

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре промышленной теплоэнергетики ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор,
Соломин Евгений Викторович

Официальные оппоненты:

Ахметова Ирина Гареевна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», проректор по развитию и инновациям;

Дубинин Алексей Михайлович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор кафедры теплоэнергетика и теплотехника;

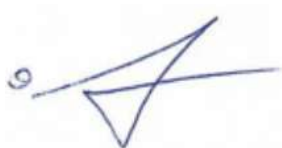
Обухов Сергей Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор Инженерной школы энергетики отделения электроэнергетики и электротехники

Защита состоится «19» декабря 2024 г. в 14:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»: <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=6372>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 (ФЭПТ/РV-Т), 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 проблемы 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. Хзмаляном, Л.Н. Хитриным, Х. Кинле, Э. Бадер, А.С. Предводителевым, 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, например, солнечных электростанций. При сопутствующем производстве активного угля колоссальные объемы тепла 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.1.

Раздельная выработка: когенерация (ТЭС), производство активных углей, электрическая генерация (СЭС) при использовании солнечной радиации



Гибридный энергетический комплекс (ГЭК) на базе ТЭС с надстройками по производству активных углей, электрической генерации ФЭПиТ при использовании солнечной радиации и систем утилизации теплоты

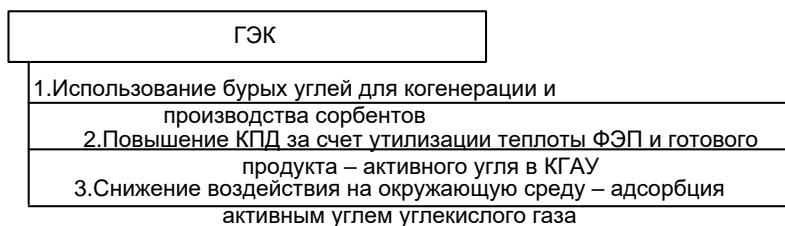


Рис.1. Преимущества гибридного энергетического комплекса (ГЭК)

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 РФФИ 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 стокowych 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).

По теме диссертации опубликовано **42** работы, из них в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ опубликована 31 статья, включая 9 статей в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus; **получено 9** патентов РФ на изобретения, **2** свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы. В рамках работы созданы научно-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 реагентной смеси и воздуха в камеры сгорания и активации.

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

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав с выводами и рекомендациями, заключения, приложений, содержит 258 страниц текста, 98 рисунков, 15 таблиц, список литературы из 513 наименований.

В главе «Введение» поставлены научные задачи, дается обоснование необходимости разработки 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. Анализ традиционных энергетических систем позволяет сделать выводы о сравнительно низкой их эффективности и значительном воздействии на окружающую среду. Не в полной мере используются методы 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 наличию превышенного карбонового следа в энергетике. Использование ФЭПиТ совместно с источниками низкопотенциальной теплоты, как надстройки над базовым оборудованием теплоэлектростанций, сглаживает суточные графики выработки электроэнергии при их совместной работе на потребителей. Область комбинации производства тепловой, электрической энергии и активного угля в одном энергетическом комплексе в современной инженерной науке проработана недостаточно, исследования ученых в этой области практически не проводились, а значит тема работы является актуальной.

В первой главе проводится обзор исследований автора, коллективов научных школ и лабораторий в предметной области. Для выявления степени научной и практической разработанности проблемы исследования проведены следующие работы: идентификация предмета и объектов изучения; определение базы данных предметной информации 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 выполнен максимально полный обзор публикаций на тему создания методологии проектирования гибридных энергокомплексов нового поколения. На основе проведенного в первой главе анализа были сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе также проведен системный анализ принципиальной схемы ГЭК. Основная идея ГЭК состоит в том, что ТЭС, работающая на органическом топливе, надстраивается солнечной электростанцией на базе ФЭПиТ, а по схеме за энергетическим комплексом устанавливается система утилизации теплоты на базе низкопотенциальных источников энергии. Для оценки технической возможности реализации подобного ГЭК проведен анализ прихода солнечной радиации. Челябинская область, так же, как и Оренбургская область, обладает значительным потенциалом по использованию солнечной энергии. Из графиков инсоляции следует, что существует техническая возможность использования ФЭПиТ для солнечной теплоэлектростанции для условий Урала.

На рисунке 2 выявлены основные три подсистемы разрабатываемого энергетического комплекса, работающего на органическом топливе и солнечной энергии и вырабатывающего электрическую, тепловую энергию и активный уголь. Схема является предварительной для проведения системного анализа.

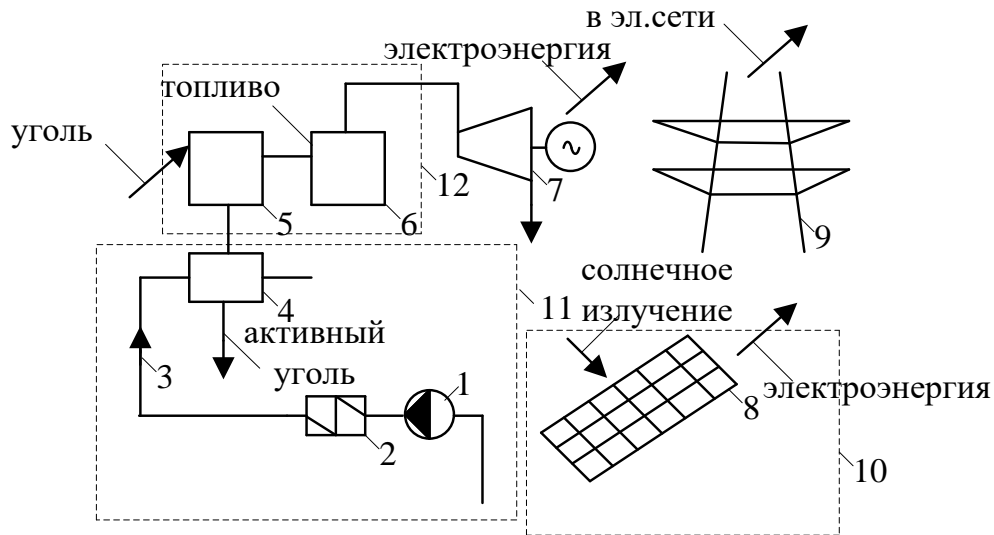


Рис. 2. Новая технологическая схема ГЭК: 1 – насос, 2 – тепловой насос, 3 – солнечный коллектор, 4 – устройство охлаждения активного угля, 5 – камера активации угля, 6 – энергетический котельный агрегат, 7 – паротурбоэлектрогенератор, 8 – СЭС, 9 – линия электропередач, 10 – подсистема ФЭПиТ (СЭС), 11 – система утилизации теплоты за ГЭК, 12 – системы сжигания органического топлива и активации угля

Функциональная электрическая схема представлена на рисунке 3.

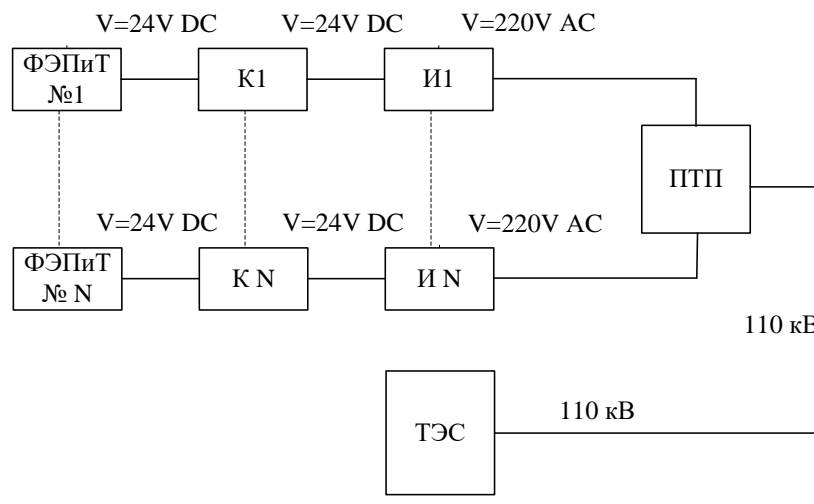


Рис. 3. Предварительная принципиальная электрическая схема гибридной электростанции: ФЭПиТ – фотоэлектрический преобразователь; К_і – контроллер ФЭП, И_і – инвертор DC/AC, ПТП – повышающая трансформаторная подстанция (ТП), ТЭС – теплоэлектростанция

Во второй главе разработаны методологические основы моделирования процессов объединения генерации гибридных систем на органическом топливе и солнечной энергии в энерготехнологический комплекс, рис.4,5.

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

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

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.

Соотношения типа (1) суммируются по элементам (2)

$$\bar{t} = \sum_{e=1}^E \bar{t}^e \sum_{i=1}^m F_i^e(x,y,z) T_i. \quad (2)$$



Рис.4. Методологические подходы к проектированию ГЭК



Рис.5. Методы повышения качества продукции внутри ГЭК

Для сравнения были проведены расчеты как по известной методике, так и в программе Ansys на основе численного моделирования.

При расчете по методике склонение по приближенному уравнению Купера:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284+n}{365}\right) \quad (3)$$

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

Косинус угла падения лучевого излучения (зенитного угла солнца):

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (4)$$

где θ_z – 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:

$$\tau_b = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \exp\left(\frac{-k}{\cos(\theta_\zeta)}\right), \quad (5)$$

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

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

$$\alpha_1 = 0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2 - 0,2711 - 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2 \quad (7)$$

Для учёта определённого типа климата необходимо умножить константы на соответствующие коэффициенты: соответственно r_0, r_1 и r_k по таблицам.

Расчёт излучения рассчитаем по системе уравнений:

$$G_{on} = \begin{cases} G_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \\ G_{sc} \cdot (1,000110 + 0,034221 \cdot \cos(B) + 0,001280 \cdot \sin(B) + 0,000719 \cdot \cos(2B) + 0,000077 \cdot \sin(2B)) \end{cases} \quad (8)$$

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

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365} \quad (9)$$

Тепловой поток был рассчитан по методике

$$q_{пол} = G_{on} - U \cdot (T_{п} - T_0) \quad (10)$$

где $q_{пол}$ и $q_{погл}$ – удельные полный и поглощаемый потоки солнечной радиации, U – коэффициент потерь, $T_{п}, T_0$ – соответственно средняя температура поверхности панели и температура окружающей среды. Полный коэффициент U для большинства конструкций равен 0,5...1,0 Вт/м²К.

