Проминь» в люках, в том числе на выходе из зоны интенсивного горения и на выходе из топки (зоны охлаждения). Этого было достаточно для предварительного анализа работы топочного устройства при различных схемах заполнения реагентами камеры сгорания. В дальнейшем при отработке новых технологий сжигания топлива дополнительно измеряли температуру факела с помощью зонда.

При проведении промышленных испытаний обеспечивали измерения в фиксируемых предварительных точках с набором информации по температуре и степени выгорания топлива с адекватной к условиям топки методикой обработки результатов по методу наименьших квадратов. Для минимизации многочисленных дополнительных влияний на результаты измерений экранирующая головка отсоединяемого зонда выполнена многоканальной.

В главе представлены результаты физического моделирования, лабораторных исследований, проведенных на их основе расчетов по активированию угля.

Размеры частиц на участке интенсивного горения могут быть определены:

$$\delta_{лф} = \left(\frac{\tau_{\phi} \cdot (T_z)^4}{k_{вк} \cdot 5,3 \cdot 10^{14}} \right)^{5/4}, \quad (5.1)$$

$$\delta_{кф} = \left(\frac{\tau_{\phi} \cdot (T_z)^3}{k_{вк} \cdot 1,12 \cdot 10^{10} \cdot \rho_y \cdot (21/O_2)^{n_1}} \right)^{10/12}, \quad (5.2)$$

Размеры частиц с полностью выгоревшими летучими и коксом определены:

$$\delta_{zl} = \left(\frac{\tau_{\phi}}{k_{zl} \cdot 0,5 \cdot 10^6} \right)^{1/2}, \quad (5.3)$$

$$\delta_{zk} = \left(\frac{\tau_{\tau} \cdot (T'_{z})^{0,9} \cdot O'_2}{k_{zk} \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \rho_k \cdot (1 - A_k)} \right)^{1/2}, \quad (5.4)$$

Таблица 5.4 – Характеристики участка факельного воспламенения по результатам натурных испытаний и лабораторных исследований

Усредненные показатели	Топливо		
	Челябинский уголь ЧУ	Шубарковский уголь	Углеродосодержащий материал УМ
Теплота сгорания, Q^p , МДж/кг	10,3/12,8	20,2	18,0/22,2
Влажность, W^p , %	25/13	20,0	3,0/1,0
Зольность, A^p , %	47/40	7,4	43/40
Выход летучих, V^r , %	36/39	50	–
Кинетические константы *):			
$k_{вл}$	1,10/1,00	1,0	–
$k_{гл}$	1,10/1,05	1,0	–
$k_{вк}$	1,30/1,25	1,15	~2,5/2,3
$k_{гк}$	1,40/1,30	1,25	≥2,5/2,0
Относительный остаток угольной пыли на сите 90 мкм, $\bar{R}_{90} = R_{90}/R_{90}^{ЧУ^{**}}$	1,4/1,0	≥1,4	0,5/0,7
Относительный максимальный размер воспламенившихся частиц **): $\bar{\delta}_{лф} = \delta_{лф}/\delta_{лф}^{ЧУ}$	0,9/1,0	1,35	–/–
$\bar{\delta}_{кф} = \delta_{кф}/\delta_{кф}^{ЧУ}$	0,95/1,0	1,3	0,3/0,35

Таблица 5.5 – Характеристики участка факельного воспламенения по результатам натурных испытаний и лабораторных исследований

Усредненные показатели	Топливо		
	Челябинский уголь ЧУ	Шубарковский уголь	Углеродосодержащий материал УМ
Относительная длина участка воспламенения в режиме выработки тепла **): $\bar{l}_{\phi} = l_{\phi}/l_{\phi}^{ЧУ}$	1,6/1,0	1,0	1,6/1,0
Относительная массовая доля воспламенившейся пыли на участке l_{ϕ}^{**}): $\bar{D}_{лф} = D_{лф}/D_{лф}^{ЧУ}$	1,0/1,0	1,0	–
$\bar{D}_{кф} = D_{кф}/D_{кф}^{ЧУ}$	~ 0,98/1,0	~1,01	0,8/0,82

*) по данным лабораторного анализа ЮУрГУ.

***) параметры в знаменателе с индексом «ЧУ» относятся к челябинскому углю с $W^p \approx 13...16\%$; $\delta_{лф}^{ЧУ} \approx 1000$ мкм; $\delta_{кф}^{ЧУ} \approx 200$ мкм; $l_{\phi}^{ЧУ} = 1,5$ м; $D_{кф}^{ЧУ} = 0,6$; $D_{лф}^{ЧУ} = 1,0$.

Первый период характеризуется безвоспламенительным нагревом частицы с выходом влаги и природных горючих летучих веществ; он равен, с:

$$\tau_{влi} = k_{вл} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} \cdot T_{\Gamma}^{-4} \cdot \delta_i^{0,8}. \quad (5.5)$$

Последующий нагрев всех компонент частицы в кислородной среде вызывает воспламенение и горение летучих веществ; время их выгорания, с:

$$\tau_{\text{гли}} = k_{\text{гл}} \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot \delta_i. \quad (5.6)$$

Время начала окисления коксового остатка i -той частицы, с:

$$\tau_{\text{вк}i} = k_{\text{вк}} \cdot 1,12 \cdot 10^{10} \cdot \rho_y \cdot \delta_i^{1,2} \cdot T_{\text{г}}^{-3} \cdot (21/O_2)^n. \quad (5.7)$$

Последний период связан с выгоранием коксового остатка, с:

$$\tau_{\text{гк}i} = f(O_2; T_{\text{г}}; \delta_i). \quad (5.8)$$

В формулах (5.5)–(5.8) $k_{\text{вл}}$, $k_{\text{гл}}$, $k_{\text{вк}}$ – опытные коэффициенты, ρ_y – плотность угля, кг/м³, $n \approx 0,5$, δ_i – размер i -той частицы, м; O_2 – концентрация кислорода, %; $T_{\text{г}}$ – температура средняя в камере, К.

Временные технологические отрезки связаны между собой:

$$\tau_{\text{вк}i} = \tau_{\text{вл}i} + \tau_{\text{гли}} + \Delta\tau_i, \quad (5.9)$$

причем $(\Delta\tau_i/\tau_{\text{вк}i}) \approx 0,1 - 0,15$.

Таблица 5.6 – Результаты расчетов на основе полученных кинетических констант лабораторных исследований – шубаркольский уголь

$T_{\text{г}}$, К	$\delta \times 10^3$, м	O_2 , %	$\tau_{\text{вл}}$, с	$\tau_{\text{гл}}$, с	$\tau_{\text{вк}}$, с
1000	0,5	5	1,212	0,125	2,710
1000	1,0	5	2,110	0,500	6,223
1000	2,0	5	3,673	2,000	14,305
1000	0,5	10	1,212	0,125	1,917
1000	1,0	10	2,110	0,500	4,403
1000	2,0	10	3,673	2,000	10,115
1000	0,5	21	1,212	0,125	1,323
1000	1,0	21	2,110	0,500	3,038
1000	2,0	21	3,673	2,000	6,980
1200	0,5	5	0,585	0,125	1,569
1200	1,0	5	1,017	0,500	3,603
1200	2,0	5	1,772	2,000	8,279
1200	0,5	10	0,585	0,125	1,109
1200	1,0	10	1,017	0,500	2,548
1200	2,0	10	1,772	2,000	5,854
1200	0,5	21	0,585	0,125	0,765
1200	1,0	21	1,017	0,500	1,758
1200	2,0	21	1,772	2,000	4,040
1400	0,5	5	0,315	0,125	0,988
1400	1,0	5	0,549	0,500	2,269
1400	2,0	5	0,956	2,000	5,213
1400	0,5	10	0,315	0,125	0,698
1400	1,0	10	0,549	0,500	1,605
1400	2,0	10	0,956	2,000	3,686
1400	0,5	21	0,315	0,125	0,482
1400	1,0	21	0,549	0,500	1,107
1400	2,0	21	0,956	2,000	2,544

Таким образом, на основе экспериментальных данных получены зависимости времени нахождения частиц на каждом из участков в процессе активации угля. Зависимости – экспоненциальные, имеют общий вид:

$$\tau = A \cdot \exp(B \cdot \delta), \quad (5.10)$$

где А, В – коэффициенты для марки угля, δ – текущий размер частицы.

Таблица 5.7 – Результаты расчетов на основе полученных кинетических констант лабораторных исследований – челябинский уголь

T_r, K	$\delta \times 10^3, \text{ м}$	$O_2, \%$	$\tau_{вл}, \text{ с}$	$\tau_{гл}, \text{ с}$	$\tau_{вк}, \text{ с}$
1000	0,5	5	1,3332	0,1375	2,981
1000	1,0	5	2,321	0,55	6,8453
1000	2,0	5	4,0403	2,2	15,7355
1000	0,5	10	1,3332	0,1375	2,1087
1000	1,0	10	2,321	0,55	4,8433
1000	2,0	10	4,0403	2,2	11,1265
1000	0,5	21	1,3332	0,1375	1,4553
1000	1,0	21	2,321	0,55	3,3418
1000	2,0	21	4,0403	2,2	7,678
1200	0,5	5	0,6435	0,1375	1,7259
1200	1,0	5	1,1187	0,55	3,9633
1200	2,0	5	1,9492	2,2	9,1069
1200	0,5	10	0,6435	0,1375	1,2199
1200	1,0	10	1,1187	0,55	2,8028
1200	2,0	10	1,9492	2,2	6,4394
1200	0,5	21	0,6435	0,1375	0,8415
1200	1,0	21	1,1187	0,55	1,9338
1200	2,0	21	1,9492	2,2	4,444
1400	0,5	5	0,3465	0,1375	1,0868
1400	1,0	5	0,6039	0,55	2,4959
1400	2,0	5	1,0516	2,2	5,7343
1400	0,5	10	0,3465	0,1375	0,7678
1400	1,0	10	0,6039	0,55	1,7655
1400	2,0	10	1,0516	2,2	4,0546
1400	0,5	21	0,3465	0,1375	0,5302
1400	1,0	21	0,6039	0,55	1,2177
1400	2,0	21	1,0516	2,2	2,7984

Уравнение (5.10) можно преобразовать для времени активации угольных частиц шубаркольского бурого угля марок БЗ:

$$\tau_{вл} = 0,576 \cdot \exp(0,832 \cdot \delta), \quad (5.11)$$

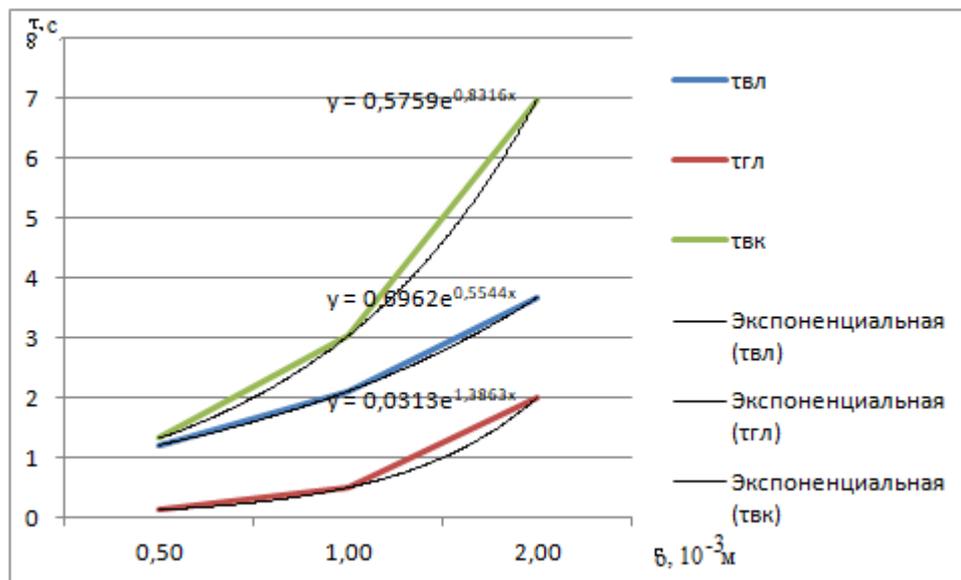
$$\tau_{гл} = 0,696 \cdot \exp(0,533 \cdot \delta), \quad (5.12)$$

$$\tau_{вк} = 0,031 \cdot \exp(1,386 \cdot \delta), \quad (5.13)$$

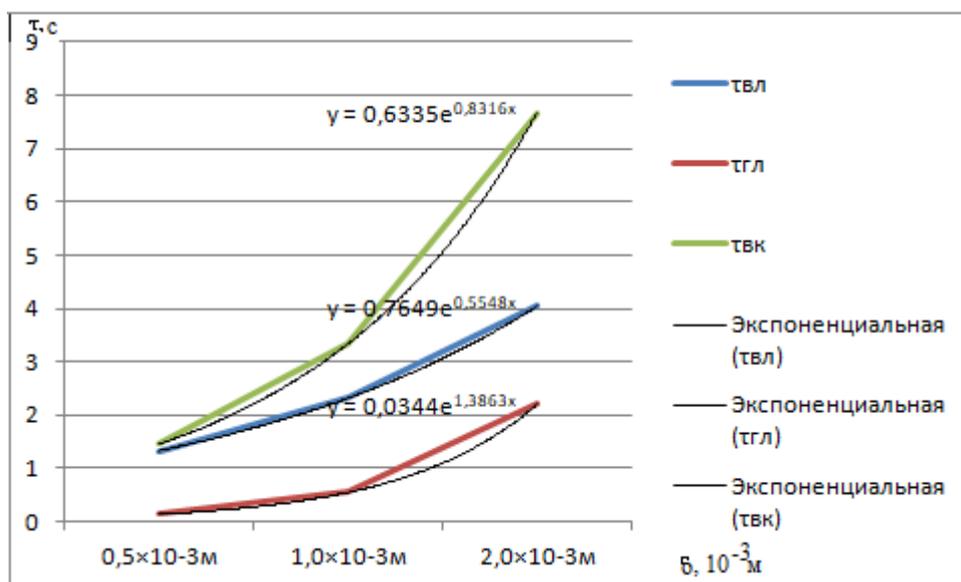
5.10. Опытное исследование работы системы утилизации теплоты

Например, в Германии Н. D. Baehr [472], в Польше Ya. Shargut, T. Bes [473, 474], в Украине V. M. Brodyanskiy, I. P. Ishkin [475, 476] начали вводить в науку понятие эксергии и эксергетического анализа применительно к тепловым насосам

и холодильным установкам. Особо следует отметить работу D. P. Gokhstein [477], которая повлияла на развитие этого направления в дальнейшем в странах Восточной Европы и Азии. В настоящее время методика применяется, в первую очередь, для тепловых насосов [478].



а)



б)

Рисунок 5.45. – Зависимости времени активации: $\tau_{вл}$, $\tau_{гл}$, $\tau_{вк}$ пылевых частиц а) шубаркольского угля б) челябинского угля при $T=1000K$, доле кислорода 0,21: $0,5 \times 10^{-3}$ м, $1,0 \times 10^{-3}$ м, $2,0 \times 10^{-3}$ м

Здесь следует отметить наиболее значимые работы авторов V. M. Brodyanskiy, V. Fratscher, K. Michalek [479]. Диаграммы Сэнки также применимы к решению поставленных задач [480]. Диаграммы другого ученого – Гроссмана [481] стали своеобразным продолжением развития диаграмм Сэнки.

Эксергетический экономический метод является продолжением развития эксергетического метода при его совмещении с методами экономического анализа [482]. Метод предусматривает решение сопряженных задач оптимизации конструкции тепловых насосов. Если будет использована геотермальная энергия, то такой подход к решению тоже возможен [483]. Метод широко применяется, начиная с 90-х годов в мировой практике [484].

Представленная в [479] методология базируется на методике эксергетических балансов и методах вычисления эксергетических КПД. Основы современного эксергетического метода изложены в [485, 486, 487]. Dincer в работе [486] представляет методологические основы использования эксергии и потерь эксергии как основных величин, показывающих эффективность работы различных теплотехнологических устройств.

Тепловые насосы предназначены для использования низкопотенциальных источников энергии [488], в качестве которых могут использоваться воздух, грунт и вода [489, 490]. В исследованиях различных авторов были представлены научные статьи о методах повышения отопительного коэффициента COP [491].

В настоящее время исследователи, особенно в области низкотемпературной техники, переходят от метода энергетических балансов на основе первого закона термодинамики к эксергетическому методу на основе второго и первого законов термодинамики. Известны методологические основы применения эксергии в различных отраслях промышленности, например в нефтегазовой, металлургической и энергетической. Но для агрегатов и устройств в области холодильной техники, кондиционирования, вентиляции, тепловых насосов и систем утилизации теплоты разработка алгоритмов и математических моделей по использованию эксергии потоков наиболее актуальна. Следует отметить, что совершенствование существ-

вующих методик и разработка новых возможны только при проведении экспериментальных исследований.

При помощи экспериментальной установки можно определить возможные режимы работы, определить характерные показатели, тепловые потери, потери энергии и эксергии.

Для достижения указанной цели работа разбивается на научные задачи.

1. Изучение работы теплового насоса на научно-исследовательской установке, согласно рис.5.43 и рис.5.44.

2. Определение основных термодинамических параметров при работе теплонасосной установки, а именно температуры, давления, расхода теплоносителей и хладагента.

3. Определение основных функций параметров, в частности, энтальпии и энтропии в характерных точках, определение характерных величин цикла.

4. Составление эксергетического баланса.

Эксергия потока в удельном виде (эксергия энтальпии) ex_i , кДж/кг, определяется по формуле (5.14):

$$ex_i = i_1 - i_{o.c} - T_{o.c} \cdot (s_1 - s_{o.c}), \quad (5.14)$$

где i_1 – удельная энтальпия потока в сечении 1, кДж/кг, s_1 – удельная энтропия потока в сечении 1, кДж/(кг·К), параметры и функции окружающей среды: $i_{o.c}$ – удельная энтальпия окружающей среды, кДж/кг, $T_{o.c}$ – абсолютная температура окружающей среды, К, $s_{o.c}$ – удельная энтропия окружающей среды, кДж/(кг·К).

Уравнение (5.15) в измененном виде:

$$ex_i = i_1 - a_i. \quad (5.15)$$

Анергия энтальпии a_i , кДж/кг, определяется по формуле (5.16):

$$a_i = i_{o.c} + T_{o.c} \cdot (s_1 - s_{o.c}). \quad (5.16)$$

Далее рассмотрим экспериментальную исследовательскую установку и ее схему работы, а после на ее основе приведем пример расчета термодинамического анализа с использованием разработанного эксергетического метода.

На рисунке 5.46 приводится тепловая схема установки.

В экспериментах рабочий режим теплонасосной установки на хладагенте R407с характеризуется следующими температурами: $t_{\text{н}} = -7^{\circ}\text{C}$ при давлении $p_{\text{н}} = 3,2$ бар; $t'_{\text{к}} = 28^{\circ}\text{C}$ при давлении $p_{\text{к}} = 12,3$ бар; $t_{\text{вх}} = 41^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{вых}} = 45^{\circ}\text{C}$ – по нагреваемой воде.

Вышеуказанные температуры определялись экспериментально.

Далее рассчитаем температуры, численные значения которых неизвестны, но их можно определить на основе полученных экспериментальных данных.

Диаграмма $\lg(p)$ - i с циклом теплового насоса приведена на рисунке 5.47.

Расчеты точек на диаграмме сведем в таблицы 5.8, 5.9.

Цикл в других значимых координатах прдеставлены на рис. 5.48-5.50.

Расчет точек, параметров и функций параметров по этим диаграммам прдставлены в таблицах 5.10-5.12.

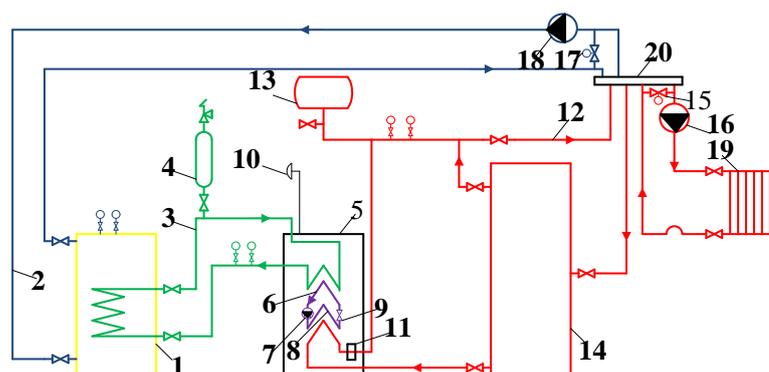


Рис.5.46. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – бак воды, 2 – вода, 3 – промежуточный теплоноситель, 4 – расширительный бак, 5 – теплонасосная установка, 6 – испаритель, 7 – объемный компрессор, 8 – конденсатор, 9 – расширительный клапан, 10 – датчик температуры, 11 – электрический нагреватель, 12 – подача нагретой воды, 13 – мембранный бак, 14 – бак косвенного нагрева, 15, 17 – клапаны подмешивающие, 16, 18 – насосное оборудование, 19 – радиатор

На рис.5.46 представлена схема лабораторной установки, основными жлемен- тами которой являются тепловой насос 5, бак холодной воды 1, бак косвенного нагрева 14 и система утилизации теплоты 19.

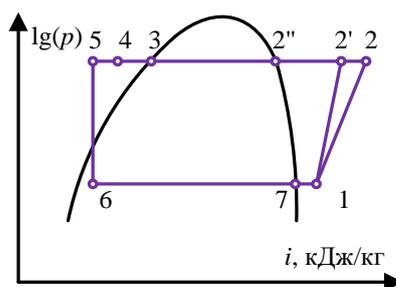


Рис. 5.47. Цикл в координатах $\lg(p)$ - i

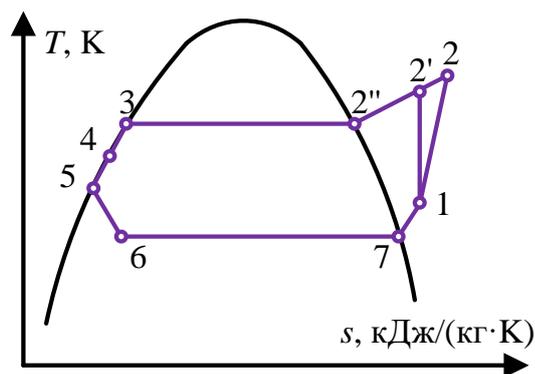


Рис. 5.48. Цикл в координатах T-s

Таблица 5.8. Точки на диаграмме

Формула/способ определения	Значение	Единица измерения
i_7	407	кДж/кг
i_1	420	кДж/кг
$i_{2'}$	455	кДж/кг
$l_a = i_{2'} - i_1$	35	кДж/кг
$\lambda = p_k / p_n$	4	-
η_i	0,75	-
$l_i = l_a / \eta_i$	46,7	кДж/кг
i_2	466,7	кДж/кг
$i_{2''}$	420	кДж/кг
i_3	240	кДж/кг
i_4	237	кДж/кг
$i_5 = i_4 + i_1 - i_7$	224	кДж/кг
i_6	224	кДж/кг

В таблицах 5.8 и 5.9 представлены результаты измерений температуры, давления и энтальпии лабораторной установки на рис.5.46. На основе этих данных рассчитан цикл ТНУ, получены значения наиболее важных с точки зрения эффективности параметров. В таблицах 5.10 и 5.11 рассчитаны эксергетические характеристики ТНУ.

