

На правах рукописи



Донской Игорь Геннадьевич

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ НА
ОСНОВЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ
ТОПЛИВ С ПОМОЩЬЮ КИНЕТИКО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 2.4.5. Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Иркутск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской
академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Официальные **Елсуков Владимир Константинович**
оппоненты: доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Братский государственный университет», кафедра энергетики,
профессор

Марьяндышев Павел Андреевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение высшего образования
«Северный (Арктический) Федеральный университет им. М.В.
Ломоносова», Высшая школа энергетики, нефти и газа, кафедра
теплоэнергетики и теплотехники, профессор

Мингалеева Гузель Рашидовна
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Казанский государственный энергетический университет, Институт
теплоэнергетики, кафедра «Энергетическое машиностроение»,
заведующий кафедрой

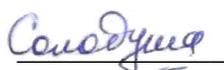
Ведущая Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
организация: Институт энергетических исследований Российской академии наук,
г. Москва

Защита диссертации состоится «21» марта 2024 г. в 9:00 часов на заседании
диссертационного совета 24.1.118.01, созданного на базе Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А.
Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: Россия, г.
Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А.
Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск, ул.
Лермонтова, 130, к. 407, и на сайте <https://isem.irk.ru/dissert2/case/DIS-2023-5/>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.1.118.01, доктор
технических наук, доцент



Солодуша Светлана Витальевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Твердое топливо, наиболее широко используемое для получения энергии – это уголь и биомасса. Уголь, помимо своей энергетической ценности, используется также во многих технологических процессах, где он является сырьем для получения углерода и синтез-газа. Качество энергетического угля непрерывно ухудшается, а экологические требования к процессам его переработки непрерывно растут. Повышение технической и экологической эффективности ТЭС на угле в настоящее время идет по двум направлениям: повышение термодинамических параметров рабочего тела в паротурбинном цикле и переход к комбинированному циклу, в котором твердое топливо сжигается в две стадии: сначала производится его конверсия в горючий газ, затем этот газ дожигается в газовом двигателе.

Разрабатываются новые процессы сжигания и газификации топлив, ориентированные на глубокую очистку выбросов, в том числе выделение и захоронение CO_2 . Во всех случаях появляются вопросы о выборе оптимальных режимов конверсии топлива с учетом физико-химических свойств топлива и окислителя, параметров реактора и энергетической установки в целом. В настоящей работе исследуются некоторые из таких процессов, в том числе процессы высокотемпературной газификации с получением газа топливного назначения.

Установки с газификацией топлива широко используются в химической технологии. Около 20% всего водорода в мире производится путем конверсии угля^[1]. Примерно та же доля важных химических продуктов, таких как аммиак и метанол^[2], производится с помощью водорода и синтез-газа, полученных в процессе газификации. Переработка тяжелых остатков нефтепереработки часто сопровождается производством технических газов. Актуальна разработка технологических решений по обеспечению собственных нужд химических предприятий тепловой и электрической энергией путем модернизации установок с газификацией на производство топливного газа^[3].

Газификация позволяет расширить использование низкокачественных топлив, таких как торф, биомасса разного происхождения, углеродсодержащие отходы (промышленные и муниципальные). Долгое время биомасса была топливом, типичным

¹ Veras, T.S. Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide / T.S. Veras, T.S. Mozer, D.C.R.M. dos Santos, A.S. Cesar // International Journal of Hydrogen Energy. - 2017. - V. 42. - No. 4. - P. 2018-2033.

² Bicef, Y. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods / Y. Bicef, I. Dincer, C. Zamfirescu, et al. // Journal of Cleaner Production. - 2016. - V. 135. - P. 1379-1395.

³ Integrated gasification combined cycle (IGCC) technologies / Ed. by T. Wang and G. Stiegel. - Woodhead Publ., 2017. - 929 p.

для доиндустриальных и аграрных обществ, но сейчас становится возобновляемым энергетическим ресурсом для развитых стран, в том числе использования в новых высокоэффективных установках. На возможности осуществления устойчивого углеродного цикла можно строить сценарии снижения эмиссии CO₂. Увеличение объемов энергетического использования биомассы возможно не только за счет установок для сжигания (в т.ч. в смеси с углем), но газогенераторов, что особенно актуально для малых энергосистем^[4], где переработка биомассы может сочетаться с другими ВИЭ^[5]. Высокая реакционная способность биомассы может способствовать стабилизации режимов горения и газификации низкорекреационных топлив, таких как угли высокой степени метаморфизма или коксовые остатки нефтепереработки. Совместная газификация углеродсодержащих промышленных отходов и биомассы была реализована на некоторых угольных станциях^[6]. На базе биоэнергетических установок можно получать продукты термической переработки биомассы, такие «биодизель», «биоуголь» и т.д., которые могут использоваться как в качестве топлива, так и в качестве восстановителей и сорбентов^[7].

Другим органическим возобновляемым источником энергии являются твердые бытовые отходы. Ежегодно в мире образуется несколько млрд т бытовых отходов, и вопросы их утилизации стоят очень остро. Сжигание твердых горючих отходов (точнее, остатков сортировки) – это наиболее распространенный способ их термической утилизации^[8], однако большая часть отходов по-прежнему не перерабатывается никак. В развитых европейских странах сжигается до 50% всех муниципальных отходов (при этом развивается рынок импорта отходов^[9]); в России, по оценкам, менее 3%^[10]. КПД современных тепловых станций, работающих на ТБО и биомассе, и единичная мощность агрегатов для сжигания непрерывно растут, приближаясь к средним значениям, характерным для ископаемых топлив. Общая мощность мусороперерабатывающих заводов в мире составляет 250 млн т/год (по

⁴ Castaldi, M. Progress and Prospects in the Field of Biomass and Waste to Energy and Added-Value Materials / M. Castaldi, J. van Deventer, J.M. Lavoie, et al. // Waste and Biomass Valorization. - 2017. - V. 8. - No. 6. - P. 1875-1884.

⁵ Kozlov, A. The modern state of wood biomass gasification technologies and their economic efficiency / A. Kozlov, O. Marchenko, S. Solomin // Energy Procedia. - 2019. - V. 158. - P. 1004-1008.

⁶ Sofia, D. Co-gasification of coal-petcoke and biomass in the Puertollano IGCC power plant / D. Sofia, P.C. Llano, A. Giuliano, et al. // Chemical Engineering Research and Design. - 2014. - V. 92. - P. 1428-1440.

⁷ Perkins, G. Process development status of fast pyrolysis technologies for the manufacture of renewable transport fuels from biomass / G. Perkins, T. Bhaskar, M. Konarova // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2018. - V. 90. - P. 292-315.

⁸ Khan, S. Technologies for municipal solid waste management: Current status, challenges, and future perspectives / S. Khan, R. Anjum, S.T. Raza, et al. // Chemosphere. - 2022. - V. 288. - P. 132403.

⁹ Malinauskaite, J. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe / J. Malinauskaite, H. Jouhara, D. Czajczynska, et al. // Energy. - 2017. - V. 141. - P. 2013-2044.

¹⁰ Тугов, А.Н. Энергетическая утилизация ТКО: мировой и отечественный опыт (обзор) / А.Н. Тугов // Теплоэнергетика. - 2022. - № 12. - С. 5-22.

данным^[10]). В основном это установки для сжигания, хотя интенсивно исследуются процессы пиролиза и газификации, в т.ч. для получения синтетических жидких топлив^[11]. Отходы, как и биомасса, используются как дополнительное топливо, которое в небольшом количестве примешивается к основному топливу (углю) при сжигании или газификации на станции.

Утилизация отходов обычно требует изменения тепловой схемы по сравнению с установками для сжигания качественного топлива (усложнение стадий подготовки сырья, охлаждения и очистки дымовых газов и т.д.). Теплотворная способность низкосортных топлив обычно ниже по сравнению с энергетическими углями, поэтому температура горения (и, как следствие, интенсивность теплоотдачи) также снижаются, в связи с чем тепловой КПД энергоустановки (при прочих равных условиях) уменьшится. Термохимическая конверсия отходов может потребовать изменения параметров и конструкции установки. Поэтому использование биомассы и отходов (в т.ч. для частичного замещения основного топлива) становится привлекательным только в условиях ограничений на вредные выбросы.

Представленные выше проблемы имеют множество аспектов, поэтому их решение требует комплексного, системного подхода. В настоящей работе некоторые из этих аспектов рассмотрены более детально. На каждом уровне решения задач, связанных с использованием твердого топлива, от исследования процессов в одиночной частице до оптимизации работы энергоблока, требуются адекватные математические модели, которые при этом являются не изолированными численными инструментами, а физически и иерархически согласованным набором математических моделей^[12,13].

Таким образом, тематика диссертационного исследования является актуальной.

Степень разработанности проблемы. Проблемам разработки новых энергетических технологий и установок на базе процессов газификации посвящены работы большого числа исследователей. Физико-химические процессы газификации твердых топлив исследовались А.С. Предводителевым, Д.А. Франк-Каменецким, Б.В. Канторовичем, Н.В. Лавровым, В.И. Бабием, Е.А. Бойко, В.М. Гремячкиным, А.М. Гюльмалиевым, И.А. Яворским, Г.В. Кузнецовым, D.G. Roberts, L.D. Smoot, Y.A.

¹¹ Porshnov, D. Evolution of pyrolysis and gasification as waste to energy tools for low carbon economy / D. Porshnov // Wiley Interdisciplinary Reviews. Energy and Environment. - 2022. - V. 11. - P. e421.

¹² Madanikashani, S. Multi-Scale Modeling of Plastic Waste Gasification: Opportunities and Challenges / S. Madanikashani, L.A. Vandewalle, S. De Meester, et al. // Materials. - 2022. - V. 15. - P. 4215.

¹³ Qiu, P. On-line reset control of a commercial-scale opposed multi-burner coal-water slurry gasification system using dynamic reduced-order model / P. Qiu, Z. Dai, J. Xu, Q. Guo, G. Yu, F. Wang // Computers & Chemical Engineering. - 2020. - V. 143. - P. 107074.

Lenvendis, L. Ding. Новые реакторы для газификации разрабатывались в работах З.Ф. Чуханова, С.И. Сучкова, Г.А. Рябова, А.М. Дубинина, А.Ю. Майстренко, Г.Б. Манелиса, С.Р. Исламова, В.Е. Мессерле, А.П. Бурдукова, В.М. Зайченко, Т.В. Reed, A. Gomez-Barea, S. Heidenreich, A. Steinfeld. Схемы установок с внутрицикловой газификацией предложены в работах С.А. Христиановича, Г.С. Асланяна, А.И. Андрющенко, А.Ф. Рыжкова, Г.В. Ноздренко, А.М. Клера, Э.А. Тюриной, А.-М. Cormos, A. Giuffrida, Y. Oki, M. Grabner, H. Spliethoff. Автономные энергетические системы с газификацией местных топлив исследовались в работах О.В. Марченко, С.В. Соломина, А.В. Кейко, С.У. Li, F. Patuzzi, J. Ahrenfeldt, N. Indrawan. Математические модели для процессов газификации предложены в работах Л.Н. Хитрина, Е.В. Самуйлова, Г.Я. Герасимова, Г.Р. Мингалеевой, A. Ghoniem, M.L. de Souza-Santos, C. Di Blasi, S. Niksa, M.J. Prins, E. Ranzi. Вопросы редукции моделей процессов горения и газификации для задач оптимизации рассматривались в работах L.T. Biegler, R.F.D. Monaghan, Z. Ren, M.H. Sahaеi, Б.М. Кагановича, Б.Г. Трусова, А.В. Мессерле, С. Netzer. Технологические схемы и способы термической утилизации отходов исследовались в работах А.Н. Тугова, Д.О. Глушкова, U. Arena, M.J. Castaldi, J. van Caneghem, E. Madadian, C. Ryu.

Целью данной диссертационной работы является решение комплексной научно-технической проблемы повышения эффективности переработки твердых топлив путем разработки взаимосвязанных методических подходов и математических моделей для анализа процессов термохимической конверсии твердых топлив для энерготехнологии, а также исследование на этой основе перспективных энергетических установок с газификацией твердых топлив разного состава и происхождения (уголь, биомасса, отходы). Для этого решаются следующие **задачи**:

- Разработка методов и подходов к оптимизации параметров энерготехнологических установок с помощью математических моделей процессов термохимической конверсии топлив, построенных на основе гибридного кинетико-термодинамического подхода.
- Численное исследование новых процессов переработки твердых топлив, включая процессы ступенчатой газификации угля и биомассы, процессы высокотемпературной газификации и газификации с использованием смесей на основе диоксида углерода, которые позволяют снизить вредное воздействие на окружающую среду.

- Сравнение разных способов повышения качества генераторного газа при газификации низкосортных твердых топлив, а также оценка эффективности процессов термохимической конверсии органического сырья разного состава с учетом эффектов фазовых и химических превращений минеральной и органической части.
- Разработка вычислительных моделей для описания этих процессов, исследование областей применимости моделей и обобщение результатов многофакторных вычислительных экспериментов, позволяющих сформировать основу для многомерной оптимизации установок с переработкой твердых топлив.
- Проведение оптимизационных исследований энергетических установок с газификацией твердых топлив для разных масштабов мощности, оценка эффективности и конкурентоспособности перспективных технологий энергетического использования угля и биомассы.

Объектом исследования является термодинамическая эффективность энергетических технологий на основе газификации твердых топлив.

Предметом исследования является совокупность физико-химических процессов, протекающих при термохимической конверсии топлив, включая процессы переноса и химических превращений.

Методология и методы исследования базируются на использовании законов термодинамики и химической кинетики, системного анализа, вычислительной математики и натурного эксперимента.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен новый гибридный кинетико-термодинамический подход к моделированию перспективных энерготехнологических процессов. С его помощью исследованы закономерности физико-химических процессов превращений при переработке органических и минеральных компонентов твердых топлив, в том числе в составе энергетических и энерготехнологических установок. Предложенный подход позволяет использовать преимущества кинетических и равновесных моделей, комбинировать их для описания сложных физико-химических систем с химическими реакциями и тепломассопереносом.
2. На основе предложенного подхода разработаны новые численные алгоритмы для решения задач, связанных с горением и газификацией твердого топлива, основанные на методах расщепления и классических методах решения

алгебраических и дифференциальных уравнений. Эти алгоритмы позволяют использовать физические особенности задач для сокращения объемов вычислений. Основной особенностью разработанных алгоритмов является комбинирование субмоделей разного типа для описания физико-химических процессов с последующим согласованием решений.

3. С помощью разработанных математических моделей получены теоретические оценки эффективности для перспективных процессов переработки твердых топлив:

а) Высокотемпературная воздушная газификация топливной пыли в ступенчатых реакторах: впервые исследован переход режимов работы реактора от одностадийного к двухстадийному, выявлены новые связи между эффективностью режима и распределением топлива по стадиям; исследованы новые способы снижения выбросов диоксида углерода за счет совместной газификации угля с древесиной, а также способ утилизации диоксида углерода в качестве дутьевого агента.

б) Ступенчатая газификация высоковлажной растительной биомассы с пиролизом сырья: рассмотрены новые варианты сочетания алло- и автотермических режимов в разных ступенях процесса, в т.ч. с пирогазификацией сырья на стадии подготовки; впервые оценена предельная эффективность получения горючего газа с учетом ограничений на температуру конверсии смолистых продуктов, оценены диапазоны условий с высоким выходом углеродистого остатка.