Во второй главе также разработана схема ГЭК, рис.6.

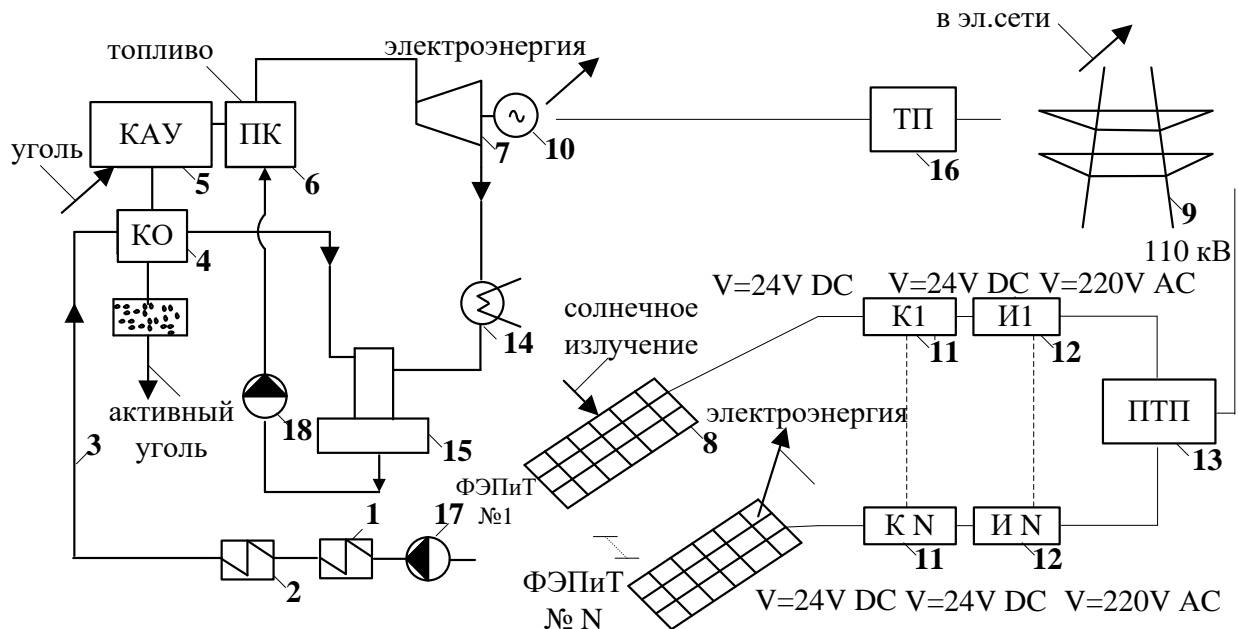


Рис. 6. Общая схема ГЭК: 1 – тепловой насос, 2 – система химводоподготовки, 3 – нагретая вода, 4 – камера охлаждения активного угля, 5 – камера активации угля, 6 – паровой энергетический котел, 7 – паровая турбина, 8 – ФЭПиТ, 9 – ЛЭП, 10 – электрогенератор, 11 – контроллер, 12 – инвертор, 13 – повышающая трансформаторная подстанция, 14 – конденсатор, 15 – деаэратор, 16 – ТП, 17 – насос исходной воды, 18 – питательный насос

При формировании общей схемы следует учесть, что:

1. СЭС должна сглаживать суточные пики энергопотребления, рис.7.
2. Методом системного анализа выявлены три подсистемы: солнечная электростанция, низкопотенциальные источники энергии и камера активации угля, соединенная с камерой сгорания энергетического котельного агрегата.
3. Выявлены основные элементы общей схемы ГЭК нового поколения, рис.6.

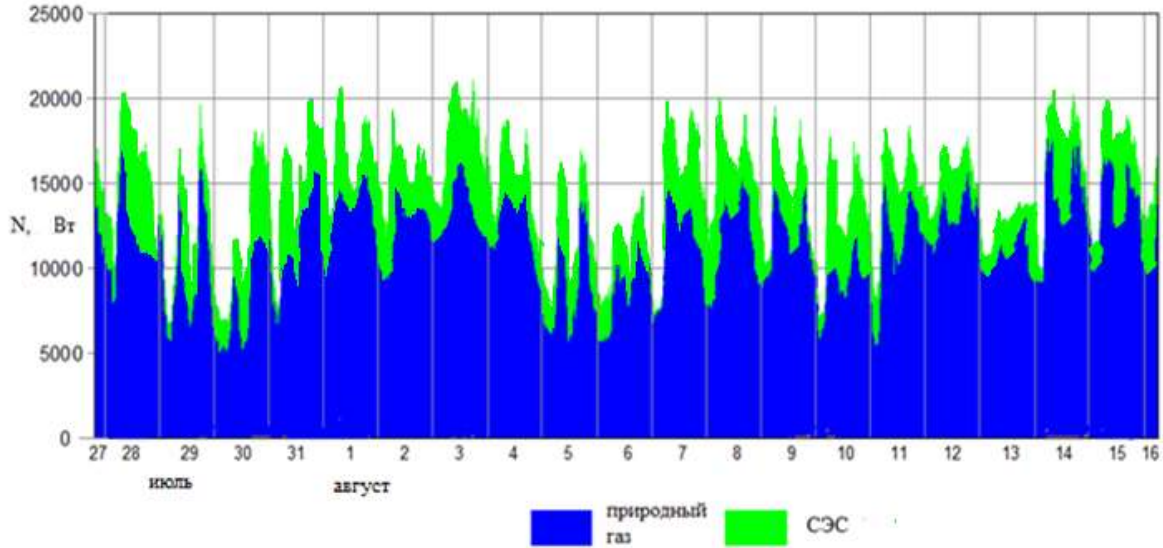


Рис.7. Суточный график генерации электроэнергии ГЭК

В третьей главе сформулирован научный подход к решению задач тепло-массообмена и газодинамики подсистемы по активации угля, рис.8.

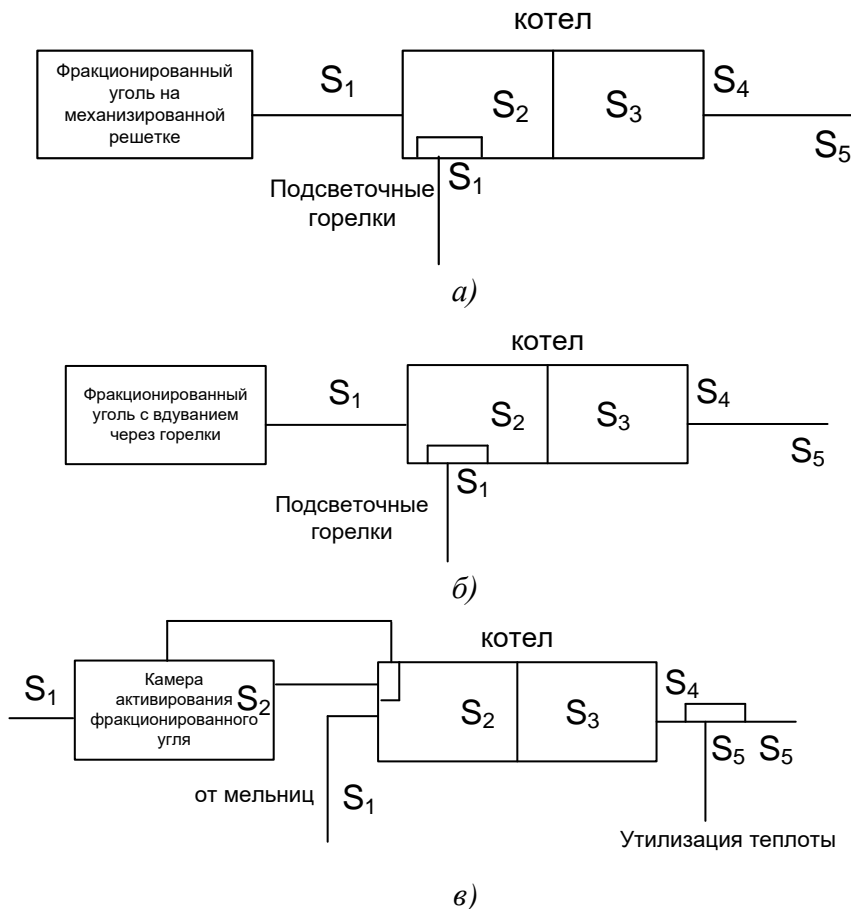


Рис.8. Основные схемы методологии тепловой части ГЭК: а, б, в – пояснения по тексту

Оценка работы энергокомплекса количественным способом сводится к поиску критерия в разрабатываемой методологии.

Многокритериальную задачу необходимо свести к однокритериальной, а именно к выбору обобщенного критерия, который является комбинацией частных. При этом дополнительные критерии имеют свои весовые коэффициенты.

При «суммировании» этих частных критериев решается оптимизационная задача тепловой схемы энерготехнологического комплекса по активации угля.

Методология тепловой части ГЭК имеет цель – поиск максимума или минимума от функции:

$$\text{Min}(\text{max})Z[Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau)] = Z^* \quad (11)$$

В формуле (11) $X_u(\tau) = \Phi_x[X(\tau), E_x(\tau)]$, $U_u(\tau) = \Phi_u[U(\tau), E_u(\tau)]$, $Y_u(\tau) = \Phi_y[Y(\tau), E_y(\tau)]$ – данные об измеренных величинах $X(\tau)$, $U(\tau)$, $Y(\tau)$ и погрешностях измерений $E_x(\tau)$, $E_u(\tau)$, $E_y(\tau)$; Φ_x , Φ_u , Φ_y – определенные операторы для системы измерения величин.

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

$$U_u^*(\tau) = \varphi[Y_u(\tau), U_u(\tau), X_u(\tau), Z^*], \quad (12)$$

которая обеспечивает возможное приближение к значению Z^* .

По зависимости (12) задается вектор искомого положения системы, которое задано заранее. В этом случае Z^* :

$$Z^* = Z[\varepsilon(\tau)]. \quad (13)$$

В зависимости (13) $\varepsilon(\tau)$ – ошибка вектора выходного сигнала.

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

$$U^*(\tau) = \varphi[\varepsilon(\tau)]. \quad (14)$$

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

Согласно инверсионной токовой схеме, рис.8, котел, как часть энергокомплекса, разбивается на 5 частей, узловые точки обозначим $S1, \dots, S5$. Схема 8,а относится к котлу со слоевым сжиганием и механической решеткой, схема 8,б – к котлу с факельной технологией активации, рис.8,в – к выносной камере активации в потоке продуктов сгорания с возможностью утилизации теплоты.