Таблица 5.9. Параметры в точках на диаграмме

Точки на диаграмме	Измеряемые параметры			
	p, бар	t, °C	v, м ³ /кг	s, кДж/кг
-				
1	3,2	8	0,08	1,845
2'	12,3	50	0,024	1,845
2	12,3	60	0,025	1,854
2''	12,3	30	0,022	1,77
3	12,3	28	0,0010	1,144
4	12,3	25	0,00084	1,135
5	12,3	17	0,00082	1,126
6	3,1	-15	0,0105	1,128
7	3,1	-10	0,07	1,809

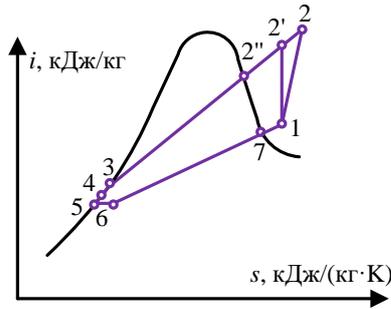


Рис. 5.49. Диаграмма i-s

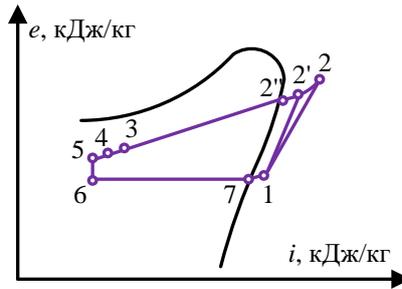


Рис. 5.50. Диаграмма e-i

Таблица 5.10. Характеристические величины цикла

Формула	Значение	Единица измерения
$q_{исп} = i_1 - i_6$	183	кДж/кг
$q_{кон} = i_2 - i_3$	226,7	кДж/кг
$q_{т.общ} = q_{кон} + q_{охл.к}$	229,7	кДж/кг
$Q_T = G_B \cdot c_p \cdot \rho (t_{вых} - t_{вх}) / \eta_T$	4,659	кВт
$G_{хл.аг} = Q_{т.общ} / q_{т.общ}$	0,02028	кг/с
$V_0 = G_{хл.аг} \cdot v_1$	0,001625	м ³ /с
$q_v = Q_{т.общ} / V_0$	2862,9	кДж/м ³
$Q_{кон} = G_{хл.аг} \cdot q_{кон}$	4,598	кВт
$Q_{охл.к} = G_{хл.аг} \cdot q_{охл.к}$	0,0608	кВт
$Q_{исп} = G_{хл.аг} \cdot q_{исп}$	3,7112	кВт
$N_i = G_{хл.аг} \cdot i_i$	0,9065	кВт
$\eta_M = 0,98 - 0,008 \cdot p_k / p_H$	0,949	-
$N_{вн} = N_i / \eta_M$	0,9552	кВт
$\eta_э = 0,97 - 0,02 \cdot p_k / p_H$	0,893	-
$N_{эл} = N_{вн} / \eta_э$	1,0697	кВт
$\Delta N = 0,035 + 0,015 \cdot N_э$	0,05104	кВт
$COP = Q_{т.общ} / (N_э + \Delta N)$	4,136	-
$\Delta W = 1 / COP$	0,2418	-
$T_H^{cp} = \frac{T_{н.вх} - T_{н.вых}}{\ln \frac{T_{н.вх}}{T_{н.вых}}}$	272,9	К
$\tau_H = 1 - T_{о.с} / T_H^{cp}$	0,0253	-
$e_H = \tau_H \cdot q_H$	4,63	кДж/кг
$T_e^{cp} = \frac{T_{в.вых} - T_{в.вх}}{\ln \frac{T_{в.вых}}{T_{в.вх}}}$	315	К
$\tau_B = 1 - T_{о.с} / T_e^{cp}$	0,155	-
$e_B = \tau_B \cdot q_B$	35,6	кДж/кг
$e_э = \frac{N_э}{G_{ха}}$	52,75	кДж/кг
$\eta_э = \frac{e_B}{e_H + e_э}$	0,62	-

Таблица 5.11. Эксергетические характеристики цикла

Формула	Значение величины, кДж/кг
$\Delta e_{\text{км}}^{\text{внеш}} = W - I_i$ $W = \frac{N_э}{G_{\text{ха}}} = e_э$	5,8
$\Delta e_{\text{км}}^{\text{внутр}} = T_0 \cdot (s_2 - s_1)$	2,349
$\Delta e_{\text{и}} = e_{\text{н}} - [q_{\text{и}} - T_0 \cdot (s_7 - s_6)]$	2,776
$\Delta e_{\text{к}} = [q_{\text{т}} - T_0 \cdot (s_2 - s_4)] - e_{\text{в}}$	3,378
$\Delta e_{\text{рт}} = T_0 \cdot (s_1 - s_7 - s_4 + s_5)$	7,182
$\Delta e_{\text{рв}} = T_0 \cdot (s_6 - s_5)$	5,32
$\sum \Delta e = \Delta e_{\text{км}}^{\text{внеш}} + \Delta e_{\text{км}}^{\text{внутр}} + \Delta e_{\text{и}} + \Delta e_{\text{к}} + \Delta e_{\text{рт}} + \Delta e_{\text{рв}}$	24,029
$\sum \Delta e = (e_{\text{н}} + e_э) - (e_{\text{в}})$	21,78

Таблица 5.12. Функции в точках на диаграмме

Номер точки	Эксергия e , кДж/кг	Анергия a , кДж/кг
1	29,725	390,275
2	74,058	392,642
3	35,09	204,91
4	33,19	203,81
5	29,13 (24,6)	194,87
6	24,663 (29,3)	199,337
7	24,62	382,38

Выводы по главе 5

1. Проведено численное моделирование динамики и горения природного газа, запыленного потока фракционированными частицами угля для условий энергетического котельного агрегата с факельным сжиганием.
2. Проведено численное моделирование движения фреона в теплонасосной установке.
3. Проведен физический эксперимент по сжиганию углеродсодержащего материала для условий тепловой электростанции.
4. Проведены лабораторные исследования по активированию угля и результаты расчетов на основе полученных данных.
5. Проведен физический эксперимент по использованию теплового насоса для системы охлаждения активного угля.
6. Проведено сравнение полученных в результате экспериментов данных.

6. Прикладная часть. Контроль и диагностика работы энергокомплекса

Целью главы является обеспечение эффективного сгорания топлива в условиях регулярно изменяющихся свойств топливного агента.

Решаются научные задачи:

1. Разработка расчетной методики, позволяющей определить необходимое время горения частиц или время горения природного газа для обеспечения необходимой длины факела, ограничиваемой геометрией котла.

2. Адаптация методики под возможности современных технологий, снятие показаний с приборов и датчиков, воздействие на топливовоздушный поток и регулирование тепловых характеристик потока.

3. Создание программного алгоритма, позволяющего вычислять необходимое воздействие и производить регулирование, а также собирающего и систематизирующего данные об ожидаемом (вычисляемом) и произведённом (реальном) эффекте с построением прогнозных характеристик.

4. Создание нейросетевого алгоритма регуляции, который будет обучаться на собранных в п.3 данных и адаптироваться под конкретный вид котла в составе энергокомплекса.

Рациональное использование топливных ресурсов является важным вопросом современной экономики, существующей в условиях ограниченного предложения топливно-энергетического рынка. При правильной организации процесса горения, разработки методов управления факелом и тем более внедрения нейросетевых алгоритмов, помимо снижения расхода топлива на котел, рационализация горения приводит к уменьшению выбросов и благотворно сказывается на экологии.

Усовершенствована теоретико-методологическая база для исследования теплообмена и горения природного газа в котлах, основанная на концепции факельного континуума как непрерывной сплошной среды и созданной авторами методики оценки длины факела и времени горения частиц пыли в условиях регулярно изменяющихся свойств топливного агента от параметров топливного агента, котельного агрегата и параметров процесса, которая адаптирована под возможности

современных технологий, снятие показаний с приборов и датчиков, воздействие на топливовоздушный поток и регулирование тепловых характеристик потока и качества подаваемого в топку топлива. На базе разработанной авторами методики создан программный алгоритм, обрабатывающий, систематизирующий данные и прогнозирующий параметры факела при изменении факторов, которые учитываются методикой.

Практическая значимость заключается в увеличении КПД проектируемых котлов, а также продлении срока эксплуатации и повышении эффективности уже используемых, а именно это позволит котельному агрегату быстро адаптироваться к колебаниям свойств запыленных газов, а также быстрее менять температурные поля при смене характеристик топлива, что в итоге позволит предотвращать недожог топлива, увеличить тепловую эффективность котельного агрегата путём регулировки длины факела под глубину топочного пространства, рис.6.1.

Прикладная часть работы с точки зрения экономических перспектив для науки состоит в том, что сам разработанный программный продукт не использует сложных и дорогостоящих вычислительных комплексов для моделирования, таких как ANSYS, Comsol, MathCad, SolidWorks, его алгоритмы построены на использовании эмпирических данных, замеряемых при функционировании котельного агрегата, организуемых в таблицы базы данных.

Выполнение поставленных целей невозможно без структуры передачи данных. Данная структура была построена на основании имеющихся в распоряжении ресурсов, она относительно проста и удовлетворяет следующим требованиям:

- возможность автоматизированного сбора данных;
- возможность сохранения истории обучения;
- возможность ограничения воздействия на процесс горения;
- возможность верификации расчётных данных диспетчером.

Обработка данных происходит следующим образом, рис.6.2.

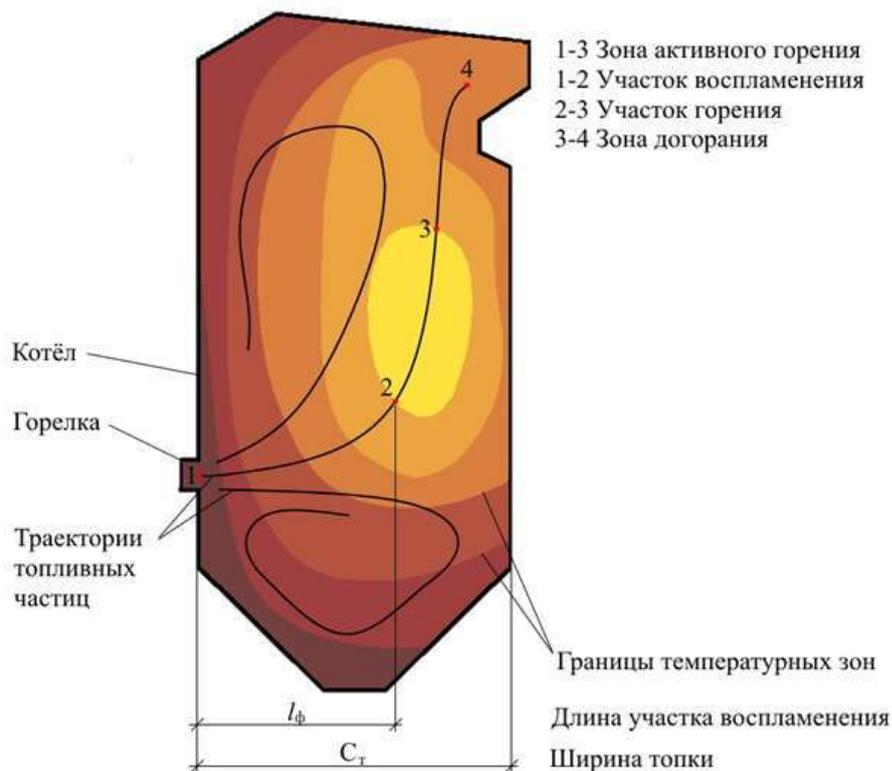


Рис. 6.1. Топка котла в составе энергокомплекса

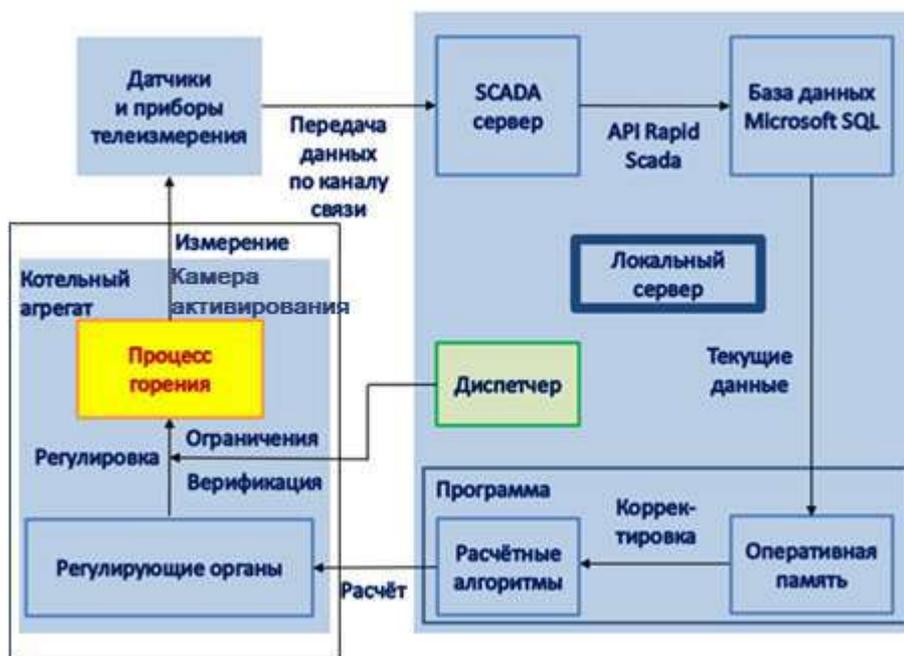


Рис.6.2. Схема передачи данных

Тепловая картина камеры сгорания строится на основании показаний оптических пирометров и термозондов. Замеряются также такие показатели как скорость воздушной струи и топливо-воздушной смеси, температура и концентрация реагентов в уходящих газах за камерой сгорания, фракционный и химический состав исходного топлива.

Снимаемые показания передаются на SCADA server, в качестве которого выступает локальный компьютер предприятия с установленной SCADA системой. Через программный интерфейс приложения SCADA-администратор данные передаются в службу ScadaSqlService, откуда по каналу связи экспортируются в базу данных Microsoft SQL, после чего могут быть использованы сторонними программами.

Разрабатываемое приложение через определённые промежутки времени обращается к базе данных за информацией. На основе различия между этой информацией о текущей тепловой картине и предыдущими расчётами, предполагающими её будущее состояние, а также на основе разницы между входными данными расчёта и текущими входными данными происходит корректировка расчётных алгоритмов.

По завершении обучения, в качестве которого рассматривается адаптация расчётных алгоритмов под получение точных результатов, программа производит новый расчёт и отправляет сигнал на регулирующие органы: заслонки, дутьевые вентиляторы, клапаны и так далее. Однако прежде чем команда будет исполнена, она должна пройти контроль на адекватность. Это необходимый шаг на первое время, потому что в ходе обучения неизбежны ошибки. При некоторых коэффициентах функция может обращаться в расходящийся ряд и давать существенные отклонения. При изменении положения регулирующего органа изменяется и тепловая картина топочной камеры, вслед за этим проводится новое измерение.

Прогнозирование характеризует будущее развитие тепловой карты (совокупности тепловых полей, меняющихся во времени) топочной камеры котельного агрегата.

Процессы горения топлива являются нестационарными.

Чем больше период прогноза (упреждения), тем больше варьируются факторы, влияющие на протекание процесса как прямо, так и косвенно. Кроме того могут обозначить своё влияние непредвиденные факторы, существенно деформирующие изучаемый процесс. К подобным относятся факторы, для предвидения влия-

ния которых в момент составления прогноза нет необходимых данных, а также те, природа которых неопределенна.

Случайные величины, в отличие от неопределённых, имеют кривую распределения и определённую вероятность попадания в заданный интервал.

В данном случае могут быть использованы для подстройки длины факела и времени горения частиц в зависимости от непрерывно меняющегося в ограниченном диапазоне состава топливной смеси и окислителя.

Также следует отметить, что для успешной адаптации модели следует максимально приблизить частоту измерений к шагу прогнозирования. Шаг прогнозирования, в свою очередь, определяется динамикой процесса. Процессы горения протекают быстро, однако приняв во внимание низкую скорость суточных колебаний температуры наружного воздуха, подаваемого для окисления, можно предположить, что замеры, совершаемые один раз в минуту будут достаточно близки друг к другу, чтобы фиксировать непосредственное влияние регулирования на процесс горения. Прогнозирование происходит на основе множества снимаемых показаний, таких как скорость подачи и температура топлива, воздуха, топливовоздушной смеси и дымовых газов, средняя удельная теплота сгорания топлива, фракционный состав, коэффициент избытка воздуха, содержание окиси углерода в дымовых газах.

1. Преобразуя основное уравнение теплового баланса для участка воспламенения факела, получим:

$$l_{\phi} = \frac{\lambda_{\tau} \cdot (T_{\phi 0} - T_0) \cdot F_{\phi}}{Q_{\text{H}}^{\text{p.o}} \cdot V_{\text{p}}^{\text{o}} - \sigma_0 \cdot a_{\tau} \cdot T_{\phi 0}^4 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i \cdot F_i)_{\text{a.g}}}, \quad (6.1)$$

где l_{ϕ} – длина факела на участке воспламенения, м; λ_{τ} – условный коэффициент теплопроводности среды продуктов сгорания, кВт/(м·К); $T_{\phi 0}$ – практическая температура среды факела на начальном участке, К; T_0 – начальная температура среды факела, К; F_{ϕ} – конструктивное сечение котла соответствующее сечению среды факела, м²; $Q_{\text{H}}^{\text{p.o}}$ – теплота сгорания, кДж/кг; V_{p}^{o} – расход топлива, кг/с.

Введем дополнительные ограничения для начала расчета. Опираясь на опытные данные можно принять: $\lambda_2 \approx 1$ кВт/(м·К); $T_0 \approx 900$ К; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴); $a_T \approx 0,9$. Величина V_p^o принимается исходя из данных о работе котла. Величина Q_H^p принимается исходя из данных о топливе. Величина $T_{\phi 0}$ зависит от свойств топлива и принимается по анализу состава топлива или пробного сжигания, а во время работы котла уточняется. Комплекс $\sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i \cdot F_i)_{a.g}$ нормативный, причем площадь поперечного сечения факела в зоне интенсивного горения F_{ϕ} считается по (6.2) и (6.3). С фронтальной и встречной компоновками горелок:

$$F_{\phi} = H_{a.g} \cdot A_T, \quad (6.2)$$

$$F_{\phi} = H_{a.g} \cdot C_T, \quad (6.3)$$

где $H_{з.и.г}$ – высота зоны интенсивного горения, м; A_T – ширина котла, м; C_T – глубина котла, м. Величины $H_{з.и.г}$, A_T , C_T зависят от геометрии котла.

2. Скорость движения в факеле будет изменяться согласно зависимости:

$$\omega_{\phi} = \omega_0 \cdot k_F \cdot k_V \cdot k_T, \quad (6.4)$$

ω_{ϕ} – скорость движения в факеле, м/с; ω_0 – скорость движения на срезе горелки, м/с; факторы влияния изменения: k_F – сечения факела на скорость; k_V – объёмного расхода среды в факеле на скорость; k_T – температуры факела на скорость.

Фактор влияния изменения сечения факела на скорость:

$$k_F = \left(1 + 0,21 \cdot \frac{l_{\phi}}{d_0} \right)^{-2}, \quad (6.5)$$

Влияние факторов k_V и k_T на скорость топливоздушной смеси на рассматриваемом участке воспламенения незначительно.

$$k_V = 1 / (1 + l_{\phi} (V^r / V^b - 1)), \quad (6.6)$$

$$k_T = T_{\phi} / T_0. \quad (6.7)$$

3. Время движения факела на участке горения, с:

$$\tau = l_{\phi} / \omega_{\phi}, \quad (6.8)$$

где l_{ϕ} – длина факела на участке горения, м; ω_{ϕ} – скорость движения в факеле, м/с.

4. Адиабатическая температура по длине факела:

$$t_{\text{адиаб}} = \Phi(L_{\text{ф}}) \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}} / (c_{\text{р}} \cdot V_{\text{г}}). \quad (6.9)$$

5. Время нагрева до заданной температуры интенсивного выделения летучих веществ (воспламенения), с:

$$\tau_{\text{нагр. част.}} = \frac{\delta \cdot \rho \cdot c \cdot m}{2 \cdot \alpha \cdot \zeta} \cdot \ln \left(\frac{t_{\text{г}} - t_0}{t_{\text{г}} - t_{\text{восп}}} \right), \quad (6.10)$$

где δ – условный размер частицы вещества, содержащегося в запыленном потоке, м; ρ – плотность вещества, кг/м³; c – массовая теплоемкость вещества, кДж/(кг·°С); m – коэффициент термической массивности вещества; α – коэффициент теплоотдачи на поверхность вещества, Вт/(м²·К); ζ – коэффициент формы вещества; $t_{\text{г}}$ – температура топочных газов, °С; t_0 – начальная температура вещества, °С; $t_{\text{восп}}$ – температура воспламенения, °С. При высоких значениях $t_{\text{восп}}$ время сушки можно не учитывать, рис.6.3.

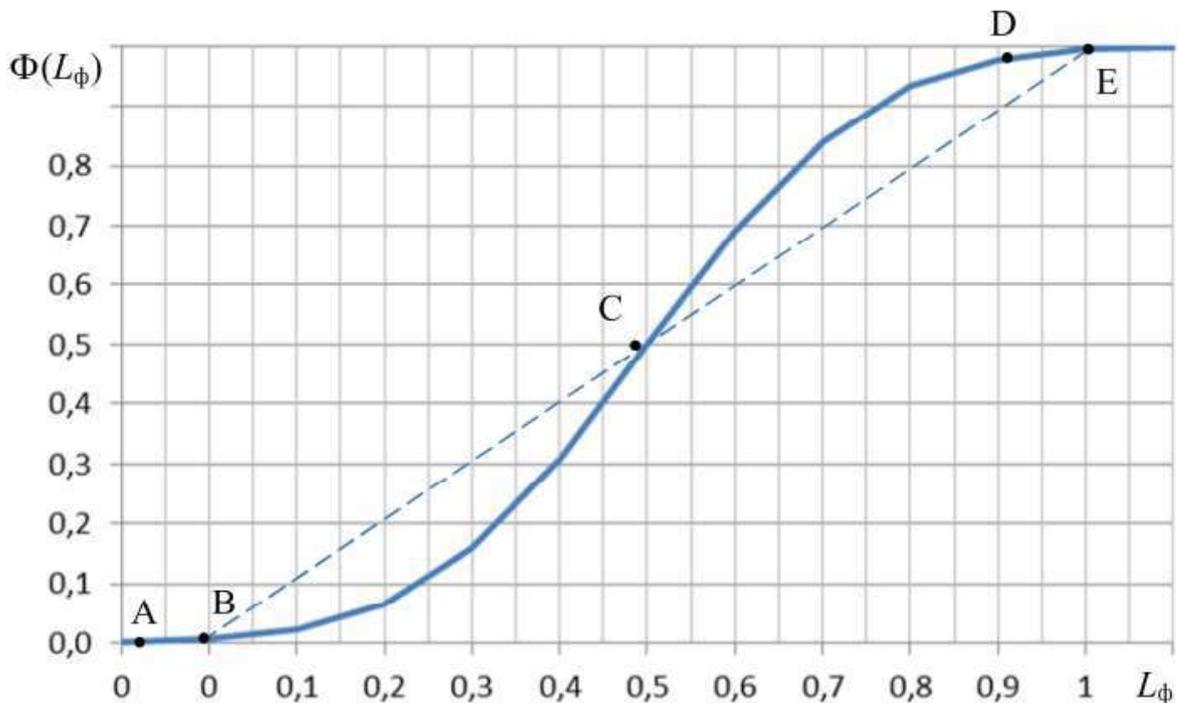


Рис. 6.3. Изменение интегральной функции $\Phi(L_{\text{ф}})$ по длине факела $L_{\text{ф}}$: линия А–В – начальный участок факела до воспламенения; точка В – начало горения, точки D, Е – завершение горения с заданной степенью недожога; пунктирная линия В–Е – линейная аппроксимация степени выгорания топлива

Для создания программного продукта была выбрана среда программирования Microsoft Visual Basic 6.0, рис.6.4. Полученный продукт принимает на ввод через

текстовые окна значения аргументов, к которым относятся величины методики, фигурирующие как невычисляемые, и характеризующие состав и свойства топлива, свойства факела, параметры дымовых газов и геометрия котельного агрегата. Из числа аргументов выбирается один изменяемый, задаются пределы его изменения в процентах от указанной величины.