в) Совместная газификация отходов (бытовые отходы с высоким содержанием пластика, шламы сточных вод) вместе с качественным твердым топливом: исследованы процессы совместной конверсии угля, биомассы и муниципальных отходов; предложена новая методика оценки граничных значений эффективности и обоснованной массовой доли низкосортного топлива, обусловленной его особенностями (влажностью, спекаемостью, плавкостью золы), в смеси с более качественным.

4. В работе предложены новые модели парогазовых энергетических установок с низкотемпературной газификацией угля, с помощью которых проведены оптимизационные исследования по технико-экономическим критериям для разных условий.

Полученные результаты, установленные закономерности и их интерпретация определяют **основные положения, выносимые на защиту**:

- 1) Методы и алгоритмы численного моделирования процессов пиролиза, газификации и сжигания твердого топлива в пылетранспортных и слоевых реакторах.
- 2) Результаты многофакторных расчетов процессов газификации твердых топлив и подходы к оптимизации их параметров (состава топлива, температуры дутья, распределение материальных потоков по ступеням) по критерию энергетической эффективности с учетом технологических ограничений (условия шлакования, содержание смолы в газе, механическая устойчивость слоя).
- 3) Результаты оптимизационных исследований технико-экономических показателей установок с газификацией угля, в т.ч. с рециркуляцией продуктов сгорания.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке новых математических моделей и эффективных вычислительных алгоритмов для решения задач, связанных с горением и газификацией твердого топлива. Эти модели и алгоритмы могут быть использованы, в том числе для теоретического исследования других процессов химической технологии (катализ, очистка, гетерогенные реакторы).

Практическая значимость работы. Полученные теоретические оценки (в сочетании с экспериментальными исследованиями) позволят сократить временные и материальные затраты при разработке энерготехнологических установок. Полученные расчетные оценки характеристик термохимических процессов конверсии топлив и их зависимости условий реагирования могут быть применены при разработке устройств для сжигания и газификации, а также систем управления такими устройствами (создание режимных карт). Проведенные технико-экономические исследования перспективных парогазовых установок с внутрицикловой газификацией твердых топлив могут быть интересны для разработчиков энергетического оборудования.

Достоверность результатов подтверждается обширной валидацией математических моделей с использованием полученных в ИСЭМ СО РАН и опубликованных в научно-технической литературе экспериментальных данных, а также сравнением с теоретическими результатами других авторов (в т.ч. с результатами термодинамических расчетов и CFD-моделирования).

Реализация результатов работы. Материалы и результаты диссертационного исследования использовались при выполнении поисковых и научно-исследовательских работ по теме энергетического использования твердых топлив. Отдельные части

работы поддержаны программой фундаментальных исследований СО РАН (Проект III.17.1, рег. № АААА-А17-117030310448-0; FWEU-2021-0005, рег. № АААА-А21-121012190004-5), Российским фондом фундаментальных исследований (проекты №№ 13-08-00281а, 14-08-01226а, 14-08-31666мол_а, 16-08-00694а, 16-08-00739а, 18-29-24047мк, 19-08-00744а, 19-58-80016_БРИКС), Российским научным фондом (проекты №№ 14-19-00524, 15-19-10025, 16-19-10227), Министерством образования и науки РФ (ФЦП ГК № 14.516.0043, МК-157.2020.8). Большая часть экспериментальных результатов получена с использованием оборудования ЦКП «Высокотемпературный контур» (ИСЭМ СО РАН).

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 2.4.5. Энергетические системы и комплексы в следующих пунктах:

- **Пункт 1: разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования.** В диссертационной работе предложены новые подходы к оценке характеристик режимов конверсии твердых органических топлив в энергетических установках, которые позволяют точнее определять оптимальные условия работы реакторов конверсии и выбирать эти условия в зависимости от состава топлива и параметров энергетического оборудования.
- **Пункт 2: математическое моделирование, численные и натурные исследования физико-химических и рабочих процессов, протекающих в энергетических системах и установках на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии, их основном и вспомогательном оборудовании и общем технологическом цикле производства электрической и тепловой энергии.** Основным инструментом для оценки технико-экономических показателей энергетических установок, рассмотренных в диссертации, являются математическое моделирование. Оптимизация режимов конверсии органических топлив проводится путем многовариантных численных расчетов. Для валидации моделей используются экспериментальные данные, в т.ч. полученные при участии автора. Кроме того,

автором были спланированы и проведены эксперименты для исследования условий спекания полимерсодержащих топливных смесей.

- **Пункт 6: теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы, энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера.** В диссертационной работе исследуются способы энергетической конверсии растительной биомассы и горючих бытовых отходов, которые относятся к возобновляемым источникам энергии. Для этого были разработаны математические модели, а также проведены экспериментальные исследования, отраженные в работе.
- **Пункт 7: исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.** Полученные в результате комплексных исследований технические показатели технологий газификации применяются в работе для оценки экономических и экологических показателей энергетических установок (капитальные затраты, стоимость электроэнергии, выбросы углекислого газа).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских конференциях с международным участием «Горение твердого топлива» и «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск 2015, 2018, 2021); на семинарах ВУЗов по теплофизике и энергетике (Санкт-Петербург, 2019), всероссийских конференциях «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск 2015, 2017, 2020, 2021), всероссийских конференциях «Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве» (Екатеринбург 2015, 2018), международной конференции «Энергетика, экономика, экология» (Алушта 2015), всероссийских конференциях «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Алушта 2015, Новосибирск 2016), всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта 2017, Севастополь 2021),

международной конференции «Тепломассообмен в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск 2016), всероссийской конференции «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск 2017, 2021), всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (Иркутск 2017), всероссийской конференции «Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление» (Иркутск 2020), международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва 2017), всероссийской молодежной конференции «Системные исследования в энергетике» (Иркутск 2019–2022), всероссийском симпозиуме по горению и взрыву (Москва, 2020), International Conference on Sustainable Energy Technologies (Nottingham, UK 2015), International Conference on Thermal Analysis and Calorimetry (Санкт-Петербург, 2016), International Seminar on Flame Structure (Новосибирск 2017), International Workshop on Heat-Mass Advances for Energy Conservation and Pollution Control (Новосибирск 2019), 2nd Sustainable Bioenergy and Processes Conference (Cape Town, South Africa 2022), а также на семинарах и заседаниях ученого совета ИСЭМ СО РАН.

Результаты, представленные в диссертационной работе, включались в перечень основных результатов ИСЭМ СО РАН.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликована 41 работа, в т.ч. 29 статей в ведущих изданиях (из них 9 в изданиях списка ВАК, относящихся к специальности 2.4.5, среди которых 7 – из категорий К1 и К2) и 7 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 370 стр. и состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 784 наименований. Текст диссертации сопровождается 161 рисунками и 49 таблицами.

Личный вклад автора. Основные научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые автором на защиту, получены соискателем самостоятельно. Соискатель являлся руководителем и основным исполнителем научно-исследовательских работ по тематике диссертационной работы. Постановка задач исследования и научная проблематика разрабатывалась диссертантом как лично, так и вместе с А.В. Кейко, В.А. Шаманским и А.Ф. Рыжковым. Автор лично занимался разработкой вычислительных кодов, проведением расчетов и анализом результатов. Техничко-экономические расчеты выполнялись вместе с А.Ю. Маринченко.

Экспериментальные исследования проводились коллегами автора Д.А. Свищевым, А.Н. Козловым и М.В. Пензиком. Вклад соискателя в основные результаты исследований является определяющим.

Благодарности. Автор благодарен В.А. Шаманскому, А.В. Кейко, О.В. Хамисову, А.Ф. Рыжкову, А.М. Клеру, Д.С. Суслову, Э.А. Тюриной и Э.А. Таирову за критические замечания и полезные советы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены некоторые тенденции развития энергетики на твердом органическом топливе, в том числе обращение к новым угольным технологиям и малым энергосистемам с возобновляемыми источниками энергии. Твердое органическое топливо (уголь и биомасса) является одним из основных источников энергии, и его доля в общем потреблении еще долгое время останется значимой. В связи с этим актуальны исследования, направленные на совершенствование технологических и экологических характеристик процессов переработки топлив. Для выделения области диссертационного исследования предлагается схема задач, изображенная на Рисунке 1, связывающая разные уровни рассмотрения энергетических систем и процессов с задачами, которые рассматриваются в работе.

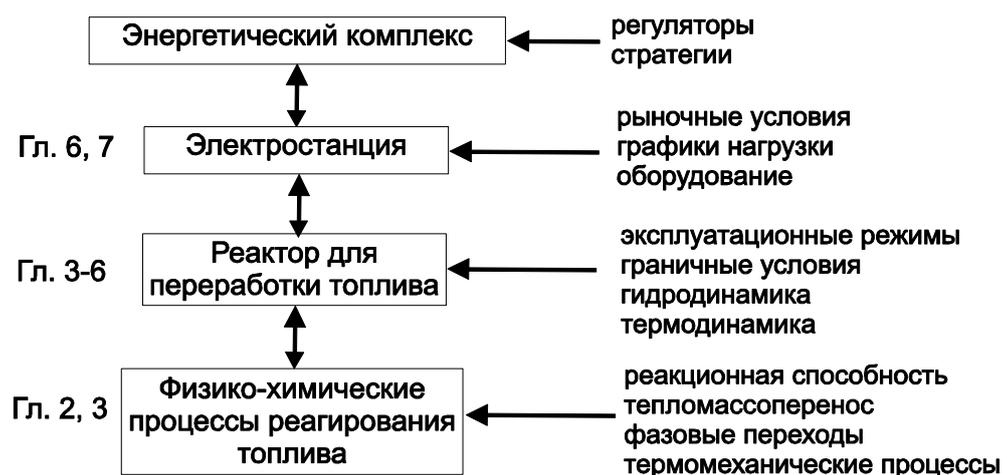


Рисунок 1 – Иерархия задач при системном исследовании технологий энергетического использования топлива: уровни рассмотрения и влияющие факторы

Обсуждаются основные особенности физико-химических процессов, протекающих при термохимической конверсии твердых топлив: фазовые переходы, термическое разложение, гетерогенные реакции, развитие пористой структуры и влияние процессов переноса на наблюдаемую кинетику. Среди перспективных направлений отдельно выделены ступенчатые способы газификации низкосортного топлива, позволяющие получить генераторный газ с низким содержанием смолы, и высокотемпературная (в т.ч. аллотермическая) газификация топлива, при которой можно отказаться от обогащения дутья кислородом при сравнимой эффективности конверсии. Данные по КПД энергетических установок с газификацией приведены на Рисунке 2.

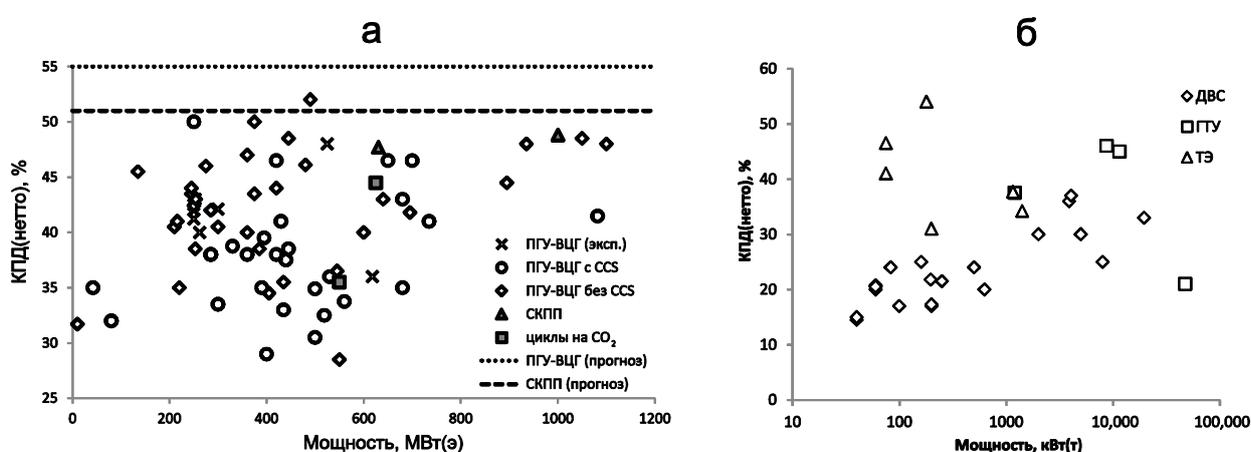


Рисунок 2 – Литературные данные по КПД(нетто) энергетических установок с газификацией угля (а) и биомассы (б)

Оценка эффективности процессов газификации зависит, прежде всего, от способа использования продуктов газификации. Наиболее простой критерий эффективности процесса газификации – это так называемый химический КПД, определяемый как отношение химической энергии (теплоты сгорания) горючих газов к химической энергии (теплоте сгорания) твердого топлива:

$$\eta_{chem} = \frac{G_g^{out} Q_g}{G_f^{in} Q_f}. \quad (1)$$

Здесь G – расход, Q – теплота сгорания, индексы g и f относятся к генераторному газу и твердому топливу соответственно. Для высокотемпературных продуктов газификации может быть значительной тепловая энергия. Поэтому более общей характеристикой эффективности газификации является эксергетический КПД η_{ex} :

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_g}{Ex_f + Ex_{ox}}. \quad (2)$$

Здесь Ex_g – эксергия генераторного газа (в т.ч. механическая эксергия), Ex_f – эксергия топлива, Ex_{ox} – эксергия окислителя (в т.ч. эксергия пара и обогащенного дутья). Проведен обзор основных типов математических моделей, которые используются для исследований процессов горения и газификации твердых топлив. Эти модели позволяют сформулировать задачи в виде систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Высокая размерность и математические особенности этих задач часто приводят к трудностям при численных расчетах, особенно при исследовании процессов со сложными механизмами химических превращений. Одним из способов преодоления указанных трудностей является редукция исходных задач на основе методов, связанных с анализом их математической и физической структуры.

Комбинирование математических постановок в рамках одной задачи позволяет строить гибридные модели, в которых отдельные составляющие исследуемого процесса (переменные, области, отдельные стадии) моделируются разными классами математических моделей. В этом случае декомпозиция задачи производится еще на стадии формулировки, при этом, однако, могут возникать проблемы взаимоувязки решений (по граничным значениям искомым функций и их производных). Численное исследование возможно при использовании методов расщепления, решения алгебро-дифференциальных уравнений и т.д. Предложенные ранее математические модели имеют недостатки, связанные с применимостью для задач, связанных с многомерной оптимизацией процессов и установок для переработки твердых топлив. Многообразие и взаимосвязанность физико-химических процессов ограничивает возможности упрощения их моделей, детальные же математические модели практически не применимы для выбора параметров оборудования и режимов. В связи с этим необходима разработка приближенных моделей, учитывающих в достаточной степени специфику исследуемых процессов (гетерогенная кинетика химических реакций, явления тепломассопереноса, фазовые переходы), но позволяющих быстро и надежно оценивать характеристики технологических процессов.

Во **второй главе** дается подробное описание математической модели процессов переноса в реакционной зоне реакторов термохимической конверсии твердого топлива (газогенераторов, пиролизеров). В модели процесс газификации рассматривается как последовательная трансформация промежуточных равновесных состояний.