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

$S2$ – точка соответствует зоне интенсивного горения. Эта зона формируется для разных котлов по определенной конструкции. Из этой зоны выходные сигналы – состав продуктов сгорания, их скорость и температура.

$S3$ – 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 теплообмена и газодинамики, задаваясь данными о параметрах воды и пара в котле. Вторая ветвь наоборот решается относительно пара и воды с заданными значениями из уравнений теплообмена и газодинамики.

S4 – точка соответствует радиационно-конвективным поверхностям или зоне охлаждения. 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 низкопотенциальными источниками теплоты, а именно, это температура уходящих газов и температура охлаждения активного угля, которая определяет экономический фактор работы.

В третьей главе предлагается модель распределения пылевых частиц на входе в узловую точку S2, это новое условие учета переизлучения в зоне интенсивного горения, рис.9, а также определения температуры как адиабатической, так и практической.

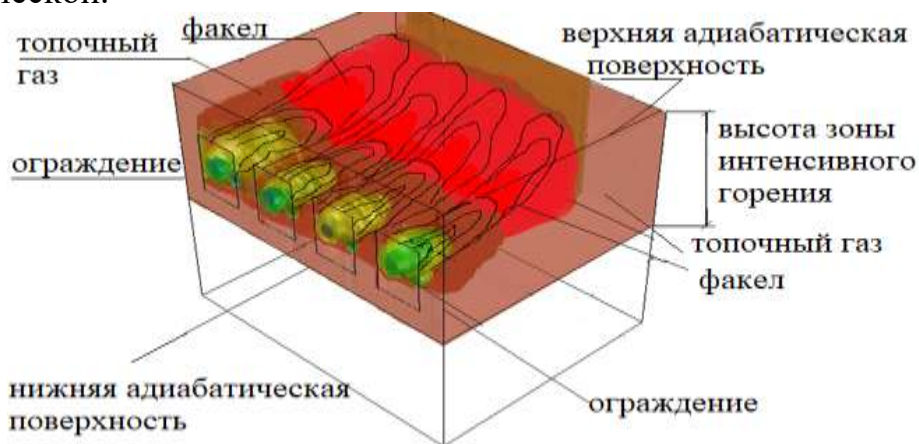


Рис.9. Схема на участках S2-S3 при активации угля в энергокомплексе

Далее теория теплообмена расширена математическим описанием гранулометрического состава пыли в потоке, в разрабатываемой инверсионной стоковой методологии в стоковых точках S1 и далее в точке S2. Кроме того, использована разработанная математическая модель горения (и охлаждения в режиме активации) 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 охлаждения, горения и теплообмена на участке S2, в котором учитываются выходные сигналы участка S1. Представлена модель распределения пылевых частиц на входе в узловую точку S2, это новое условие учета переизлучения в зоне интенсивного охлаждения и определения температуры как адиабатической, так и практической.

Схема замещения приводится в виде (15) – это уравнение учитывает среднюю арифметическую величину между двумя интервалами:

$$F_i = 0,5 [F(\delta_1 / \delta_2) + F(\delta_2 / \delta_3)] = 0,5 [\exp(-b\delta_1^n) - \exp(-b\delta_3^n)]. \quad (15)$$

В формуле (15) b и n – коэффициенты анализа пылевых частиц.

Гауссова кривая позволяет показать плотность распределения пылевых частиц с достаточной достоверностью

$$\varphi(u) = \exp(-0,5u^2) / \sqrt{2\pi}, \quad (16)$$

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.

Линеаризовать логарифмически расчетное значение и кривую по уравнению (16) можно по уравнению (17):

$$y_2 = \ln \varphi(u) = -(0,92 + 0,5u^2). \quad (17)$$

По уравнению (17) определяется корреляционный коэффициент, который используется для коррекции уравнения (16).

Для запыленного потока газов использована формула скорости:

$$w_{l,T} = 1,93w_0 (T/T_0)(l/d_0)^{-0,5}. \quad (18)$$

В формуле (18) w_0, T_0 – начальные значения скорости и температуры, l – длина участка горения, d_0 – условный диаметр ввода потока.

Далее определена безразмерная температура горения пылевых частиц:

$$\Theta = \exp(-3BiFo), \quad (19)$$

где в формуле (19) числа Био и Фурье содержат физические параметры, относящиеся к материалу пылевых частиц.

Для определения времени интенсивного горения учтен параметр m :

$$m = 1 + \alpha\delta / 2\lambda(\zeta + 2) = \alpha [1/\alpha + 0,5\delta/\lambda(\zeta + 2)]. \quad (20)$$

$$m = 1 + 0,5Bi / (\zeta + 2). \quad (21)$$

Представив пылевые частицы условными сферами, можно использовать значения $\zeta = 3$, λ, α – коэффициент теплопроводности пылевых частиц и коэффициент теплоотдачи на поверхности частиц соответственно.

Время интенсивного горения:

$$\tau_{инт} = [\delta\rho c m / (2\alpha\zeta)] \ln(\theta_0 / \theta_{инт}), \quad (22)$$

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

На рисунке 10 представлена номограмма, построенная по уравнению (19), которая 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 .

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 $\theta_l = \theta_{вс} = t_r - \Delta t_{вс}$ и с заменой концентрации и температуры на таковые при воспламенении можно в (19) подставить вместо $\theta_l = \theta_{вс}$, что дает возможность определить время воспламенения при $m \approx 1,0$ и $\zeta = 3,0$:

$$\tau_{вс} = [0,4 \cdot 10^6 \delta / 6\alpha] \ln(\theta_0 / \theta_{вс}), \quad (23),$$

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

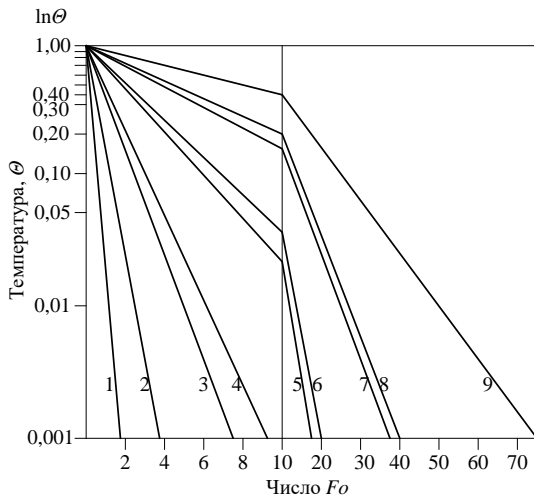


Рис. 10. Номограмма по определению безразмерного времени процесса нагрева Fo для частиц размером δ по числу Bi : 1 – $Bi = 0,18$; 2 – $Bi = 0,091$; 3 – $Bi = 0,045$; 4 – $Bi = 0,0364$; 5 – $Bi = 0,0182$; 6 – $Bi = 0,01164$; 7 – $Bi = 0,0091$; 8 – $Bi = 0,0082$; 9 – $Bi = 0,0045$

Движение среды факела на начальном участке зоны интенсивного горения подвергается изменениям и корректировкам при реализации режимов наиболее оптимальных температур при максимальном тепловыделении, поэтому предложен специальный математический аппарат, который помогает исследованию.

Согласно разработанным моделям среда энергокомплекса разбивается на систему и подсистемы. Первая подсистема – среда газа, вторая – среда факела, третья – оградительные элементы. Первые две считаются 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 $S2$. Эти параметры, а именно концентрация (состав) продуктов сгорания и температура наиболее важны для определения свойств излучения.

При определении оптической длины излучения (толщины слоя) запыленных газов следует применить совместное уравнение законов Бугера и Бера:

$$\varepsilon_{z+\delta} = a_{z+\delta} = 1 - e^{-(Bu_z + Bu_\delta)}. \quad (24)$$

Оградительные конструкции характеризуются постоянным интегральным значением ε_{oz} , которое зависит от геометрических характеристик камеры сгорания. Оградительные поверхности вогнуты, что добавляет в расчеты самооблучение. Подобное наблюдается при горении природного газа как в ослабленном газовом потоке, так и в запыленном потоке вблизи поверхностей нагрева.

Адиабатические оболочки в газовой среде – разработка автора, они виртуальны, через них не проходит тепловое излучение. Такие оболочки необходимы для соблюдения физических условий существования температурных, скоростных и концентрационных полей между стоковыми точками $S1$, $S2$, $S3$ согласно разработанной методологии тепловой части ГЭК. Тепловыделение от факела:

$$q_\phi = q_z^\phi + (1 - \varepsilon_z) \cdot q_z^{oz} + Q_\phi / F_\phi \cdot [(1 - \varepsilon_z)^2 \cdot F_\phi / F_{oz} - 1] + (1 - \varepsilon_z) \cdot [Q_{\text{вз.оз}} / F_{oz} - q_{oz}]. \quad (25)$$

В уравнении (25) 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, ε_z – степень черноты среды газа.

Из уравнения (25) следует, что величина q_ϕ зависит от нескольких основных параметров, а именно q_2^ϕ , q_2^{oz} , ε_2 и, наконец, от величины $\varphi_{oz,\phi} = F_\phi / F_{oz}$, которая называется угловым коэффициентом, в данном случае для теплового излучения со стороны ограждающих конструкций на среду факела.

Плотность теплового излучения от среды газа определяет три режима: $q_2^\phi = q_2^{oz}$ – распределенное равномерно, $q_2^\phi > q_2^{oz}$ – направленное прямое на факел со стороны топочных газов, $q_2^\phi < q_2^{oz}$ – направленное косвенное на ограждающие конструкции со стороны топочных газов.

Результирующий тепловой поток излучением:

$$Q_\phi^{pez} = C_{z,oz,\phi} \cdot F_\phi \cdot [\theta_2^4 - \theta_\phi^4]. \quad (26)$$

В уравнении (26) $C_{z,oz,\phi}$ – коэффициент теплового излучения, приведенный к системе «среда факела – среда газа – ограждающие конструкции»:

$$C_{z,oz,\phi} = C_0 \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_\phi \cdot \frac{1 + \varphi_{oz,\phi} \cdot (1 - \varepsilon_2) - \frac{(q_{oz} - q_{вз,оз}) \cdot (1 - \varepsilon_2)}{C_0 \cdot \varepsilon_2} \cdot \frac{F_\phi}{F_{oz}}}{\varphi_{oz,\phi} \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot [\varepsilon_\phi + \varepsilon_2 \cdot (1 - \varepsilon_\phi)] + \varepsilon_2}. \quad (27)$$

С учетом уравнений (26), (27) $[\theta_2^4 - \theta_\phi^4] = [(T_2/100)^4 - (T_\phi/100)^4]$.