После нажатия кнопки «Calculate» все функции вычисляются для заданных в текстовых полях аргументов. Для построения графика каждой функции создана отдельная кнопка, после нажатия которой функция связывается с выбранным аргументом. Для построения графика вычисляется среднее по пределам изменения значение функции и два крайних, после чего график центрируется в графическом окне и масштабируется. Затем вычисляется массив равномерно распределённых N точек, которые наносятся на график. Пример работы программы изображён на рисунке 6.5. Построена функция длины факела.

На рисунке 6.6 изображён ряд графиков, показывающих отклонения спрогнозированных значений длины факела от действительного её значения при различных значениях параметра сглаживания, расположенного рядом с аргументом температуры в зоне интенсивного горения, запечатлённых в момент времени после смены вида топлива (13:00 08.04.2019).

DateTime	Hot air: speed, m / s	Hot air: temp., °C	Fuel-air mixture: speed, m/s
11.10.2019 13.00.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.01.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.02.00	8,1	349	8,57
11.10.2019 13.03.00	8,1	349	8,58
11.10.2019 13.04.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.05.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.06.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.07.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.08.00	8,05	349	8,54
11.10.2019 13.09.00	8,05	349	8,52
11.10.2019 13.10.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.11.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.12.00	8,12	350	8,65
11.10.2019 13.13.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.14.00	8	350	8,46
11.10.2019 13.15.00	8	350	8,46

Рис. 6.4. Внешний вид базы данных

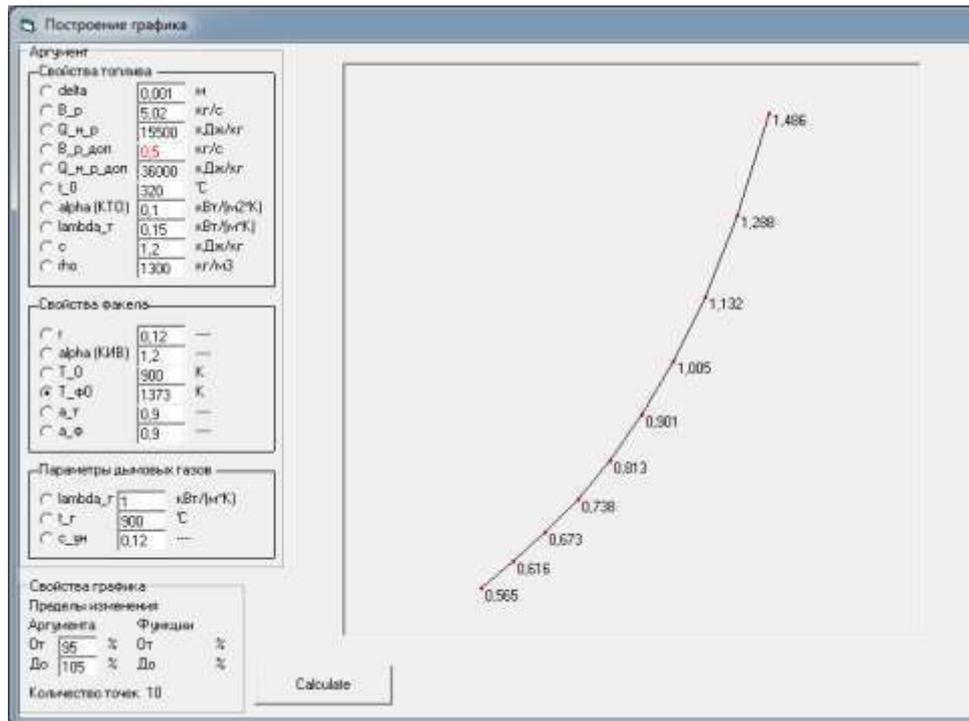


Рис. 6.5. Внешний вид окна программы

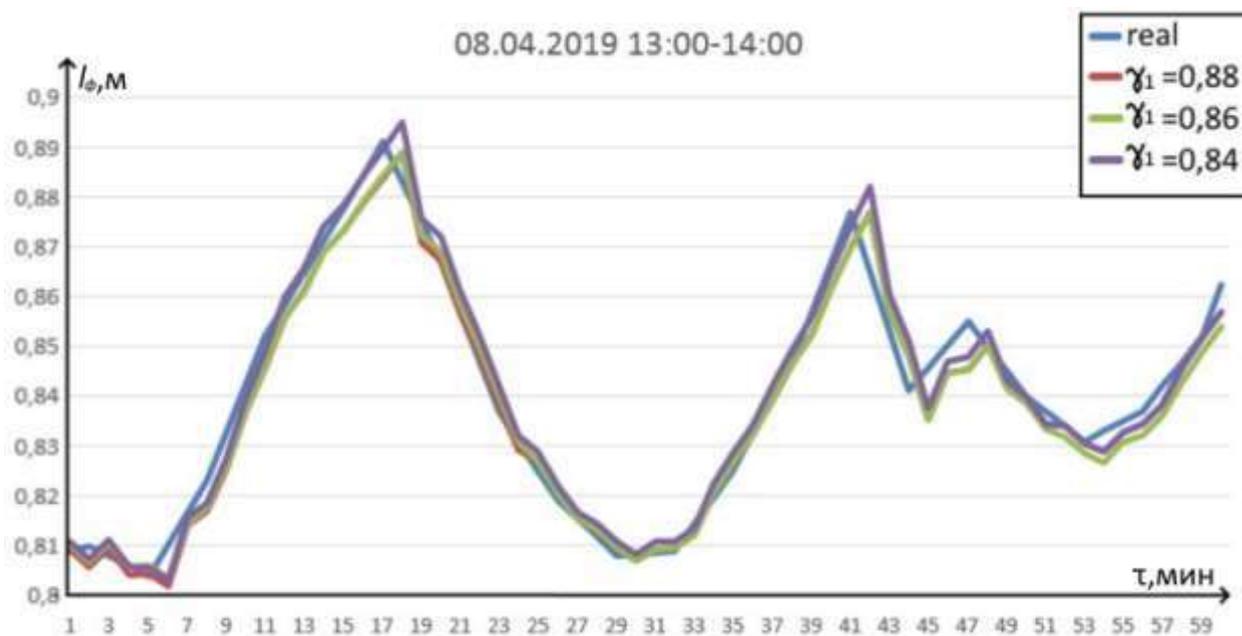


Рис. 6.6. Прогнозирование длины факела с различными весовыми коэффициентами при аргументе температуры в зоне интенсивного горения

6.1. Программа по оптимизации системы энергосбережения

Программа предназначена для специалистов в области проектирования систем управления и программистов контроллеров теплоэнергетических установок. Про-

грамма считает эксергию для каждого часа дня по вводимым значениям температуры окружающей среды, а также значения лучеиспускание света для чистого неба в горизонтальной поверхности для оптимального угла наклона фотоэлектрической поверхности для каждого дня выбранного месяца. В программе реализованы: визуальное представление величин лучеиспускания света для чистого неба в горизонтальной поверхности для оптимального угла наклона солнечной панели Челябинского региона и, как следствие, энергоэффективной выработки электроэнергии для выбранного месяца и эксергии для заданной температуры окружающей среды. Тип ЭВМ: IBM PC - совмест. ПК; ОС: Windows 7/10. Листинг программы представлен в [492].

6.2. Программный комплекс расчета параметров возобновляемых источников энергии на основе нейросетевого алгоритма

Программа предназначена для специалистов в области проектирования систем управления и программирования контроллеров тепло- и электроэнергетических установок, а также установок, работающих на возобновляемых источниках энергии. Программа прогнозирует данные по исходным файлам по скорости ветра для лопастей ветроустановок, выработки электрической энергии солнечной панелью, температуры поверхности солнечной панели, выработки электрической энергии фотоэлементом. В программе реализованы: визуальное представление прогностических данных скорости ветра для лопастей ветроустановок, выработки электрической энергии солнечной панелью, температуры поверхности солнечной панели, выработки электрической энергии фотоэлементом с применением запрограммированных самообучающихся нейронных сетей, а также визуальное представление исходных данных. Листинг программы представлен в [493].

6.3. Перспективы использования новых технологий при передаче сигналов от фотоэлектрических преобразователей

Актуальность совершенствования методов моделирования процессов передачи данных определяется необходимостью повышения их аналитических возможностей и получения более точных решений при использовании достижений ряда на-

ук. Это является ответом на вызовы сформулированной интеграционно-конвергентной организационно-технологической парадигмы развития сложных систем. В своих ранних работах [3] исследователи подчеркивают, что при использовании расчетов по теореме Найквиста-Шеннона возникает ряд проблем, объяснение которых возможно только при использовании новых методологий и математических моделей. Столкнувшись на практике расчетов с использованием нейросетевых алгоритмов, например, с построением линий тренда на базе функций, построенных на условиях дискретизации по теореме Найквиста, автор [3] предлагает использовать новые методы аппроксимации кусочно-линейных функций, которые позволяют достичь меньшей погрешности по сравнению со стандартными методами расчета. Теоретическое существование такой возможности подтверждено методами геометрической алгебры многомерного пространства, исследующей вычислительные подходы к сжатию и растягиванию как видам преобразования пространства. Впоследствии эти подходы образовали математические основы квантовой механики.

Наиболее известной работой последнего времени является книга Кок С.-W. и Там W.-S.[494, 495]. В этой книге дается сводка работ по системам передачи и обработки сигналов, а также математические соотношения, позволяющие реализовать подобные системы на практике.

В работах Basak G. et al. [496], GamaF. et al. [497] представлены основы передачи сигналов. Особенно в работе OrtegaA. et al. [498] отчетливо показаны преимущества новых методов дискретизации сигналов, в работе того же автора Ortega A. Et al. [499] показаны недостатки применения рядов Фурье при обработке и передаче сигналов.

Предпосылками к работе [3] являются фундаментальная работа, на которую часто ссылаются исследователи, а именно Mayers D.F. et al. [500] о математических соотношениях при обработке сигналов.

Кроме того, следует отметить, что дискретизацией аналоговых сигналов до последнего времени занимался специалист Sozanski K. [501]. Он же исследовал устойчивость передачи данных [502].

Работы OshanaR. [503], Meyer-Base A. [504] связаны с преобразованием сигналов для нейросетевых алгоритмов, они близки к теме исследования.

Исследования O'Shaughnessy D. [505], Khobotov A.G. et al. [506] связаны с повышением эффективности устройств при обработке сигналов в нейросетях.

Работы Malsagov M.Y. et al. посвящены исследованию весовых коэффициентов [507] и обучению нейросетей [508]. Исследователи Kryzhanovsky B. et al. [509] изучали непосредственно дискретизацию сигналов. А в работе [510] указаны преимущества и недостатки различных методов дискретизации. Авторы хотели бы отметить книги, которые положены в основу проектирования нейросетей [511], их применению на практике [512] и проявлению осцилляций при решении [513].

Выводы по главе 6

1. Достижение поставленных целей невозможно без структуры передачи данных. Разработанная структура была построена на основании имеющихся в распоряжении ресурсов, она относительно проста и удовлетворяет следующим требованиям:

- возможность автоматизированного сбора данных;
- возможность сохранения истории обучения;
- возможность ограничения воздействия на процесс горения;
- возможность верификации расчётных данных диспетчером.

2. Для управления гибридным энергетическим комплексом нового поколения автором созданы программы:

Программа по оптимизации системы энергосбережения.

Программный комплекс расчета параметров возобновляемых источников энергии на основе нейросетевого алгоритма.

7 Экономическая оценка перевода котельных и ТЭС в гибридные энергетические комплексы, сипользующих органическое топливо и солнечную энергию, производящих электрическую, тепловую энергию и активный уголь

7.1 Стратегическая направленность работы

7.1.1 Внедрение в проекты и котлы ТЭС результатов диссертационной работы по организации энергокомплексов в топках промышленных котлов согласуется с «Энергетической стратегией России на период до 2030г.», а также «Основами государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030г.», утвержденными Президентом РФ 30.04.2012г [377-381].

7.1.2 Одно из направлений реализации правительственного распоряжения о повышении эффективности использования угля связано с увеличением доли твердого топлива за счет комбинированной выработки теплоты и активного угля. То же касается и повышения эффективности газопылеугольных объектов энергетики, на которых возможна организация энергокомплекса. Экономическую целесообразность такого мероприятия можно оценить по изменению годовых топливных затрат при выработке равноэквивалентной продукции [382]:

$$\pm\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = (C^{\Gamma}V_1^{\Gamma}\eta_{\text{H1}}^{\Gamma} + C^{\Upsilon}V_1^{\Upsilon}\eta_{\text{H1}}^{\Upsilon}) - (C^{\Upsilon}V_2^{\Upsilon}\eta_{\text{H2}}^{\Upsilon}), \quad (7.1)$$

где $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2$ – топливная составляющая годовых затрат до и после перехода на режим полигенерации, руб./год; $V_1^{\Gamma}, V_1^{\Upsilon}$ – годовой расход горючего топлива для производства активного угля и угольной пыли до перехода на технологию полигенерации, т/год; V_2^{Υ} – годовой расход угля после перехода на технологию полигенерации, т/год; C^{Γ}, C^{Υ} – цена горючего топлива для активации угля и угольной пыли, руб./т; $\eta_{\text{H1}}^{\Gamma}, \eta_{\text{H1}}^{\Upsilon}, \eta_{\text{H2}}^{\Upsilon}$ – условные КПД нетто технологии получения готовой продукции при работе до перехода на новую технологию и после, учитывающие как термические свойства установок, так и затраты электроэнергии на собственные нужды, эксплуатационные и ремонтные расходы, плату за экологические изменения окружающей среды.

7.1.3 Раздельная технология выработки продукции, например, активного угля и теплоты и электроэнергии промышленными котлами ТЭС с использованием

твердого топлива затратнее технологии энергокомплекса; при ее организации дополнительные расходы на собственные нужды топливоподачи, пылеприготовления и золошлакоудаления, расходы на специфические ремонты и эксплуатацию, избыточные потери с термическим преобразованием энергии, дополнительная плата за выбросы в атмосферу и золошлакоотвалы. Выражая годовой комплекс подобных затрат через условные технологические КПД нетто, получим ориентировочные значения последних. По данным Челябинской ТЭЦ-2, ТЭЦ г.Бишкек, других ТЭС, а также технологии получения активного угля $\eta_{\text{H}}^{\text{y}} = 0,72-0,78$, $\eta_{\text{H}}^{\text{r}} = 0,85-0,88$. При стоимости угля (3500-4000)руб./т от разных Поставщиков различного качества со среднегодовой загрузкой объектов (0,4-0,6) установленной мощности формируется поле экономической выгоды от сокращения потребления топлива в энергокомплексе в режиме полигенерации, рис. 7.1.

7.1.4 Понятно, что абсолютные значения выгоды зависят от совершенно конкретных событий и связей.

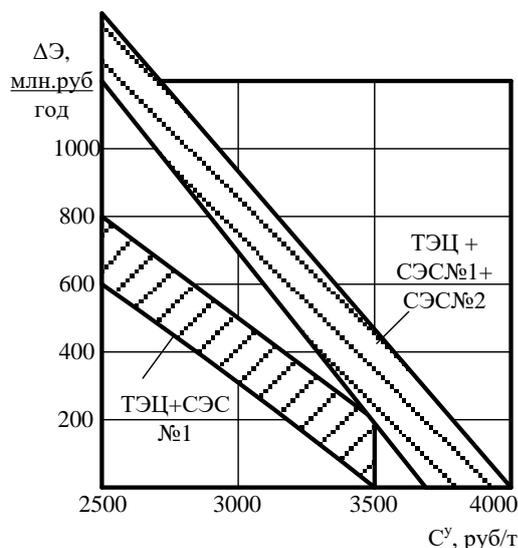


Рис. 7.1. Экономическая эффективность от перевода ТЭЦ в гибридный энергокомплекс

7.2 Технологическое обеспечение реализации экономической стратегии и экологического развития РФ

7.2.1 Извлечение выгоды по рис.7.1 невозможно без выполнения мероприятий, обеспечивающих надежную, экономичную и экологически приемлемую работу оборудования. Сжигание твердого топлива сопровождается комплексом негативных последствий:

- шлаковыми загрязнениями топочных камер и конвективных поверхностей нагрева, ухудшающими теплообмен между факельной и водопаровой средами со снижением паропроизводительности котлов;
- быстротечными загрязнениями и терморазрушениями амбразур и конструкций горелочных устройств;
- повышением эксплуатационных затрат на ремонт горелок и очистки котлов от загрязнений золой и шлаком, на пусковые режимы;
- увеличением выхода вредных веществ, в том числе летучей золы, оксидов серы (SO_x), оксидов азота (NO_x) и оксида углерода (CO) в атмосферу, золы и шлака в отвалы.

В стремлении обойти обозначенные явления персонал ТЭС увеличивает долю газопотребления.

7.2.2 Разработки, изложенные в диссертации, направлены на минимизацию обозначенных в п.7.2.1 негативных последствий твердотопливного сжигания. Не рассматривая вопросы очистки (снижения выхода) летучей золы, оксидов серы, золы и шлака в отвалы, которыми очень плотно и успешно занимаются специализированные организации и фирмы, автор диссертации отвечает на актуальные вопросы снижения активности шлакования и терморазрушения горелочных конструкций с повышением их межремонтных сроков при одновременном уменьшении концентрации оксидов азота в выводимых в атмосферу продуктах сгорания. Предлагаемые мероприятия позволяют повысить паропроизводительность котлов и тем самым организовать работу ТЭС и котельных при пониженном газопотреблении с улучшенными экологическими показателями. Это согласуется с «Энергетической стратегией России на период до 2030г.», принятой распоряжением Правительства Российской Федерации №1715-р от 13.04.2009г. и с «Основами государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030г.», утвержденными Президентом РФ 30.04.2012г [377-381].

7.2.3 Диссертационные рекомендации по внедрению универсальны, они касаются также отдельно котлов, работающих изначально на угольной пыли, а также

котлоагрегатов, работающих на газе. В этих случаях полезный выход представляемой работы также связан со снижением шлакования и повышением надежности горелок при одновременном уменьшении выхода оксидов азота в атмосферу, обеспечивающих повышение паровой нагрузки теплопроизводящих агрегатов.

7.3 Экономическая эффективность разрабатываемых мероприятий

К особенностям оценки экономической эффективности улучшения работы индивидуальных узлов технологии выработки теплоты и электроэнергии можно отнести сбор статистических данных до и после внедрения мероприятий. Полученное в результате внедрения работы снижение затрат на расшлаковку, включая ручной труд и растопочные потери топлива при аварийных запусках котлов в работу, выглядит следующим образом [382-384]:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{шл}} = n(\mathcal{E}'_{\text{шл}} - \mathcal{E}''_{\text{шл}}), \quad (7.2)$$

где $\mathcal{E}'_{\text{шл}}$ и $\mathcal{E}''_{\text{шл}}$ – годовые затраты на расшлаковку, аварийные пуски котлов и ремонт шнеков топочного шлакоудаления до и после внедрения мероприятия, руб/год; n – количество котлов, охваченных мероприятием.

Годовая экономия при повышении срока службы горелочных элементов:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{сл}} = K_p^c / \tau_c - K_p^h / \tau_h, \quad (7.3)$$

где K_p^c и K_p^h – стоимость ремонта и замены горелочных элементов, руб; τ_c и τ_h – срок службы старых и новых элементов, год.

Годовой экономический выигрыш от улучшения термического КПД котлов:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{топл}} = \left(\Delta \eta_{\text{бр}} / \eta_{\text{бр}} \right) V_p C^T, \quad (7.4)$$

где $\Delta \eta_{\text{бр}}$, $\eta_{\text{бр}}$ – улучшение КПД брутто и собственно КПД брутто до внедрения мероприятия; V_p – среднестатистический годовой расход топлива, т/год; C^T – цена на топливо на момент внедрения мероприятия, руб/т.

Годовой экономический эффект, связанный с повышением паропроизводительности и возможности вывода одного из котлов в резерв:

$$\Delta \mathcal{E}_N = c \tau (N_1 n_1 - N_2 n_2), \quad (7.5)$$

где c – стоимость кВтч, руб./1000кВт·ч; τ – условное среднестатистическое число часов работы котлов, ч; n_1, n_2 – усредненное количество работающих котлоагрегатов до и после внедрения мероприятия, шт.; N_1, N_2 – суммарная электронагрузка собственного оборудования котлов до и после внедрения мероприятия, кВт.

Затраты на разработку и внедрение, вычитаемые при формировании экономического эффекта, учитывались в виде распределенных с нормативным коэффициентом $E_n=0,151/\text{год}$ [382]:

$$\Delta \mathcal{E}_p = E_n K_p, \quad (7.6)$$

где K_p – затраты на разработку и внедрение.

Затраты на разработку и внедрение даже в «чистом» виде без распределения по годам, как правило, не превышали 10-25% от реализуемого экономического эффекта и окупались в течение

$$\tau_{\text{окуп}} = K_p / \Sigma \Delta \mathcal{E} \leq 0,5 \text{ года}, \quad (7.7)$$

где $\Sigma \Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_{\text{шл}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{сл}} + \Delta \mathcal{E}_{\text{топл}} + \Delta \mathcal{E}_N$, руб./год; $\Delta \mathcal{E}_{\text{шл}}, \Delta \mathcal{E}_{\text{сл}}, \Delta \mathcal{E}_{\text{топл}}, \Delta \mathcal{E}_N$ приведены в формулах (7.2) – (7.5), руб./год.

Выводы по главе 7

1. Показана экономическая целесообразность перевода существующих предприятий и ТЭЦ в энергокомплексы по активированию угля.
2. Переход ТЭС и котельных на работу в режиме полигенерации совмещать с ремонтной компанией, заменой изношенного на более современное и менее энергоемкое оборудование.
3. Инфляционные процессы, изменения закупочной цены на топливо, иные обстоятельства могут существенно менять абсолютные значения составляющих экономического эффекта. Однако тенденция улучшения технико-экономических показателей предлагаемого изменения процесса сжигания в топках промышленных котлов ТЭС и котельных сохраняется.

Заключение

Итогом диссертационной работы является разработанная методология использования солнечной энергии и органического топлива для производства тепловой, электрической энергии и активного угля при минимизации карбонового следа на базе тепловых электрических станций, имеющая важное социально-экономическое значение – обеспечение генерации энергии при снижении потребления ТЭС органического топлива и его использования для производства активных углей, что в свою очередь повышает экологичность гибридного энергетического комплекса, обладающего экономической устойчивостью и конкурентоспособностью, отсутствием конъюнктурных влияний энергетического рынка и топливно-энергетического комплекса в целом.

Сформулированы **основные результаты работы:**

1. Впервые предложена методология создания гибридных систем на органическом топливе, солнечной энергии и низкопотенциальном сбросном тепле в едином энерготехнологическом комплексе.

2. Разработаны новые алгоритмы и методы создания ГЭК на основе органического топлива, солнечной энергии и низкопотенциальных источников энергии.

3. Разработан метод расчета удельной плотности солнечной радиации в ГЭК.

4. Впервые предложена новая концепция деления тепловой части ГЭК, а именно камер сгорания и камер активации на отдельные области, в которых среда представлена в виде подсистем: факел, топочный газ, окружающий факел, и ограждающие конструкции.

5. Разработан метод расчета теплообмена на участке воспламенения камер сгорания и камер активации с учетом разработанной непрерывной функции гранулометрического состава, линейно аппроксимированной функции выгорания топлива по длине факела, которые позволяют рассчитать адиабатическую температуру горения и время пребывания частиц в факеле.

6. Разработана математическая модель теплообмена в камере сгорания и активации, в которой используются приведенный коэффициент теплового излучения

всех подсистем, обобщенный коэффициент теплопроводности диффузионных механизмов переноса теплоты, суммарный коэффициент теплоотдачи излучением и конвекцией, обобщенное число Нуссельта.

7. Впервые предложена математическая модель ФЭПиТ с предварительным подогревом за счет использования источников низкопотенциального тепла.

