

На правах рукописи



Налетов Владислав Алексеевич

**Разработка мультифункциональных
технологических систем переработки природных
энергоносителей на основе их оптимальной
организации**

Специальности: 05.17.07 – Химическая технология топлива и
высокоэнергетических веществ
05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена на кафедре химической технологии углеродных материалов
Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
Глебов Михаил Борисович,
заведующий кафедрой кибернетики химико-технологических процессов Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор
Бессарабов Аркадий Маркович,
заместитель директора по науке Научного центра «Малотоннажная химия»

Доктор технических наук, профессор
Дворецкий Дмитрий Станиславович,
заведующий кафедрой «Технологии и оборудование пищевых и химических производств»
Тамбовского государственного технического университета

Доктор химических наук
Мордкович Владимир Зальманович,
заведующий отделом новых химических технологий и наноматериалов Технологического института сверхтвердых и новых углеродных материалов

Ведущая организация: **Национальный исследовательский университет «МЭИ»**

Защита состоится «11» сентября 2018 г. в 11-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212. 204. 08 в РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047 Москва, Миусская пл., д.9) в Конференц-зале (ауд. 443).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ им. Д.И. Менделеева и на сайте <http://diss.muctr.ru/author/228>

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212. 204. 08
кандидат химических наук

С.В. Вержичинская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Актуальные проблемы технологической политики при использовании природных энергоносителей, такие как энергосбережение и охрана окружающей среды требуют разработки новых научных подходов к созданию multifunctionальных химико-технологических систем (ХТС), позволяющих решать эти проблемы комплексно и эффективно. Многофункциональность технологических систем означает, что они одновременно могут выполнять несколько функций, решая при этом комплекс задач. Например, все системы ко, три- или полигенерации являются multifunctionальными. В настоящее время большинство актуальных задач решается обособленно, ввиду отсутствия научных подходов, позволяющих оптимальным образом дифференцировать функции сложной системы. Основные приоритеты в технологической политике представлены в докладе Международного Энергетического Агентства, определяющего стратегию использования природных энергоносителей на период до 2050 года, среди которых в соответствии с инновационным Сценарием ускоренного развития (**Accelerated Technology scenarios, АСТ**), можно выделить следующие: энергосбережение – 45% (в том числе, когенерация – совместная выработка электроэнергии и теплоты – 34%) и сокращение выбросов CO₂ – процессы улавливания и захоронения диоксида углерода (**Carbon Capture and Storage, ССS**) – 12%. Важным направлением в улавливании и захоронении диоксида углерода является также его использование для целей повышения нефтеотдачи на месторождениях (**Enhanced Oil Recovery, EOR**), при котором диоксид углерода либо остается в пласте, либо выделяется при добыче для повторного использования. Доминирующее положение по выбросам диоксида углерода занимают отрасли промышленности, использующие ископаемые топлива, в частности, отрасли топливно-энергетического комплекса (ТЭК), химии, нефтехимии, металлургии, коксохимии и ряда других. Например, суммарные мировые выбросы дымовых газов, содержащих диоксид углерода, ежегодно оцениваются в 325 млрд. тонн, а их тепловой потенциал после очистки от оксидов серы и азота (тепловое загрязнение окружающей среды) – в 65 млн. ТДж в год (1ТДж=10¹² Дж), что сопоставимо с энергией термальных вод Земли (около 50 млн. ТДж/год). В связи с увеличивающимися потребностями в товарном диоксиде углерода особую значимость приобретает задача получения диоксида углерода в виде продукта, соответствующего требованиям действующих стандартов, что позволит повысить рентабельность технологий. Одной из практических задач в свете этого является разработка систем ко- и полигенерации с получением диоксида углерода из дымовых газов в виде продукта, в которых возможно достичь синергетического эффекта при

совмещении нескольких функций в одном элементе, что позволит разрабатывать конкурентные технические решения. Разработка мультифункциональных технологических систем переработки природных энергоносителей основана на научной парадигме о существовании взаимосвязи между организованностью ХТС и оптимальной дифференциацией их функций между элементами и подсистемами в соответствии с эволюционным законом системной организации К.Ф. Рулье, который имеет всеобщий характер. Реализация этого направления в исследовании позволит отказаться от частных постановок задач и перейти к общему подходу на основе введенного в работе понятия организованности ХТС. Под организованностью понимается характеристика структуры системы, при которой ее элементы действуют согласованно, благодаря оптимальной дифференциации функций системы между ними. Данная работа является развитием информационно-термодинамического метода анализа систем и выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2020 годы».