Рассматривается стационарный процесс в приближении реактора идеального вытеснения.

Общая схема взаимодействия между химическими и тепломассообменными процессами в каждом расчетном элементе представлена на Рисунке 3. Полная система уравнений оказывается сложной из-за множества взаимосвязей и требует совместного численного решения нелинейных уравнений. В настоящей работе применяется расщепление процессов, что позволяет разорвать взаимосвязи и упростить систему уравнений для каждого расчетного элемента в отдельности. Такое упрощение, однако, приводит к итеративному процессу на уровне всей реакционной зоны. Тем не менее, для систем большой размерности такой подход оказывается более экономичным.

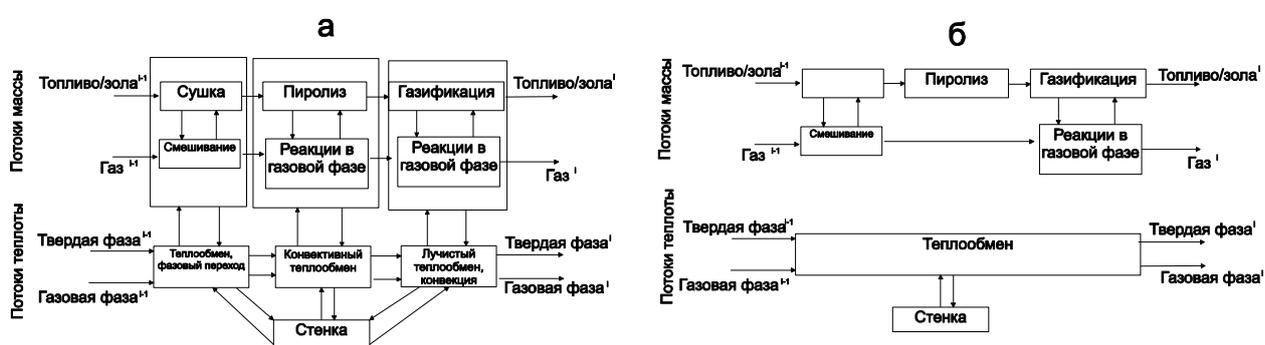


Рисунок 3 – Полная схема (а) и схема с расщеплением по физическо-химическим процессам (б)

Для реакторов газификации в плотном слое и пылеугольном потоке детализируются значения коэффициентов тепломассопереноса, строится вычислительный алгоритм, основанный на методах расщепления по физическим процессам. Проведена верификация математической модели на обширном экспериментальном материале, включая реакторы для газификации разных масштабов (лабораторные, пилотные, промышленные). Результаты верификации модели для некоторых случаев представлены на Рисунке 4.

Третья глава посвящена применению математической модели слоевого процесса термохимической конверсии твердого топлива для исследования эффективности способов повышения качества генераторного газа при газификации угля, биомассы и горючих отходов. Рассматриваются ступенчатые процессы газификации (со вторичным дутьем и шнековым пиролизером), газификация смесевых топлив, окислительная конверсия смолистых продуктов. Для выбранных условий (мощность установки, составы топлив) выбираются оптимальные (по энергетическим и

технологическим критериям) режимы конверсии твердого топлива с получением калорийного газа с низким содержанием смолы.

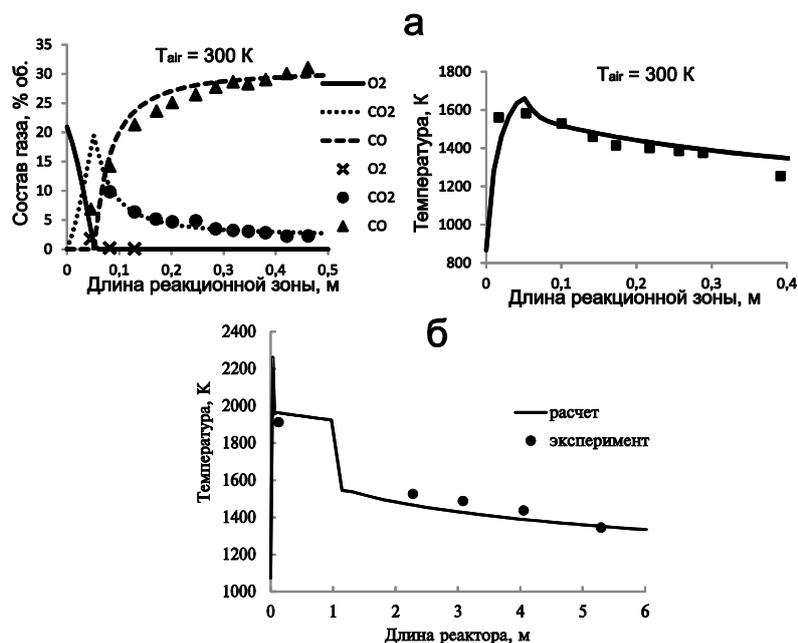


Рисунок 4 – Сравнение экспериментальных и расчетных для газификации углерода в плотном слое (а) и для газификации угольной пыли в двухступенчатом реакторе (б)

С помощью разработанной в гл. 2 математической модели процесса слоевой газификации проведены расчетные исследования эффективности использования вторичного воздушного дутья при газификации кокса и биомассы. Варьируемыми параметрами являются расход вторичного дутья (точнее, его доля от полного расхода) и расстояние между точками подачи первичного и вторичного воздуха. В зависимости от значений этих параметров реализуются однофронтной или двухфронтной режимы газификации. Состав топлива определяет выбор режима: для кокса наиболее эффективным является однофронтной режим газификации, в то время как для биомассы двухфронтной режим позволяет создать условия для более полного разложения смолы (Рисунок 5). Вариантные расчеты позволяют оценить оптимальную долю вторичного воздуха (10–20 %).

Исследованы границы эффективности ступенчатого процесса газификации влажной древесной биомассы (Рисунок 6а) при варьировании удельных тепловых затрат реактора пиролиза и условий сжигания пиролитического газа. Результаты расчетов позволяют определить оптимальные условия ступенчатой газификации для сетки параметров с учетом обратных связей, позволяющих регенерировать теплоту химических реакций. Показано, что для ступенчатой газификации существуют

довольно широкие области управляющих параметров, в которых следует искать устойчивые термические режимы работы газогенератора. За пределами этой области, однако, эффективность процесса довольно резко падает (Рисунок 6б). Математическая модель и результаты расчетов может быть использованы при оценке эффективности энергетических установок, использующих ступенчатую газификацию, с учетом разных способов нагрева пиролизера, в том числе при исследовании автономных энергетических систем с применением ВИЭ.

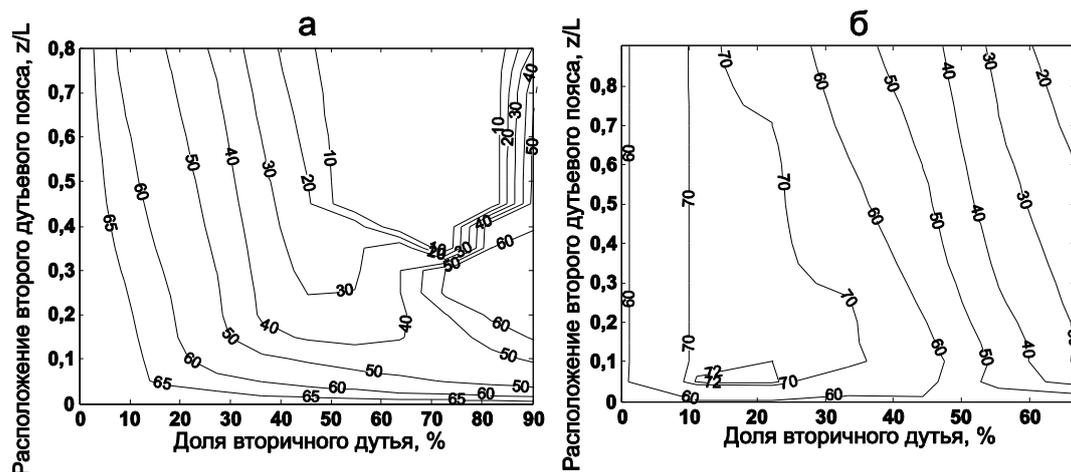


Рисунок 5 – Поверхности химического КПД при газификации кокса (а) и древесной биомассы (б) в зависимости от доли и точки подачи вторичного воздуха

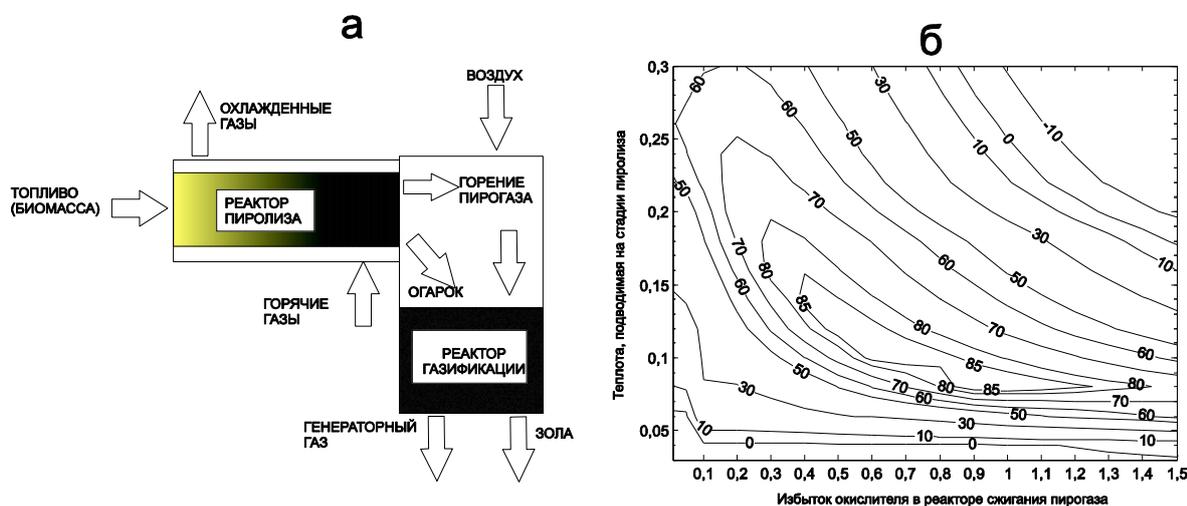


Рисунок 6 – Схема ступенчатого реактора газификации DTU (а) и зависимость химического КПД ступенчатой газификации (б) от управляющих параметров (влажность топлива 20%)

Проведено расчетное исследование эффективности каталитической газификации биомассы в плотном слое. Предполагается, что вместе с топливом в слой поступает негорючий каталитически активный материал, способствующий разложению смолистых веществ. С помощью математического моделирования получены оценки

оптимальных условий проведения процесса газификации. Из-за небольшой теплотворной способности топлива доля негорючего материала не может превышать 5–10% масс (Рисунок 7). Достаточно интенсивное разложение смолы при таком содержании активного материала возможно только при достаточной его высокой удельной реакционной способности (расчета оценка порядка 10^4 – 10^5 с⁻¹). Добавление активного материала поднимает вопрос об его извлечении, поэтому следующее ограничение связано с температурой процесса (которая не должна превышать температуры плавления минеральной части).

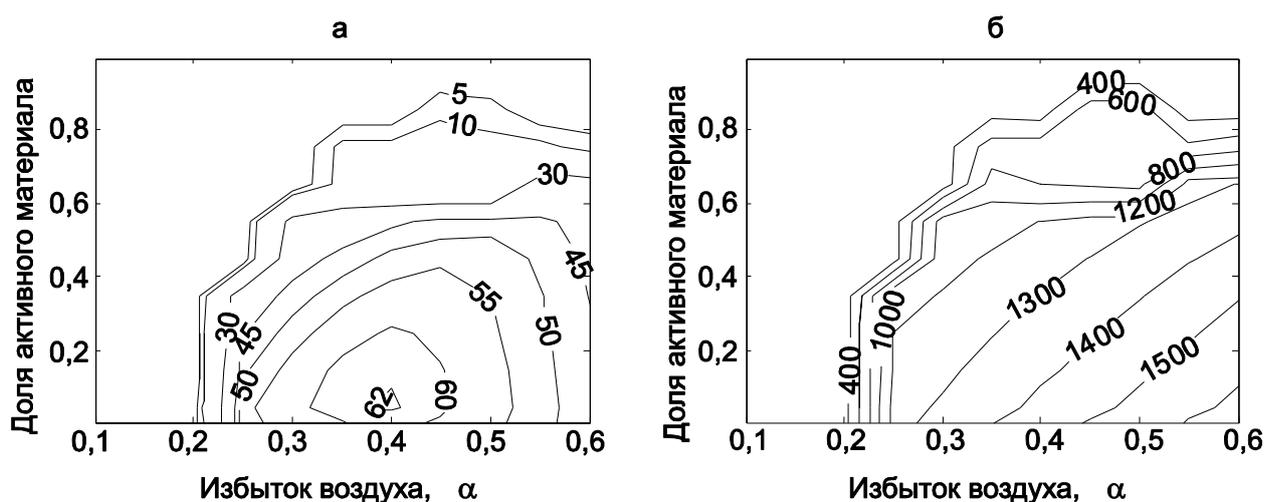


Рисунок 7 – Зависимость химического КПД (а) и температуры в ядре горения (б) при газификации биомассы с добавлением каталитически активного материала (удельная реакционная способность 10^5 с⁻¹)

В четвертой главе экспериментально и теоретически исследуется переработка отходов. Выделяется явление агломерации слоя частиц при сжигании и газификации отходов, содержащих спекающиеся материалы (полимеры, легкоплавкую золу). С помощью математической модели установлены возможные механизмы образования и роста агломерата в разных условиях (способ нагрева, доля плавящихся частиц в слое). В ходе экспериментов по газификации смесей древесных опилок и угля с гранулами полиэтилена были получены агломераты, образование которых может быть связано с предложенными механизмами. Показано, что прочность агломерата определяется особенностями химического и межфазного взаимодействием между компонентами.

Рассмотрен процесс газификации биомассы водяным паром при интенсивном внешнем теплоподводе (мощность 10 кВт). Исследовано влияние массовых расходов топлива и пара на эффективность процесса газификации. Показано, что для поддержания процесса при подходящей температуре, когда не происходит перегрев реактора и происходит достаточно глубокая конверсия сырья, необходимо выбирать

подходящий массовый расход и соотношение топливо-пар: в настоящих расчетах расходах топлива 4–10 кг/ч оптимальный расход водяного пара составляет 3–6 кг/ч. Максимальная термохимическая эффективность процесса аллотермической газификации с учетом затраты теплоты на нагрев реактора составляет около 70%; максимальное содержание водорода в сухом генераторном газе около 60% (до осушки – более 25%, см. Рисунок 8). Оптимальные параметры газификации биомассы лежат в области, в которой не достигается полная конверсия топливного углерода.