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:

$$C_{z,oz,\phi} \equiv C_{np}. \quad (28)$$

Значение $C_{z,oz,\phi}$ зависит от ε_2 , от соотношения площадей среды факела и ограждающих конструкций $\varphi_{oz,\phi}$, от величины ε_ϕ , рис.11.

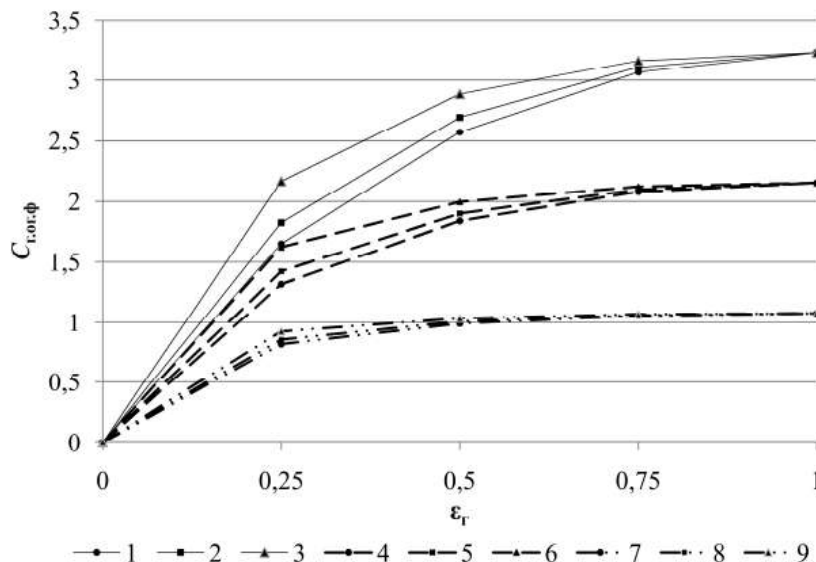


Рис. 11. Графики $C_{z,oz,\phi} = f(\varepsilon_2)$: 1 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,5$; $\varepsilon_\phi = 0,6$; 2 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,0$; $\varepsilon_\phi = 0,6$; 3 – $\varphi_{oz,\phi} = 0,5$; $\varepsilon_\phi = 0,6$; 4 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,5$; $\varepsilon_\phi = 0,4$; 5 – $\varphi_{oz,\phi} = 1,0$; $\varepsilon_\phi = 0,4$; 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 достижении газо-воздушной смесью концентрации, соответствующей нижнему пределу воспламенения $\mu_{см} = \mu_{вс}$, температура соответствует темпера-

турному перепаду воспламенения $\Delta t_{bc} = t_{bc} - 300$, а $\theta_l = \theta_{bc} = t_r - \Delta t_{bc}$ и с заменой концентрации и температуры на таковые при воспламенении можно в (19) подставить вместо $\theta_l = \theta_{bc}$, что дает возможность определить время воспламенения при $m \approx 1,0$ и $\zeta = 3,0$:

$$\tau_{bc} = [0,4 \cdot 10^6 \delta / 6\alpha] \ln(\theta_0 / \theta_{bc}), \quad (23)$$

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

Результирующее тепловое излучение с учетом введенных положений методологии преобразуем к виду:

$$Q_{\phi}^{рез} = \frac{\varepsilon_{\phi} \cdot F_{\phi} \cdot \left[\frac{F_{\phi}}{F_{oz}} \cdot (1 - \varepsilon_z) + 1 \right] \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_z \cdot [\theta_z^4 - \theta_{\phi}^4] - (q_{oz} - q_{вз.оз}) \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot \frac{F_{oz}}{F_{\phi}}}{\frac{F_{\phi}}{F_{oz}} \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot (1 - \varepsilon_z) \cdot [\varepsilon_{\phi} + \varepsilon_z \cdot (1 - \varepsilon_{\phi})] + \varepsilon_z}. \quad (29)$$

Из формулы (29) следует, что результирующее тепловое излучение на среду факела может быть повышено при увеличении температуры среды газа T_z , увеличении значений ε_z и $\varphi_{оз.ф}$, причем особенно сильное влияние имеют уменьшение ε_z ниже 0,4, и уменьшение $\varphi_{оз.ф}$ до 0,7.

В третьей главе также представлена математическая модель обобщенного теплообмена.

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

$$\text{div} \vec{q}_k + \text{div} \vec{q}_r + \text{div} \vec{q}_l = 0. \quad (30)$$

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 переноса энергии топочной среды, Вт/м².

С учетом принятых уточнений уравнение энергии (30) преобразуется к виду

$$\rho c_p \vec{w} \nabla T_{об} - \text{div}(\lambda_{об} \nabla T_{об} + \rho c_p D \nabla T_{об}) = 0. \quad (31)$$

Далее, при делении на ρc_p , замене \vec{w} на w_x и введении относительной температуры $\theta = T_{об} - T_{cm}$, где T_{cm} – температура тепловоспринимающих поверхностей в этой части топки, возможен переход к дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{w_x}{a_{об}} \frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0. \quad (32)$$

В уравнении (32) $a_{об} \equiv \lambda_{об} / \rho c_p$ – обобщенный коэффициент температуропроводности, м²/с. Кроме того, принято, что изменение температуры вдоль координаты y связано только с градиентно-диссипативным вторым слагаемым, а изменение $T_{об}$ вдоль координаты x связано только с конвективно-дисперсионным первым слагаемым. 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 $\vec{q}_{об} = -\lambda_{об} \cdot \nabla T_{об}$.

Решение уравнения (32) возможно методом разделения переменных.

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

$$\theta_x'' - w_x / a_{об} + k^2 \theta_x = 0; \quad \theta_x = C_1 \exp(\gamma_1 x) + C_2 \exp(\gamma_2 x); \quad (33)$$

$$\theta_y'' - k^2 \theta_y = 0; \quad \theta_y = C_3 \sin(ky) + C_4 \cos(ky). \quad (34)$$

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

$$\left. \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad (35)$$

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

$$\theta = \theta_x \cdot \theta_y = C_1 C_4 \exp(\gamma_1 x) \cos(ky) + C_2 C_4 \exp(\gamma_2 x) \cos(ky). \quad (36)$$

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

$$\left. \frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right|_{y=\delta} = -\frac{\alpha_c}{\lambda_{об}} \theta_{y=\delta}, \quad \text{откуда} \quad \frac{k\delta}{Nu_{об}} = \text{ctg}(k\delta). \quad (37)$$

Граничные условия III рода в форме (37), 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 (37) $k\delta = \mu_i$ представляют сходящийся ряд собственных чисел краевой задачи при $i = 1, 2, 3 \dots n$; решения уравнения (37) достаточно подробно изучено в математическом анализе в применении к краевым задачам теплопроводности. Единственным параметром, влияющим на решение уравнения (37) 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 по ряду корней при $n \leq 6$, при $n > 6$ можно воспользоваться рекуррентным соотношением $\mu_{n+1} \approx \mu_n + \pi$.

Для радиационного теплового потока излучающей среды на экран с поглощательной способностью A_{cm} можно применить формулу

$$q_{л} = \sigma_0 (T^4 - T_{cm}^4) / (1/A_{cm} - 1/2), \quad (38)$$

и с учетом изложенных выше выводов

$$q_{рез} = \psi \sigma_0 (T^4 - T_{cm}^4) (Bo + 1) / (1/A_{cm} - 1/2), \quad (39)$$

получаем суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_c = \frac{\psi_3 \sigma_0 (Bo+1) (T^4 - T_{cm}^4)}{(1/A_{cm} - 1/2) (T - T_{cm})} = \frac{\psi_3 \sigma_0 (Bo+1) T^3}{(1/A_{cm} - 1/2)} F(T), \quad (40)$$

где $F(T) = [1 + (T_{cm}/T) + (T_{cm}/T)^2 + (T_{cm}/T)^3]$. 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 $F(T)_{cp} = 3,25$. 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. Число Нуссельта можно определить по формуле:

$$Nu_{об} \equiv \frac{\alpha_c \delta}{\lambda_{об}} = \frac{3 \psi_3 k_{cp} \delta (Bo+1) \sigma_0 T^3 F(T)_{cp}}{16 (1/\psi_3 + 1/2) \sigma_0 T^3 b_{об}} = 0,61 B\bar{u} \frac{\psi_3}{(1/\psi_3 + 1/2)} \frac{(Bo+1)}{b_{об}}, \quad (41)$$

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.

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 дает

$$C_1 + C_2 = \theta_n, \quad (42)$$

и решение уравнения (42) при $C_3 = 0$ с учетом корней μ_i , где $Y = y/\delta$:

$$\theta_n = \sum_{i=1}^n A_i \cos(\mu_i Y), \quad (43)$$

Коэффициенты A_i определяются при подчинении решения (43) условию $\theta_n = const$ с учетом четности функции косинуса

$$A_i = \frac{\theta_n \cdot 2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i}, \quad (44)$$

при этом решение уравнения (43) приобретает вид

$$\theta_y = \theta_n \sum \frac{2 \sin \mu_i}{\mu_i + \sin \mu_i \cos \mu_i} \cos(\mu_i Y). \quad (45)$$

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

$$\left. \frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right|_{x=h} = -\frac{\alpha_c}{\lambda_{об}} \theta_{x=h} \quad \text{или} \quad \theta_{x=h} = -\frac{\lambda_{об}}{\alpha_c} \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right)_{x=h}, \quad (46)$$

что при подстановке в уравнение дает

$$C_1 \gamma_1 \exp(\gamma_1 h) + C_2 \gamma_2 \exp(\gamma_2 h) = -\frac{\alpha_c}{\lambda_{об}} [C_1 \exp(\gamma_1 h) + C_2 \exp(\gamma_2 h)]. \quad (47)$$

Совместное решение уравнений относительно C_1 и C_2 дает

$$C_1 = -\frac{\theta_n (\beta_2/\beta_1) \exp(\gamma_2 h)}{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1) h}, \quad (48)$$

$$C_2 = \theta_n - C_1 = \frac{\theta_n}{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1) h}, \quad (49)$$

и решение для распределения температуры по оси x будет иметь вид

$$\theta_x = C_1 \exp(\gamma_1 x) + C_2 \exp(\gamma_2 x) = \theta_n \exp(\gamma_2 x) \frac{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)(h - x)]}{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1) h}. \quad (50)$$