8. Проведено экспериментальное исследование констант стадий горения и активации челябинского и шубаркольского бурых углей и экспериментальное исследование времени нахождения частиц на стадиях горения, на основе которого разработаны зависимости для расчета стадий горения и активации. Результаты исследования могут быть использованы в теории горения и активации в качестве справочных материалов. Определены средние температуры на выходе из зоны интенсивного горения $T_{з.и.г}^{чел}=1595\text{К}$, $T_{з.и.г}^{шуб}=1620\text{К}$ и в выходном окне камер сгорания $T_{вых}^{чел}=1400\text{К}$, $T_{вых}^{шуб}=1420\text{К}$ для челябинского и шубаркольского углей соответственно, получены значения констант активации и горения челябинского $k_{вл}=1,10$, $k_{гл}=1,10$, $k_{вк}=1,30$, $k_{гк}=1,40$, и шубаркольского $k_{вл}=1,00$, $k_{гл}=1,00$, $k_{вк}=1,20$, $k_{гк}=1,25$, углей в лабораторных условиях. Получены аналитические зависимости для определения стадий активации этих углей, результаты расчетов по которым отличаются от результатов по формулам методологии на 1-2%, от результатов по формулам В.И. Бабия-Ю.Ф. Куваева на 2-3%.

9. Проведено численное моделирование удельной плотности солнечной радиации ФЭПиТ, движения хладагента и его кипения при внедрении системы утилизации теплоты ГЭК, тепловых и газодинамических процессов слоевой, факельной технологии сжигания и активации бурого угля. Результаты использованы в отчете гранта РФФ 22-19-2011 «Методология многопараметрической оптимизации опреснительной установки для грунтовых и морских минеральных вод на основе возобновляемых источников энергии».

10. Разработанный алгоритм и методы управления и контроля рабочих процессов в основном оборудовании ГЭК внедрены в учебный процесс ЮУрГУ, что подтверждается Справкой использования результатов.

11. Разработанные схемы гибридного энергетического комплекса, использующего солнечную энергию и органическое топливо, производящего электрическую, тепловую энергию и активный уголь, на которые получены патенты на изобретения (Пат. 2484371 РФ, Пат. 2615241 РФ, Пат. 2499035 РФ, Пат. 2499189 РФ, Пат. 2500617 РФ, Пат. 2500953 РФ, Пат. 2500954 РФ, Пат. 2502921 РФ), используются АО «Объединение ВНИПИЭнергопром» и АО «Электрические станции», что подтверждается Справками.

12. На предложенную схему охлаждения готового активированного угля с утилизацией теплоты за энергетическим комплексом при использовании низкопотенциальных источников энергии получен патент 2748628 РФ.

14. Разработана и реализована методология использования органического топлива и солнечной энергии в едином энергокомплексе, сокращающая потребление топлива и снижающая воздействие на окружающую среду, что подтверждается Актом внедрения КНТЦ «Энергия».

15. Материалы диссертационного исследования вошли в учебники и учебные пособия ЮУрГУ и внедрены в программы подготовки и профессиональной переподготовки специалистов для энергетики.

Рекомендации по использованию результатов работы

Полученные научные и прикладные результаты работы могут быть использованы на предприятиях энергетической отрасли. В частности, результаты работы рекомендованы к применению при проектировании схем и оборудования на семинаре Приволжского и Южно-Уральского филиала АО «ВнипиЭнергопром», г. Казань, что внесет существенный вклад в улучшение экологической ситуации и развитие ресурсосберегающих технологий в энергетике РФ.

Разработки в области газодинамики и теплообмена рекомендованы при проектировании новых технологических устройств и агрегатов предприятиями АО «Электрические станции» и КНТЦ «Энергия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mathematical Foundations for Modeling a Zero-Carbon Electric Power System in Terms of Sustainability / A. Alabugin, K. Osintsev, S. Aliukov [et al.] // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11, No. 9. – P. 2180. – DOI 10.3390/math11092180. – EDN MWLHKY.
2. Toropov, E. V., Osintsev, K. V., and Aliukov, S. V., *Int. J. of Heat and Tech.*, 2018, vol. 36 (4), pp. 1240 – 1248.
3. Osintsev K., Aliukov S., Prikhodko Y. *IEEE Access*, 2020, 8: 192857-192866.
4. Aliukov, S., and Osintsev, K., *App. Sci.*, 2021, vol. 11 (4):1609.
5. Osintsev, K., Aliukov, S., and Kuskarbekova, S., *Energies*, 2021, vol. 14 (4):1004.
6. A.A. Alabugin and S.V. Aliukov, “Modeling Regulation of Economic Sustainability in Energy Systems with Diversified Resources *J. Sci*, vol. 3, Issue 1, 2021, doi:10.3390/sci3010015.
7. Szalavetz A. Digitalisation, automation and upgrading in global value chains-factory economy actors versus lead companies. *Post-Communist Economies*, 2019, vol. 31, pp. 646 – 670. DOI: 10.1080/14631377.2019.1578584
8. The emergence of renewable energy technologies at country level: relatedness, international knowledge spillovers and domestic energy markets. *Industry and Innovation*, 2020. DOI: 10.1080/13662716.2020.1713734
9. Hosenuzzaman, N. A. Rahim, J. Selvaraj, M. Hasanuzzaman, A. B. M. A. Malek, and A. Nahar, “Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 284–297, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.046
10. A. M. Alsayah, M. H. K. Aboaltabooq, B. A. S. Bassam Abed, and M. H. Majeed, “CFD study to improve PV cell performance by forced air: Modern design,” *Period. Eng. Nat. Sci.*, vol. 7, no. 3, pp. 1468–1477, 2019, doi: 10.21533/pen.v7i3.794.

11. P. G. V. Sampaio and M. O. A. González, “Photovoltaic solar energy: Conceptual framework,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 74, no. December 2016, pp. 590–601, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.081.
12. Lalu, F. *Discovering organizations of the future* / F. Lalu. - M.: Mann, Ivanov and Ferber, 2016. - 88 p.
13. Meyer, J. W. *World society, institutional theories, and the actor* / J. Meyer//*Annual review of sociology*. – 2010. – T. 36. – C. 1-20.
14. Mitreva, E., Gorkov, EP., Gjorshevski, H., Tushi, B. *Application of the Total Quality Management (TQM) Philosophy in a Macedonian Air Conditioning Company. Quality – Access to Success*, 2020, vol. 21, pp. 45 –51. Available at: https://www.srac.ro/calitatea/en/authors_guide.htm...
15. Pisar, P., Bilkova, D. *Controlling as a tool for SME management with an emphasis on innovations in the context of Industry 4.0. Equilibrium. Quarterly Journal of economics and Economic Policy*, 2019, vol. 14, pp. 763 – 785. DOI: 10.24136/eq.2019.035
16. Oseledets, I. *Artificial intelligence and terminators from Google (visionary lecture) [electronic resource]* / I. Oseledets. -
Access mode: https://go.mail.ru/search_video?src=go&rf=tv.mail.ru&sbmt=1543215241478&fm=1&q=Oseledets+AND.+Artificial+intelligence+and+terminators&d=2210928336&sig=c5b7c5ac2e&s=Youtube (accessed: 26.11.18).
17. Ji, B. *Future global trends in innovative startups (video lecture) [electronic resource]* / B. J.-Access mode: [/https://www.youtube.com/watch?v=0nl4MDocrJk](https://www.youtube.com/watch?v=0nl4MDocrJk) (accessed: 26.11.18).
18. Peskov D. *University model 20.35 and conditions for joining its creation (lecture)*. Access Mode: <https://www.youtube.com/watch?v=UihOt9MpTZg> (Accessed: 11/26/2018).

19. Borovkov, A. New design paradigms. Factories of the Future, digital doubles [electronic resource] / A. Borovikov.- Access mode: <https://www.youtube.com/watch?v=cbUkFx1WXfs> (date accessed 26.11.2018).

20. Alabugin, A.; Aliukov, S.; Osintsev, K. Combined Approach to Analysis and Regulation of Thermodynamic Processes in the Energy Technology Complex. *Processes* 2021, 9, 204, pp. 1-32 <https://doi.org/10.3390/pr9020204>.

21. Alabugin A. A. Models of theory and methodology of integration and balancing management of intellectual labor resources and capital in the conditions of the singularity of technologies: conceptual research basics// *Intelligence. Innovation. Investment.* - 2019. -No. 4. - p. 10-20.

22. Alabugin, A.A. Approximation Methods for Analysis and Formation of Mechanisms for Regulating Heat and Mass Transfer Processes in Heat Equipment Systems / A.A. Alabugin, S.V. Aliukov, K.V. Osintsev // *International Journal of Heat and Technology.* – 2020. – Vol. 38 No. 1. – P.45-58Journal homepage: <http://iieta.org/journals/ijht>.

23. Topuzov, N.K.; Shchelkonogov, A.E.; Amelin, I.S. Multi-criteria approach to hydrogen fuel technology. In *Proceedings of the International Conference of Electrical Engineering and Electronics Engineering*, London, UK, 5–7 July 2017; Volume 1, pp. 308–311.

24. Kuznetsov, E. Technological singularity: the future that awaits us waiting. [electronic resource] / E. Kuznetsov. - Access mode:<https://www.youtube.com/watch?v=0qsBcrknPCI> (date of request: 26.11.18).

25. Alabugin A. A. Models of theory and methodology of integration-balancing management of intellectual labor and capital resources in the conditions of technology singularity: mathematical and methodological bases of research// *Intelligence. Innovation. Investment.* - 2019. - No. 8. - p. 19-32.

26. Brixner C., Isaak P., Suarez D., Yoguel G. Back to the future. Is industry 4.0 a new techno-organizational paradigm? Implications for Latin American countries. *Eco-*

nomics of Innovation and New Technology, 2020. DOI 10.1080/10438599.2020.1719642.

27. Garcia-Flores V., Martos, LP., Social innovation: Key factors for its development in the territories. CIRIEC-España, Revista de Economía Pública, Social y Cooperativa, 2019, vol. 97/2019, pp. 245-278. DOI: 10.7203/CIRIEC-E.97.14148.

28. Bhamra R., Nand A., Yang LL., Albregard P., Azevedo G., Corraini D., Emiliasiq M. Is leagile still relevant? A review and research opportunities. Total Quality Management & Business Excellence, 2020. DOI: 10.1080/14783363.2020.1750360.

29. Cainelli G., De Marchi V., Grandinetti R. Do knowledge-intensive business services innovate differently? Economics of Innovation and New Technology, 2020, vol. 29, pp 48 – 65. DOI: 10.1080/10438599.2019.1585639.

30. Khalfallah M., Lakh L. The impact of lean manufacturing practices on operational and financial performance: the mediating role of agile manufacturing. International Journal of Quality & Reliability Management, 2020. DOI: 10.1108/IJQRM-07-2019-0244.

31. Chen, R., Lee, YD., Wang, CH. Total quality management and sustainable competitive advantage: serial mediation of transformational leadership and executive ability. Total Quality Management & Business Excellence, 2020, vol. 31, pp. 451 – 468. DOI: 10.1080/14783363.2018.1476132.

32. Brito E., Pais, L., dos Santos NR., Figueiredo C. Knowledge management, customer satisfaction and organizational image discriminating certified from non-certified (ISO 9001) municipalities. International Journal of Quality & Reliability Management, 2020, vol. 37, pp. 451 – 469. DOI: 10.1108/IJQRM-10-2018-0281.

33. Bagis, M., Karaguzel, ES., Kryeziu, L., Ardic, K. A longitudinal analysis on intellectual structure of human resources management: Theoretical foundations and research trends. vol. 6, pp. 796 – 814. DOI: 10.30798/makuiibf.569513.

34. Rocha C., Narcizo CF., Gianotti E. Internet of Management Artifacts: Internet of Things Architecture for Business Model Renewal. International Journal of Innovation

and Technology Management, 2019, vol. 16, No. 08. DOI: 10.1142/S0219877019500627.

35. Asif M. Are QM models aligned with Industry 4.0? A perspective on current practices. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 258. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120820.

36. Hipp A., Binz, C. Firm survival in complex value chains and global innovation systems: Evidence from solar photovoltaics. *Research Policy*, 2020, vol. 49. DOI: 10.1016/j.respol.2019.103876.

37. Xiao QZ., Shan, MY., Xiao, XP., Rao CJ. Evaluation Model of Industrial Operation Quality Under Multi-source Heterogeneous Data Information. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2020, vol. 22, pp. 525 – 547. DOI: 10.1007/s40815-019-00776-x.

38. Casalet, M., Stezano F. Risks and opportunities for the progress of digitalization in Mexico. *Economics of Innovation and New Technology*, 2020. DOI: 10.1080/10438599.2020.1719643.

39. Clegg B. Improving systemic success factors in a university to achieve more effective and efficient operations Using the ProOH modelling methodology. *Business Process Management Journal*, 2020, vol. 26, pp. 630 – 654. DOI: 10.1108/BPMJ-11-2017-0308.

40. Wang, SX., Lu, WM., Hung, SW. Improving innovation efficiency of emerging economies: The role of manufacturing. *Managerial and decision economics*, 2019, vol. 41, pp. 503 – 519. DOI: 10.1002/mde.3116.

41. F. Zeng, Z. Bie, X. Li, Z. Han, Y. Zhi and Y. Zhang, Annual renewable energy planning platform: Methodology and design, 2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Xi'an, 2017, Pp. 1392-1397.

42. Liu Q., Wu S., Lei Y., et al. Exploring spatial characteristics of city-level CO₂ emissions in China and their influencing factors from global and local perspectives. *Science of The Total Environment*, 2020.

43. Liu Y., Jiang C., Shen J., et al. Coordination of Hydro Units With Wind Power Generation Using Interval Optimization. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 6(2):443-453.
44. Z. Wang et al., Wind Power Integration Capability Evaluation of Large-scale Combined Heat and Power System with Additional Heat Source, 2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Macao, 2019, Pp.1-5.
45. Yang Yongping, Duan Liqiang, Du Xiaoze, et al. Research foundation and prospects of multi-energy complementary distributed energy. *Chinese Science Foundation*, 2020, v.34(03):37-44.
46. Wang Fengyun, Zhang Shuang. Research on my country's Renewable Energy Power Generation Trend and Market Space--Analysis of the Development Potential of Renewable Energy during the "14th Five-Year Plan" Period. *Price Theory and Practice*, 2020(4): 36-40.
47. Yang Yongping, Duan Liqiang, Du Xiaoze, et al. Research foundation and prospects of multi-energy complementary distributed energy. *Chinese Science Foundation*, 2020, v.34(03):37-44.
48. Fatih Sorgulu, Ibrahim Dincer, Thermoeconomic and impact assessments of trigeneration systems with various fuels, *Fuel*, Volume 317, 2022, 123503, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123503>.
49. Canan Acar, Ibrahim Dincer Environmental impact assessment of renewables and conventional fuels for different end use purposes, *International Journal of Global Warming*, Vol. 13, No. 3-4, 2017, pp 260-277
50. Chinmay Deheri, Saroj Kumar Acharya, Dharendra Nath Thatoi, Ambica Prasad Mohanty, A review on performance of biogas and hydrogen on diesel engine in dual fuel mode, *Fuel*, Volume 260, 2020, 116337, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116337>.
51. Ayse Fidan Altun, Design and thermodynamic performance analysis of an ammonia-water absorption refrigeration and microturbine combined system, *Uludağ Uni-*

versity Journal of The Faculty of Engineering 27(2):765-784, DOI: 10.17482/uumfd.1134555

52. Bhaskor J. Bora, Ujjwal K. Saha, Experimental evaluation of a rice bran bio-diesel – biogas run dual fuel diesel engine at varying compression ratios, *Renewable Energy*, Volume 87, Part 1, 2016, Pages 782-790, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.002>.

53. A. Khaliq, R. Kumar, I. Dincer, Exergy Analysis of an Industrial Waste Heat Recovery Based Cogeneration Cycle for Combined Production of Power and Refrigeration, *J. Energy Resour. Technol.* Jun 2009, 131(2): 022402, <https://doi.org/10.1115/1.3120381>.

54. Khaliq, A., and Kaushik, S. C. , 2004, “Thermodynamic Performance Evaluation of Combustion Gas Turbine Cogeneration System With Reheat,” *Appl. Therm. Eng.* 1359-4311, 24, pp. 1785–1795.

55. Oh, S. D., Pang, H. S. , Kim, S. M. , and Kwak, H. Y. , 1996, “Exergy Analysis for a Gas Turbine Cogeneration System,” *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 0742-4795, 118, pp. 782–791.

56. Khaliq, A., and Choudhary, K., 2007, “Combined First and Exergy Analysis of Gas Turbine Cogeneration System With Inlet Air Cooling and Evaporative After Cooling of the Compressor Discharge,” *ASME J. Eng. Gas Turbines Power*, 0742-4795, 129, pp. 1004–1012.

57. M.M. Aman, K.H. Solangi, M.S. Hossain, A. Badarudin, G.B. Jasmon, H. Mokhlis, A.H.A. Bakar, S.N Kazi, A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 41, 2015, Pages 1190-1204, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.086>.

58. Goswami, D. Y. , 1995, “Solar Thermal Power-Status of Technologies and Opportunities for Research,” *Proceedings of the Second ISHMT-ASME Heat and Mass Transfer Conference*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, India, Vol. 27, pp. 57–60.

59. Goswami, D. Y. , 1998, “Solar Thermal Power Technology: Present Status and Ideas for the Future,” *Energy Sources*, 0090-8312, 20, pp. 137–145.

60. Aqeel Ahmed Bazmi, Gholamreza Zahedi, Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 8, 2011, Pages 3480-3500, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.003>.

61. K. Hacatoglu, I. Dincer, M.A. Rosen, A new model to assess the environmental impact and sustainability of energy systems, *Journal of Cleaner Production*, Volume 103, 2015, Pages 211-218, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.050>.

62. J. Nondy, T.K. Gogoi, Exergoeconomic investigation and multi-objective optimization of different ORC configurations for waste heat recovery: A comparative study, *Energy Conversion and Management*, Volume 245, 2021, 114593, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114593>

63. Патент № 2748628 С1 Российская Федерация, МПК F03G 6/00, F01K 27/00, F25B 29/00. Способ работы тригенерационной установки : № 2020118702 : заявл. 15.05.2020 : опубл. 28.05.2021 / К. В. Осинцев, Ю. С. Приходько, С. И. Кускарбекова [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Южно-Уральский государственный университет ". – EDN VYFMBR.

64. T. Romsy, P. Zacha, CFD simulation of upward subcooled boiling flow of freon R12, *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 4(73) (2016). <https://doi.org/10.14311/AP.2016.4.0073>

65. O.O. Milman, P.A. Ananyev, M.O. Korlyakova, V.O. Miloserdov, Experimental studies of non-stationary thermo-hydraulic processes at freon R113 boiling, *Journal of Physics Conference Series*. 1382(1) (2019). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1382/1/012114>

66. A.Yu Kuzmin, A.V Bukin, Experimental study of heat transfer during boiling on a smooth tube under conditions of free convection of alternative refrigerants R407c and R410a, *South of Russia: ecology, development*, 5 (4) (2010) 121–124. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2010-4-121-124>

67. Aleksandrov A.A., Orlov K.A., Ochkov V.F. Thermophysical properties of working substances of heat power industry: Internet reference book. - M.: MPEI Publishing House, 2009
68. Osintsev, K.V., Alyukov, S.V. Experimental Investigation into the Exergy Loss of a Ground Heat Pump and its Optimization Based on Approximation of Piecewise Linear Functions. *J Eng Phys Thermophy* 95, 9–19 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02451-9>
69. M. E. Demir, I. Dincer Development and Analysis of a New Integrated Solar Energy System with Thermal Storage for Fresh Water and Power Production. *International Journal of Energy Research* 42(9) (2017) <https://doi.org/10.1002/er.3846>
70. M. E. Demir, I. Dincer, Development of an Integrated Hybrid Solar Thermal Power System with Thermoelectric Generator for Desalination and Power Production. *Desalination*, 404 (2017), 59-71. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.016>
71. R. Saidur, E.T. Elcevvadi, S. Mekhilef, A. Safari, H.A. Mohammed An Overview of Different Distillation Methods for Small Scale Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9) (2011), 4756-4764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.077>
72. A. Safwat Nafey, M.A. Mohamad, S.O. El-Helaby, M.A. Sharaf Theoretical and Experimental Study of a Small Unit for Solar Desalination Using Flashing Process. *Energy Conversion and Management*, 48(2), (2007) 528-538. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.06.010>
73. I. Dincer, M. A. Rosen Chapter 2 - Exergy and Energy Analyses, Editor(s): Ibrahim Dincer, Marc A. Rosen, *Exergy (Second Edition)*, Elsevier, 2013, 21-30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097089-9.00002-4>
74. A. M. Nasrabadi, M. Korpeh Techno-economic Analysis and Optimization of a Proposed Solar-Wind-Driven Multigeneration System; Case Study of Iran, *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(36), (2023), 13343-13361. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.283>

75. A. Yapicioglu, I. Dincer, A Newly Developed Renewable Energy Driven Multigeneration System with Hot Silica Sand Storage for Power, Hydrogen, Freshwater and Cooling Production. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 55 (2023), 102938. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102938>

76. Новицкий Н.Н. Методические проблемы интеллектуализации трубопроводных систем и направления развития теории гидравлических цепей для их решения // Тр. XIV Всерос. науч. семинара «Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2014. – 280 с. ISBN 978-5-93. – С. 301–318.

77. Стенников В.А. О реформировании теплоснабжения России / В.А. Стенников // *Энергосбережение*. 2015. № 5. С. 63–66; № 6. С. 62–67.

78. Воропай Н.И. Интеллектуальные электроэнергетические системы: концепция, состояние, перспективы / Н.И. Воропай // *Автоматизация и ИТ в энергетике*. 2011. № 3(20). С. 11–16.

79. Дорофеев В.В. Активно-адаптивная сеть — новое качество ЕЭС России / В.В. Дорофеев, А.А. Макаров // *Энергоэксперт*. 2009. № 4. С. 28–34.

80. Воропай Н.И. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы / Н.И. Воропай, В.А. Стенников // *Известия РАН. Энергетика*. 2014. № 1. С. 64–73.

81. Voropay N.I., Stennikov V.A. Modeling of Integrated Energy Supply Systems: Main Principles, Model and Applications. *Journal on Energy Engineering*. 2017. DOI: 10.1061. (ASCE)EY.1943-7897.0000443.

82. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс] – <https://docplayer.com/414731-Osnovnye-polozheniya-koncepcii-intellektualnoy-energositemy-s-aktivno-adaptivnoy-setyu.html> (дата обращения: 11.12.2021).

83. Глебов И. Интеллектуальные энергетические системы городов с активно-адаптивной сетью (Smart Grid): настоящее и будущее [Электронный ресурс] – <https://www.eprussia.ru/epr/339/3180950.htm> (дата обращения: 11.12.2021).

84. Лукутин Б.В Возобновляемая энергетика в децентрализованном электро-снабжении / Б.В Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.

85. Сухарев М.Г. Состояние, проблемы и методы обеспечения надежности систем газоснабжения / М.Г. Сухарев // Надежность систем энергетики: проблемы, модели и методы их решения. Новосибирск: Наука, 2014. С. 165–189.

86. Правительство Челябинской области. Постановление. О региональной программе газификации жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций в челябинской области на 2017– 2021 годы [Электронный ресурс] – <https://docs.cntd.ru/document/543703618> (дата обращения: 11.12.2021).

87. Shishkov A.N., Osintsev K.V. 2021 Modernization of technological equipment in the waste water purification process behind the coke oven using the organic Rankine cycle IOP. Conference Series Materials Science and Engineering 1064

88. Osintsev K.V., Shishkov A.N. 2021 Increasing the energy efficiency of the industrial enterprise technological and mechanical equipment due to the use of converter steam IOP. Conference Series Materials Science and Engineering 1064

89. ОАО РАО ЕЭС России – Основные положения (Концепция) технической политики в электро-энергетике России на период до 2030 г. [Электронный ресурс] – <https://bib.convdocs.org/v23396/?download=file> (дата обращения: 11.12.2021).

90. Нетбай Г.В. / Прогнозное управление локальной городской системой теплоснабжения на основе нейросетевого моделирования / Г.В. Нетбай, В.Д. Онискив, В.Ю. Столбов, Р.Р. Каримов. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 20, № 3. С. 29–38

91. Комаров, Н.М. Управление инженерными системами интеллектуального здания с использованием информационного и инфографического моделирования / Н.М. Комаров, В.Г. Жаров // СЕРВИС Plus. – 2013. – № 2. – С. 74–81.