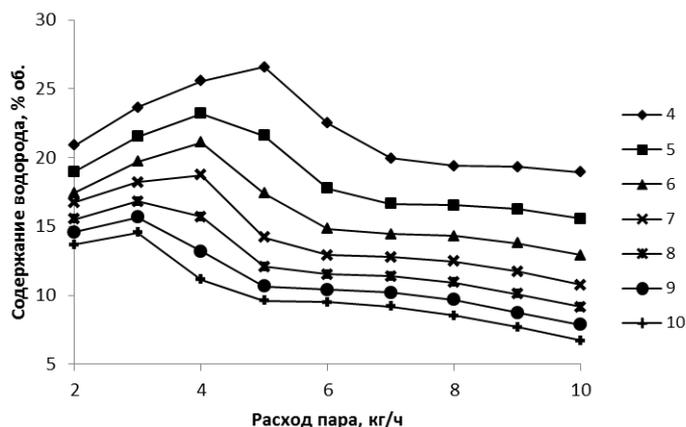


Рисунок 8 – Зависимость концентрации водорода в генераторном газе от расходов топлива и пара

Проведено численное исследование совместной слоевой газификации смесей древесины и пластика. Пластик (при условии полного разложения) позволяет значительно повысить теплотворную способность продуктов газификации. В расчетах варьируется содержание пластика в смеси и температура подогрева воздушного дутья. Расчеты показывают, что оптимальные режимы совместной газификации лежат вблизи границы тепловой устойчивости стационарного процесса, при этом оптимальная доля пластика в смеси находится в области 30–40% (Рисунок 9). Такое значение кажется завышенным, поскольку такое содержание требует обеспечения механической устойчивости слоя (предотвращения спекания).

Для смесей шлама сточных вод с древесиной и бурым углем с помощью численного моделирования определены оптимальные условия совместной газификации. Результаты расчетов без учета спекания показывают возможность эффективной конверсии смесей с высокой долей шлама: при высокой влажности возможна газификация с химическим КПД 50–60% при доле шлама 30–40%, при влажности 10–20% шлам может перерабатываться даже без добавления качественного топлива (Рисунок 10). Если скорректировать результаты с учетом эмпирических данных (т.е. ограничить долю шлама до уровня 20–30%), то химический КПД может

быть сохранен на уровне 60% при теплотворной способности генераторного газа порядка 4 МДж/нм³ (с ростом влажности характеристики ухудшаются).

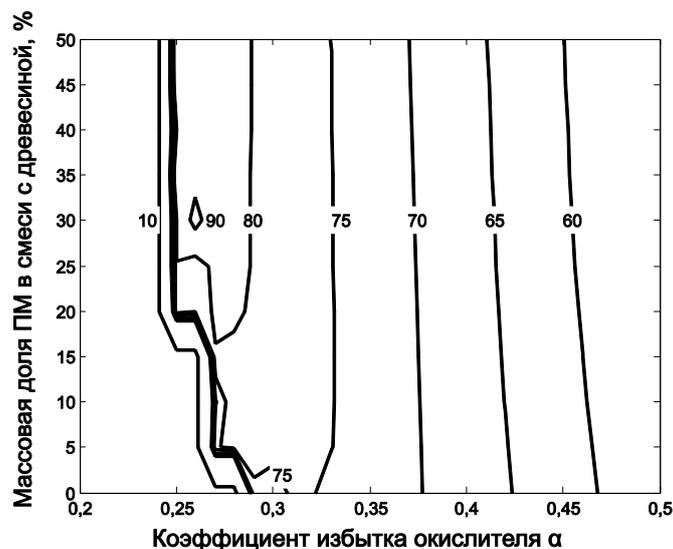


Рисунок 9 – Зависимость химического КПД процесса совместной газификации древесины и пластика (%) от состава смеси при начальной температуре дутья 30°C

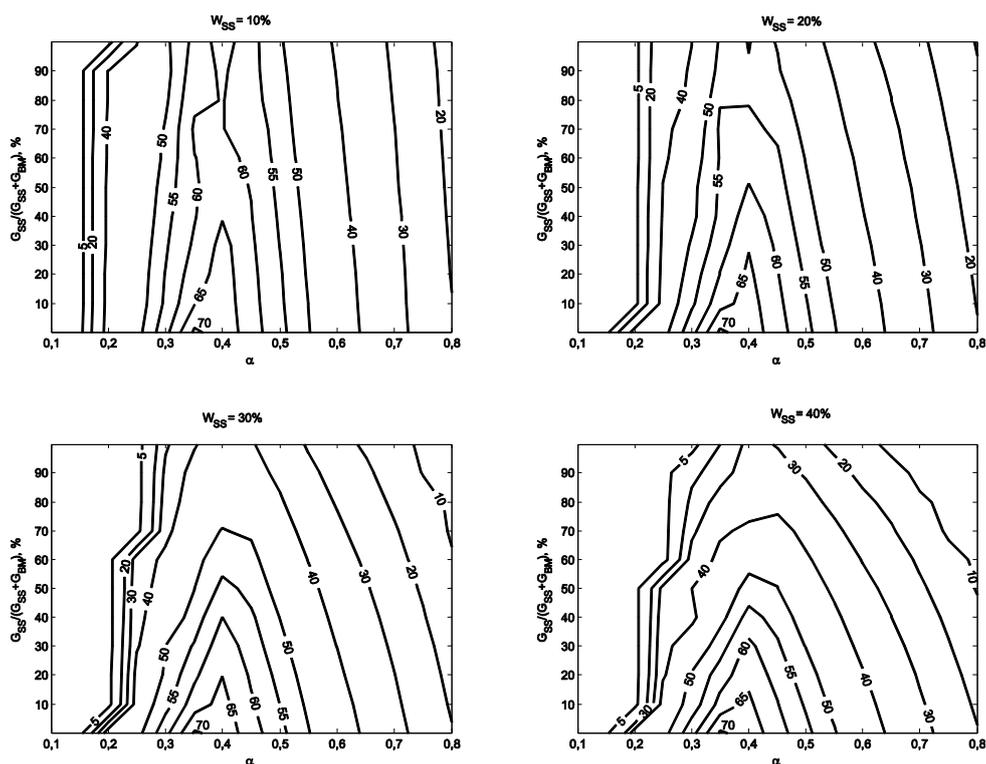


Рисунок 10 – Зависимость химического КПД от коэффициента избытка окислителя, доли шлама в смеси с древесиной и его начальной влажности

Проведено численное исследование изменения проницаемости в слое полимерсодержащих гранулированных материалов. При нагреве слоя агломерация частиц начинается от боковой стенки, постепенно распространяясь на практически на

весь расчетный участок. При нагреве до высокой температуры пористая среда частично восстанавливает проницаемость (за счет частичного термического разложения расплавленной массы), однако вблизи нижней границы непрерывное поступление холодного газа препятствует прогреву агломерата. При нагреве горячим газом происходит агломерация частиц вблизи нижней границы и блокирование участка, поэтому нагрев слоя прекращается. Чем выше температура греющего газа, тем меньше времени требуется для блокировки слоя (Рисунок 11). Полученные результаты представляют интерес при исследовании процессов переработки низкосортных, которые часто сопровождаются спеканием, а также при разработке способов, с помощью которыми можно препятствовать спеканию.

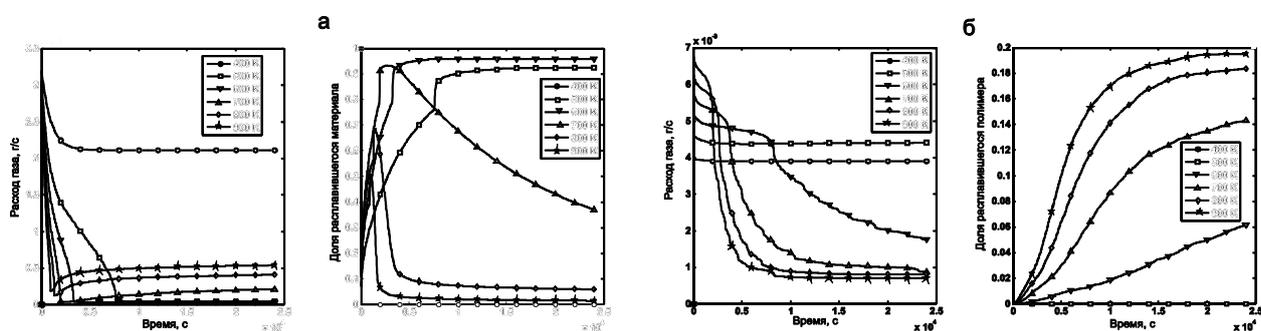


Рисунок 11 – Расчетная зависимость расхода газа и средней доли расплавленного полимера от времени при нагреве засыпки через стенку (а) и при нагреве горячим газом (б)

Экспериментальные исследования процессов слоевого горения модельных отходов (смеси опилок и полиэтилена) показывают, что спекание слоя происходит при доле полиэтилена 20%. Спекание характеризуется уменьшением скорости горения и ростом перепада давления по высоте слоя (Рисунок 12). С ростом доли полиэтилена уменьшается доля частиц, которые не успевают разложиться до перехода в режим медленного горения. При спекании слоя вблизи греющей стенки образуются прогары, через которые проходит большая часть воздуха. Пристеночная область выгорает интенсивнее, однако при большой доле полиэтилена (при наименьшем пропускном сечении слоя) скорость движения воздуха становится достаточно высокой для уноса частиц, наблюдается рост концентрации кислорода в продуктах горения. Продукты окислительного разложения древесины и полиэтилена конденсируются в фильтрах, образуя отложения, похожие на парафин. Термический анализ показывает, что эти отложения намного менее устойчивы, чем полиэтилен, что может быть связано с частичным окислением и поликонденсацией олефинов с древесной смолой.

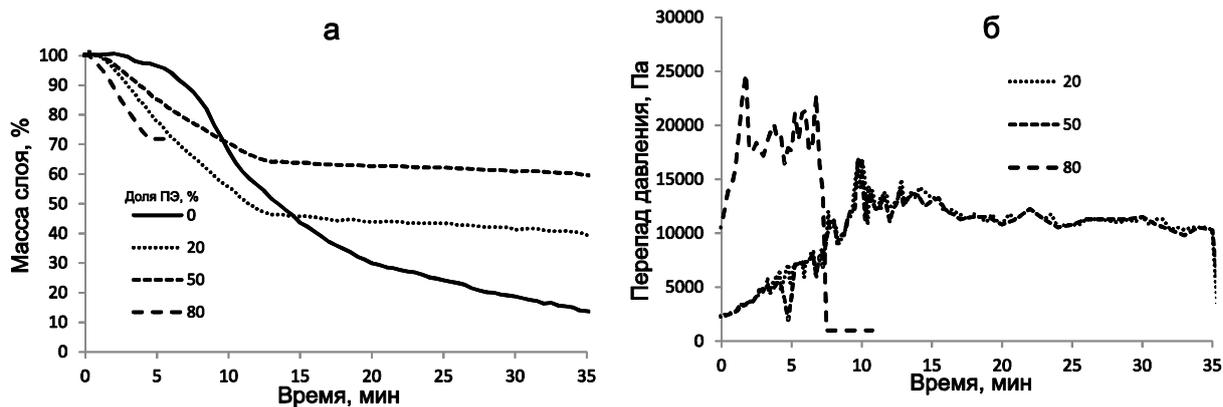


Рисунок 12 – Гравиметрические кривые для смесей древесных опилок и полиэтилена разного состава (а) и динамика перепада давления в реакторе при сжигании этих смесей (б)

Экспериментально исследован процесс спекания при слоевой конверсии смесей бурого угля и полиэтилена. Показано, что уголь сильнее подвержен спеканию в присутствии пластика, чем древесные опилки. Уже при массовой доле полиэтилена 10% наблюдается образование плотного агломерата, занимающего практически весь объем слоя, и стационарный процесс конверсии становится невозможным (Рисунок 13). Можно предположить, что причиной является лучшая смачиваемость угольной поверхности расплавом полиэтилена и близких диапазонах интенсивного термического разложения компонентов.

В пятой главе с помощью математической модели исследуются процессы газификации пылевидного топлива. Методом оптимизации, как и в предыдущем разделе, является применение многовариантных расчетов. Анализируются возможности повышения энергетической эффективности процесса газификации древесной пыли, в том числе в смеси с углем на крупных тепловых электростанциях. Дается оценка влиянию состава топливных смесей на границы эффективности совместной газификации. Исследуются перспективные высокотемпературные процессы паровоздушной газификации угля в одно- и двухступенчатых реакторах. Сформулированы рекомендации по отбору оптимальных режимов для дальнейших исследований (детальное моделирование, эксперимент).

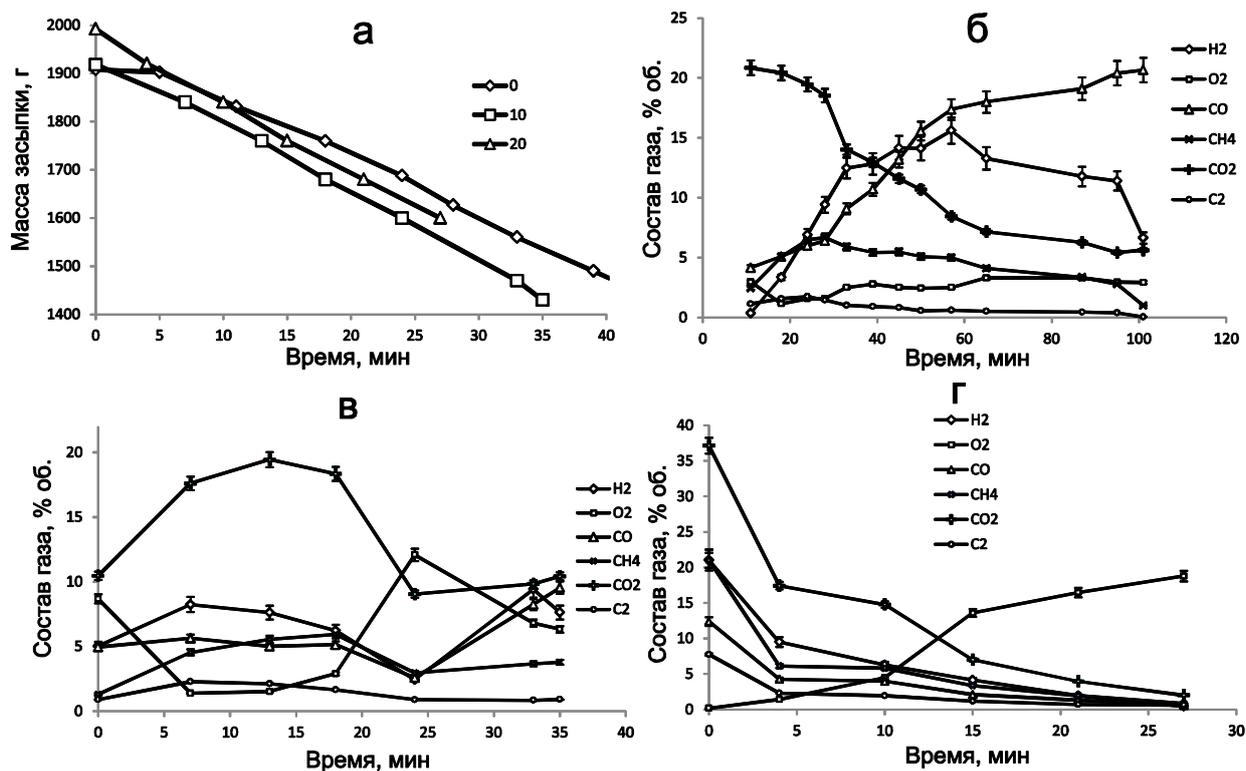


Рисунок 13 – Изменение во времени массы засыпки (а) и состава продуктов термического разложения смесей бурого угля и полиэтилена: (б) – 0%, (в) – 10%, (г) – 20%.