В решении (50) 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 , рис.12.

$$\Theta = \frac{\theta_x \theta_y}{\theta_n^2} = \sum_{i=1}^n D_i \cos(\mu_i Y) \exp(\gamma_2 x) \frac{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp[(\gamma_2 - \gamma_1)(h-x)]}{1 - (\beta_2/\beta_1) \exp(\gamma_2 - \gamma_1)h}. \quad (51)$$

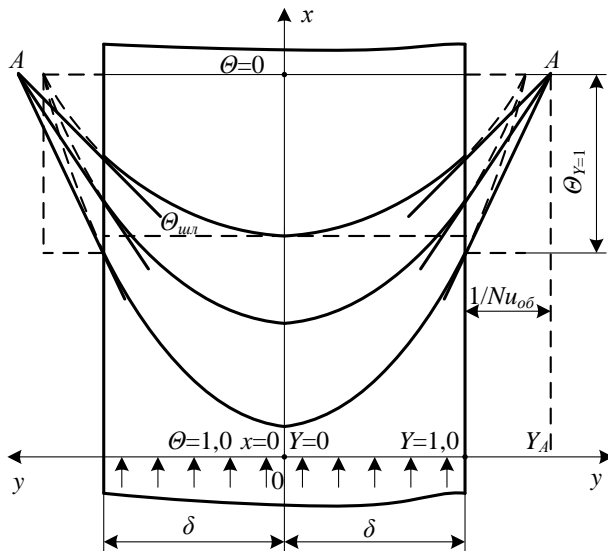


Рис. 12. Температурное поле в камере сгорания (активации) в стационарном режиме: $\Theta = \theta_x \theta_y / \theta_n^2$, $Y = y/\delta$, $x = h_k$ – координата выходного сечения

В четвертой главе рассмотрены перспективные проекты энергокомплексов по активации угля, в том числе с применением систем утилизации теплоты.

Автором разработаны возможные варианты совместной выработки теплоты и активного угля в едином энергокомплексе, рис.13, 14, 15.

В качестве первоначальной проверки методологии в пятой главе представлены результаты компьютерного моделирования движения запыленного газового потока и горения природного газа. При исследовании движения задавался состав пылевых частиц и их размеры. Для более детального исследования температурных, скоростных и концентрационных полей выбраны начальные условия процесса горения.

Граничные условия для компьютерного моделирования при движении и горении природного газа: скорость газа 0,528 м/с, скорость воздуха 0,66 м/с, удельная теплота сгорания 50,11 МДж/кг. Граничные условия для компьютерного моделирования при движении и запыленного газового потока, скорость газа 0 м/с, скорость пыли 1,7638 м/с, скорость воздуха (для пыли) 2,3458 м/с, удельная теплота сгорания 12,0 МДж/кг. Кроме того, моделировалось новое горелочное устройство, предназначенное в том числе, для реализации процесса активации угля и выработки теплоты в энергокомплексе.

На рис.16 показано распределение температур в котле при сжигании запыленного газового потока. Для моделирования задачи не только с течения газа, но и теплообмена – выберем модель турбулентного течения k- ω SST. Данная модель хорошо описывает течение вблизи твердых стенок, а также теплоотдачу на стенке. 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.

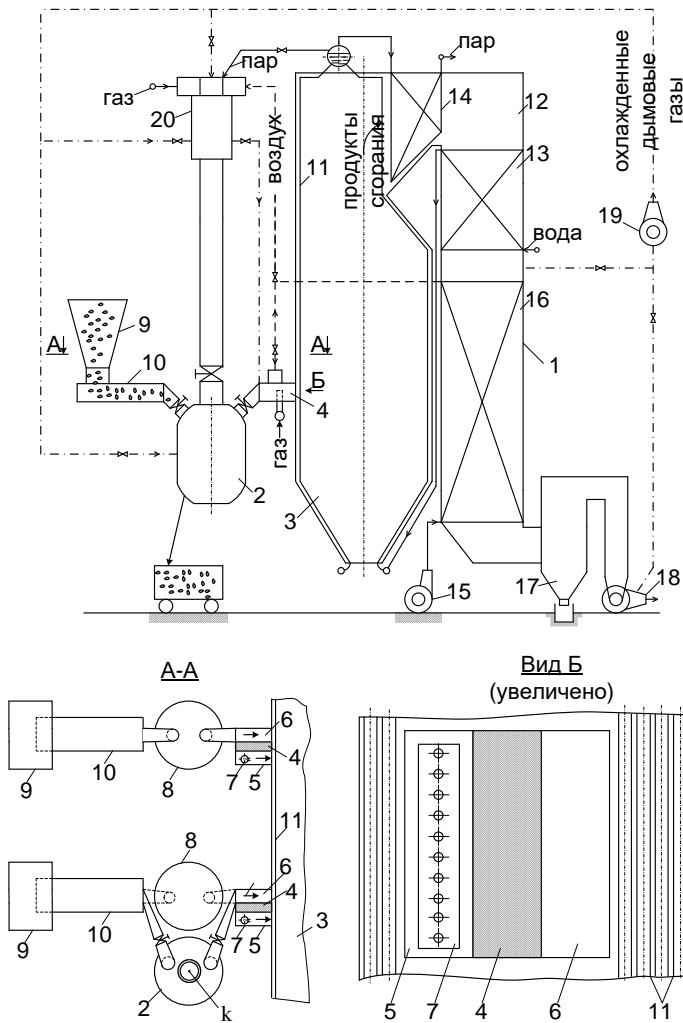


Рис. 13. Система работы камеры в составе единого энергокомплекса: 1 – котел, 2 – камера, 3 – топка, 4 – подсветочного топлива; многофункциональные горелочные устройства, 5, 6 – каналы ввода газозвоздушной и пылевоздушной смесей, 7 – сопла природного газа, 8 – мельницы, 9 – бункеры, 10 – питатели, 11 – экраны, 12 – газоход, 13 – водонагреватель, 14 – пароперегреватель, 15 – вентиляторы, 16 – воздухоподогреватель, 17 – газозолоочистка, 18 – дымососы, 19 – вентилятор, 20 – горелочно-смесительное устройство

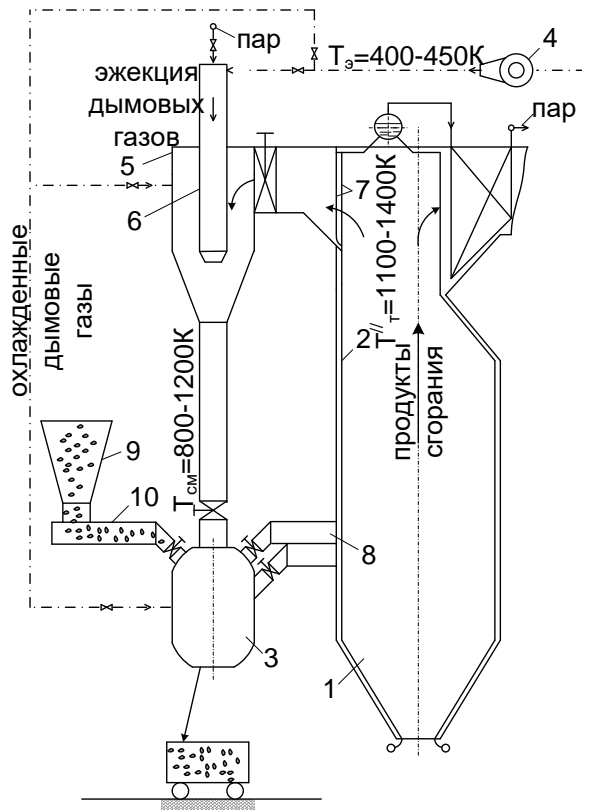


Рис. 14. Энергокомплекс с камерой, но без подсветочного топлива: 1 – топочная камера; 2 – экранные трубы; 3 – камера; 4 – нагнетатель высокого напора; 5 – устройство смешения; 6 – узел эжекции; 7 – окно ввода газов; 8 – мельницы; 9 – емкость исходного продукта; 10 – регулятор подачи исходного продукта

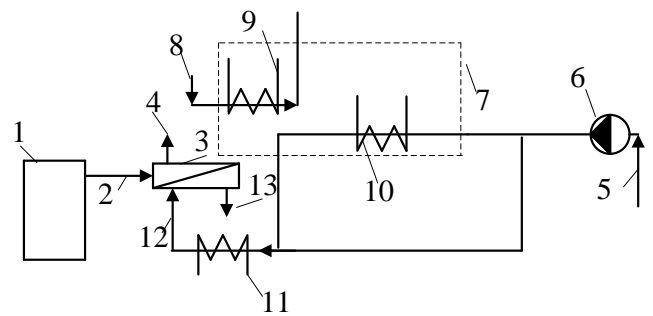


Рис. 15. Технологическая схема энергокомплекса с низкопотенциальными источниками теплоты: 1 – камера активации; 2 – вывод готового продукта; 3 – камера охлаждения; 4 – вывод охлажденного готового продукта; 5 – исходная вода; 6 – насос исходной воды; 7 – подсистема низкопотенциальных источников теплоты; 8 – теплота грунта/воды; 9 – испаритель; 10 – конденсатор; 11 – подогреватели блока химводоподготовки; 12 – ввод химочищенной воды; 13 – вывод нагретой химочищенной воды (в деаэратор)

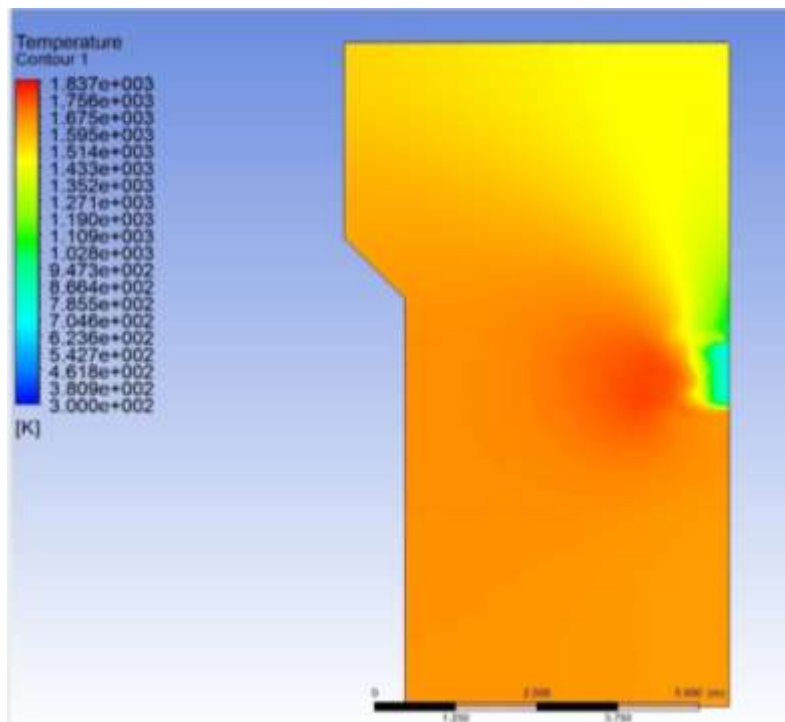


Рис. 16. Распределение температур при сжигании запыленного потока

Таблица 1. Сравнение результатов газодинамики

Параметр	Расчет по стандартным методикам	Расчет по новой методологии	Результаты компьютерного моделирования
Температура на выходе, °С	1050	1035	1046
Скорость истечения, м/с	1,72	1,75	1,76

Кроме того, сравнивались результаты натуральных испытаний физического моделирования.