92. Чернявский А.О. Практическое применение метода конечных элементов в задачах расчета на прочность. Учебное пособие. / А. О. Чернявский // Издательство ЮУрГУ 2001. С. 5-22.

93. Ali M. Aqlan, Musaed Aklan and Abdulmalik E. Momin 2021 Solar-powered desalination, a novel solar still directly connected to solar parabolic trough. Elsevier 2352-4847

94. Амерханов Р.А. Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии. — М.: КолосС, 2003. — 532 с.

95. Moiseev I A, Shishkov A N, Berseneva I A and Osintzev K V 2022 Simulation of the operation of the solar panel of the pilot plant in the Ansys software package. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 990

96. Бушуев В.В. Умная энергетика на базе новых организационно-технологических принципов управления инфраструктурными системами / В.В. Бушуев // «Интеллектуальная электроэнергетика, автоматика и высоковольтное коммутационное оборудование». Доклад на XI Международной научно-технической конференции., Москва, 2011. – 22 с.

97. Возможности использования возобновляемых источников энергии для независимого энергообеспечения промышленного предприятия ООО «Челябинск-спецгражданстрой» / В. Р. Низамутдинов, И. А. Моисеев, И. А. Берсенева [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 89-98. – DOI 10.14529/power230109. – EDN ODRUCQ.

98. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615785 Российская Федерация. Программный комплекс расчета параметров возобновляемых источников энергии на основе нейросетевого алгоритма : № 2023614979 : заявл. 20.03.2023 : опубл. 20.03.2023 / И. А. Моисеев, И. А. Берсенева, К. В. Осинцев, С. И. Кускарбекова ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет ». – EDN ZRCXFN.

99. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661347 Российская Федерация. Оптимизатор системы ориентации : № 2022619640 : заявл. 28.05.2022 : опубл. 20.06.2022 / Е. В. Соломин, К. В. Осинцев,

Ю. С. Приходько [и др.] ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет ». – EDN SFQTOF.

100. The use of organic waste of the agro-industrial complex for the production of fuel using neural network algorithms / K. V. Osintsev, Iu. S. Prikhodko, D. I. Nikitina [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : Mechanization, engineering, technology, innovation and digital technologies in agriculture Сер. 3, Smolensk, 25 января 2021 года. Vol. 723. – Smolensk: IOP PUBLISHING LTD, 2021. – P. 032026. – DOI 10.1088/1755-1315/723/3/032026. – EDN UTHNFB.

101. Annaratone, D. Steam generators (Description and design) / D. Annaratone. – Berlin: Springer, 2008. – 427 p.

102. Kitto, John B. Steam: Its generation and use. 41st edition / John B. Kitto, Steven C. Stultz. - Barberton, Ohio, U.S.A.: The Babcock & Wilcox Company, 2005. – 1106 p.

103. Кузнецов, Н.В. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / Н.В. Кузнецов. – М. – Л.: Энергия, 1973. – 256 с.

104. Тепловой расчет котлов. Нормативный метод. – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ-ВТИ, 1998. – 257 с.

105. Митор, В.В. Проектирование топок с твердым шлакоудалением (дополнение к нормативному методу теплового расчета котельных агрегатов). Руководящие указания / В.В. Митор, Ю.Л. Маршак // ВТИ – НПО ЦКТИ. –1981. – Вып. 42. – 118 с.

106. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.

107. Липов, Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М. Липов, Ю.М. Третьяков. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 592 с.

108. Спейшер, В.А. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках / В.А. Спейшер, А.Д. Горбаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1982. – 240 с.

109. Шницер, И.Н. Исследование топочного процесса при сжигании непроектного антрацита отдельно и совместно с газом / И.Н. Шницер // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 16–22.
110. Шницер, И.Н. Образование и снижение содержания окислов азота в пылеугольных котлах / И.Н. Шницер, В.В. Литовкин. – Киев: Техника, 1986. – 224 с.
111. Сидельковский, Л.Н. Парогенераторы промышленных предприятий / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренев. – М.: Энергия, 1978. – 336 с.
112. Алгоритм и программа зонального расчета теплообмена в топочных камерах паровых котлов / Э.С. Карасина, З.Х. Шраго, Т.С. Александрова, С.Е. Боревская // Теплоэнергетика. – 1982. – № 7. – С. 42–47.
113. Бабий, В.И. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / В.И. Бабий, Ю.Ф. Куваев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 210 с.
114. Осинцев, В.В. Аэродинамика и температурные поля газоходов пылеугольных котлов / В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 1989. – № 11. – С. 46–49.
115. Influence of the secondary air-box damper opening on airflow and combustion characteristics of a down-fired 300-MWe utility boiler / F. Ren, Z.-Q. Li, Y.-B. Zhang, et al. // Energy & Fuels. – 2007. – № 21 (2). – P. 668 – 676.
116. Influence of vent air valve opening on combustion characteristics of a down-fired pulverized-coal 300-MWe utility boiler / Z.-Q. Li, F. Ren, J. Zhang, et al. // Fuel. – 2007. – № 86 (15). – 2457 – 2462.
117. Influence of the adjustable vane position on the flow and combustion characteristics of a down-fired pulverized-coal 300 MWe utility boiler / F. Ren, Z.-Q. Li, J.-P. Jing, et al. // Fuel Processing Technology. – 2008. – № 89 (12). – P. 1297 – 1305.
118. Study on coal combustion characteristics in aW-shaped boiler furnace / J.-R. Fan, X.-D. Zha, K.-F. Cen // Fuel. – 2001. – № 80. – P. 373 – 381.
119. Итоги испытаний котла П-49 блока 500 МВт после реконструкции. / Е.А. Болдычев, В.Н. Точилкин, В.В. Лисицин и др. // Электрические станции. – 1986. – № 5. – С. 56–59.
120. Совершенствование методов снижения температурных неравномерностей

в топках с фронтальной компоновкой горелок / В.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов и др. // Теплоэнергетика. – 1990. – № 4. – С. 23–30.

121. Освоение и исследование опытно-промышленного котла БКЗ-500-140-1 с тангенциальной топкой для низкотемпературного сжигания канско-ачинских углей / М.Я. Процайло, Ю.Л. Маршак, М.С. Пронин и др. // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 5–12.

122. Структура факела в тангенциальной топочной камере котла БКЗ-500-140-1 при сжигании березовского и ирша-бородинского углей / В.Г. Мещеряков, В.Н. Верзаков, Ю.Л. Маршак и др. // Теплоэнергетика. – 1989. – № 8. – С. 13–19.

123. Энергетические угли восточной части России и Казахстана / В.В. Богомолов, Н.В. Артемьева, А.Н. Алехнович и др. – Челябинск: УралиВТИ, 2004. – 304 с.

124. Further study of the gas temperature deviation in large-scale tangentially coal-fired boilers / Chunggen Yin, Lasse Rosendahl, Thomas J. Condra // Fuel. – 2003. – № 82. – p. 1127 – 1137.

125. Deduction of the two-dimensional distribution of temperature in a cross section of a boiler furnace from images of flame radiation / Chun Lou, Huai-Chun Zhou // Combustion and Flame. – 2005. – № 143. – p. 97 – 105.

126. Доброхотов, В.И. Основные направления в развитии котельной техники на ближайшую перспективу / В.И. Доброхотов // Теплоэнергетика. – 1975. – № 9. – С. 2–4.

127. Локшин, В.А. О температурных неравномерностях в поворотных газоходах парогенераторов / В.А. Локшин, В.Г. Лисовой // Теплоэнергетика. – 1975. – № 10. – С. 45–47.

128. Чебулаев, В.В. Уменьшение тепловых разверок в промперегревателе котла ПК-24 изменением его гидравлической характеристики / В.В. Чебулаев, В.Д. Бараненко // Теплоэнергетика. – 1970. – № 11. – С. 51–54.

129. Исследование температурного режима и усовершенствование конструкций ширмовых пароперегревателей мощных паровых котлов / В.А. Локшин, В.В. Чебулаев, В.Г. Лисовой и др. // Теплоэнергетика. – 1972. – № 3. – С. 20–25.

130. Петренко, А.Я. Исследование аэродинамики топочной камеры котла БКЗ-670-140 при отключении одной или нескольких горелок на изотермической модели / А.Я. Петренко, А.М. Хидиятов // Повышение надежности и экономичности блоков: Труды ВТИ, Уральский филиал. – Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1976. – Вып. 12. – С. 34–37.

131. Исследование рециркуляции газов на котлах ТПП-200 Славянской ГРЭС / Г.Н. Кемельман, В.Н. Палей, Н.И. Резник и др. // Теплоэнергетика. – 1972. – № 7. – С. 52–56.

132. Шатиль, А.А. Расчетная оценка устойчивости факельного горения твердых топлив в топках котлов / А.А. Шатиль, Е.К. Чавчанидзе // Теплоэнергетика. – 1990. – № 4. – С. 2–6.

133. Мотин, Г.И. Исследование аэродинамики топочных устройств на гидро-моделях / Г.И. Мотин, И.Л. Шрадер, А.Л. Шрадер // Теплоэнергетика. – 1978. – № 8. – С. 17–21.

134. Итман, Д.Л. Расчетная оценка эффективности применения двухсветных экранов в топочных камерах мощных паровых котлов / Д.Л. Итман, В.Б. Дуб // Теплоэнергетика. – 1980. – № 12. – С. 23–25.

135. Деев, Л.В. Исследование рециркуляции газов в верхнюю часть топки / Л.В. Деев, В.И. Рогов // Труды МЭИ: «Эффективность и надежность работы парогенераторов». – М.: МЭИ, 1979. – Вып. 396. – С. 9–14.

136. Ковалев, А.П. Сжигание фрезерного торфа в системе плоских параллельных струй в шахтно-мельничных топках / А.П. Ковалев, Д.М. Хзмалян. – М.: Энергия, 1964. – 68 с.

137. Повышение бесшлаковочной мощности котлоагрегата на подмосковном угле / В.А. Крыжановский, Г.Н. Чаленко, Л.В. Деев и др. // Теплоэнергетика. – 1964. – № 4. – С. 2–5.

138. Виленский, Т.В. Динамика горения пылевидного топлива / Т.В. Виленский, Д.М. Хзмалян. – М.: Энергия, 1978. – 246 с.

139. Регулирование оксидов азота вводом аммиака в продукты сгорания /

П.В. Росляков, В.А. Двойнишников, А.В. Буркова, Е.Н. Степанова // Теплоэнергетика. – 1989. – № 9. – С. 43–48.

140. К вопросу повышения эффективности работы пылеугольных плоскофакельных горелок / В.И. Черняев, Т.В. Виленский, В.А. Двойнишников, А.В. Кузьмин // Теплоэнергетика. – 1980. – № 4. – С. 17–19.

141. Изюмов, М.А. Аэродинамика системы встречно-смещенных струй / М.А. Изюмов, В.И. Черняев // Труды МЭИ: «Эффективность и надежность работы парогенераторов». – М.: МЭИ, 1972. – Вып. 150. – С. 76–86.

142. Двойнишников, В.А. Расчетная оценка влияния неравномерности температурных и скоростных полей газовой среды на тепловосприятие конвективных поверхностей нагрева котла / В.А. Двойнишников, В.П. Князьков, Е.С. Чубенко // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 24–29.

143. Организация топочного процесса в замещающем котле энергоблока 300 МВт Новочеркасской ГРЭС при сжигании смеси антрацитового штыба с природным газом / В.А. Двойнишников, В.П. Князьков, В.А. Галков, А.Н. Безгрешнов, Г.И. Калмыков, В.И. Якшов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 10 – 14.

144. Влияние начальных условий на воспламенение и выгорание пыли антрацитового штыба при сжигании ее с природным газом / В.А. Двойнишников, В.П. Князьков, И.А. Гамазков, А.Н. Безгрешнов, Н.В. Усиков, В.И. Якшов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 18 – 22.

145. Росляков, П.В. Нестехиометрическое сжигание природного газа и мазута на тепловых электростанциях / П.В. Росляков, И.А. Закиров. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 144 с.

146. Контроль вредных выбросов ТЭС в атмосферу: учебное пособие для вузов по специальности 101300 «Котло- и реакторостроение», специальности 100500 «Тепловые электрические станции» / под ред. П.В. Рослякова. – М.: Издательство МЭИ, 2004. – 226 с.

147. Росляков, П.В. Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов по направлению 140500 «Энергомашиностроение» / П.В. Росляков. – М.: Издатель-

ский дом МЭИ, 2007. – 334 с.

148. Росляков, П.В. Эффективное сжигание топлив с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, К.А. Плешанов // Теплоэнергетика. – 2009. – № 1. – С. 20 – 23.

149. Roslyakov, P.V. Effect of the main characteristics of an active burning zone on the nitrogen oxide yield / P.V. Roslyakov, L.E. Egorova // Теплоэнергетика. – 1996. – № 9. – С. 22 – 26.

150. Исследование возможности перевода котлов ТП-92 Яйвинской ГРЭС на непроектные виды углей / М.А. Изюмов, В.М. Супранов, П.В. Росляков, А.В. Новиков // Теплоэнергетика. – 2008. – № 9. – С. 7 – 18.

151. Roslyakov, P.V. Technique for calculation of nitrogen oxide effluents by steam and water gas-oil-burning boilers / P.V. Roslyakov, L.E. Egorova // Теплоэнергетика. – 1997. – № 4. – С. 67 – 74.

152. Исследование неравномерности полей концентрации веществ в газовом тракте котельных установок / П.В. Росляков, И.А. Закиров, И.Л. Ионкин, Л.Е. Егорова // Теплоэнергетика. – 2006. – № 5. – С. 10 – 16.

153. Исследование на изотермических моделях и огневом стенде особенностей аэродинамики, теплообмена и выгорания топлива в кольцевых топках. Горение органического топлива / Ф.А. Серант, Б.П. Устименко, В.Н. Змейков и др. // Материалы V Всесоюзной конференции. – Новосибирск, 1985. – Ч. 1. – С. 34–39.

154. Трёмбовля, В.И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – М.: Энергия, 1977. – 297 с.

155. Итоги испытаний котла П-49 блока 500 МВт после реконструкции. / Е.А. Болдычев, В.Н. Точилкин, В.В. Лисицин и др. // Электрические станции. – 1986. – № 5. – С. 56–59.

156. Новый способ сжигания зольных топлив в циркулирующем кипящем слое – основа экологически чистой работы ТЭС // Э.П. Волков, А.Ф. Гаврилов, Е.И. Гаврилов и др. // Теплоэнергетика. – 1989. – № 3. – С. 37–42.

157. Волков, Э.П. Проблемы использования низкосортных топлив в работах

ЭНИН им. Кржижановского / Э.П. Волков // Электрические станции. – 1989. – № 8 – С. 56–59.

158. Ступенчатое сжигание пыли кузнецкого угля на котлах ПК-40 с жидким шлакоудалением / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев и др. // Электрические станции. – 1989. – № 11. – С. 46–49.

159. Повышение эффективности использования технологии ступенчатого сжигания пыли кузнецкого угля на котлах ПК-40 с жидким шлакоудалением / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, О.В. Дронов и др. // Электрические станции. – 1995. – № 9. – С. 37–44.

160. Устименко, Б.П. Огневое моделирование пылеугольных топок / Б.П. Устименко, Б.К. Алияров, Е.К. Абубакиров. – Алма-Ата: Наука, 1982. – 212 с.

161. Темирбаев, Д.Ж. Исследование слабонеизотермических моделей рециркуляции газов в верхнюю часть топочных камер мощных парогенераторов / Д.Ж. Темирбаев, Ю.Б. Белиловский // Теплоэнергетика. – 1977. – № 3. – С. 11–15.

162. Устименко, Б.П. Численное моделирование аэродинамики и горения в топочных и технологических установках / Б.П. Устименко, К.Б. Джакулов, В.О. Кроль. – Алма-Ата: Наука, 1986. – 221 с.

163. Ахмедов, Р.Б. Основы регулирования топочных процессов / Р.Б. Ахмедов. – М.: Энергия, 1977. – 280 с.

164. Цирульников, Л.М. Уменьшение окислов азота путем впрыска воды при сжигании природного газа в топке котла ТГМП-114 / Л.М. Цирульников, К.З. Закиров, Р.А. Айрих // Электрические станции. – 1985. – № 9. – С. 15–18.

165. Эффективность некоторых способов снижения выбросов оксидов азота при сжигании природного газа в котлах энергоблоков 300 МВт / Л.М. Цирульников, М.Н. Нурмухамедов, Ю.Е. Миненков и др. // Теплоэнергетика. – 1986. – № 9. – С. 34–38.

166. Перевод котла БКЗ-220 на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // Электрические станции. – 1991. – № 11. – С. 17–22.

167. Перевод котла БКЗ-160 на технологию ступенчатого сжигания топлива / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.Я. Гигин и др. // Электрические станции. – 1993. – № 3. – С. 25–29.
168. Джундубаев, А.К. Оценка влияния влагосодержания на устойчивость воспламенения кавакского бурого угля / А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 61–64.
169. Осинцев, В.В. Анализ тепловой устойчивости факельного сжигания углей Киргизии / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов / Известия Академии Наук Киргизской ССР. – 1989. – № 1. – С. 56–64.
170. Перевод котла БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 на технологию сжигания природного газа с отдельным тангенциальным вводом реагентов в топку / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Г.Ф. Кузнецов и др. // Электрические станции. – 1994. – № 7. – С. 12–17.
171. Резник, Н.И. Рециркуляция газов как метод уменьшения тепловой неравномерности / Н.И. Резник, Д.И. Парпаров // Теплоэнергетика. – 1971. – № 11. – С. 34–36.
172. Резник, Н.И. Расчётная оценка коэффициентов неравномерности тепловосприятия в конвективных пароперегревателях газомазутных парогенераторов / Н.И. Резник, Д.Б. Литвак // Теплоэнергетика. – 1975. – № 10. – С. 41–43.
173. Исследование тепловых неравномерностей в пароперегревателе котельного агрегата ТП-81 / А.В. Змачинский, Л.М. Христинич, Н.И. Резник и др. // Теплоэнергетика. – 1979. – № 10. – С. 42–44.
174. Производство тепла в энергетических котлах / А.У. Липец, С.М. Кузнецова, Л.В. Дирина, Д.М. Бурняцкий // Энергетик. – 1981 – № 10. – С. 14–17.
175. Разработка проекта парового котла к энергоблоку 500 МВт / В.Г. Овчар, И.А. Сотников, Х.К. Айзен, Е.В. Петров // Теплоэнергетика. – 1980. – № 5. – С. 32–35.

176. Литенецкий, В.Я. Некоторые соображения по типу и компоновке вихревых пылеугольных горелок / В.Я. Литенецкий // Труды Алтайского ПИ «Вопросы сжигания топлив в парогенераторах». – Барнаул, 1975. – Вып. 48. – С. 40–47.

177. Литенецкий, В.Я. Вихревая горелка БКЗ с лопаточными завихрителями / В.Я. Литенецкий, С.Ю. Соболевский, А.П. Упоров // Энергомашиностроение. – 1972. – № 5. – С. 22–25.

178. Сжигание немолотых азейских бурых углей в низкотемпературной вихревой топке по схеме ЛПИ на ИТЭЦ-10 / Ф.А. Серант, С.М. Шестаков, В.В. Померанцев и др. // Теплоэнергетика. – 1983. – № 7. – С. 35–41.

179. Освоение и исследование котла БКЗ-420-140-9 с вихревой топкой ЛПИ / Ю.А. Рундыгин, С.М. Шестаков, Д.Б. Ахметов и др. // Теплоэнергетика. – 1988. – №1. – С. 12 – 16.

180. Горб, И.Э. Коэффициент тепловой эффективности экранов в низкотемпературных вихревых топках / И.Э. Горб, Д.Б. Ахмедов / Теплоэнергетика. – 1989. – № 10. – С. 34–37.

181. Влияние температур продуктов сгорания мазута на коррозионную стойкость котельных сталей / И.П. Эпик, А.А. Отс, Я.П. Лайд и др. / Теплоэнергетика. – 1979. – № 3. – С. 29–33.

182. Arro, H., Loosaar, J., Ots, A., Pihu, T., Prikk, A., Rushelijuk, P., Hiltunen, M., Hotta, A., Parkkonen, R., Peltola K. Firing Estonian oil shale in CFB boilers // Proc. 19th FBC conference, Part II, Session E, Vienna, Austria, May 21-24 2006.

183. Ots, A. Ash Fouling of Boiler Tubes and Thermophysical Properties of Deposits. In: Advances in Heat Transfer: Proceedings of the 5th Baltic Heat Transfer Conference: 5th Baltic heat Transfer Conference. St. Petersburg (Russia), September 19-21, 2007. (Toim.) Fedorovich, E.; Sunden, B. St. Petersburg: St. Petersburg State Politechnical niversity Publishing House, 2007, (I), 323 – 339.

184. Баскаков, А.П. Исследование динамики выгорания ирша-бородинского бурого угля в низкотемпературном псевдо-сжиженном слое / А.П. Баскаков, А.А. Ашихман, В.А. Мунц // Проблемы тепло- и массопереноса в топочных уст-

ройствах, газогенераторах и химических реакторах. – Минск, 1983. – С. 123–126.

185. Геометрические характеристики структурных образований в газовом факеле, созданном аксиальным завихрителем / Б.В. Берг, А.Н. Шуба, Д.И. Токарев, Б.П. Жилкин // Проблемы энергетики. – №7–8. – Казань, 2000. – С. 34–38.

186. Берг, Б.В. Технология растопки пылеугольных котлов, обеспечивающая снижение расхода мазута и природного газа на 1-2 порядка / Б.В. Берг, А. Батхисиг, В.А. Микула // Вестник Уральского государственного технического университета – УПИ. – № 3 (18). – Екатеринбург, 2002. – С. 20–26.

187. Field, M.A., Grill, D.W., Morgan, B.B., et al., Combustion of pulverized coal, The British Coal Utilization Research Association, Leatherhead, Surrey, England, United Kingdom, 1967.

188. Crowe, C.T., Smoot, L.D., Pratt, D.T., Eds., “Gas particle flow,” Pulverized coal combustion and gasification, Plenum Press, New York, New York, 1979.

189. Spalding, D. B., “Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames,” proceedings of the 13th international symposium on combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pennsylvania, 1971.

190. Grant, D. M., Pugmire, R. J., Fletcher, T. H., et al., “A chemical model of coal devolatilization using percolation lattice statistics,” Energy and fuels, Vol. 3, p. 175, 1989.

191. Fletcher, T. H., Kerstein, A. R., Pugmire, R. J., et al., “A Chemical Percolation Model for Devolatilization: Milestone Report,” Sandia report SAND92-8207, available National Technical Information Service, May, 1992.

192. Perry, S., “A global free-radical mechanism for nitrogen release during devolatilization based on coal chemical structure,” Ph.D. dissertation for the Department of Chemical Engineering, Brigham Young University, Provo, Utah, United States, 1999.

193. Schneider, A. Korrosionen und Beschädigungen auf Reingasseite von Dampferzeugern / A. Schneider. – Mittverein. Grobkesselbesitzer, 1967. – № 109. – P. 232–245.
194. Komo, G. Planung der Kesselanlagen der 600 – MW – Bloke kraftwerkes Niderauben / G. Komo. – Braunkohle, 1972. – 24. – № 4. – P. 118–126.
195. Altman, W. Stromungsvorgänge in Feuerungs – Systemen von Braunkohle / W. Altman, A. Apel, W. Pasher. – Dampfer – Zeugern – Energietechnik, 1976. – 26. – № 6. – P. 240–247.
196. Ledienegg, M. Temperaturverteilung in Flammen / M. Ledienegg. – Mitt. VGB, 1972. – №2. – P. 127–135.
197. Müller, R. Ecken – und Frontfeuerung / R. Müller, H. Trenkler – Mitt. VGB, 1957. – № 47. – P. 87–94.
198. Hegemann, J. Einfluss des Druckes der Dampf temperatur und Zwischenüberhitzung auf die Kessel Konstruktion / J. Hegemann. – Mitt. VGB, 1957. – № 50. – P. 293 – 310.
199. Flame temperature distribution in a pool-fire / Eulàlia Planas-Cuchi, Joaquim Casal // Journal of Hazardous Materials. – 1998. – № 62. – P. 231 – 241.
200. Characteristics and structure of inverse flames of natural gas / Andrzej Sobiesiak, Jamie C. Wenzell // Proceedings of the Combustion Institute. – 2005. – № 30. – P. 743 – 749.
201. Энерго-экологические проблемы сжигания твёрдого топлива в котельных установках / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Е.В. Торопов и др. – Челябинск: Изд. ЧГТУ, 1995. – 192 с.
202. Аэродинамика поворотных газоходов котлов ПК-57 и ПК-57Р / В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов, Е.В. Петров, И.А. Сотников // Сборник научных трудов ВТИ «Надежность и экономичность работы котельного оборудования при сжигании экибастузских углей». – Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1985. – С. 56–63.