С помощью математической модели исследованы возможности повышения эффективности процесса газификации биомассы в потоке парокислородного дутья. Модель протестирована на опубликованных данных и показала хорошее согласие с экспериментом. Для поиска оптимальных условий газификации биомассы были проведены вариантыные расчеты, которые показали, что в зависимости от рабочего давления в реакторе реализуются различные режимы конверсии топлива: при низких давлениях эффективность процесса определяется температурным уровнем (соответственно, требуются большие избытки окислителя), с увеличением давления оптимальный расход кислорода уменьшается из-за увеличения времени пребывания частиц в зоне реакции (с 0,41 для 1 бар до 0,2 для 10 бар). Результаты моделирования показывают возможность достижения химического КПД процесса газификации порядка 85% при давлениях 5–10 бар (Рисунок 14). Применение условий шлакования сужает область оптимальных параметров, например, позволяет обосновать ограничение рабочего давления в реакторе на уровне 5 бар.

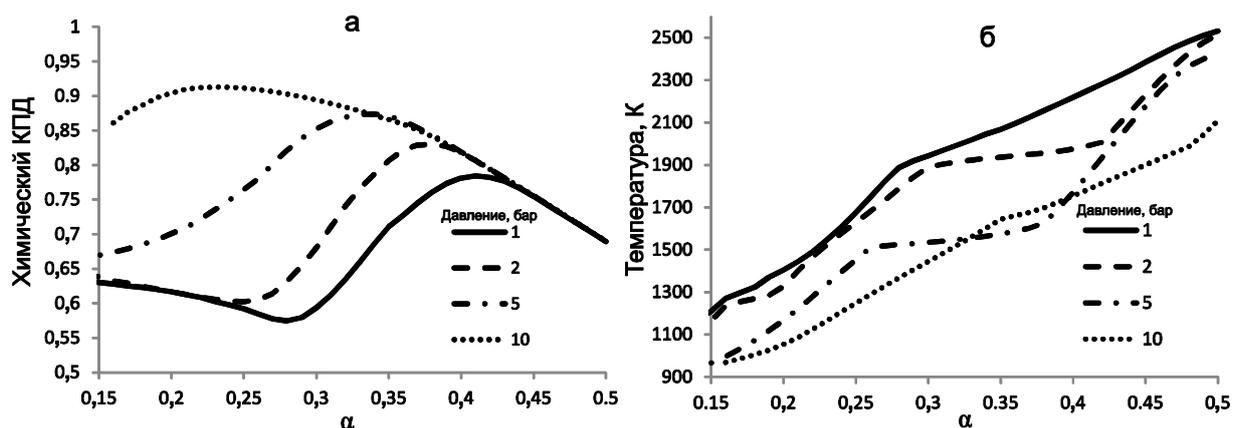


Рисунок 14 – Зависимость химического КПД, % (а) и температуры в зоне горения, К (б) от коэффициента избытка окислителя и давления

Результаты математического моделирования процесса совместной газификации угля и биомассы в поточном реакторе показывают, что при газификации смесей эффективность конверсии возрастает, в том числе, за счет улучшения стехиометрических условий (Рисунок 15). Биомасса является топливом с высокой реакционной способностью и высоким содержанием водорода, а уголь – компонентом с высокой теплотворной способностью и высоким содержанием углерода. При этом температурные ограничения, накладываемые условиями шлакоудаления, могут отсеять некоторые режимные области, среди которых – термодинамически оптимальные условия газификации (химический КПД порядка 90%). Повышение эффективности совместной газификации возможно, за счет управления составом минеральной части: смесевая зола должна быть более легкоплавкой.

С помощью одномерной математической модели исследован процесс газификации с двухступенчатой подачей топлива (каменного угля) с нагретым паровоздушным дутьем в широком диапазоне условий. Показано, что при высокой доле первичного топлива может происходить резкое падение химического КПД процесса газификации, однако при низкой доле первичного топлива возрастают теплотери с уносом твердой фазы, поэтому целесообразно поддерживать эту долю на уровне 30–50%. Переход между одноступенчатыми и двухступенчатыми режимами показан на Рисунке 16. Подача вторичного пара мало влияет на эффективность процесса при небольших абсолютных расходах. При фиксированной выходной температуре газа использование паровоздушного дутья становится эффективнее, чем использование только воздушного дутья, начиная с температуры дутьевого воздуха ок. 500°C.

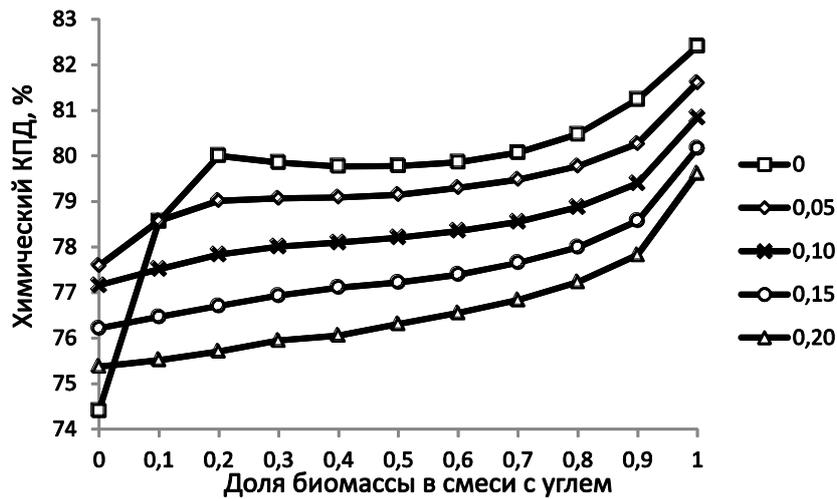


Рисунок 15 – Химический КПД процесса совместной газификации угля и биомассы при температуре шлакования при разных удельных расходах пара (моль/моль углерода)

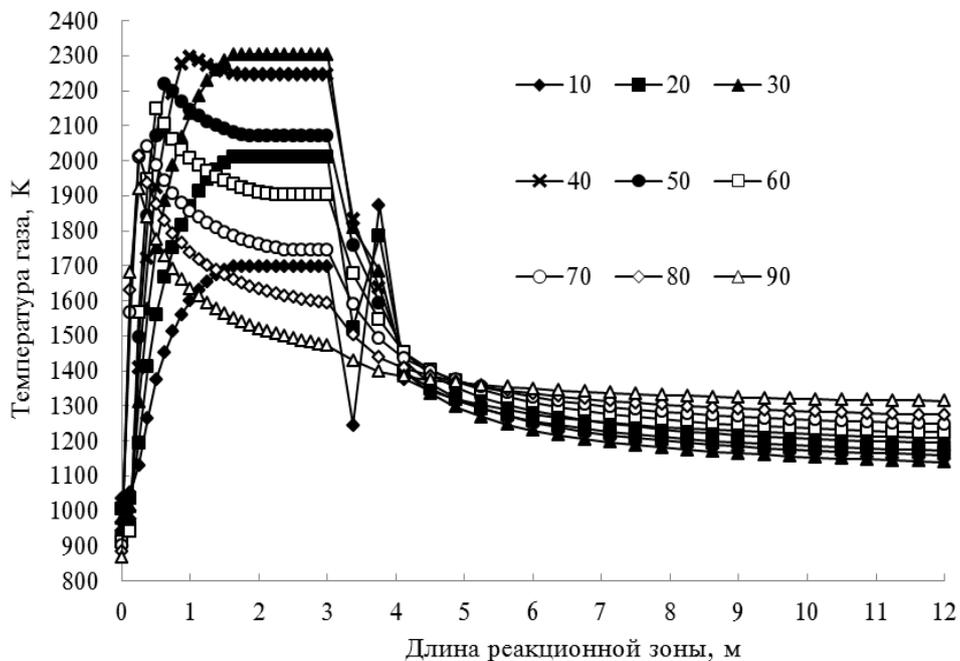


Рисунок 16 – Распределение температуры по длине реактора в зависимости от доли первичного топлива, % (режимы без подачи вторичного пара)

Рассмотрен процесс газификации угольного топлива в высокотемпературном воздушном дутье. Вариантные расчеты позволяют определить влияние управляющих параметров (температура подогрева воздуха и его удельный расход) на характеристики процесса газификации (химический КПД, характерные температуры реакционной зоны, качество генераторного газа). При подогреве воздуха до 1073 К модель предсказывает возможность достижения химического КПД более 80%. Высокотемпературный нагрев, однако, действует только в связке с подачей водяного пара, который служит для

улучшения стехиометрических условий конверсии. Сравнение химического и эксергетического КПД приведено на Рисунке 17: химический КПД имеет довольно пологий максимум (область КПД выше 78% вытянута вдоль температурной оси), а эксергетический КПД имеет намного более четкий экстремум, причем в области температур около 600 К. Это связано с вкладом тепловой эксергии воздушного дутья: химический КПД с ростом температуры не меняется, в то время как тепловая эксергия воздуха, входящая в знаменатель (2), растет. Тепловая эксергия продуктов газификации, в свою очередь, также растет, поэтому при избытках воздуха выше оптимального эксергетический КПД падает медленнее, чем химический КПД.

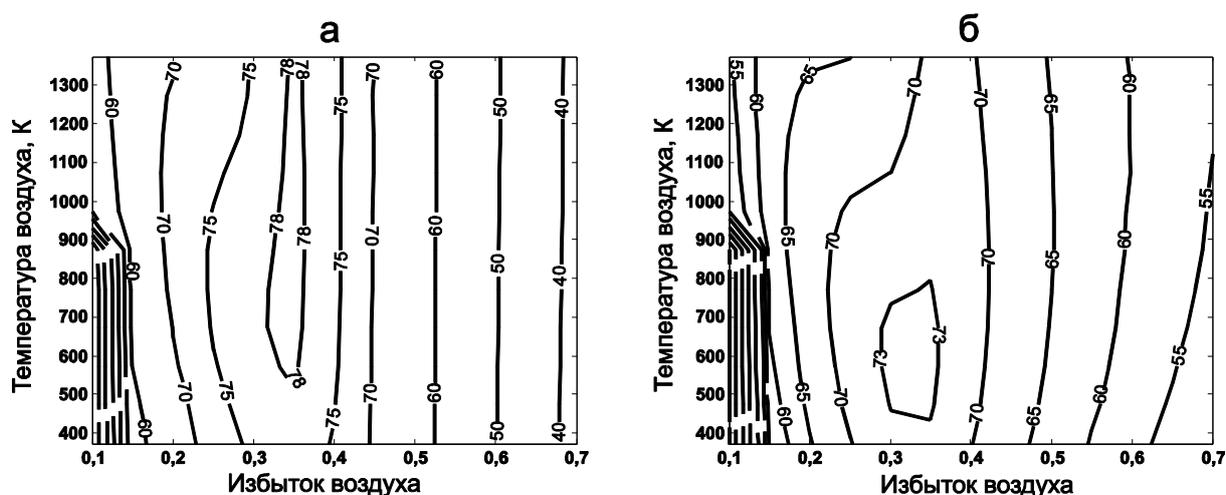


Рисунок 17 – Эффективность газификации угля (%) при удельном расходе пара 0.1 моль/моль углерода: химический КПД (а) и эксергетический КПД (б)

Результаты расчетного исследования характеристик режимов воздушной газификации бурых углей в реакторах поточного типа показывают существование ограничений на эффективность процесса, связанные с реакционной способностью и теплотой сгорания топлива. Максимальные значения химического КПД газификации для выбранных сортов достигают 66–68%, однако для достаточно глубокой конверсии топлива необходимо увеличивать удельный расход воздуха и допускать потери в эффективности. Результаты расчетов будут использованы для проведения оптимизационных исследований парогазовых установок с внутрицикловой газификацией бурого угля. Химический КПД и степень конверсии топлива связаны между собой немонотонно. Расчетные зависимости можно увидеть на Рисунке 18: удельный расход воздуха здесь растет слева направо. Видно, что максимальные значения химического КПД соответствуют довольно высокому уровню недожога. Для

того, чтобы снизить недожог до приемлемого уровня, необходимо повышать удельный расход воздуха, снижая химический КПД.

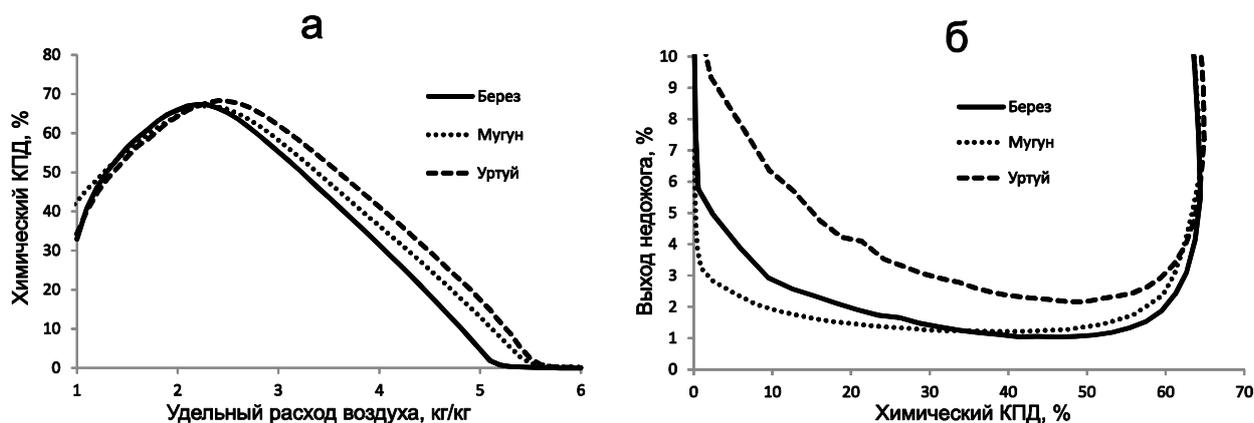


Рисунок 18 – Расчетные зависимости химического КПД от удельного расхода воздуха (а) и выхода недожога от химического КПД газификации (б) для бурых углей разных месторождений

В **шестой главе** рассматриваются процессы газификации угольной пыли с рециркуляцией продуктов сгорания (CO_2 и H_2O). Результаты математического моделирования показывают, что использование продуктов сгорания в качестве разбавителя позволяет снизить удельный расход окислителя и температуру генераторного газа на выходе при повышении степени конверсии углерода и выхода горючих газов. Проведены расчетные исследования для оценки эффективности высокотемпературной и ступенчатой газификации в смесях кислорода с диоксидом углерода.

С помощью термодинамических моделей проведено численное моделирование для оценки характеристик процессов газификации твердых топлив с рециркуляцией продуктов сгорания (Рисунок 19). Путем варьирования параметров получены оценки для оптимальных условий конверсии (состав и температура дутья, стехиометрические соотношения). Проведено сравнение процессов газификации в смесях O_2/N_2 и в смесях O_2/CO_2 .