Таблица 2 Характеристики участка факельного воспламенения по результатам натуральных испытаний и лабораторных исследований

Усредненные показатели	Топливо		
	Челябинский уголь	Шубар-кольский уголь	Углеродосодержащий материал
Теплота сгорания, Q^p , МДж/кг	10,3/12,8	15,3	18,0/22,2
Влажность, W^p , %	25/13	18,0	3,0/1,0
Зольность, A^p , %	27/20	10,2	43/40
Выход летучих, V^r , %	36/39	46	–
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
Относительная длина участка воспламенения в режиме выработки тепла **):			
$\bar{l}_ф = l_ф/l_ф^{ЧУ}$	1,6/1,0	1,0	1,6/1,0
Относительная массовая доля воспламенившейся пыли на участке $l_ф^{**}$):			
$\bar{D}_{лф} = D_{лф}/D_{лф}^{ЧУ}$	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; $l_ф^{ЧУ} = 1,5$ м; $D_{кф}^{ЧУ} = 0,6$; $D_{лф}^{ЧУ} = 1,0$.

Размеры частиц на участке интенсивного горения могут быть определены:

$$\delta_{лф} = \left(\frac{\tau_{\phi} \cdot (T_z)^4}{k_{вл} \cdot 5,3 \cdot 10^{14}} \right)^{5/4}, \quad (52)$$

$$\delta_{кф} = \left(\frac{\tau_{\phi} \cdot (T_z)^3}{k_{вк} \cdot 1,12 \cdot 10^{10} \cdot \rho_y \cdot (21/O_2)^{n_1}} \right)^{10/12}, \quad (53)$$

Размеры частиц с полностью выгоревшими летучими и коксом определены:

$$\delta_{зл} = \left(\frac{\tau_{\phi}}{k_{зл} \cdot 0,5 \cdot 10^6} \right)^{1/2}, \quad (54)$$

$$\delta_{зк} = \left(\frac{\tau_{\tau} \cdot (T'_z)^{0,9} \cdot O'_2}{k_{зк} \cdot 2,21 \cdot 10^8 \cdot \rho_k \cdot (1 - A_k)} \right)^{1/2}, \quad (55)$$

При физическом моделировании и далее в расчетах время $\tau_{вл}$, $\tau_{гл}$, $\tau_{вк}$ вычислялось по формулам автора работы.

Первый период характеризуется безвоспламенительным нагревом частицы с выходом влаги и природных горючих летучих веществ; он равен, с:

$$\tau_{влi} = k_{вл} \cdot 5,3 \cdot 10^{14} \cdot T_r^{-4} \cdot \delta_i^{0,8}. \quad (56)$$

Последующий нагрев всех компонент частицы в кислородной среде вызывает воспламенение и горение летучих веществ; время их выгорания, с:

$$\tau_{гли} = k_{гл} \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot \delta_i. \quad (57)$$

Время начала окисления коксового остатка i -той частицы, с:

$$\tau_{вкi} = k_{вк} \cdot 1,12 \cdot 10^{10} \cdot \rho_y \cdot \delta_i^{1,2} \cdot T_r^{-3} \cdot (21/O_2)^n. \quad (58)$$

Последний период связан с выгоранием коксового остатка, с:

$$\tau_{гкi} = f(O_2; T_r; \delta_i). \quad (59)$$

В формулах (49)–(52) $k_{вл}$, $k_{гл}$, $k_{вк}$ – опытные коэффициенты, ρ_y – плотность угля, кг/м³, $n \approx 0,5$, δ_i – размер i -той частицы, м; O_2 – концентрация кислорода, %; T_r – температура средняя в камере, К. Расчеты сведены в таблицы 3 и 4.

Временные технологические отрезки связаны между собой:

$$\tau_{вкi} = \tau_{влi} + \tau_{гли} + \Delta\tau_i, \quad (60)$$

причем $(\Delta\tau_i/\tau_{вкi}) \approx 0,1 - 0,15$.

Таким образом, на основе экспериментальных данных получены зависимости времени нахождения частиц на каждом из участков в процессе активации угля. Зависимости – экспоненциальные, имеют общий вид:

$$\tau = A \cdot \exp(B \cdot \delta), \quad (61)$$

где A , B – коэффициенты, δ – текущий размер частицы.

Уравнение (61) можно преобразовать для времени активации угольных частиц шубаркольского бурого угля марок БЗ:

$$\tau_{вл} = 0,576 \cdot \exp(0,832 \cdot \delta), \quad (62)$$

$$\tau_{зл} = 0,696 \cdot \exp(0,533 \cdot \delta), \quad (63)$$

$$\tau_{вк} = 0,031 \cdot \exp(1,386 \cdot \delta), \quad (64)$$

Для челябинского бурого угля марки БЗ коэффициент правую часть уравнения (61) следует помножить на коэффициент 1,1.

Таблица 3. Характеристики процесса активации. Расчеты на основе полученных кинетических констант лабораторных исследований – шубаркольский уголь

T_r, K	$\delta \times 10^3, м$	$O_2, \%$	$\tau_{вн}, с$	$\tau_{гль}, с$	$\tau_{вк}, с$
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

Таблица 4. Характеристики процесса активации. Расчеты на основе полученных кинетических констант лабораторных исследований – челябинский уголь

T_r, K	$\delta \times 10^3, м$	$O_2, \%$	$\tau_{вн}, с$	$\tau_{гль}, с$	$\tau_{вк}, с$
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

В пятой главе также исследовалась работа теплового насоса на натурной установке в лабораторных условиях. На рисунке 17 приведена схема установки.

Основные обозначения на принципиальной схеме 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, 20 – коллектор.

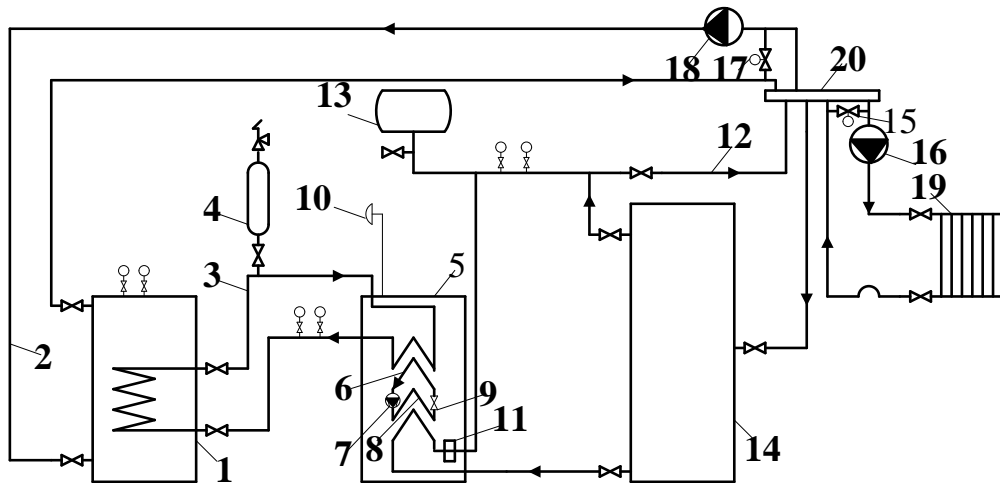


Рис.17. Принципиальная схема экспериментальной установки (обозначения по тексту)

Таблица 5. 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
$V_o = G_{хл.аг} \cdot u_1$	0,001625	м ³ /с
$q_v = Q_{т.общ} / V_o$	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
$T_B^{cp} = \frac{T_{в.вых} - T_{в.вх}}{\ln \frac{T_{в.вых}}{T_{в.вх}}}$	315	К
$\tau_B = 1 - T_{о.с} / T_B^{cp}$	0,155	-
$e_B = \tau_B \cdot q_B$	35,6	кДж/кг
$e_э = \frac{N_э}{G_{ва}}$	52,75	кДж/кг
$\eta_э = \frac{e_B}{e_H + e_э}$	0,62	-

Шестая глава носит прикладной характер. Кроме того, в главе показаны перспективы использования разработанной методологии.

Разработана программа определения длины участка интенсивного горения и времени движения газового потока на этом участке в стоковой точке S3.

1. Основное уравнение теплового баланса участка воспламенения факела:

$$l_{\phi} = \frac{\lambda_{\Gamma} \cdot (T_{\phi 0} - T_0) \cdot F_{\phi}}{Q_{\text{H}}^{\text{p.o.}} \cdot V_{\text{p}}^{\circ} - \sigma_0 \cdot a_{\Gamma} \cdot T_{\phi 0}^4 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i \cdot F_i)_{\text{a.g.}}}, \quad (65)$$

где l_{ϕ} – длина факела на участке воспламенения, м; λ_{Γ} – условный коэффициент теплопроводности 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}° – расход топлива, кг/с.

Для начала расчета введены дополнительные ограничения. 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); $a_{\Gamma} \approx 0,9$. Величина V_{p}° принимается исходя из данных о работе котла. Величина $Q_{\text{H}}^{\text{p.o.}}$ 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 $\sum_{i=1}^{i=n} (\Psi_i \cdot F_i)_{\text{a.g.}}$ нормативный, причем площадь поперечного сечения факела в зоне интенсивного горения F_{ϕ} считается по (66) и (67). С фронтальной и встречной компоновками горелок:

$$F_{\phi} = N_{\text{a.g.}} \cdot A_{\Gamma}, \quad (66)$$

$$F_{\phi} = N_{\text{a.g.}} \cdot C_{\Gamma}, \quad (67)$$

где $N_{\text{з.и.г}}$ – высота зоны интенсивного горения, м; A_{Γ} – ширина котла, м; C_{Γ} – глубина котла, м. Величины $N_{\text{з.и.г}}$, A_{Γ} , C_{Γ} зависят от геометрии котла.