203. Влияние технологии сжигания топлива и конструкции котлоагрегатов на эмиссию оксидов азота / Е.В. Торопов, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Г.Ф. Кузнецов // Проблемы экологии Южного Урала. – 1995. – № 2. – С. 16–19.

204. Комбинированное сжигание природного газа и пыли челябинского угля в вихревых горелках / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Н.М. Щапин и др. // Электрические станции. – 1987. – № 6. – С. 23–28.

205. Осинцев, В.В. Анализ тепловых неравномерностей газов в топках парогенераторов / В.В. Осинцев, В.В. Осинцев // Научные труды МЭИ «Повышение эффективности и надежности работы парогенераторов». Межвузовский сборник. – М.: МЭИ. 1983. – Вып. 15. – С. 80–86.

206. Осинцев, В.В. Повышение эффективности рационального теплообмена в топках с плотным факелом / В.В. Осинцев // Сборник научных трудов ВТИ «Надежность и экономичность работы котельного оборудования при сжигании экибастузских углей». – Челябинск: Южно-Уральское книжное издательство, 1985. – С. 56 – 63.

207. Исследование на огневой модели рециркуляции газов в верх тангенциальной топочной камеры / Э.Х. Вербовецкий, В.В. Осинцев, В.Н. Точилкин и др. // Труды симпозиума по исследованию новых методов подготовки и сжигания низкокалорийных топлив. – Варна, 1980. – С. 55–63.

208. Исследование на огневой модели аэродинамики и рециркуляции газов в верх топочной камеры котла П-67 / Э.Х. Вербовецкий, В.Н. Точилкин, В.В. Осинцев и др. // Теплоэнергетика. – 1981. – № 7. – С. 18–24.

209. Осинцев, В.В. Оптимизация сжигания природного газа и пыли челябинского бурого угля на котлах с фронтальной компоновкой мельниц / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Е.В. Торопов // Известия ВУЗов: Энергетика. – 1993. – № 5–6. – С. 77–85.

210. Анализ эффективности сжигания природного газа и бурого угля ухудшенного качества на котлах БКЗ-210-140Ф Челябинской ТЭЦ-2 / В.В. Осинцев,

Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Электрические станции. – 2001. – № 6. – С. 26–34.

211. Особенности и организация факельного процесса в топке с многофункциональными горелками / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Электрические станции. – 2002. – № 11. – С. 14–19.

212. Анализ результатов опытного сжигания высокорекреационного бурого угля на котле БКЗ-210-140Ф / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Теплоэнергетика. – 2003. – № 8. – С. 27–32.

213. Совершенствование систем совместного сжигания пыли челябинского угля и природного газа на котлах ЦКТИ-75 / В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов, А.П. Лысов, Н.Ф. Жернаков // Промышленная энергетика. – 1991. – № 5. – С. 13–16.

214. Осинцев, В.В. Совершенствование технологии сжигания органического топлива на котлах Челябинской ТЭЦ-2 / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов, В.В. Петров, М.П. Сухарев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2002. – 147 с.

215. Совершенствование методов снижения температурных неравномерностей в топках с фронтальной компоновкой горелок / В.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов и др. // Теплоэнергетика. – 1990. – №4. – С. 23 – 26.

216. Результаты испытаний и совершенствование парового котла производительностью 58,3кг/с с газогенератором твердого топлива / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, М.П. Сухарев // Теплоэнергетика. – 2002. – №5. – С.36–41.

217. А. с. 1218246 СССР, МКИ⁴ F 23 C 9/08. Вертикальная призматическая топка / В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов, Ю.Л. Маршак, В.Б. Галускин, И.А. Сотников, Н.Н. Кузменков, Ф.А. Серант, В.Н. Точилкин, Е.В. Петров (СССР). – № 3839143/24–06 ; заявл. 14.01.85 ; опубл. 15.03.86, Бюл. № 10. – 2 с. : 5 ил.

218. А. с. 1059344 СССР, МКИ³ F 25 C 7/02. Топка / В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов, И.А. Сотников, Е.В. Петров (СССР). – № 3507392/24–06 ; заявл. 27.10.82 ; опубл. 07.12.83, Бюл. № 45. – 3 с. : 4 ил.

219. Пат. 2228491 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 D 17/00. Многофункциональная горелка / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Петров В.В., Сухарев М.П., Муд-

рых Б.А., Сабельфельд В.А., Стародубцев В.В. – № 2003110836/06; заявл. 15.04.03; опубл. 10.05.2004, Бюл. № 13. – 6 с.

220. Пат. 2076998 Российская Федерация, МПК⁷, С 1 F23С 1/12. Способ работы вертикальной четырехгранной топки для совместного сжигания газообразного и пылевидного топлива / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Петров, В.В. Воронин, М.П. Сухарев; заявители и патентообладатели «Челябинская ТЭЦ-2» и «Челябинский государственный технический университет». – № 95103214/06; заявл. 07.03.95; опубл. 10.04.97, Бюл. № 10. – 10 с.: 4 ил.

221. Пат. 2143084 Российская Федерация, МПК⁷, С 1 F23С 1/12. Способ комбинированного сжигания, природного газа, угольной пыли и газообразных продуктов термохимической переработки угля / В.В. Осинцев, Г.Ф. Кузнецов, В.В. Воронин, В.В. Петров, М.П. Сухарев; заявители и патентообладатели «Южно-Уральский государственный университет», «Челябинская теплоэлектростанция № 2». – № 99103155/06; заявл. 16.02.99; опубл. 20.12.99, Бюл. № 35. – 15 с.: 10 ил.

222. Сжигание челябинского угля, природного, коксового и доменного газов в котлах ПК-14 ТЭЦ металлургического комбината / В.В. Осинцев, В.В. Осинцев, В.И. Кузин и др. // Промышленная теплоэнергетика. – 1989. – № 12. – С. 3–7.

223. Осинцев, В.В. Сжигание пыли челябинского угля на котле ПК-14 в условиях одноступенчатого и многоступенчатого ввода воздуха в топку / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Е.В. Торопов // Известия вузов: Энергетика. – 1992. – № 2. – С. 78–84.

224. Osintsev, K.V. Studying flame combustion of coal–water slurries in the furnaces of power-generating boilers / K.V. Osintsev // Thermal engineering. – 2012. – V. 59, № 6. – P. 439 – 445.

225. Osintsev, K.V. Low-temperature combustion of coal and coal wastes of different plants / K.V. Osintsev // Successful R&D in Europe: 4th European Networking Event. – http://www.frp.nrw.de/frp2/_dld/va/v619/S2_Energy_6_Osintsev%20-%20Combustion%20of%20Coal.pdf.

226. Улучшение процесса сжигания топлива на котлах БКЗ-210-140Ф / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Электрические станции. – 2006. – № 11. – С. 13 – 20.

227. Осинцев, К.В. Учет неоднородности и нестабильности тепловой структуры топчного факела при использовании многофункциональных горелок / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2007. – № 6. – С. 66 – 70.

228. Перевод оборудования ТЭС на факельное сжигание разнородных топлив с использованием технологии рассредоточенного ввода реагентов в топку / Осинцев К.В., Сухарев М.П., Торопов Е.В., Осинцев В.В. // Теплоэнергетика. – 2008. – № 4. – С. 75 – 79.

229. Осинцев, К.В. Способ снижения теплового потока в направлении горелочных амбразур / Осинцев К.В. // Электрические станции. – 2009. – № 11. – С. 13 – 17.

230. Осинцев, К.В. Классификация и анализ эффективности методов низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли на котлах / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2010. – Вып. 14 – № 32 (208). – С. 20 – 27.

231. Сжигание природного газа в слабоэкранированной топке котла Бабкок-Вилькокс с подовыми горелками / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Сухарев М.П., Пашнин С.В., Окунев А.П., Сабельфельд В.А. // Электрические станции. – 2010. – № 6. – С. 8 – 14.

232. Осинцев, К.В. Повышение надежности топки и дымоотводящих элементов котла Бабкок-Вилькокс при сжигании природного газа в подовых щелевых горелках / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2010. – № 4. – С. 2 – 8.

233. Осинцев, К.В. Организация низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли на котлах / К.В. Осинцев // Тяжелое машиностроение. – 2010. – № 12. – С. 15 – 19.

234. Управление тепловой структурой факела в топках котлов БКЗ-210-140Ф с одноярусной фронтальной компоновкой многофункциональных горелок при сжи-

гании разнородного топлива / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 14–23.

235. Получение активного угля в аппаратах периодического действия на ТЭС / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № . – С. – .

236. Осинцев, К.В. Настройка параметров низкотемпературного топочного факела с топливным реагентом переменного состава / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Компьютерные технологии, управление и радиоэлектроника». – 2012. – Вып. 17 – № 35. – С. 50 – 54.

237. Осинцев, В.В. Применение многофункциональных горелок в технологии факельного сжигания газа и пыли угля с различными составом и свойствами на котлах Челябинской ТЭЦ-2 / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8 –10 ноября 2006 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч. 2. – С. 142 – 150.

238. Осинцев, В.В. Утилизация углеродосодержащих отходов в полидисперсном и газовом факелах многофункциональных горелок / В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Г.Ф. Кузнецов, Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8 – 10 ноября 2006 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч. 2. – С. 150 – 157.

239. Осинцев, В.В. Особенности термогазодинамики факельных топок с расщедоточенным вводом топливных и окислительных потоков / В.В. Осинцев, К.В. Осинцев // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8 – 10 ноября 2006 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч. 2. – С. 135 – 142.

240. Осинцев, К.В. Термогазодинамические особенности начального участка газового факела при расщедоточенном вводе реагентных потоков в топку через горелки / К.В. Осинцев // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетике

ческих установках: труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под рук. акад. РАН А.И. Леонтьева: сб. докл. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГПУ, 2007. – Том I. – С. 253 – 254.

241. Осинцев, К.В. Учет термогазодинамических особенностей полидисперсного факела при проектировании топок / К.В. Осинцев, Е.В. Торопов // Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов: Сборник докладов IV научно-практической конференции: сб. докл. – Челябинск: Изд-во ООО «Тираж сервис», 2007. – Том II. – С. 86 – 88.

242. Осинцев, К.В. Особенности и экологическое совершенствование факельных технологий сжигания газа на котлах тепловых электростанций / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2007. – Вып. 8 – № 20 (92). – С. 10 – 12.

243. Осинцев, К.В. Повышение срока службы горелочных устройств на котлах средней мощности при факельном сжигании природного газа / К.В. Осинцев, Е.В. Торопов // Проблемы теплоэнергетики: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: сб. докл. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 54 – 55.

244. Осинцев, К.В. Расчет характеристик начального участка полидисперсного факела при фронтальном прямоточном вводе реагентов в топку / К.В. Осинцев // Тепловые процессы в технике. – 2009. – № 9. – Том 1. – С. 379 – 382.

245. Osintsev, K.V. Operation principles of control process of heat generation and activation kyrgyz coals on CHP / Osintsev K.V. // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. # 8602604.

246. Osintsev, K.V. Automatic flare control based on the mathematical model of ignition of the initial section of combustion / Osintsev K.V. // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. # 8602762.

247. Пат. 2615241 Российская Федерация, МПК⁷ С1. Способ получения активного фракционированного угля в камере на решетке / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Бийбосунов А.И., Богаткин В.И. – № 2015154912; заявл. 21.12.2015; опубл. 04.04.2017.

248. Пат. 2499035 Российская Федерация, МПК⁷ С1. Способ активирования угольных частиц в вертикальной осесимметричной кольцевой камере Осинцев К.В., Осинцев В.В., Торопов Е.В., Джундубаев А.К., Акбаев Т.А., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Богаткин В.И. – № 2012146764/04; заявлено. 01.11.2012; опубл. 20.11.2013.

249. Пат. 2499189 Российская Федерация, МПК⁷ С1. Способ и установка активирования фракционированных по размеру частиц порошкообразного угля Осинцев К.В., Осинцев В.В., Торопов Е.В., Джундубаев А.К., Акбаев Т.А., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Богаткин В.И. – № 2012123081/04; заявл. 04.06.2012; опубл. 20.11.2013.

250. Пат. 2500617 Российская Федерация, МПК⁷ С1. Способ активирования фракционированных по размеру угольных частиц (варианты) Осинцев К.В., Осинцев В.В., Торопов Е.В., Джундубаев А.К., Акбаев Т.А., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Богаткин В.И. – № 2012123086/05; заявл. 04.06.2012; опубл. 10.12.2013.

251. Пат. 2500953 Российская Федерация, МПК⁷ С1. Способ активирования порошкообразного угля в вертикальной четырехгранной призматической топке Осинцев К.В., Осинцев В.В., Торопов Е.В., Джундубаев А.К., Акбаев Т.А., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Богаткин В.И. – № 2012123084/06; заявл. 04.06.2012; опубл. 10.12.2013.

252. Пат. 2500954 Российская Федерация, МПК⁷ С1. Многофункциональное топочное устройство Осинцев К.В., Осинцев В.В., Торопов Е.В., Джундубаев А.К., Акбаев Т.А., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Богаткин В.И. – № 2012123082/06; заявл. 04.06.2012; опубл. 10.12.2013.

253. Пат. 2502921 Российская Федерация, МПК⁷ С1. Способ работы вертикальной призматической топки Осинцев К.В., Осинцев В.В., Торопов Е.В., Джундубаев А.К., Акбаев Т.А., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Богаткин В.И. – № 2012123087/06; заявл. 04.06.2012; опубл. 27.12.2013.

254. Осинцев, К.В. Получение активированного угля с использованием оборудования ТЭС и котельных / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Акбаев Т.А., Богаткин В.И. // Теплоэнергетика. 2013. № 8. С. 57-64.

255. Осинцев, К.В. Перспективы получения на ТЭС активных углей / Осинцев К.В. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2013. Т. 13. № 2. С. 5-13.

256. Осинцев, К.В. Активирование угля в топке с механической решеткой / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Акбаев Т.А., Богаткин В.И. // Промышленная энергетика. 2012. № 7. С. 28-31.

257. Осинцев, К.В. Управление параметрами топочного факела при комбинировании выработки теплоты и теплопереработки топливосодержащих материалов / Осинцев К.В. // Промышленная энергетика. 2012. № 8. С. 38-43.

258. Осинцев, К.В. Организация низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли и природного газа на котлах с пассивированием воспалительного процесса: монография / К.В. Осинцев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, ООО «Издательство РЕКПОЛ», 2010. – 227 с.

259. Пат. 2303194 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 5/28. Топка / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В., Осинцев К.В. – №2006111936/06; заявл. 10.04.06; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. – 6 с.

260. Пат. 2303193 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 1/12. Способ ступенчатого сжигания газа в вертикальной призматической четырехгранной камере сгорания / Осинцев В.В., Полевин А.В., Кузнецов Г.Ф., Торопов Е.В., Осинцев К.В. – № 2006111952/06; заявл. 10.04.06; опубл. 20.07.2007, Бюл. № 20. – 6 с.

261. Пат. 2306484 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 D 17/00, F 23 C 1/12. Способ работы многофункциональной горелки / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Сухарев М.П., Криницын Г.К., Мудрых Б.А., Стародубцев В.В., Осинцев К.В. – №2006121067/06; заявл.13.06.06; опубл.20.09.2007, Бюл. № 26. – 6 с.

262. Пат. 2306482 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 C 1/12, F 23 C 5/08. Горелочное устройство / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Сухарев М.П., Криницын Г.К., Мудрых Б.А., Стародубцев В.В., Осинцев К.В. – № 2006121027/06; заявл. 13.06.06; опубл. 20.09.2007, Бюл. № 26. – 6 с.

263. Пат. 2309332 Российская Федерация, МПК⁷ F 23 D 17/00. Многофункциональная горелка / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Сухарев М.П., Криницын Г.К., Мудрых Б.А., Стародубцев В.В., Осинцев К.В. – № 2006121028/06; заявл. 13.06.06; опубл. 27.10.2007, Бюл. № 30. – 9 с.

264. Пат. 2403497 Российская Федерация, МПК⁸ F 23 C 1/12. Четырехгранная призматическая топка с вертикальными стенами (варианты) / Осинцев В.В., Сухарев М.П., Пашнин С.В., Окунев А.П., Сабельфельд В.А. Торопов Е.В., Осинцев К.В. – № 2008140208/06; заявл. 09.10.08; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31. – 11 с.

265. Пат. 2370701 Российская Федерация, МПК⁸ F 23 C 5/32. Вертикальная призматическая топка и способ ее работы / Осинцев В.В., Торопов Е.В., Осинцев К.В.

266. Пат. 2412397 Российская Федерация. МПК⁸ F 23 C 1/12. Способ работы четырехгранной вертикальной топки с экранированными боковыми, задней и неэкранированной фронтальной стенами / Осинцев К.В. – № 2009133892/06; заявл. 09.09.09; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5. – 8 с.

267. Пат. 2425285 Российская Федерация, МПК⁸, F23C 1/12. Многокамерное топочное устройство / Осинцев В.В., Осинцев К.В., Торопов Е.В., Сухарев М.П., Пашнин С.В., Окунев А.П., Сабельфельд В.А. № 2010114551/06; заявл.12.04.2010; опубл. 27.07.2011, Бюл.21. – 7 с.

268. Пат. 2440535 Российская Федерация, МПК⁸, F23C 99/00. Горелка / Осинцев К.В., № 201026458/06; заявл.28.06.2010; опубл. 20.01.2012, Бюл.2. – 8 с.

269. Выбор технологии сжигания бурого угля на ТЭЦ г.Бишкек / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, В.И. Богаткин // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – №4. – С.36 – 39.

270. Осинцев, К.В. Регулирование параметров факела многофункциональных горелок в топках паровых котлов ТЭЦ г.Бишкек / К.В. Осинцев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – №.4 – С. 44 – 47.

271. Осинцев, К.В. Повышение надежности пылеугольных котлов ПК-33 при переводе на природный газ / К.В. Осинцев // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 16 – 20.

272. Осинцев, К.В. Автоматизация выбора параметров низкотемпературного топочного факела с топливным реагентом переменного состава / К.В. Осинцев // Тяжелое машиностроение. – 2012. – № 11 – 12. – С. 32 – 36.

273. Повышение эффективности сжигания твердого топлива на котлах БКЗ-220 и БКЗ-160 / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, В.И. Богаткин, А.К. Джундубаев, В.И. Васильева, Ш.У. Мавлянбеков, С.М. Закиров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17 – № 16 (275). – С. 120 – 127.

274. Осинцев, К.В. Сжигание различного по теплофизическим характеристикам твердого топлива в низкотемпературном факеле / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2011. – Вып. 16 – № 34 (251). – С. 4 – 7.

275. Осинцев, К.В. Управление параметрами топочного факела при комбинировании выработки теплоты и теплопереработки топливосодержащих материалов / К.В. Осинцев // Промышленная энергетика. – 2012. – № 8. – С. 38 – 43.

276. Активирование угля в топке с механической решеткой / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин // Промышленная энергетика. – 2012. – № 7. – С. 28 – 31.

277. Активирование угля в топке с фронтальным размещением многофункциональных горелок / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Т.А. Акба-

ев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 9. – С. 425 – 429.

278. Улучшение процесса сжигания угольной пыли на котлах ТЭЦ г.Бишкек / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, В.И. Богаткин, А.К. Джундубаев, В.И. Васильева, Ш.У. Мавлянбеков, С.М. Закиров // Тепловые процессы в технике. – 2012. – № 3. – С. 139 – 145.

279. Осинцев, К.В. Переход к низкотемпературному сжиганию топлива на котлах ТЭЦ г.Бишкек / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 8. – С. 1 – 6.

280. Осинцев, К.В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 6. – С. 21 – 27.

281. Giral, I. An augmented reduced mechanism for the reburning process / I. Giral, M.U. Alzueta // Fuel. – 2002. – № 81. – P. 2263 – 2275.

282. Controlling LOI from coal reburning in a coal-fired boiler / Hou-Peng Wan, Chyh-Sen Yang, B.R. Adams, S.L. Chen // Fuel. – 2008. – № 87. – P. 290 – 296.

283. Study of syngas co-firing and reburning in a coal fired boiler / К.-Т. Wu, H.T. Lee, C.I. Juch, H.P. Wan, H.S. Shim, B.R. Adams, S.L. Chen // Fuel. – 2004. – № 83. – P. 1991 – 2000.

284. Optimization of coal reburning in a 1 MW tangentially fired furnace / Sen Li, Tongmo Xu, Qulan Zhou, Houzhang Tan, Shien Hui, Hongli Hu // Fuel. – 2007. – № 86. – P. 1169 – 1175.

285. Efficient and cost effective reburning using common wastes as fuel and additives / Yaxin Su, Benson B. Gathitu, Wei-Yin Chen // Fuel. – 2010. – № 89. – P. 2569 – 2582.

286. Numerical simulations of the slagging characteristics in a down-fired, pulverized-coal boiler furnace / Qingyan Fang, Huajian Wang, Yan Wei, Lin Lei, Xuelong Duan, Huaichun Zhou // Fuel Processing Technology. – 2010. – № 91. – P. 88 – 96.

287. Study on coal combustion characteristics in a W-shaped boiler furnace / J.-R. Fan, X.-D. Zha, K.-F. Cen // Fuel. – 2001. – № 80. – P. 373 – 381.

288. Naganuma, H., Control of ash deposition in pulverized coal-fired boiler / H. Naganuma // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – № 32 (2). P. 2709 – 2716.
289. Shedding of ash deposits / A. Zbogar, F.J. Frandsen // Progress in Energy and Combustion Science. – 2008. – № 35 (1). P. 31 – 56.
290. Harding, N.S. Ash deposition impacts in the power industry / N.S. Harding // Fuel Processing Technology. – 2007. – № 88. P. 1082 – 1093.
291. Wigley, F. The effect of mineral additions on coal ash deposition / F. Wigley // Fuel Processing Technology. – 2007. – № 88. P. 1010 – 1016.
292. Wee, H.L. The effect of combustion conditions on mineral matter transformation and ash deposition in a utility boiler fired with a sub-bituminous coal / H.L. Wee, H.W. Wu // Proceedings of the Combustion Institute. – 2005. – № 30. – P. 2981 – 2989.
293. Zbogar, A. Heat transfer in ash deposits: a modelling tool-box / A. Zbogar, F.J. Frandsen // Progress in Energy and Combustion Science. – 2005. – № 31. P. 371 – 421.
294. The implication of mineral coalescence behaviour on ash formation and ash deposition during pulverized coal combustion / L. Yan, R.P. Gupta, T.F. Wall. // Fuel. – 2001. – № 80 (9). – P. 1333 – 1340.
295. Simulation of ash deposit in a pulverized coal-fired boiler / J.-R. Fan, X.-D. Zha, P. Sun, et al. // Fuel. – 2001. – № 80 (5). – P. 645 – 654.
296. You, C.-F. Effect of operation parameters on the slagging near swirl coal burner throat / C.-F. You, Y. Zhou // Energy and Fuels. – 2006. – № 20. P. 1855 – 1861.
297. Flexibility of a 300 MW arch firing boiler burning low quality coals / Fang Qing-yan, Zhou Huai-chun, Wang Hua-jian, Yao Bin, Zeng Han-cai // J China Univ Mining & Technol. – 2007. – № 17 (4). – P. 566 – 571.
298. Novel conceptual design of a supercritical pulverized coal boiler utilizing high temperature air combustion (HTAC) technology / Natalia Schaffel-Mancini, Marco Mancini, Andrzej Szlek, Roman Weber // Energy. – 2010. – № 35. – P. 2752 – 2760.