Расчеты показывают, что при переходе от смесей O_2/N_2 к O_2/CO_2 при прочих равных температура снижается на 200–300 К, но, несмотря на это, химический КПД процесса увеличивается на 10–20%. Одним из преимуществ процессов газификации с добавлением продуктов сгорания является уменьшение затрат кислорода на полную газификацию топлива, хотя в ряде случаев это уменьшение приходится компенсировать подогревом дутья. Лучшим топливом для *oxfuel*-газификации оказывается высокоуглеродистое (кокс, каменный уголь). Высокотемпературный нагрев

способствует протеканию эндотермических реакций газификации, поэтому оказывается эффективным при использовании смесей O_2/CO_2 , но практически не влияет на оптимальные характеристики воздушной газификации. В аллотермических режимах обогащение дутья кислородом становится неэффективным, поскольку реакции газификации поддерживаются за счет физической теплоты дутья, а не химической энергии топлива.

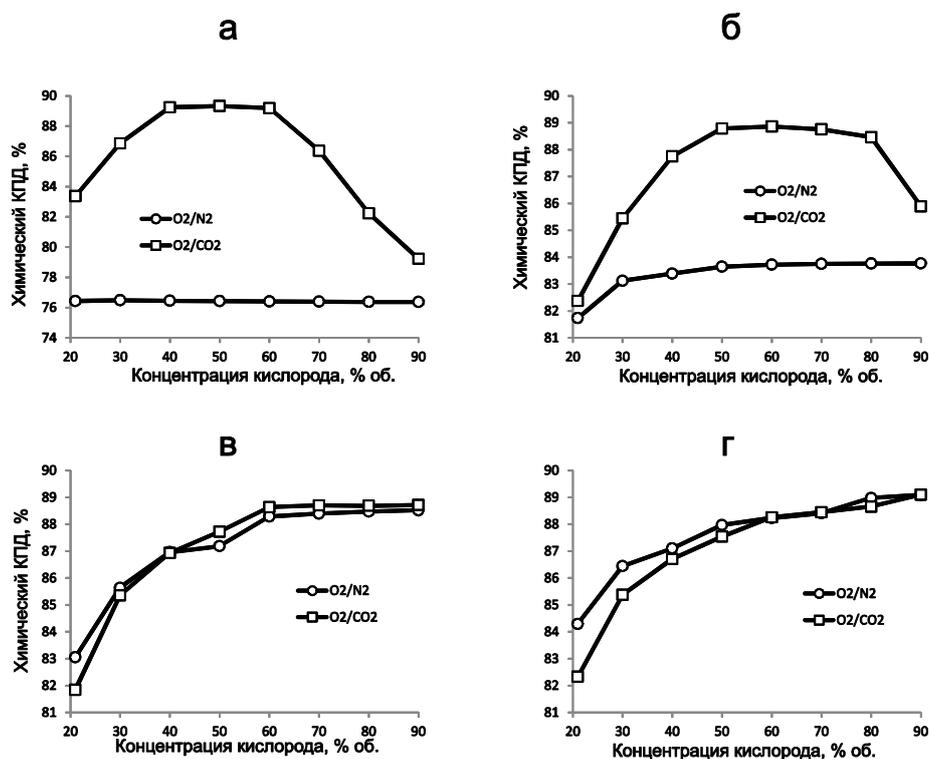


Рисунок 19 – Сравнение максимального химического КПД газификации разных топлив в смесях O_2/N_2 и O_2/CO_2 : кокс (а), каменный уголь (б), бурый уголь (в), биомасса (г)

Для процесса кислородной газификации (концентрация O_2 80% об.) проведено сравнение добавок на примере смесей $O_2/N_2/CO_2/H_2O$. Добавление H_2O и CO_2 приводит к повышению химического КПД, и, в некоторых случаях, к повышению степени конверсии топлива. Снижение температуры газификации компенсируется приростом теплотворной способности генераторного газа. Результаты расчетов показывают перспективы управления процессом газификации путем добавления реагентов в разных пропорциях, что позволяет регулировать одни характеристики процесса при сохранении других.

В процессе ступенчатой газификации пылеугольного топлива переход к дутью O_2/CO_2 также позволяет добиться повышения эффективности, при этом величина эффекта определяется концентрацией кислорода и температурными ограничениями.

Оптимальная доля первичного топлива находится в пределах 50–60% для всех случаев, а оптимальное значение коэффициента избытка окислителя лежит в пределах 0,35–0,4. Химический КПД процесса газификации увеличивается с 75 до 82 % при увеличении объемной концентрации кислорода с 21 до 30 %. На Рисунке 20 приведено сопоставление химического КПД η_{chem} , модифицированного химического КПД η_{chem}^t (включающего затраты энергии на нагрев дутья) и эксергетического КПД η_{ex} . В области оптимальных параметров поведение всех трех критериев качественно одинаково: максимум наблюдается с ростом температуры в узком диапазоне стехиометрических соотношений, однако предельный уровень эффективности снижается от 95% для химического КПД до 88% для модифицированного химического КПД и 84% для эксергетического КПД. С увеличением коэффициента избытка окислителя химический КПД перестает зависеть от температуры и определяется только стехиометрическими условиями; при учете нагрева воздуха химический КПД закономерно уменьшается с температурой; эксергетический КПД, напротив, растет с температурой из-за роста тепловой составляющей эксергии продуктов газификации.

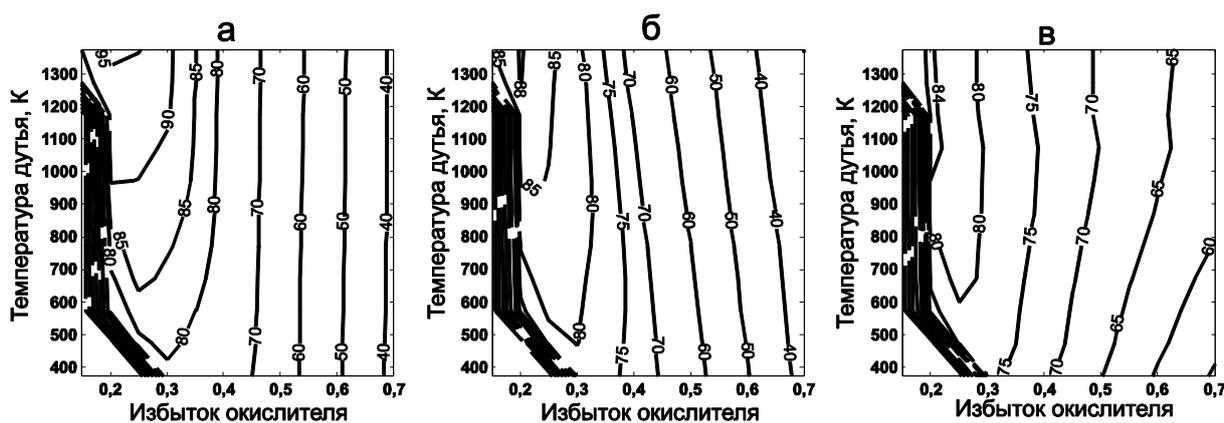


Рисунок 20 – Сравнение показателей эффективности газификации угля в O_2/CO_2 (%): химический КПД (а), химический КПД с учетом внешней теплоты (б) и эксергетический КПД (в)

Рассмотрены схемы парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля и улавливанием CO_2 . Снижение расчетного КПД станции, связанное с включением узла CCS (Рисунок 21), зависит от выбора схемы установки и процесса газификации (в данной работе КПД снижается с 43–47% до 25–39%).

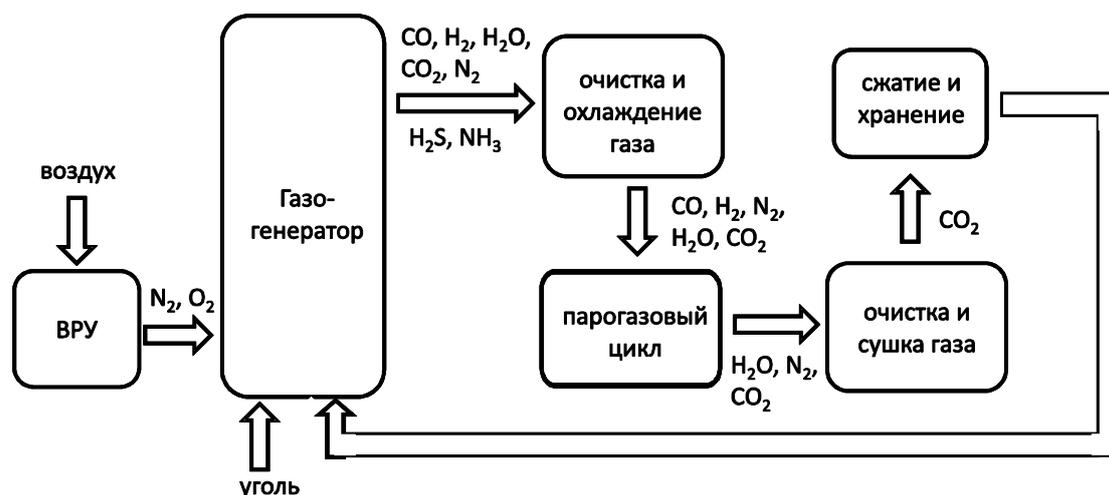


Рисунок 21 – Схема угольной ПГУ в режиме oxyfuel

Проведенные расчеты показывают, что использование процессов газификации с рециркуляцией дымовых газов позволяет снизить потери на выделение CO_2 до двух раз (около 8,5% вместо 16–18%); увеличение стоимости энергии, соответственно, оказывается в 1,5–2 раза меньше – 22–23% вместо 35–40% (Рисунок 22). Двухступенчатый процесс газификации является более перспективным для схем угольных ПГУ с CCS за счет большей эффективности термохимического преобразования топлива в горючий газ.

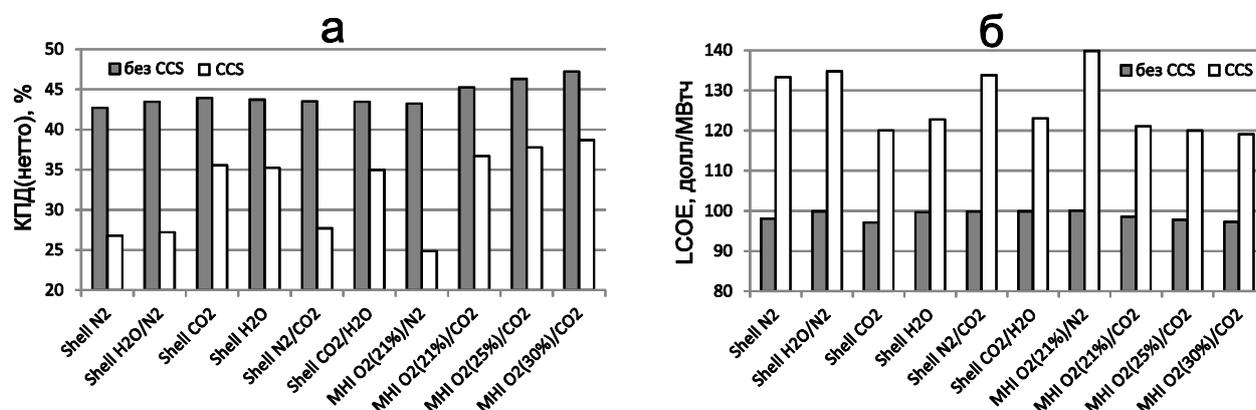


Рисунок 22 – Зависимость технико-экономических показателей угольных ПГУ от способа газификации топлива: серым выделены значения для базовой схемы, белым – для схем с удалением CO_2

Седьмая глава посвящена оптимизации параметров конкретной тепловой схемы ПГУ с внутрицикловой газификацией бурых углей. Для этого с помощью пакета программ СМПП строится подробная модель угольной ПГУ, в которой режимы газификации задаются табулятивно (на основе многовариантных расчетов, результаты которых представлены в предыдущей главе). Таким образом удается сохранить реалистичность описания процесса газификации при небольших вычислительных

затратах в ходе численной оптимизации. Результаты оптимизационных исследований показывают влияние уровня детализации модели на технико-экономические показатели энергетической установки, в том числе, особенности выбора режимов газификации с учетом цены и состава топлива, термохимической эффективности конверсии и механического недожога.

Предложена схема угольной ПГУ-ВЦГ с воздушным дутьем и одноступенчатым процессом газификации бурых углей (см. Рисунок 23). Для этой схемы построена математическая модель (с помощью программного комплекса СМПП-ПК), позволяющая использовать разные приближения для описания блока газификации. Среди таких приближений рассматриваются два варианта модели конечного равновесия и кинетико-термодинамическая модель, разработанная автором. Расчеты показывают, что интерполяционная модель позволяет достаточно точно определять выход, состав и температуру генераторного газа в зависимости от условий газификации.

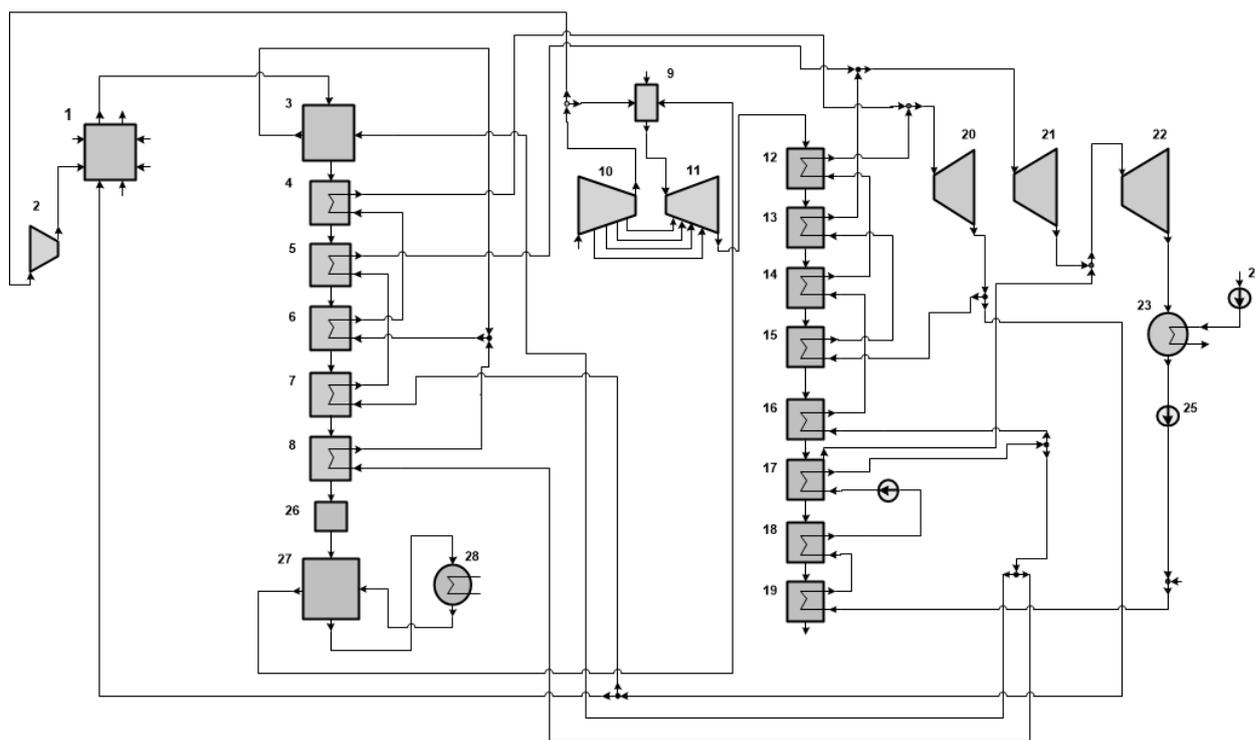


Рисунок 23 – Расчетная схема ПГУ с газификацией угля. 1 – газогенератор, 2 – дутьевой компрессор, 3 – улавливание коксозольного остатка, 4–8 – ступени котла-утилизатора для охлаждения генераторного газа, 9 – камера сгорания газовой турбины, 10 – воздушный компрессор, 11 – газовая турбина, 12–19 – ступени котла-утилизатора для охлаждения продуктов сгорания, 20–22 – отсеки паровой турбины, 23 – конденсатор, 24 – циркуляционный насос системы технического водоснабжения, 25 – конденсатный насос, 26–28 – золо- и сероочистка

С помощью модели угольной ПГУ-ВЦГ проведены оптимизационные исследования по критериям максимума КПД производства электроэнергии и минимума цены электроэнергии. Расчеты проводились для углей Березовского, Мугунского и Уртуйского месторождений. В расчете использовались две математические модели газогенератора – модель конечного термодинамического равновесия и модель из гл. 2. Одной из важных характеристик процесса газификации при работе в составе ПГУ-ВЦГ является величина мехнедожога. Соответственно, для оценки характеристик газогенератора в настоящей работе существуют три варианта:

- Вариант 1. Используется модель конечного термодинамического равновесия с без фиксированной доли мехнедожога.
- Вариант 2. Используется модель конечного термодинамического равновесия с расчетом величины мехнедожога с помощью зависимостей, полученных в гл. 5.
- Вариант 3. Используется кинетики-термодинамическая модель, в которой мехнедожог определяется с учетом гетерогенных реакций (см. Рисунок 18).