2. Скорость движения в факеле будет изменяться согласно зависимости:

$$\omega_{\phi} = \omega_0 \cdot k_{\text{F}} \cdot k_{\text{V}} \cdot k_{\text{T}}, \quad (68)$$

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:

$$k_{\text{F}} = (1 + 0,21 \cdot l_{\phi} / d_0)^{-2}, \quad (69)$$

Влияние факторов k_{V} и k_{T} на скорость топливовоздушной смеси на рассматриваемом участке воспламенения незначительно.

$$k_{\text{V}} = 1 / (1 + l_{\phi} (V^{\Gamma} / V^{\text{B}} - 1)), \quad (70)$$

$$k_{\text{T}} = T_{\phi} / T_0. \quad (71)$$

3. Время движения факела на участке горения, с:

$$\tau = l_{\phi} / \omega_{\phi}, \quad (72)$$

l_{ϕ} – длина факела на участке горения, м; ω_{ϕ} – скорость движения в факеле, м/с.

4. Адиабатическая температура по длине факела:

$$t_{\text{адиаб}} = \Phi(l_{\phi}) \cdot Q_{\text{H}}^{\text{p.}} / (c_{\text{p}} \cdot V^{\Gamma}). \quad (73)$$

5. Время нагрева до заданной температуры интенсивного выделения летучих веществ (воспламенения), с:

$$\tau_{\text{нагр.част.}} = \frac{\delta \cdot \rho \cdot c \cdot m}{2 \cdot \alpha \cdot \zeta} \cdot \ln \left(\frac{t_{\Gamma} - t_0}{t_{\Gamma} - t_{\text{восп}}} \right), \quad (74)$$

где δ – условный размер частицы вещества, содержащегося в запыленном потоке, м; ρ – плотность вещества, кг/м^3 ; c – массовая теплоемкость вещества, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; m – коэффициент термической массивности вещества; α – коэффициент теплоотдачи на поверхность вещества, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; ζ – коэффициент формы вещества; $t_{\text{Г}}$ – температура топочных газов, $^\circ\text{C}$; t_0 – начальная температура вещества, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{восп}}$ – температура воспламенения, $^\circ\text{C}$. При высоких значениях $t_{\text{восп}}$ время сушки можно не учитывать.

Разработанная программа может встраиваться как компонент системы автоматического регулирования и управления энергокомплексом, рис.18.

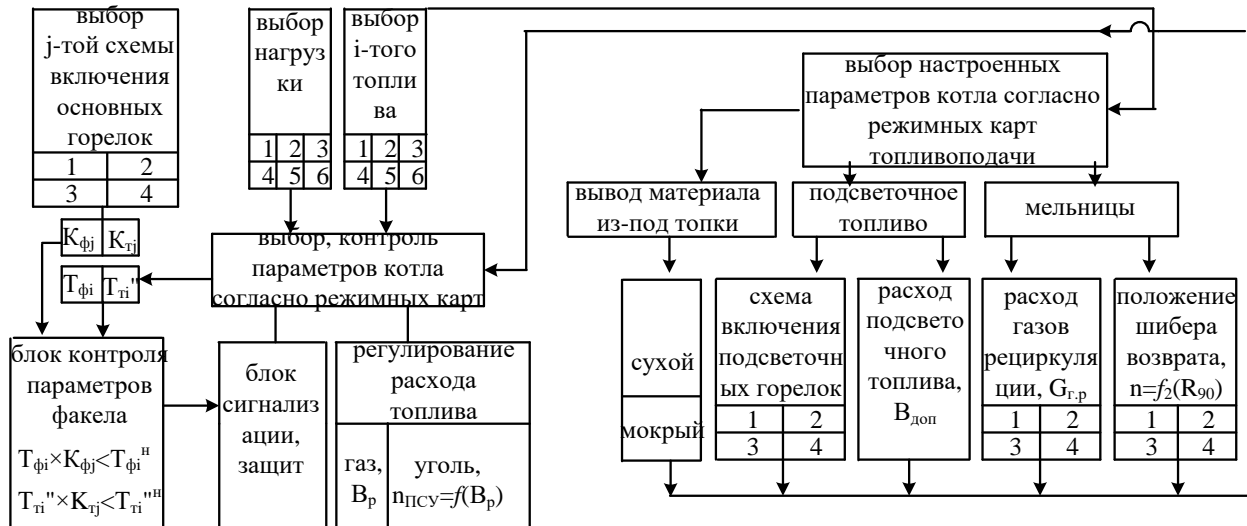


Рис.18. Алгоритм управления энергокомплексом

На рисунке 19 показаны данные натурных испытаний по сжиганию челябинского и шубаркольского бурых углей.



Рис.19. Опытные данные по температурам в тепловой части ГЭК

На рисунке 20 показано сравнение полученных результатов по челябинскому бурому углю: $a - T_{\text{ф}}=f(l_{\text{ф}})$; $b - a_{\text{ф}}=\Psi(l_{\text{ф}})$; 1 – натурные испытания установленных горелочных устройств; 2 – натурные испытания многофункциональных горелочных устройств; 3 – аналитический расчет по формулам автора; 4 – численное моделирование; 5 – аналитический расчет по В.И. Бабию, Ю.Ф. Куваеву.

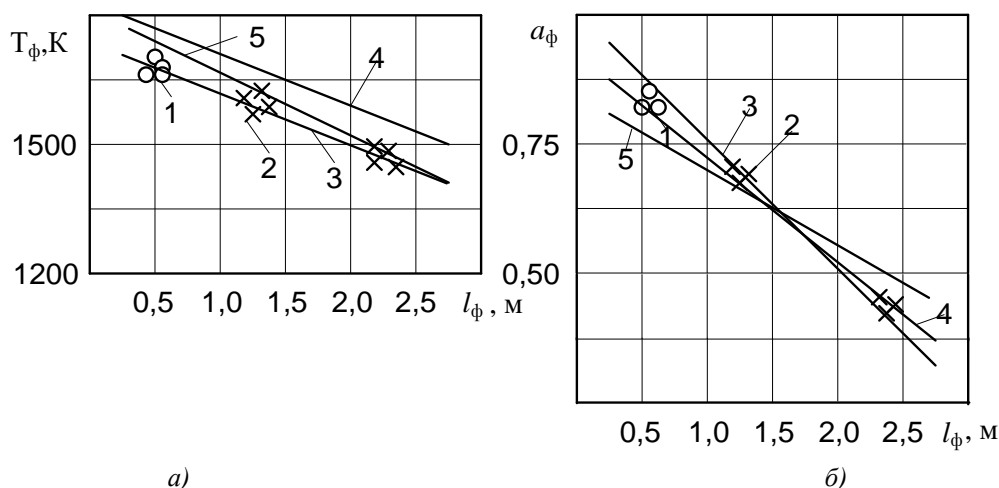


Рис. 20. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по челябинскому бурому углю (обозначения по тексту)

В **седьмой главе** показана экономическая целесообразность перевода существующих предприятий и ТЭЦ в гибридные энергокомплексы, использующих солнечную энергию и органическое топливо, производящих электрическую, тепловую энергию и активный уголь. 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. 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 мероприятия можно оценить по изменению годовых топливных затрат при выработке равноэквивалентной продукции:

$$\pm \Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = (C^r V_1^r \eta_{H1}^r + C^y V_1^y \eta_{H1}^y) - (C^y V_2^y \eta_{H2}^y - \mathcal{E}_3), \quad (75)$$

где \mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2 – топливная составляющая годовых затрат до и после перехода на режим полигенерации, руб./год; V_1^r , V_1^y – годовой расход горючего топлива для производства активного угля и угольной пыли до перехода на технологию полигенерации, т/год; V_2^y – годовой расход угля после перехода на технологию полигенерации, т/год; C^r , C^y – цена топлива для активации угля и угольной пыли, руб./т; η_{H1}^r , η_{H1}^y , η_{H2}^y – 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, \mathcal{E}_3 – снижение топливных затрат за счет надстройки солнечной электростанции. По данным Челябинской ТЭЦ-2, других ТЭС, а также технологии получения активации угля $\eta_H^y = 0,72-0,78$, $\eta_H^r = 0,85-0,88$. При колеблющейся стоимости угля (3500-4000) руб/т от разных Поставщиков различного качества со среднегодовой загрузкой объектов (0,4-0,6) уста-

новленной мощности формируется поле экономической выгоды от сокращения потребления топлива в энергокомплексе в режиме полигенерации, рис. 21.

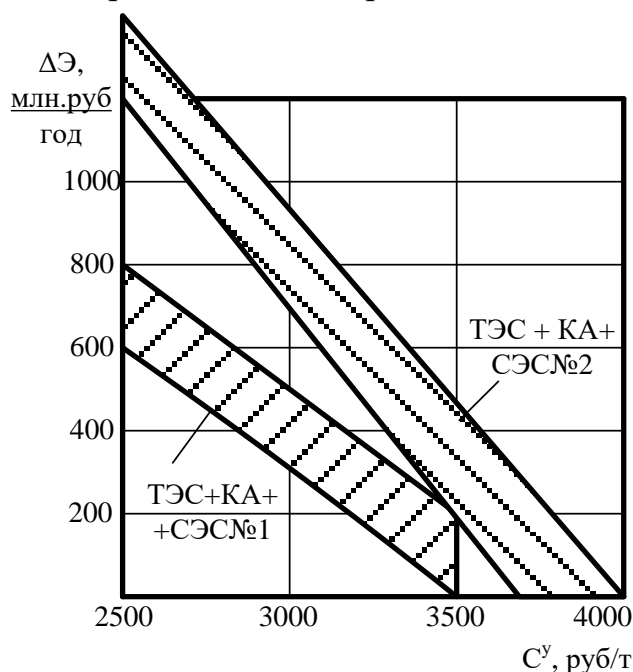


Рис.21. Экономическая эффективность от перевода ТЭС в ГЭК

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.

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 РФ 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».

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. 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 – 26; 0,43 п.л./0,43 п.л.

2. 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; 0,25 п.л./0,25 п.л.