299. Experimental and numerical investigations on the interactions of volatile flame and char combustion of a coal particle / Juan Yu, Ming-chuan Zhang, Jian Zhang // Proceedings of the Combustion Institute. – 2009. – № 32. – P. 2037 – 2042.

300. Experimental investigation on NO_x emission and carbon burnout from a radially biased pulverized coal whirl burner / Shan Xue, Shi'en Hui, Taisheng Liu, Qulan Zhou, Tongmo Xu, Hongli Hu // Fuel Processing Technology. – 2009. – № 90. – P. 1142 – 1147.

301. Characteristic studies of NO_x formation reactions in low NO_x burners and conventional impeller less pulverized coal burner / E. An, J. Yu, J. Zhu, Y. Wang, G. Yan, B. Xiao, M. Shi, Q. Song, H. Zhou, D. Yang, Y. Chen // Power Engineering. – 2006. – № 26. – P. 784 – 789.

302. Numerical analysis of pulverized coal combustion characteristics using advanced low-NO_x burner / R. Kurose, H. Makino, A. Suzuki // Fuel. – 2004. – № 83. – P. 693 – 703.

303. Aerodynamics of an isolated slot-burner from a tangentially-fired boiler / J.T. Hart, J.A. Naser, P.J. Witt // Applied Mathematical Modelling. – 2009. – № 33. – P. 3756 – 3767.

304. Prediction of ignition behavior in a tangentially fired pulverized coal boiler using CFD / T. Asotani, T. Yamashita, H. Tominaga, Y. Uesugi, Y. Itaya, S. Mori // Fuel. – 2008. – № 87. – P. 482 – 490.

305. Numerical investigation of Solid Recovered Fuels' co-firing with brown coal in large scale boilers – Evaluation of different co-combustion modes / Michalis Agraniotis, Nikos Nikolopoulos, Aris Nikolopoulos, Panagiotis Grammelis, Emmanuel Kakaras // Fuel. – 2010. – № 89. – P. 3693 – 3709.

306. Characteristics and structure of inverse flames of natural gas / Andrzej Sobiesiak, Jamie C. Wenzell // Proceedings of the Combustion Institute. – 2005. – № 30. – P. 743 – 749.

307. Numerical investigation on the flow, combustion and NO_x emission characteristics in a 500 MWe tangentially fired pulverized-coal boiler / Choeng Ryul Choi a, Chang Nyung Kim // Fuel. – 2009. – № 88. – P. 1720 – 1731.

308. Кропп, Л.И. Актуальные проблемы нормирования и сокращения выбросов ТЭС / Л.И. Кропп, Л.И. Мамрукова // Теплоэнергетика. – 1989. – № 3. – С. 33–36.

309. Кропп, Л.И. Защита окружающей среды / Л.И. Кропп, В.Р. Котлер // Энергохозяйство за рубежом. – 1989. – № 2. – С. 12–17.

310. Котлер, В.Р. Ступенчатое сжигание – основной метод подавления оксидов азота на пылеугольных котлах / В.Р. Котлер // Теплоэнергетика. – 1989. – № 8. – С. 41–44.

311. Котлер, В.Р. Новый метод снижения выбросов оксидов азота на пылеугольных ТЭС Японии / В.Р. Котлер // Теплоэнергетика. – 1987. – № 5. – С. 72–73.

312. Сполдинг, Д.Б. Основы теории горения / Д.Б. Сполдинг. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 318 с.

313. Хзмалян, Д.М. Введение в теорию горения / Д.М. Хзмалян. – М.: Издательство МЭИ, 1953. – 133 с.

314. Вулис, Л.А. Тепловой режим горения / Л.А. Вулис. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1954. – 240 с.

315. Вулис, Л.А. Аэродинамика факела / Л.А. Вулис, Л.П. Ярин. – Л.: Энергия, 1978. – 216 с.

316. Вильямс, В.А. Теория горения / В.А. Вильямс. – М.: Наука, 1971. – 615 с.

317. Абрамович, Г.Н. Турбулентное смешение газовых струй / Г.Н. Абрамович, С.Ю. Крашенинников, А.Н. Секундов. – М.: Наука, 1974. – 272 с.

318. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Изд-во АН СССР, 1947. – 491 с.

319. Зельдович, Я.Б. Теория горения и детонация газов / Я.Б. Зельдович. – М. – Л.: Издательство АН СССР, 1944. – 72 с.

320. Хитрин, Л.Н. Физика горения и взрыва / Л.Н. Хитрин. – М.: Издательство МГУ, 1957. – 442 с.

321. Семенов, Н.Н. Тепловая теория горения и взрывов / Н.Н. Семенов // Успехи физических наук. – 1940. – Т. 23. – Вып.3. – С. 251–292.
322. Процесс воспламенения угольной пыли в одномерном пылевоздушном потоке / Д.М. Хзмалян, Т.В. Виленский, М.Л. Краснов и др. // Теплоэнергетика. – 1964. – № 6. – С. 85–87.
323. Исследование воспламенения одномерного пылевоздушного потока при наличии теплоотвода / Д.М. Хзмалян, Т.В. Виленский, М.Л. Краснов и др. // Теплоэнергетика. – 1964. – № 8. – С. 67–70.
324. Ковалев, А.П. Экспериментальное исследование воспламенения угольной пыли в пылевоздушном потоке / А.П. Ковалев, Д.М. Хзмалян, Т.В. Виленский // Теплоэнергетика. – 1965. – № 9. – С. 14–18.
325. Сборник методик по определению концентраций загрязняющих веществ в промышленных выбросах. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 112 с.
326. Штерн, Е.Н. Контрольный метод определения окислов азота в дымовых газах / Е.Н. Штерн. – М.: Союзтехэнерго, 1978. – 90 с.
327. Абрамович, Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: Физматгиз. 1960. – 715 с.
328. Гиневский, А.С. Теория турбулентных струй и следов / А.С. Гиневский. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.
329. Сполдинг, Д.Б. Вычислительная гидродинамика (CFD): прошлое, настоящее и будущее / Д.Б. Сполдинг // Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках. – СПб, 2007. – С. 9 – 13.
330. Сполдинг, Брайен. Компьютерное моделирование течений, теплообмена и горения твердого топлива в печах / Брайен Сполдинг, CHAM Ltd // Горение твердого топлива: Сб. докладов VII Всерос. конф., Новосибирск, 10-13 ноября 2009 г.: эл. сб. докл. – С. 10 – 19.
331. CFD code Phoenix: <http://www.cham.co.uk>.
332. FLUENT Flow Modeling Software: <http://www.fluent.com/software/fluent>.
333. ANSYS: <http://www.ansys.com/products/>.

334. Серант, Ф.А. Результаты освоения опытно-промышленного котла 820 т/ч с кольцевой топкой / Ф.А. Серант, О.И. Будилов, В.Е. Остапенко, В.П. Сенов // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8-10 ноября 2006 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч.1. – С. 57–72.

335. Коняшкин, В.Ф. Моделирование физических процессов в кольцевой топке с помощью программы FLUENT / В.Ф. Коняшкин // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8-10 ноября 2006 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч.1. – С. 170–177.

336. Аношин, Р.Г. Численное исследование аэротермохимических процессов при различных схемах сжигания подмосковного угля в топке котла БКЗ-220 / Р.Г. Аношин, К.А. Григорьев, Б.В. Лебедев, Д.Н. Михайлов, А.В. Старченко // Горение твердого топлива: Сб. докладов VI Всерос. конф., Новосибирск, 8-10 ноября 2006 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч.1. – С. 81–87.

337. Алексеенко, С.В. Применение современных методов физического и математического моделирования для разработки эффективных и экологически чистых теплоэнергетических аппаратов / С.В. Алексеенко, А.П. Бурдуков, А.А. Дектерев, Д.М. Маркович, С.И. Шторк // Горение твердого топлива: Сб. докладов VII Всерос. конф., Новосибирск, 10-13 ноября 2009 г.: эл. сб. докл. – С. 20 – 34.

338. Аскарова, А.С. Моделирование топки пылеугольного котла с плазменно-топливными системами / А.С. Аскарова, В.Е. Мессерле, А.О. Нагибин, А.Б. Устименко // Горение твердого топлива: Сб. докладов VII Всерос. конф., Новосибирск, 10-13 ноября 2009 г.: эл. сб. докл. – С. 98 – 105.

339. Серант, Ф.А. Котел для блока 600 МВт на экибастузских углях с тангенциальной топкой и вихревыми низкоэмиссионными горелками / Ф.А. Серант // Горение твердого топлива: Сб. докладов VII Всерос. конф., Новосибирск, 10-13 ноября 2009 г.: эл. сб. докл. – С. 192 – 200.

340. Михеев, М.А. Моделирование тепловых устройств / М.А. Михеев, М.В. Кирпичев. – М. – Л.: Изд-во АН ССР, 1936. – 180 с.

341. Кутателадзе, С.С. Моделирование теплоэнергетического оборудования / С.С. Кутателадзе, Д.Н. Ляховский, В.А. Пермяков. – М.–Л.: Энергия, 1966. – 340 с.

342. Кинле, Х. Активные угли и их промышленное применение / Х. Кинле, Э. Бадер. – Л.: Химия, 1984. – 216 с.

343. Углеродные адсорбенты из бурого угля Канско-Ачинского бассейна / А.О. Еремина, В.В. Головина, М.Ю. Учай и др. // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 55.

344. Осинцев К.В. Моделирование факельных процессов в топках промышленных котлов / К.В. Осинцев // Горение твердого топлива: Тезисы докладов VIII Всерос. конф., Новосибирск, 13 – 16 ноября 2012 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – С. 96.

345. Осинцев К.В. Организация факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергокотлов / К.В. Осинцев // Горение твердого топлива: Тезисы докладов VIII Всерос. конф., Новосибирск, 13 – 16 ноября 2012 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – С. 97.

346. Осинцев К.В. Активирование угля в тепловырабатывающих установках ТЭС / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Акбаев Т.А., Богаткин В.И. // Горение твердого топлива: Тезисы докладов VIII Всерос. конф., Новосибирск, 13 – 16 ноября 2012 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – С. 98.

347. Осинцев К.В. Модернизация систем сжигания топлива на котлах ТЭЦ г. Бишкек / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Богаткин В.И. // Горение твердого топлива: Тезисы докладов VIII Всерос. конф., Новосибирск, 13 – 16 ноября 2012 г.: сб. докл. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2012. – С. 99.

348. Осинцев, К.В. Организация низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли и природного газа на котлах с пассивированием воспламенитель-

ного процесса: монография / К.В. Осинцев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 198 с.

349. Осинцев, К.В. Теплотехника: учебное пособие / К.В. Осинцев – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 213 с.

350. Осинцев, К.В. О возможности перевода котлов БКЗ-160 на водоугольную суспензию / К.В. Осинцев // Всероссийский журнал научных публикаций. – 2013. – № 5. – С. 40 – 42.

351. Ларин Е.А., Сандалова Л.А., Чикалкин А.В. Методы и вероятностные модели расчета надежности систем теплоэнергоснабжения / Е.А. Ларин, Л.А. Сандалова, А.В. Чикалкин // Сб. науч. трудов XXI международной научной конференции (ММТТ-21). – Саратов. – Т. 4. – С. 222 – 228.

352. Симонов В.Ф., Каширский В.Г., Левушкина Л.В. Проблемы и перспективы использования сернистых горючих сланцев / В.Ф. Симонов, В.Г. Каширский, Л.В. Левушкина // Вестник СГТУ. – 2008. – № 4. – С. 77 – 81.

353. Семенов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях: Уч. пос. с грифом УМО / Б.А. Семенов. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2009. – 27 с.

354. Теплоэнергетика и теплотехника: Общие вопросы: Справочник / Под общ. Ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М. Зорина. – 3-е изд., перераб. – М.: Изд-во МЭИ, 1999 – 528 с.

355. Трёмбовля, В.И. Теплотехнические испытания котельных установок / В.И. Трёмбовля, Е.Д. Фингер, А.А. Авдеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.

356. Применение прогрессивных технологий подготовки и сжигания основных энергетических углей Киргизии / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов, Г.В. Козьмин, С.П. Костовецкий. – Фрунзе: Илим, 1989. – 208 с.

357. Методика определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники. – М.: Экономика, 1977. – 61 с.

358. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий / под редакцией Б.В. Канторовича, Г.Н. Делягина. – М.: Наука, 1967. – 194 с.

359. Морозов, А.Г. ВУТ в теплоэнергетике / А.Г. Морозов, С.И. Мосин, В.И. Мурко // Энергия, экономика, техника, экология. – 2007. – №4. – С. 29 – 32.

360. Ходаков, Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г.С. Ходаков // Теплоэнергетика. – 2007. – №1. – С. 35 – 45.

361. Технологии сжигания топлив в котельных и на электростанциях / Ф.А. Серант, Л.И. Пугач, Ю.В. Овчинников и др. // Академия энергетики. Серия Наука и технологии. – 2008. – №6 (26). – С. 54 – 65.

362. Цепенюк, А.И. Приготовление и сжигание водоугольного топлива в различных топочных устройствах / А.И. Цепенюк, С.В. Луценко, Ф.А. Серант, Е.Г. Карпов // Материалы международной конференции по теплоэнергетике и ее устойчивому развитию. – г.Угльевик, Республика Сербская, Босния и Герцеговина. – 2010. – С. 61 – 66.

363. Перспективы, основные результаты исследований и проблемы использования водоугольных суспензий с энергетике / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Л.И. Дубовцев // Электрические станции. – 1988. – №9. – С. 2 – 12.

364. Результаты перевода пылеугольного котла паропроизводительностью 89 кг/с на сжигание водоугольной суспензии / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев, др. // Теплоэнергетика. – 1987. – №1. – С. 5 – 11.

365. Моделирование технологических схем сжигания кавакского бурого угля, доставляемого на ТЭС гидротранспортом / А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 1987. – №5.

366. Оценка влияния влагосодержания на устойчивость воспламенения кавакского бурого угля / А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 1988. – №1.

367. Патент №2324860 РФ, МПК⁵¹, С 1 F23C 1/10, F23G 7/05. Способ утилизации жидких смазочных отходов с твердотопливными включениями / Осинцев В.В., Кузнецов Г.Ф., Осинцев К.В., Торопов Е.В.; заявитель и патентообладатель

ГОУ ВПО “Южно-Уральский государственный университет”. - № 2006143234/06; заявл. 06.12.06; опубл. 20.05.2008, Бюл. №14. - 5 с.: 1 ил.

368. Выбор технологии сжигания сгущенных шламов в энергетических котлах / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.П. Костовецкий, др. // Электрические станции. – 1990. – №6. – С. 12 – 15.

369. Авт. свидетельство № 1366785. Способ совместного сжигания угольной пыли и диспергированного топливного коагулянта / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Л.И. Дубовцев, др. // опубл. Б.И. №2 от 15.01.88.

370. Авт. свидетельство №1523842. Форсунка / В.В. Осинцев, А.М. Хидиятов, Л.И. Дубовцев, др. // опубл. Б.И. №43 от 23.11.89.

371. Авт. свидетельство №1322006. Форсунка / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, Е.Н. Васильева // опубл. Б.И. №25 от 07.07.87.

372. Морозов, А.Г. Гидроударные технологии для получения водоугольного топлива / А.Г. Морозов, Н.В. Коренюгина // Новости теплоснабжения. – 2010. – №7. – С. 18 – 21.

373. Овчинников, Ю.В. Искусственное композиционное жидкое топливо из угля и эффективность его использования / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко // Материалы научно-практической конференции «Перспективные энергосберегающие технологии и способы сжигания твердого топлива в котлах малой и средней мощности», 15 – 18 ноября 2005 г. – г. Кемерово. – 2005. – С. 10.

374. Овчинников, Ю.В. Физические процессы и механохимические эффекты в дезинтеграторах и кавитаторах при производстве ИКЖТ / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко, Е.А. Евтушенко // Энергосистемы, электростанции и их агрегаты. Сборник научных трудов. Вып. 9. НГТУ. – г. Новосибирск. – 2005. – С. 310.

375. Интенсификация процесса горения водоугольной суспензии с помощью присадок / В.И. Бабий, Н.И. Кузина, В.С. Вдовченко, В.М. Барабаш // Электрические станции. – 1991. – №11. – С. 6 – 8.

376. Получение активированного угля с использованием оборудования ТЭС и котельных / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин // Теплоэнергетика. – 2013. – № 7. – С. 1 – 8.

377. Основные проблемы ТЭС России в области охраны атмосферного воздуха. Эффективное оборудование и новые технологии в российской энергетике / В.П. Глебов, А.П. Зыков, И.Н. Шмиголь и др. // Сб. докладов ВТИ. М.: ВТИ, 2001.

378. Энергетическая стратегия России на период до 2030г., принятая распоряжением Правительства РФ №1715-р от 13.11.2009г.

379. Основы государственной политики в области экологического развития РФ на период до 2030г., утвержденные Президентом РФ от 30.04.2012г.

380. Кожуховский И.С., Новоселова О.А. Энергетика и охрана окружающей среды. Экологическая политика ОАО РАО «ЕЭС России» // Теплоэнергетика. 2007. № 6. С.2 – 4.

381. Тумановский А.Г., Котлер В.Р. Перспективы решения экологических проблем тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2007. № 6. С. 5 – 11.

382. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / 2-я редакция. Утв. 21.07.1999 Госстроем России, Минэкономки РФ, Минфином РФ. - М., 1999.

383. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика: Учеб. пособие-2-е изд., перераб. и доп.– М.: Дело, 2002 .

384. Самсонов В.С. Экономика предприятий энергетического комплекса: учеб. для вузов / В.С. Самсонов, М.А. Вяткин. – М.: Высшая школа, 2003.

385. Торопов, Е.В. Концепция факельного континуума для зоны интенсивного горения котельного агрегата / Е.В.Торопов, К.В.Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т.15, № 3. – С. 5 – 10.

386. Телегин, А.С. Тепломассоперенос / А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.

387. Блох, А.Г. Теплообмен в топках паровых котлов / А.Г. Блох. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 306 с.
388. Ахмедов, Р.Б. Технология сжигания газа и мазута в парогенераторах / Р.Б. Ахмедов, Л.М. Цирульников. – Л.: Недра, 1976. – 272 с.
389. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.
390. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
391. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов / АООТ «НПО ЦКТИ», ВТИ; под ред. Э.Х. Вербовецкого, Н.Г. Жмерика. – СПб., 1996. – 268 с.
392. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.
393. Математическая модель теплообмена в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В.Торопов, К.В.Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т.15, №4. – С. 19 – 25.
394. Лыков, А.В. Тепломассообмен: справ. / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
395. Торопов, Е.В. Основные характеристики факельного континуума в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В.Торопов, К.В.Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т.16, №2. – С. 14 – 22.
396. Метод определения гранулометрического состава. – ГОСТ 2093-82. – 16 с.
397. Белосельский, Б.С. Технология топлива и энергетических масел. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 340 с.
398. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. – М.: Наука, Физматгиз, 1983. – 176 с.
399. Malyavskaya, Greta. Russian-English Dictionary of Scientific and Engineering Terms: A Guide to Usage / Greta Malyavskaya, Natalia Sveyeva. – New York: Begell House, Inc., 2000. – p. 1238.

400. Торопов, Е.В. Математическая модель определения начального участка гетерогенного факела и ее адаптация / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев.// Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т.16, № 3. – С. 15 – 22.
401. Зельдович, Я.Б. Математическая теория горения и взрыва / Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
402. Семенов, Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н.Н. Семенов – М.: Изд. АН СССР, 1954. – 350 с.
403. Правила взрывобезопасности топливоподачи и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива / РД 153 – 34.1 – 03.352 – 99. – М.: Энергия, 2000. – 37 с.
404. Jones, J.C. Combustion Science: Principles and Practice. – Australia.: Millennium Books. – 1993. – 306 p.
405. Торопов, Е.В. Математическая модель обобщенного теплообмена в топке котельного агрегата – парадигма теплообмена / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев.// Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т.17, № 1. – С. 5 – 12.
406. www.alstom.com.
407. Торопов, Е.В. Адаптация дифференциального уравнения энергии к условиям топочных процессов в котельных агрегатах / Е.В.Торопов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. - Т.15, № 1. – С. 5 – 10.
408. Toropov, E.V. The Systemically Structured Adaptation of Heat Transfer in Boilers / Toropov E.V. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2016. – Т.16, № 1. – С. 19 – 23.
409. Шорин, С.Н. Теплопередача. – М.: Издательство «Высшая школа», 1964. – 490 с.
410. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П.Исаченко, В.А.Осипова, А.С.Сукомел. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
411. Осинцев, К.В. Системно структурированная адаптация теплопередачи в котлах / К.В. Осинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т.17, № 3. – С. 5 – 12.

412. Аэродинамический расчет котельных установок (Нормативный метод)/ Под ред. С.И. Мочана. – Изд. 3-е. – Л.: Энергия, 1977. – 184 с.
413. Pollard, Devid. Market Opportunities in the Power Generation Sector. – May, 2006. – 30 p. (www.alstom.com).
414. Ganjehkaviri A, Mohd Jaafar MN, Ahmadi P, Barzegaravval H. Modelling and optimization of combined cycle power plant based on exergoeconomic and environmental analyses. *Appl Therm Eng* 2014; 67: 566–578. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.018>.
415. Kaviri AG, Jaafar MNM, Lazim TM, Barzegaravval H. Exergoenvironmental optimization of Heat Recovery Steam Generators in combined cycle power plant through energy and exergy analysis. *Energy Convers Manage* 2013;67:27–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2012.10.017>.
416. Nise, Norman S. Control Systems Engineering/Norman S. Nise. – 3rd ed. – 2000, USA, John Wiley & Sons, Inc. – 970 p.
417. Omar M, Jihong W, Shen G, Bushra A, Jianlin W. Modelling study of supercritical power plant and parameter identification using genetic algorithms. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering, London, vol. II; 2010. p. 973-978.*
418. Yu J, Jia B, Wu D, Wang D. Optimization of heat transfer coefficient correlation at supercritical pressure using genetic algorithms. *Heat Mass Transf* 2009; 45: 757-766.
419. T.C. Bond, D.G. Streets, K.F. Yarber, S.M. Nelson, J.H. Woo, Z. Klimont A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion *J. Geophys. Res.*, 109 (2004), p. D14203.
420. Raask E. Mineral impurities in coal combustion, behaviour, problem and remedial measures. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation; 1985. p. 283–310.
421. Швыдкий, В.С. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса: Учебник для вузов / В.С. Швыдкий, Н.А. Спирин, М.Г. Ладыгичев и др. – М.: Интернет Инжиниринг, 1999. – 520 с.

422. Law CK. Combustion physics. Cambridge: Cambridge University Press; 2006. p.309.
423. Ye Y, Li S, Li G, Wu N, Yao Q. The transition of heterogeneous-homogeneous ignitions of dispersed coal particle streams. *Combust Flame* 2014; 161: 1458–1468.
424. Bäckström D, Gall D, Pushp M, Johansson R, Andersson K, Pettersson JBC. Particle composition and size distribution in coal flames – the influence on radiative heat transfer. *Exp Thermal Fluid Sci* 2015; 64: 70–80.
425. Bäckström D, Johansson R, Andersson K, Johnsson F, Clausen S, Fateev A. Measurement and modeling of particle radiation in coal flames. *Energy Fuels* 2014; 28: 2199–2210.
426. Lou C, Zhou H-C, Yu P-F, Jiang Z-W. Measurements of the flame emissivity and radiative properties of particulate medium in pulverized-coal-fired boiler furnaces by image processing of visible radiation. *Proc Combust Inst* 2007; 31: 2771–2778.
427. Zima W, Nowak-Oclon M, Oclon P. Simulation of fluid heating in combustion chamber waterwalls of boilers for supercritical steam parameters. *Energy* 2015; 92: 117–127.
428. Li Y, Zhou L, Xu G, Fang Y, Zhao S, Yang Y. Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant. *Energy* 2014;74: 202-214.
429. Taler J, Duda P. Solving direct and inverse heat conduction problems. Berlin: Springer; 2006.
430. Diller T. Advances in heat flux measurements. *Adv Heat Transf* 1993; 23: 279–368.
431. Incropera FP. Fundamentals of heat and mass transfer. John Wiley & Sons; 2011.
432. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебное пособие для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.