Оптимизационные расчеты по определению максимума $KPD_{эл}$ показывают (см. Рисунок 24), что самые высокие значения $KPD_{эл}$ получаются в варианте 1 (равновесная модель газогенератора). В варианте 2, когда доля недожога угля зависит от условий газификации, $KPD_{эл}$ на 1,6–2% ниже, чем в варианте 1. На 12–18% возрастает удельный расход воздуха, на 20% возрастает температура газа на выходе. При переходе к задаче минимизации цены электроэнергии, в оптимальных решениях становятся ниже и капиталовложения, и КПД производства электроэнергии (см. Рисунок 25).

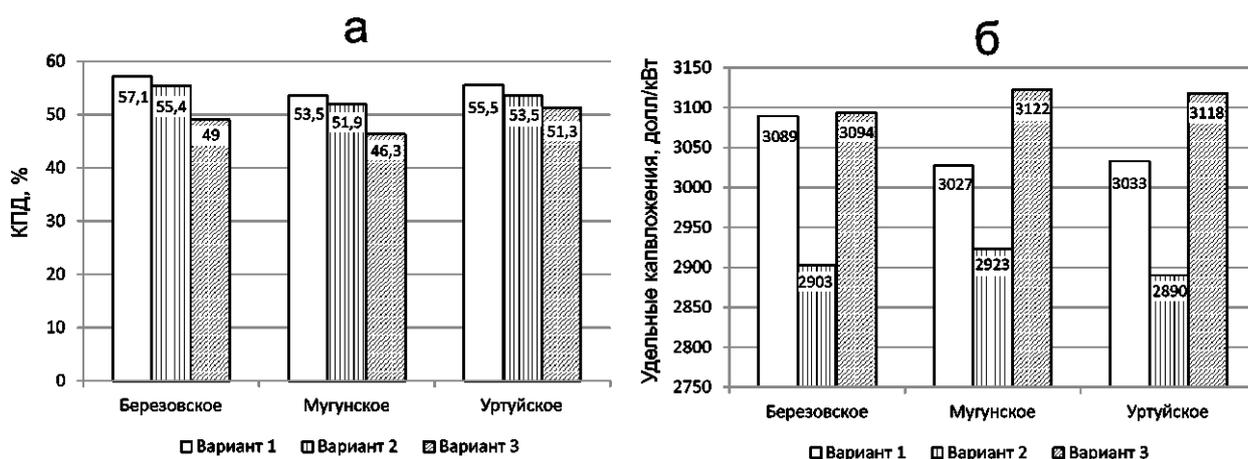


Рисунок 24 – Результаты расчетов на максимум КПД_{эл}: а) КПД_{эл}, б) удельные капиталовложения

Выбор модели для оценки параметров генераторного газа влияет на параметры парогазового цикла. Следствием этого является перераспределение выработки

электроэнергии между газовой и паротурбинной частями установки. При решении задачи на максимум КПД превышение в выработке электроэнергии на ГТУ составляет 15–30% по сравнению с ПТУ, а при минимизации цены электроэнергии оно не превышает 10%, а для некоторых задач и углей выработка на ПТУ больше чем на ГТУ (Рисунок 26). Этот факт можно связать с качеством газа: равновесная модель переоценивает теплотворную способность газа и занижает его температуру, поэтому оптимизация по критерию эффективности установки приводит к увеличению доли ГТУ. Реалистичная оценка качества газа ведет к снижению КПД ГТУ, поэтому максимизация КПД установки в целом ведет к росту доли ПТУ в выработке электроэнергии. Такой переход требует больших капиталовложений в паротурбинную часть, поэтому минимизация цены электроэнергии возвращает часть выработки на ГТУ.

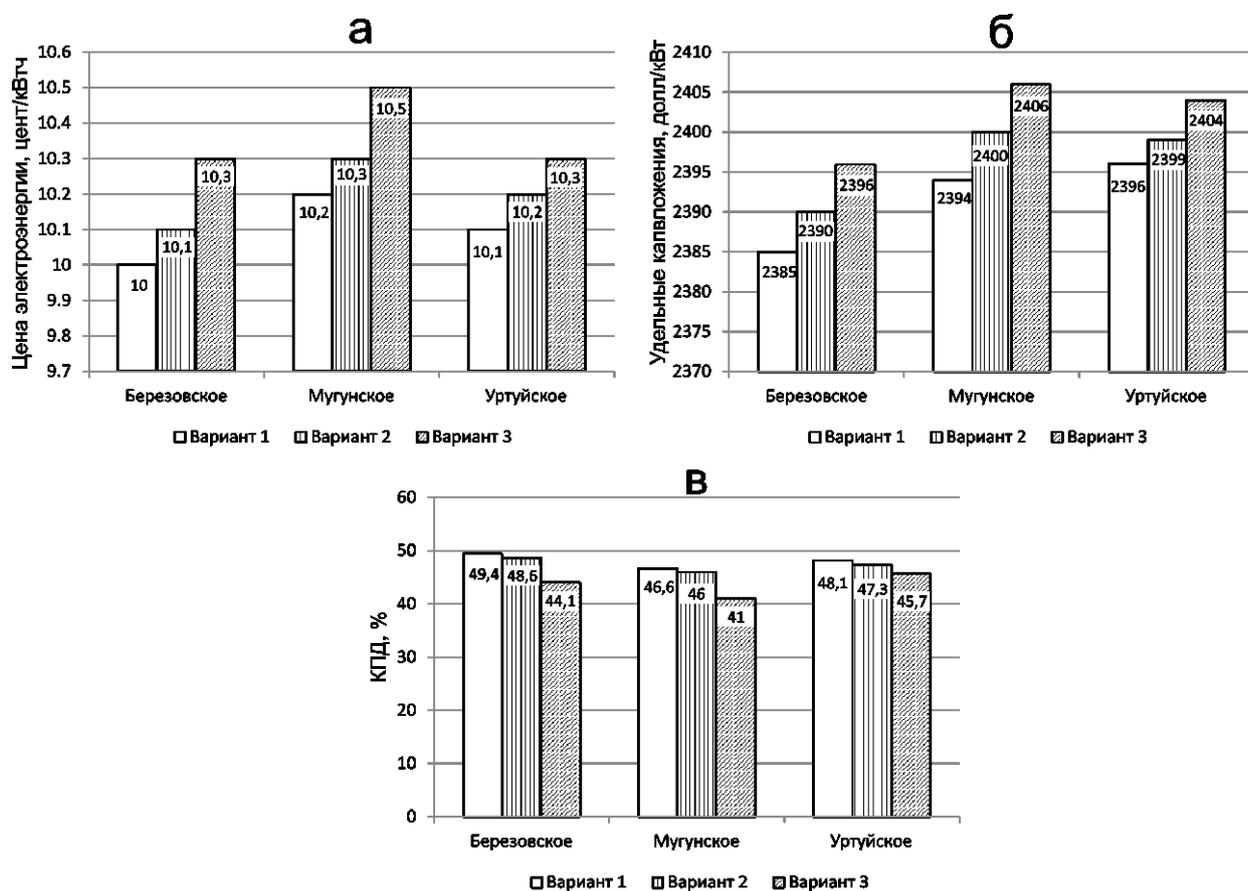


Рисунок 25 – Результаты расчетов на минимум цены электроэнергии при цене топлива 100 долл./т у.т.: а) цена электроэнергии, б) удельные капиталовложения, в) КПД_{эл}

Расчетный КПД производства электроэнергии при использовании кинетико-термодинамической модели лежит в диапазоне 40–50% для всех углей, удельные

капиталовложения – в диапазоне 2500–3000 долл/кВт. При использовании равновесных оценок технико-экономические показатели становятся лучше. КПД производства электроэнергии более чувствителен к используемой модели блока газификации, чем цена электроэнергии.

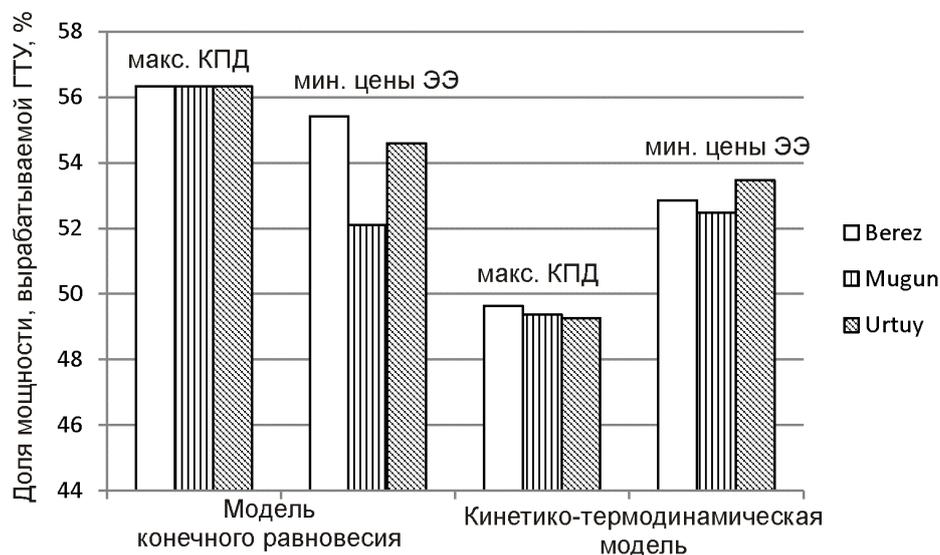


Рисунок 26 – Влияние модели газогенератора и критерия оптимизации на долю выработки электроэнергии, приходящуюся на ГТУ

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования, а также перечислены основные направления исследований, в которых автор планирует продолжать представленную работу.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе приводятся результаты комплексных исследований эффективности процессов переработки твердых топлив, как традиционных (уголь), так и низкосортных (биомасса, отходы). Оценка пределов эффективности процессов переработки твердых топлив проводится путем разработки взаимосвязанных методических подходов на разных уровнях рассмотрения (реагирующая смесь, реактор, блок газификации, энергетическая/энерготехнологическая установка). Основным инструментом исследования выступает численное моделирование. Предложены методы и подходы для численного моделирования и оптимизации параметров энерготехнологических установок. На основе кинетико-термодинамического подхода разработаны новые математические модели процессов термохимической конверсии топлив. Оценены области применимости этих моделей, проведена их верификация. С их помощью проведены многофакторные численные расчеты для новых процессов

газификации. Результаты этих расчетов позволяют оптимизировать режимы термохимической конверсии твердого топлива в широких диапазонах управляющих параметров (расходных, геометрических и т.д.). Проведено сравнение разных технологических решений, направленных на повышение качества генераторного газа, получаемого при переработке низкосортных твердых топлив, показаны преимущества ступенчатых процессов газификации и перспективы повышения их эффективности применительно к влажному древесному топливу.

Проведены расчетные исследования разных способов повышения качества генераторного газа при газификации низкосортных топлив, таких как и использование вторичного дутья (расчеты позволяют оптимизировать долю вторичного дутья и точку его подачи в слой), разделение процесса газификации на ступени пиролиза и конверсии огарка (расчеты позволяют определить области устойчивости термических режимов), добавление в слой каталитически активного негорючего материала. Исследованы условия работы реактора с аллотермической газификацией биомассы водяным паром при интенсивном внешнем теплоподводе. Выполнены численные расчеты для поиска оптимальных условий газификации топливных смесей (бурый уголь, древесная биомасса, пластики, муниципальные отходы).

Проведено экспериментальные и численное исследование термохимической конверсии полимерсодержащих смесей. Определены механизмы агломерации за счет расплавления пластиков и заполнения порозного пространства при разных способах нагрева. Эксперименты показывают, что агломерация смесей биомассы и полиэтилена происходит при доле полиэтилена 20% и выше. Показано, что уголь сильнее подвержен спеканию, вероятно, из-за лучшей смачиваемости продуктами плавления и разложения полиэтилена. При спекании образуются прогары, преимущественно в пристеночной области. Продукты разложения древесины и полиэтилена образуют отложения в системе газоочистки.

Исследованы возможности повышения эффективности процессов газификации распыленного топлива: биомассы и угольно-биомассных смесей, каменных и бурых углей. Рассмотрены высокотемпературные процессы с подогревом воздуха и разбиением реактора на ступени для сжигания и квенчинга. Определены ограничения на эффективность, связанные с составом топлива и условиями шлакования. Проведено сравнение процессов газификации в смесях O_2/N_2 и $O_2/CO_2/H_2O$. Показано, что

применение смесей с водяным паром и диоксидом углерода позволяет снизить удельный расход окислителя и лучше использовать теплоту подогрева дутья.

Оценены экономические характеристики парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля и улавливанием CO_2 . Проведено сравнение уровней снижения КПД станции, связанное с включением узла улавливания CO_2 . Показано, что использование процессов газификации с рециркуляцией CO_2 позволяет снизить потери до двух раз.

Разработанные математические модели применены в программных комплексах, осуществляющих оптимизацию тепловых схем энергетических установок с газификацией твердых топлив по технико-экономическим критериям. Определены показатели эффективности перспективных парогазовых установок с внутрицикловой газификацией угля, а также их зависимость от внешних условий.