3. Осинцев, К.В. Активирование угля в топке с механической решеткой / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, Т.А. Акбаев, В.И. Богаткин // Промышленная энергетика. – 2012. – № 7. – С. 28 – 31; 0,25 п.л./0,12 п.л.

4. 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; 0,37 п.л./0,37 п.л.

5. Осинцев, К.В. Регулирование параметров факела многофункциональных горелок в топках паровых котлов ТЭЦ г. Бишкек / К.В. Осинцев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. – №4 (78). – С. 44 – 47; 0,25 п.л./0,25 п.л.

6. Осинцев, К.В. Переход к низкотемпературному сжиганию топлива на котлах ТЭЦ г. Бишкек / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 8. – С. 29 – 33; 0,31 п.л./0,31 п.л.

7. Осинцев, К.В. 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 Юж-

но-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2012. – Вып. 17. – №16 (275). – С. 120–127; 0,5 п.л./0,1 п.л.

8. Осинцев, К.В. Получение активированного угля с использованием оборудования ТЭС и котельных / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, Т.А. Акбаев, В.И. Богаткин // Теплоэнергетика. – 2013. – № 8. – С. 57 – 64; 0,5 п.л./0,1 п.л.

9. Осинцев, К.В. Перспективы получения на ТЭС активных углей / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2013. – Т. 13, № 2. – С. 5–13; 0,56 п.л./0,56 п.л.

10. Осинцев, К.В. Расчетная модель топочного устройства с различными компоновками горелочных устройств / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, №3. – С. 5 – 14; 0,63 п.л./0,63 п.л.

11. Осинцев, К.В. Модель и методика теплового расчета топок с жидким шлакоудалением / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2014. – Т. 14, № 4. – С. 18 – 26; 0,56 п.л./0,56 п.л.

12. Осинцев, К.В. Расширение практического диапазона использования расчетной модели топочного устройства с твердым шлакоудалением / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2015. – №2. – С. 47–54; 0,5 п.л./0,5 п.л.

13. Торопов, Е.В. Адаптация дифференциального уравнения энергии к условиям топочных процессов в котельных агрегатах / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 1. – С. 5 – 10; 0,37 п.л./ 0,2 п.л.

14. Осинцев, К.В. Методика расчета тепловых характеристик топочного факела при сжигании промышленных газов / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 11 – 19; 0,56 п.л./0,56 п.л.

15. Торопов, Е.В. Концепция факельного континуума для зоны интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 5 – 10; 0,37 п.л./0,2 п.л.

16. Торопов, Е.В. Математическая модель теплообмена в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 4. – С. 19 – 25; 0,43 п.л./0,25 п.л.

17. Осинцев, К.В. Методика расчета тепловых характеристик топочного факела при сжигании промышленных газов / К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15, № 2. – С. 11 – 19; 0,56 п.л./0,56 п.л.

18. Торопов, Е.В. Основные характеристики факельного континуума в зоне интенсивного горения котельного агрегата / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 14 – 22; 0,56 п.л./0,3 п.л.

19. Торопов Е.В. Математическая модель определения начального участка гетерогенного факела и ее адаптация / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 15 – 22; 0,5 п.л./0,25 п.л.
20. Торопов Е.В. Математическая модель обобщенного теплообмена в топке котельного агрегата – парадигма теплообмена / Е.В. Торопов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2017. – Т.17, № 1. – С. 5 – 12; 0,5 п.л./0,25 п.л.
21. Осинцев В.В. Возможности снижения топливных затрат промышленных ТЭС путем реорганизации основных процессов / В.В. Осинцев, К.В. Осинцев, В.И. Богаткин // Промышленная энергетика. – 2018. – № 8. – С. 20 – 28; 0,56 п.л./0,2 п.л.
22. Toropov, E.V. 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 / E.V. Toropov, K.V. Osintsev, S.V. Aliukov // International Journal of Heat and Technology. – 2018. – V. 36, № 4. Pp. 1240 – 1248; 0,56 п.л./0,2 п.л. (Scopus)
23. Toropov, E.V. New theoretical and methodological approaches to the study of heat transfer in coal dust combustion / E.V. Toropov, K.V. Osintsev, S.V. Aliukov // Energies. – 2019. – V. 12, № 1. – Article ID: en12010136. – 14 p.; 0,87 п.л./0,3 п.л. (Scopus)
24. Osintsev, K.V. New methods for control system signal sampling in neural networks of power facilities / K.V. Osintsev, S.V. Aliukov, Y.S. Prikhodko // IEEE Access. – 2020. – V.8. – Article ID: 9229406. – Pp. 192857 –192866; 0,56 п.л./0,2 п.л. (Scopus)
25. 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. Alyukov, K.V. Osintsev // International Journal of Heat and Technology. – 2020. – V. 38, № 1. – Pp. 45 – 58; 0,87 п.л./0,3 п.л. (Scopus)
26. Alabugin, A.A. Combined approach to analysis and regulation of thermodynamic processes in the energy technology complex / A.A. Alabugin, S.V. Alykov, K.V. Osintsev // Processes. – 2021. – V. 9, № 2. – Article ID: 204. – Pp. – 1 – 32 p.; 2 п.л./0,7 п.л. (Scopus)
27. Aliukov, S.V. Mathematical modeling of coal dust screening by means of sieve analysis and coal dust combustion based on new methods of piece-linear function approximation / S.V. Aliukov, K.V. Osintsev // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11, № 4. – Article ID: 1609. – Pp. 1 – 15; 0,94 п.л./0,5 п.л. (Scopus)
28. Osintsev, K.V. Management of the torch structure with the new methodological approaches to regulation based on neural network algorithms / K.V. Osintsev, S.V. Aliukov, Y.S. Prikhodko // Energies. – 2021. – V. 14, № 7. – Article ID: 1909; 1,06 п.л./0,5 п.л. (Scopus)
29. Alabugin, A.A. Methodological foundations for modeling the processes of combining organic fuel generation systems and photovoltaic cells into a single energy technology complex / A.A. Alabugin, K.V. Osintsev, S.V. Alykov // Energies. – 2021. – V.14, №10. – Article ID: 2816; 2,37 п.л./0,7 п.л. (Scopus)

30. Низамутдинов, В.Р. Возможности использования возобновляемых источников энергии для независимого энергообеспечения промышленного предприятия ООО «Челябинскспецгражданстрой» / В.Р. Низамутдинов, И.А. Моисеев, И.А. Берсенева, А.В. Курмангулов, К.В. Осинцев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2023. – Т. 23, № 1. – С. 89-98; 0,63 п.л. / 0,12 п.л.

31. Alabugin, A.A. Mathematical foundations for modeling a zero-carbon electric power system in terms of sustainability / A.A. Alabugin, K.V. Osintsev, S.V. Aliukov, Z.V. Almetova, Y.S. Bolkov // Mathematics. – 2023. – V. 11, №9. – Article ID: 2180. – 24 p.; 1,5 п.л./0,3 п.л. (Scopus)

Патенты и программы:

32. Пат. 2484371 РФ, МПК8F23D 17/00. Многофункциональная горелка (варианты) / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, Е.В. Торопов, В.И. Богаткин, А.К. Джундубаев, № 2011143204/06; заявл.25.10.2011; опубл. 10.06.2013, Бюл.16. – 12 с.; 0,75 п.л./0,12 п.л.

33. Пат. 2615241 РФ, МПК7 С1. Способ получения активного фракционированного угля в камере на решетке / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, А.И. Бийбосунов, В.И. Богаткин – № 2015154912; заявл. 21.12.2015; опубл. 04.04.2017, Бюл.10. – 7 с.; 0,43 п.л./0,1 п.л.

34. Пат. 2499035 РФ, МПК7 С1. Способ активирования угольных частиц в вертикальной осесимметричной кольцевой камере / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, Е.В. Торопов, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин – № 2012146764/04; заявл. 01.11.2012; опубл. 20.11.2013., Бюл.32. – 10 с.; 0,63 п.л./0,12 п.л.

35. Пат. 2499189 РФ, МПК7 С1. Способ и установка активирования фракционированных по размеру частиц порошкообразного угля / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, Е.В. Торопов, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин – № 2012123081/04; заявл.04.06.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл.32. – 8 с.; 0,5 п.л./ 0,1 п.л.

36. Пат. 2500617 РФ, МПК7 С1. Способ активирования фракционированных по размеру угольных частиц (варианты) / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, Е.В. Торопов, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин. – № 2012123086/05; заявл. 04.06.2012; опубл. 10.12.2013., Бюл.34. – 9 с.; 0,56 п.л./0,12 п.л.

37. Пат. 2500953 РФ, МПК7 С1. Способ активирования порошкообразного угля в вертикальной четырехгранной призматической топке / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, Е.В. Торопов, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин. – № 2012123084/06; заявл. 04.06.2012; опубл. 10.12.2013., Бюл.34. – 8 с.; 0,5 п.л./0,1 п.л.

38. Пат. 2500954 РФ, МПК7 С1. Многофункциональное топочное устройство / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, Е.В. Торопов, А.К. Джундубаев, Т.А. Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин. – № 2012123082/06; заявл. 04.06.2012; опубл. 10.12.2013, Бюл.34. – 10 с.; 0,63 п.л./0,12 п.л.

39. Пат. 2502921 РФ, МПК7 С1. Способ работы вертикальной призматической топки / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, Е.В. Торопов, А.К. Джундубаев, Т.А.

Акбаев, С.П. Ким, Г.Т. Альмусин, В.И. Богаткин. – № 2012123087/06; заявл. 04.06.2012; опубл. 27.12.2013, Бюл.36. – 8 с.; 0,5 п.л./0,1 п.л.

40. Пат. 2748628 РФ, МПК7 С1. Способ работы тригенерационной установки / К.В. Осинцев, Ю.С. Приходько, С.И. Кускарбекова, М.М. Дудкин, Д.В. Растворов, А.В. Хасанова, Н.А. Клепиков. – № 2020118702; заявл. 15.05.2020; опубл. 28.05.2021, Бюл.16. – 7 с.; 0,43 п.л./0,1 п.л.

41. 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», – 2 с.; 0,13 п.л./0,05 п.л.

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022661639 Российская Федерация. Программа по оптимизации системы энергосбережения: № 2022661022; заявл. 15.06.2022; опубл. 23.06.2022 / И.А. Моисеев, К.В. Осинцев, И.А. Берсенева, М.М. Дудкин, С.И. Кускарбекова, Ю.С. Приходько; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет», – 4 с.; 0,25 п.л./0,05 п.л.