433. Самарский, А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры /А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 320 с.
434. Yin C, Yan J. Оxy-fuel combustion of pulverized fuels: combustion fundamentals and modeling. *Appl Energy* 2016;162: 742–762.
435. Chui E, Hughes PM, Raithby G. Implementation of the finite volume method for calculating radiative transfer in a pulverized fuel flame. *Combust Sci Technol* 1993; 92: 225–242.
436. Паршин, А.А. ТЕПЛОВЫЕ СХЕМЫ КОТЛОВ / А.А. Паршин, В.В. Митор, А.Н. Безгрешнов и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
437. Basu P, Kefa C, Jestin L. *Boilers and burners: design and theory*. Springer Science & Business Media; 2012.
438. Shifting the equipment of thermal power stations for firing different kinds of fuels in flames using the technology of distributed admission of reagents into the furnace / К. V. Osintsev, V. V. Osintsev, M. P. Sukharev, and E. V. Toropov // *Thermal engineering (English translation of Teploenergetika)*. – 2008. – V. 55. – № 4. – P.355–360.
439. E.V. Toropov, K.V. Osintsev, S.V. Aliukov New Theoretical and Methodological Approaches to the Study of Heat Transfer in Coal Dust Combustion, *Energies*, 2019, 12(1):136, doi: 10.3390/en12010136 Q1
440. E.V. Toropov, K.V. Osintsev, S.V. Aliukov Analysis of the calculated and experimental dependencies of the combustion of coal dust on the basis of a new methodological base of theoretical studies of heat exchange processes, *International Journal of Heat and Technology*, 2018, 36(4):1240-1248, doi: 10.18280/ijht.360411 Q1, TOP-10
441. K.V. Osintsev, S.V. Aliukov, Y.S. Prikhodko New Methods for Control System Signal Sampling in Neural Networks of Power Facilities, *IEEE Access*, 2020, 8: 192857-192866, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3032326 Q1, TOP-10

442. A.A. Alabugin, S.V. Alyukov, K.V. Osintsev Approximation Methods for Analysis and Formation of Mechanisms for Regulating Heat and Mass Transfer Processes in Heat Equipment Systems, International Journal of Heat and Technology, 2020, 38(1):45-58, doi: 10.18280/ijht.380106 Q1, TOP-25

443. Alabugin A.A., Alykov S.V., Osintsev K.V. Management Models of Efficiency of Development of Resource and Energy Saving Systems Using Methods of Approximation of Step Functions / WCE 2017 World Congress on Engineering 2017 // Proceedings of the World Congress on Engineering, 2017, V.7, p. 102-112 (ISBN of Vol I (pp1-542): 978-988-14047-4-9, ISBN of Vol II (pp543-1084): 978-988-14048-3-1, Publisher: Newswood Limited, Organization: International Association of Engineers)

444. K.V. Osintsev, I.S. Prikhodko, T.A. Pshenitsyna Choice of Chelyabinsk and Kuznetsk coals as main fuel for steam generator PK-14 using elements of cluster analysis, IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/194/5/052018

445. K.V. Osintsev Operation Principles of Control Process of Heat Generation and Activation Kyrghyz Coals on CHP, Conference: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018, doi:10.1109/FarEastCon.2018.8602604

446. K.V. Osintsev Automatic Flare Control Based on the Mathematical Model of Ignition of the Initial Section of Combustion, Conference: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), 2018, doi:10.1109/FarEastCon.2018.8602762

447. O.G. Brylina, K.V. Osintsev, Yu.S. Prikhodko, N.V. Savosteenko On issue of increasing profitability of automated energy technology complexes for preparation and combustion of water-coal suspensions, 2018, doi:10.1088/1757-899X/327/2/022015

448. Osintsev K.V., Dudkin M.M., Prikhodko Iu.S. Improving Efficiency of Boiler in Case of Coal Hydrotransport, Lecture Notes in Mechanical Engineering 2020, doi: 10.1007/978-3-030-22063-1_146

449. Osintsev K.V., Dudkin M.M., Prikhodko Yu.S. Method of Using Exhausted Gases for the Compressed Carbon Dioxide and Electricity Generation, International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon, 2019, doi: 10.1109/FarEastCon.2019.8934369

450. Osintsev K.V., Prikhodko Iu.S. Application of linear programming techniques to optimize the choice of coal and water coal fuel, Journal of Physics: Conference Series, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1333/4/042025

451. K.V. Osintsev, O.G. Brylina, Yu.S. Prikhodko Modeling and Automation of the Hydro-Transport System of Water-Coal Fuel at Negative Ambient Temperatures, In book: Advances in Automation, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-39225-3_72

452. K.V. Osintsev, D.P. Korabelnikova, Y.S. Bolkov Combined environmentally friendly technology for recycling of coal-water slurries in coal mining, IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/579/1/012110

453. Пат. 2635947 Российская Федерация, МПК8F23С 1/12, F23С 5/08. Котел и способ его работы / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Богаткин В.И., №2016114216/06; заявл.12.04.2016; опубл.17.11.2017, Бюл.№ 32 – 11 с.

454. Пат. 2594840 Российская Федерация, МПК8, F23С 1/12, F23С 5/08. Вертикальная призматическая топка / Осинцев К.В., Осинцев В.В. №2015115351/06; заявл.23.04.2015; опубл.27.07.2016, Бюл. №23 – 8 с.

455. Пат. 2620614 Российская Федерация, МПК8, F23С 1/00, F23С 5/08. Способ комбинированного сжигания угольной пыли, природного газа и жидкотопливной смеси / Осинцев К.В., Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Бийбосунов А.И., Богаткин В.И., №2015115330/06; заявл.16.06.2016; опубл.29.05.2017, Бюл. №16 – 10 с.

456. Kaczmarczyk T, Zywica G and Ihnatowicz E 2017 The impact of changes in the geometry of a radial microturbine stage on the efficiency of the micro CHP plant based on ORC Energy 137 530-543

457. Frigo S, Gabbrielli R, Puccini M, Seggiani M and Vitolo S 2014 Small-scale wood-fuelled CHP plants: a comparative evaluation of the available technologies *Chem. Eng. Trans.* 37 847-852
458. Klonowicz P, Witanowski L, Suchocki T and Lampart P 2017 A turbine based domestic micro ORC system *Energy Procedia* 129 930-993
459. Wang M, Jing R, Zhang H, Li N and Zhao Y 2018 An innovative Organic Rankine Cycle (ORC) based Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) system with performance simulation and multi-objective optimization *Applied Thermal Engineering* 145 743-754
460. Koukou M, Vrachopoulos M, Tachos N and Tsolakoglou N 2018 Design and development of a 10-kW ORC installation working with low-temperature sources *International Journal of Sustainable Energy* 37(9) 857-872
461. Gotelip Correa Veloso T, Sotomonte C, Coronado C and Nascimento M 2018 Multi-objective optimization and exergetic analysis of a low-grade waste heat recovery ORC application on a Brazilian FPSO *Energy Conversion and Management* 174 537-551
462. Ma W, Liu T, Min R and Li M 2018 Effects of physical and chemical properties of working fluids on thermodynamic performances of medium-low temperature organic Rankine cycles (ORCs) *Energy Conversion and Management* 171 742-749
463. Zhu Y, Li W, Sun G and Li H 2018 Thermo-economic analysis based on objective functions of an organic Rankine cycle for waste heat recovery from marine diesel engine *Energy* 158 343-356
464. Bo Z, Sang Z, Lu X and Weng Y 2018 Effects of different working fluids on the performance of a radial turbine in an organic Rankine cycle power system *Journal of Mechanical Science and Technology* 32(9) 4503-4515
465. Urazmetov S, Kraev V, Verevkin A, Kiryushin O and Skatov K 2013 Method for determining the viscosity of nonlinear viscous liquids and the device for its implementation *Federal Intellectual Property Service Official Bulletin* 16 21-24

466. Baniasad A, Oukati S and Ameri M 2015 Energy management and economics of a trigeneration system Considering the effect of solar PV, solar collector and fuel price Energy for Sustainable Development 26 43-55
467. Biryuzova E A 2018 Investigation of Methods for Determining Heat Losses from External Cooling of Surfaces of a Small-Capacity Hot-Water Boiler Materials Science and Engineering 463 032056 1-4
468. Batrakov P A, Mikhailov A G and Ignatov V Yu 2018 Fire-tube boiler optimization criteria and efficiency indicators rational values defining Journal of Physics: Conf. Series 944 012009
469. Alabugin A.A., Alykov S.V., Osintsev K.V. Combined Approach to Analysis and Regulation of Thermodynamic Processes in the Energy Technology Complex. Processes. 2021. V.9 (2). #204
470. Alabugin A.A., Osintsev K.V., Alykov S.V. Methodological Foundations for Modeling the Processes of Combining Organic Fuel Generation Systems and Photovoltaic Cells into a Single Energy Technology Complex. Energies. 2021. V.14 (10). #2816
471. Osintsev K.V., Yang L., Zang G. Modeling of the Algorithm of Management of Using Efficiency of Energy Resources. International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon. 2020. # 9271614
472. H. D. Baehr Thermodynamik, Berlin-Gottingen-Hedelberg, 1962.
473. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
474. T. Bes Egzergia w procesach ogrewania, klimatyzacji I suszenia, Energetyka Przemyslowa, V.11, 1962, pp. 388-392
475. В. М. Бродянский Энергетические потери в современных кислородных установках, Известия ВУЗов, Энергетика, 1959, № 7, с.87-95
476. В. М. Бродянский, И.П. Ишкин Термодинамический анализ необратимых процессов в холодильных установках, Известия Академии наук СССР, Отделение технических наук, 1958, № 5, с.40-45
477. Д. П. Гохштейн Современные методы термодинамического анализа энергетических установок, Москва, Энергия, 1969, 190 с.

478. Kemp, Ian C. Pinch analysis and process integration – A user guide on process integration for the efficient use of energy (2nd Ed.). Elsevier Ltd, 2007. 415 p.
479. V. M. Brodyanskiy, V. Fratsher, K. Michalek Эксергетический метод и его приложения, Москва, Энергоатомиздат, 1988, 288 с.
480. A. Abdelalim, W. O'Brien, Z. Shi (2017) Development of Sankey Diagrams to Visualize Real HVAC Performance. Energy and buildings 149, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.05.040
481. M. O. Karaagac, A. Kabul, H. Ogul (2019) First- and second-law thermodynamic analyses of a combined natural gas cyclepower plant: Sankey and Grossman diagrams, Turkish Journal of Physics 43(1):93-108, doi: 10.3906/fiz-1809-9
482. M. H. Yang, R. H. Yeh (2015) Economic performances optimization of the transcritical Rankine Cycle systems in geothermal application. Energy Convers. Manag. 95, 20–31, doi:10.1016/j.enconman.2015.02.021
483. N. Javanshir, S. Mahmoudi, M. Akbari Kordlar and M. A. Rosen (2020) Energy and Cost Analysis and Optimization of a Geothermal-Based Cogeneration Cycle Using an Ammonia-Water Solution: Thermodynamic and Thermoeconomic Viewpoints, Sustainability 12(484): 1-28, doi:10.3390/su12020484
484. A. Ahmadzadeh, M. R. Salimpour, A. Sedaghat Thermal and exergoeconomic analysis of a novel solar driven combined power and ejector refrigeration (CPER) system. Int. J. Refrig. 2017, 83, 143–156, doi:10.1016/j.ijrefrig.2017.07.015
485. A. Crivellari, V. Cozzani, I. Dincer (2019) Exergetic and exergoeconomic analyses of novel methanol synthesis processes driven by offshore renewable energies. Energy, 187, doi:10.1016/j.energy.2019.115947
486. A. Abuadala, I. Dincer, G. F. Naterer (2010) Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification. Int J Hydrog Energy 35:4981–4990
487. I. Dincer, C. O. Colpan, O. Kizilkan (2017) Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions 1st Edition. Academic Press. 1116 p.

488. Jung, D., Lee, Y., Park, B., Byoungha, K., (2000). A study on the performance of multi-stage condensation heat pumps. *Int. J. Refrigeration* 23, 528–539. doi:10.1016/S0140-7007(99)00083-3

489. Gaigalis, V., Skema, R., Marcinauskas, K., Korsakiene, I. (2016). A review on Heat Pumps implementation in Lithuania in compliance with the National Energy Strategy and EU policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53, 841-858. doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.029

490. Wang, S. (2000). *Handbook of air conditioning and refrigeration*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York.

491. Yan, G., Bai, T., Yu, J. (2016). Energy and exergy efficiency analysis of solar driven ejector–compressor heat pump cycle, *Solar Energy* 125, 243–255. doi.org/10.1016/j.solener.2015.12.021

492. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661639 Российская Федерация. Программа по оптимизации системы энерго-сбережения : № 2022661022 : заявл. 15.06.2022 : опубл. 23.06.2022 / И. А. Моисеев, К. В. Осинцев, И. А. Берсенева [и др.] ; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет». – EDN DVBFVB.

493. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615785 Российская Федерация. Программный комплекс расчета параметров возобновляемых источников энергии на основе нейросетевого алгоритма : № 2023614979 : заявл. 20.03.2023 : опубл. 20.03.2023 / И. А. Моисеев, И. А. Берсенева, К. В. Осинцев, С. И. Кускарбекова ; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет». – EDN ZRCXFN.

494. C.-W. Kok, W.-S. Tam Signal sampling. In book: *Digital Image Interpolation in Matlab* , IEEE, 2019, pp.1-15

495. C.-W. Kok, W.-S. Tam Partitioned fractal interpolation. In book: *Digital Image Interpolation in Matlab* , IEEE, 2019, pp.263-290

496. G. Başak et al. Robust graph signal sampling. 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (2019): 7520-7524
497. F. Gama, A.G. Marques, G. Leus, A.R. Ribeiro Convolutional neural network architectures for signals supported on graphs, IEEE Transactions on Signal Processing, 2019. Vol.67(4). pp.1034-1049
498. A. Ortega, P. Frossard, J. Kovacecic, J.M.F. Moura, P. Vandergheynst Graph Signal Processing: Overview, Challenges, and Applications Proceedings of the IEEE, 2018 Vol. 106(5) pp.808-828
499. B. Girault, A. Ortega, S.S. Narayanan irregularity-aware graph fourier transforms 2018 IEEE Transactions on Signal Processing, 2018. Vol.66(21). pp.5746-5761
500. D.F. Mayers, G.H. Golub, C.F van Loan Matrix computations 1986 Mathematics of Computation 47(175):376
501. K. Sozanski Analog signals conditioning and discretization. In book: Digital Signal Processing in Power Electronics Control Circuits, Power Systems 2017 pp 23-81
502. K. Sozanski Signal-to-noise ratio in power electronic digital control circuits Conference: 2016 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA) #16519619
503. R. Oshana DSP software development techniques for embedded and real-time systems, Newnes: 2005, 608 p.
504. A. Meyer-Base, V.J. Schmid Transformation and signal-separation neural networks. In book: Pattern Recognition and Signal Analysis in Medical Imaging, 2014 .pp.245-289
505. D. O'Shaughnessy Recognition and processing of speech signals using neural networks, Circuits Systems and Signal Processing 38(8) 2019 pp.3454-3481
506. A.G. Khobotov, A.I. Khilko, A.A. Telnykh Studying the possibilities and efficiency of operation with signals in neural networks, Radiophysics and Quantum Electronics 2018 61(2) pp.69-76

507. M.Y. Malsagov, E.M. Khayrov, M.M. Pushkareva, I. Karandashev Exponential discretization of weights of neural network connections in pre-trained neural networks, *Optical Memory and Neural Networks* volume 28, pp. 262–270(2019)
508. B. Kryzhanovsky, M.V. Kryzhanovsky, M.Y. Malsagov Discretization of a matrix in quadratic functional binary optimization, *Doklady Mathematics* 83(3) pp.413–417(2011)
509. B. Kryzhanovsky, M.V. Kryzhanovsky An accelerated procedure for solving binary optimization problems, *Journal of Computer and Systems Sciences International* 2009 48(5):732-738
510. B. Kryzhanovsky, M.V. Kryzhanovsky, A.L. Mikaelyan Application of the clipping procedure to the binary minimization of a quadratic functional, *Doklady Mathematics* 2007 75(2):310-313
511. S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive foundation*, Macmillan College Publishing Company, New York (1994).
512. P. K.A. Simpson, *A Review of artificial neural systems II: Paradigms, application and implementations*, General Dynamics, San Diego (1988).
513. Y. Kuramoto, *Chemical oscillations, waves, and turbulence*, Springer–Verlag, Berlin, Heidelberg (1984).

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

"Объединение ВНИПИЭнергопром"
105094, Москва, Семеновская набережная, 2/1
Телефон (495) 360-76-40 Факс (495) 366-36-25
ИНН/КПП 7701027557/770101001
Р/счет 40702810100020001024
«Мой банк» (ООО) г. Москва
БИК 044525088
К/счет 30101810100000000088
ОКОНХ – 66000; ОКПО – 00113537
vnipiep@vnipiep.ru
www.vnipiep.ru

13.11.2015

№ б/н

Справка

об использовании результатов диссертационной работы Осинцева Константина Владимировича

Результаты диссертационной работы К.В. Осинцева по организации низкотемпературного факельного сжигания угольной пыли, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в техпредложениях кафедры промышленной теплоэнергетики Южно-Уральского государственного университета в рекомендациях по организации сжигания челябинского бурого угля и его активированию на котлах действующих ТЭЦ.

Вопрос реализации рекомендованных в диссертационной работе К.В. Осинцева системы сжигания и способов активирования угля рассматривается руководством предприятия в комплексе проектов по развитию ТЭЦ РФ и, в частности, Уральского, Западно-Сибирского и Приволжского регионов.

Заместитель генерального директора
по проектированию энергообъектов -
Директор Приволжского и
Южно-Уральского филиалов
ОАО «ВНИПИЭнергопром»

В.И. Богаткин

Приложение Б (справочное)

КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН
ЭНЕРГЕТИКА МИНИСТРИЛИГИНЕ
КАРАШТУУ ЭНЕРГЕТИКА БОЮНЧА
КЫРГЫЗ ИЛИМИЙ-ТЕХНИКАЛЫК
БОРБОР
(КЭНТБ «Энергия»)



КЫРГЫЗСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЦЕНТР ПО ЭНЕРГЕТИКЕ ПРИ
МИНИСТЕРСТВЕ ЭНЕРГЕТИКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
(КНТЦ «Энергия»)

720055, Кыргызская Республика, г.Бишкек, ул. Исы Ахунбаева, 119, тел. (+996 312) 510349, факс. (+996312) 510339,
E-mail: e-mail: [a.dfundubaev@eco.kg]



“УТВЕРЖДАЮ”

Директор КНТЦ «Энергия»

 Ш.Б.Дикамбаев

«14» апреля 2011 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы ОСИНЦЕВА Константина Владимировича

Комиссией в составе:

Председатель

Директор КНТЦ «Энергия», к.т.н. Ш.Б.Дикамбаев

Члены комиссии:

Заведующий лабораторией
промтеплоэнергетики, к.т.н. А.К.Джундубаев

Начальник отдела
проектных работ Ш.У.Мавлянбеков

составлен настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Осинцева К.В. по организации низкотемпературного факельного сжигания органического топлива в топках котлов, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы при реализации технического предложения кафедры промышленной теплоэнергетики Южно-Уральского государственного университета при разработке проектов реконструкции систем сжигания котлов БКЗ-220, БКЗ-160 на ТЭЦ г. Бишкека для повышения их надежности, срока службы и снижения выхода оксидов азота.

Председатель комиссии 

 Ш.Б. Дикамбаев

Члены комиссии:

 А.К.Джундубаев

 Ш.У.Мавлянбеков

Приложение В (справочное)

**«ЭЛЕКТР
СТАНЦИЯЛАР»**
ААКсынын филиалы
Бишкек шаарынын ЖЭБи



**Филиал ОАО
«ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»**
ТЭЦ города Бишкек

Кыргыз Республикасы
720022, Бишкек ш., Чуй пр.2
power@bttec.mega.kg, bttec@mail.ru
тел. 36-55-82
факс(0996312) 36-56-31
а-б/э № 1091820100010189
«ЮниКредитБанк» ААКсынын
Бишкектеги борбордук филиалы
БИК 109018
ИНН 41212199710434
0000000 26 0253101 2

Кыргызская Республика
720022, г.Бишкек, пр.Чуй,2;
power@bttec.mega.kg, bttec@mail.ru
тел. 36-55-82
факс(0996312) 36-56-31
р/с № 1091820100010189
Бишкекский центральный филиал
ОАО «ЮниКредитБанк»
БИК 109018
ИНН 41212199710434
0000000 26 0253101 2

15.04.2016

Справка об использовании результатов диссертационной работы Осинцева Константина Владимировича

Результаты диссертационной работы Осинцева К.В. по организации низкотемпературного факельного сжигания органического топлива, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, использованы в техническом предложении кафедры промышленной теплоэнергетики Южно-Уральского государственного университета в рекомендациях по организации сжигания карагандинского, кавакского, ташкумырского углей, природного газа на котлах БКЗ-220, БКЗ-160 ТЭЦ г. Бишкека.

С внедрением этих рекомендаций увеличивается межремонтный срок службы горелок, снижаются выбросы оксидов азота в атмосферу.

Вопрос реконструкции системы сжигания котлов БКЗ-220, БКЗ-160 рассматривается руководством предприятия в комплексе вопросов развития ТЭЦ г. Бишкека, повышения эффективности выработки электрической и тепловой энергии, получения прибыли.

Главный инженер ТЭЦ г. Бишкек



Бочко С.Н.

Приложение Г (справочное)



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
Политехнический институт
Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»

СПРАВКА

01.04.2024г.

№ 309-28/03

г. Челябинск

Об использовании результатов диссертационного исследования Осинцева Константина Владимировича в учебном процессе кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ФGAOY BO «IOYpГУ (НИУ)».

Настоящая справка дана Осинцеву Константину Владимировичу, и подтверждает, что основные методологические положения его диссертационной работы на тему: Методологические основы использования солнечной энергии и органического топлива для производства электрической, тепловой энергии и активного угля при минимизации карбонового следа на базе тепловых электрических станций, представленной на соискание степени доктора технических наук по специальности: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы, были использованы при составлении учебного плана направления подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» по магистерской программе «Теория и практика аналитических методов оценки и исследования тепломассообменных процессов».

Ученый секретарь

С.И. Кускарбекова

Приложение Д (справочное)



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

ЮУрГУ

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080, тел./факс (351)267-99-00, e-mail: info@susu.ru, www.susu.ru
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

05.04.2024 г. № 309-28

На № _____ от _____

СПРАВКА

Об использовании результатов диссертационного исследования Осинцева Константина Владимировича в учебном процессе ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)».

Настоящая справка дана Осинцеву Константину Владимировичу и подтверждает, что основные методологические положения его диссертационной работы на тему: Методологические основы использования солнечной энергии и органического топлива для производства электрической, тепловой энергии и активного угля при минимизации карбонового следа на базе тепловых электрических станций, представленной на соискание степени доктора технических наук по специальности: 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы, были использованы в ходе учебного процесса ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», а именно при создании учебного лабораторного стендов «Солнечная электростанция», «Физическое моделирование движения продуктов сгорания в газоходах энергетического котельного агрегата» для кафедры «Промышленная теплоэнергетика».

Применение результатов диссертационной работы Осинцева К.В. повышает качество профессиональной подготовки студентов по направлениям 13.03.01 «Промышленная теплоэнергетика».

Первый проректор-проректор по научной работе   Корзов А.В.