Одним из общих выводов и для низкотемпературной конверсии биотоплив, и для высокотемпературных процессов конверсии углей, можно указать на необходимость компромисса между полнотой конверсии топлива и свойствами горючего газа: термодинамические расчеты, как правило, занижают равновесную температуру реакции, поэтому достижение оптимального состояния оказывается кинетически затруднено. Повышение температуры для преодоления этих затруднений требует снижения эффективности (т.е. ухода в область с меньшим выходом горючих компонентов), использования дополнительных источников энергии (подогрева дутья) или рекуперации теплоты продуктов конверсии (химический квенчинг, термоподготовка топлива). Многие технологические и эксплуатационные проблемы энергетических установок с газификацией топлив связаны, в первую очередь, именно с физико-химическими особенностями (реакционная способность органической массы, поведение минеральной части и т.д.).

Результаты проведенных исследований составляют теоретическую основу для разработки новых высокоэффективных технологий использования твердого топлива в энергетике и химической промышленности, связанных с такими направлениями, как глубокая переработка угля, экологически чистые угольные технологии, вовлечение низкосортных топлив и отходов в энергобаланс.

Развитие вычислительной техники и появление новых эффективных численных методов позволяют моделировать все более детальные явления, связанные с процессами переноса и химическими превращениями в реакторах для конверсии

твердого топлива. Необходимо, однако, отметить еще раз, что задачи полноценной многофакторной оптимизации установок для переработки топлив еще долгое время будут решаться с применением упрощенных и полуэмпирических моделей. В связи с этим можно перечислить задачи, решение которых позволит усовершенствовать предложенные методы и расширить область их применения:

1) Обоснование осреднения (и редукции в целом) пространственных моделей и определение критериев для выбора уровней детализации математических моделей.

2) Разработка эффективных численных методов для кинетико-термодинамического анализа процессов переработки топлив.

3) Совершенствование методик обработки и коррекции сигналов, получаемых при экспериментальных исследованиях термохимических превращений твердых топлив и создание баз данных по их реакционной способности.

4) Развитие представлений о кинетических механизмах горения продуктов пиролиза с учетом образования и разложения смолистых продуктов и сажи, а также эффективная редукция этих механизмов для типичных условий конверсии.

5) Разработка новых процессов газификации, в первую очередь, со ступенчатой конверсией топлив и промежуточных продуктов конверсии и тепловых схем энергетических установок для увеличения степени полезного использования химической и тепловой энергии топлива.

6) Экспериментальные и теоретические исследования динамики термического поведения пористых систем с меняющейся проницаемостью на разных масштабах (от одиночных частиц до засыпок).

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из списка ВАК:

1. **Донской, И.Г.** Влияние смолообразования на эффективность процесса воздушной газификации биомассы / И.Г. Донской // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2015. - № 5-6. - С. 93-100. (К2 списка ВАК)
2. **Донской, И.Г.** Численное исследование режимов работы одноступенчатого поточного газогенератора с паровоздушным дутьем / И.Г. Донской // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". - 2017. - Т. 17. - № 3. - С. 13–23. (К1 списка ВАК)

3. **Донской, И.Г.** Численное исследование режимов газификации угля и биомассы в поточном газогенераторе с парокислородным дутьем / И.Г. Донской // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". - 2018. - Т. 18. - № 3. - С. 14-21. (К1 списка ВАК)
4. **Донской, И.Г.** Математическое моделирование газификации древесины смолистых продуктов на частицах активных компонентов / И.Г. Донской // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2018. - Т. 20. - № 11-12. - С. 107-117. (К2 списка ВАК)
5. **Донской, И.Г.** Влияние параметров дутья на эффективность ступенчатого процесса высокотемпературной пылеугольной газификации / И.Г. Донской // Вестник ЮУрГУ. Серия "Энергетика". - 2020. - Т. 20. - № 1. - С. 12-21. (К1 списка ВАК)
6. **Донской, И.Г.** Математическое моделирование термического разложения смолистых веществ в процессе обращенной газификации растительной биомассы / И.Г. Донской // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2020. - Т. 22. - № 5. - С. 83-93. (К2 списка ВАК)
7. **Донской, И.Г.** Влияние добавок водяного пара и диоксида углерода на характеристики процесса кислородной газификации пылеугольного топлива / И.Г. Донской // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия "Энергетика". - 2021. - Т. 21. - № 1. - С. 21-28. (К1 списка ВАК)
8. **Донской, И.Г.** Численное исследование эффективности совместной слоевой газификации древесной биомассы и муниципальных отходов / И.Г. Донской // Известия РАН. Энергетика. - 2021. - № 3. - С. 54-69.
9. Клер, А.М. Оптимизационные исследования парогазовой установки с внутрицикловой газификацией бурых углей на основе различных моделей газогенератора / А.М. Клер, **И.Г. Донской**, А.Ю. Маринченко // Известия РАН. Энергетика. - 2022. - № 5. - С. 36-48.
10. **Донской, И.Г.** Математическое моделирование процесса ступенчатой пылеугольной газификации / И.Г. Донской, Д.А. Свищев, В.А. Шаманский, А.Н. Козлов // Научный вестник НГТУ. - 2015. - № 1 (58). - С. 231-245.

Статьи в журналах, индексируемых в системах Web of Science и/или Scopus:

11. **Донской, И.Г.** Оптимизация режимов работы парогазовой мини-ТЭС с атмосферным газогенератором / И.Г. Донской, А.Ю. Маринченко, А.М. Клер, А.Ф. Рыжков // Теплофизика и аэромеханика. - 2015. - Т. 22. - № 5. - С. 663-671.

- перевод: **Donskoy, I.G.** Optimizing modes of a small-scale combined-cycle power plant with atmospheric-pressure gasifier / I.G. Donskoy, A.Yu. Marinchenko, A.M. Kler, A.F. Ryzhkov // Thermophysics and Aeromechanics. - 2015. - V. 22. - No. 5. - P. 639-646.
12. **Донской, И.Г.** Математическое моделирование реакционной зоны газогенератора типа Shell-Prenflo с помощью моделей последовательных равновесий / И.Г. Донской // Химия твердого топлива. - 2016. - № 3. - С. 54-59.
- перевод: **Donskoi, I.G.** Mathematical modeling of the reaction zone of a Shell-Prenflo gasifier with the use of the models of sequential equilibrium / I.G. Donskoi // Solid Fuel Chemistry. - 2016. - V. 50. - No. 3. - P. 191-196.
13. **Donskoy, I.G.** A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification / D.A. Svishchev, A.N. Kozlov, I.G. Donskoy, A.F. Ryzhkov // Fuel. - 2016. - V. 168. - P. 91-106.
14. **Донской, И.Г.** Расчетное исследование эффективности ступенчатого процесса газификации влажной древесины / И.Г. Донской, А.Н. Козлов, Д.А. Свищев, В.А. Шаманский // Теплоэнергетика. - 2017. - № 4. - С. 21-29.
- перевод: **Donskoi, I.G.** Numerical investigation of the staged gasification of wet wood / I.G. Donskoi, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev, V.A. Shamanskii // Thermal Engineering. - 2017. - V. 64. - No. 4. - P. 258-264.
15. **Donskoy, I.G.** Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation / I.G. Donskoy, V.A. Shamansky, A.N. Kozlov, D.A. Svishchev // Combustion Theory and Modelling. - 2017. - V. 21. - No. 3. - P. 529-559.
16. Шаманский, В.А. Модель выгорания угольной частицы в поточном реакторе для термохимической конверсии твердого топлива / В.А. Шаманский, **И.Г. Донской** // Теоретические основы химической технологии. - 2017. - Т. 51. - № 2. - С. 182-188.
- перевод: Shamanskii, V.A. Model of carbon particle burnout in a flow reactor for thermochemical conversion of solid fuel / V.A. Shamanskii, **I.G. Donskoi** // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. - 2017. - V. 51. - No. 2. - P. 199-205.
17. **Донской, И.Г.** Моделирование процесса совместной газификации древесины и полимерных материалов в плотном слое / И.Г. Донской // Химия твердого топлива. 2018. № 2. С. 67-72.

- перевод: **Donskoi, I.G.** Process simulation of the co-gasification of wood and polymeric materials in a fixed bed / I.G. Donskoi // *Solid Fuel Chemistry*. - 2018. - V. 52. - No. 2. - P. 121-127.
18. Рыжков, А.Ф. Модернизация поточного воздушного газификатора для твердотопливной парогазовой установки / А.Ф. Рыжков, Н.А. Абаимов, **И.Г. Донской**, Д.А. Свищев // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54. № 3. С. 96-103.
- перевод: Ryzhkov, A.F. Modernization of Air-Blown Entrained-Flow Gasifier of Integrated Gasification Combined Cycle Plant / A.F. Ryzhkov, N.A. Abaimov, **I.G. Donskoy**, D.A. Svishchev // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. - 2018. - V. 54. - No. 3. - P. 337-344.
19. **Донской, И.Г.** Математическое моделирование совместной конверсии угля и шлама сточных вод в обращенном слоевом газогенераторе / И.Г. Донской // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. - 2019. - Т. 330. - № 2. - С. 7-18.
20. **Донской, И.Г.** Влияние состава угольно-биомассного топлива на эффективность его газификации в газогенераторах поточного типа // *Химия твердого топлива*. - 2019. - № 2. - С. 55-62.
- перевод: **Donskoy, I.G.** Influence of coal-biomass fuel composition on the efficiency of its conversion in entrained-flow gasifiers / I.G. Donskoy // *Solid Fuel Chemistry*. - 2019. - V. 53. - No. 2. - P. 113-119.
21. **Донской, И.Г.** Численное моделирование и оптимизация режимов газификации древесной биомассы в потоке парокислородного дутья / И.Г. Донской // *Журнал прикладной химии*. - 2020. - Т. 93. - № 4. - С. 18-26.
- перевод: **Donskoi, I.G.** Simulation and Optimization of Wood Biomass Gasification Regimes in a Flow of Steam-Oxygen Blast / I.G. Donskoi // *Russian Journal of Applied Chemistry*. - 2020. - V. 93. - No. 4. - P. 519-526.
22. Marchenko, O. Economic Efficiency Assessment of Using Wood Waste in Cogeneration Plants with Multi-Stage Gasification / O. Marchenko, S. Solomin, A. Kozlov, V. Shamanskiy, **I. Donskoy** // *Applied Sciences*. - 2020. - V. 10. - P. 7600.
23. **Донской, И.Г.** Влияние состава твердого топлива на равновесные характеристики процесса газификации в смесях кислорода и диоксида углерода / И.Г. Донской // *Химия твердого топлива*. - 2021. - № 6. - С. 50-58.

- перевод: **Donskoi, I.G.** Influence of the composition of solid fuel on the equilibrium characteristics of a gasification process in the mixtures of oxygen and carbon dioxide / I.G. Donskoi // Solid Fuel Chemistry. - 2021. - V. 55. - No. 6. - P. 399-406.
24. **Донской, И.Г.** Анализ эффективности процесса газификации пылеугольного топлива в высокотемпературном потоке O_2/N_2 и O_2/CO_2 с помощью математического моделирования / И.Г. Донской // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2021. - Т. 332. - № 11. - С. 127-140.
 25. **Donskoy, I.** Influence of heating conditions on formation and development of agglomerates in a reactive porous medium / I. Donskoy // Heat Transfer Research. - 2022. - V. 53. - No. 12. - P. 25-36.
 26. Marchenko, O. Evaluation of the Effectiveness of Joint Use of Wood and Other Renewable Energy Sources in the Baikal Region / O. Marchenko, S. Solomin, V. Shamanskiy, **I. Donskoy** // Applied Sciences. - 2022. - V. 12. - P. 1254.
 27. **Donskoy, I.G.** Decomposition of the problem in the numerical solution of differential-algebraic systems for chemical reactions with partial equilibria / I.G. Donskoy // Bulletin of the South Ural University. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. - 2022. - V. 15. - No. 4. - P. 59-70.
 28. **Donskoy, I.** Techno-Economic Efficiency Estimation of Promising Integrated Oxyfuel Gasification Combined-Cycle Power Plants with Carbon Capture / I. Donskoy // Clean Technologies. - 2023. - V. 5. - P. 215-232.
 29. **Donskoy, I.** Particle Agglomeration of Biomass and Plastic Waste during Their Thermochemical Fixed-Bed Conversion / I. Donskoy // Energies. - 2023. - V. 16. - P. 4589.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

1. **Донской, И.Г.** Стационарные режимы обращенного процесса газификации твердых топлив (Downdraft Air-blown Gasification) / И.Г. Донской // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018611292. Дата регистрации: 01.02.2018. Правообладатель: ИСЭМ СО РАН.
2. **Донской, И.Г.** Стационарные режимы процесса газификации пылевидного топлива (Entrained-Flow Gasification) / И.Г. Донской // Свидетельство о государственной

регистрации программы для ЭВМ № 2019667069. Дата регистрации: 18.10.2019 г. Правообладатель: ИСЭМ СО РАН.

3. **Донской, И.Г.** Программа расчета нестационарной фильтрации в случайной пористой среде (Chromef-2D) / И.Г. Донской // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612098. Дата регистрации: 14.02.2020 г. Правообладатель: ИСЭМ СО РАН.
4. **Донской, И.Г.** Термодинамический расчет состава продуктов газификации твердого топлива в режимах охуfuel / И.Г. Донской // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666768. Дата регистрации: 16.12.2020. Правообладатель: ИСЭМ СО РАН.
5. **Донской, И.Г.** Ступенчатая газификация пылевидного топлива в потоке (Staged Entrained-Flow Gasification) / И.Г. Донской // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666769. Дата регистрации: 16.12.2020. Правообладатель: ИСЭМ СО РАН.
6. **Донской, И.Г.** Программа для расчета теплового баланса реактора идеального перемешивания с пиролизом и газификацией биотоплива. / И.Г. Донской // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021665421 Дата регистрации: 24.09.2021. Правообладатель: ИСЭМ СО РАН.
7. **Донской, И.Г.** Программа для численного решения уравнений химической кинетики с частичным равновесием (изотермическое окисление метана) / И.Г. Донской // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666657. Дата регистрации: 01.11.2021. Правообладатель: ИСЭМ СО РАН.

Прочие публикации:

1. **Donskoy, I.G.** Reduced Order Modelling of Pulverized Coal Staged Gasification: Influence of Primary and Secondary Fuel Ratio / I.G. Donskoy, D.A. Svishchev, A.F. Ryzhkov // Energy Systems Research. - 2018. - V. 1. - No. 4. - P. 27-35.
2. **Donskoy, I.G.** Numerical study of operating parameters of a single-stage air-steam blown gasification process of pulverized coal / I.G. Donskoy // Energy Systems Research. - 2019. - V. 2. - No. 3. - P. 55-61.
3. **Donskoy, I.** The Influence of Fuel and Steam Consumption on Characteristics of Fixed Bed Process of Woody Biomass Steam Gasification with Intensive Heat Supply / I. Donskoy // Energy System Research. - 2020. - V. 3. - No. 4. - P. 13-22.

4. **Donskoy, I.** A Numerical Study of the Influence of Process Parameters on the Efficiency of Staged Coal Gasification Using Mixtures of Oxygen and Carbon Dioxide / I. Donskoy // Energy Systems Research. - 2021. - V. 4. - No. 2. - P. 27-34.
5. **Donskoy I.** Simulation and optimization of entrained-flow air-steam gasification of brown coals / I. Donskoy // Energy Systems Research. - 2022. - V. 5. - No. 1. - P. 31-37.

Отпечатано в «ДубльПринт»
664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14, оф. 112
Заказ № 6965, тираж 100 экз.