Цель работы – разработка мультифункциональных технологических систем переработки природных энергоносителей с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов, минимальным воздействием на окружающую среду и максимальным термодинамическим КПД на основе их оптимальной организации для создания новых технических решений в отраслях топливно-энергетического комплекса, нефтегазохимии и коксохимии.

Реализация цели работы предполагает решение следующих задач:

1. Разработка научных и методических основ построения организованных химико-технологических систем, включающих:
 - постановку и решение задачи дифференциации функций ХТС между элементами и подсистемами;
 - решение задачи о распределении функций многоцелевого процесса между потоками продуктов;
 - разработку методов распределения затрат на организацию многопоточных процессов ХТС на примере процессов теплообмена;
 - разработку методики оценки параметров макроуровня ХТС и анализ их влияния на организованность системы;
 - разработку методологии оптимизации организованных ХТС с заданным типом и множеством элементов;

- разработку методологии проектирования (синтеза) неоднородных ХТС в условиях неопределенности элементной и топологической структур с применением критериев усложнения.

2. Разработка оптимально организованных мультифункциональных технологических систем переработки природных энергоносителей, в частности:

- отопительной системы коксового производства;
- отделения пылеугольной газификации бурого угля;
- отделения конверсии синтез-газа;
- объединенной системы газификации бурого угля и конверсии синтез-газа в схеме получения метанола и высших спиртов из угля;
- способа энерготехнологического использования попутного нефтяного газа шельфовых месторождений для повышения продуктивности нефтяных пластов;
- технических предложений по оптимальной организации теплоэнергетических систем, имеющих коммерческий потенциал использования.

3. Разработка нового способа и методики технической реализации процесса получения товарного диоксида углерода из очищенных дымовых газов в энергоблоке тригенерации нового поколения.

4. Разработка математической модели процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов.

5. Проведение исследований на созданных в рамках выполнения госзаданий экспериментальном стенде с тепловым двигателем и экспериментальной установке по десублимации диоксида углерода для подтверждения теоретических разработок и проверки адекватности математической модели.

6. Разработка технико-экономического обоснования процесса получения товарного диоксида углерода в энергоблоке тригенерации нового поколения, подтверждение возможности достижения синергетического эффекта тригенерации и сравнение разработанного технического решения с современными зарубежными аналогами.

Объект исследования. Объектами исследования являются химико-технологические системы переработки природных энергоносителей, включая варианты теплоэнергетических систем, имеющих коммерческий потенциал использования, а также процесс низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов.

Методы исследования. В работе используются методы теории информации, термодинамики, математического и физического моделирования, анализа, оптимизации и синтеза ХТС.

Научная новизна:

1. Разработаны научные и методические основы оптимальной организации многофункциональных ХТС, в рамках которых представлены впервые:
 - решение общей задачи дифференциации функций системы между элементами и подсистемами на основе информационной модели исходов, которое описывается на основе энтропии информации, являющейся функцией статистического веса;
 - условия оптимальной организации многоцелевых процессов при разделении потока сырья в аппарате на потоки продуктов, заключающиеся в равенстве факторов затрат (статистических весов) по потокам продуктов;
 - методы дифференциации затрат для многопоточных процессов на примере теплообмена: «уравнительный», основанный на равенстве стоимостей единиц информации по потокам, и «выделения», основанный на перенесении всех затрат на целевой (по постулатам) поток;
 - уточненная методика расчета характеристик макроуровня ХТС – весовых коэффициентов, определяющих «место» процессов в структуре системы;
 - стратегия и алгоритм оптимизации организованных ХТС с заданным типом и множеством элементов на основе декомпозиции задачи по иерархическим уровням по принципу «сверху-вниз»;
 - стратегия и алгоритмы проектирования (синтеза) систем в условиях неопределенности их элементной и топологической структур с применением критериев усложнения, минимизация которых приводит к оптимальному решению;
 - обоснование возможности согласования целевых процессов в рамках виртуальных систем по общим правилам дифференциации функций ХТС между подсистемами.
2. На основе математической модели $k-\varepsilon$ турбулентности и компьютерного моделирования гидродинамики в отопительном канале печи коксования доказана возможность интенсификации процесса путем искусственной турбулизации потока.
3. По результатам оптимизации на основе критерия макроэнтропии обоснована целесообразность применения кратностей рециркуляции потоков в отопительных каналах, превышающих применяемые на практике значения и обеспечивающих снижение градиента температур по высоте простенков печных камер для равномерности прогрева коксового пирога.
4. На основе методологии проектирования организованных ХТС обоснована целесообразность применения двух высокотемпературных ступеней конверсии в интеграции с процессом пылеугольной газификации бурого угля для повышения

энергосберегающих показателей комбисистемы в технологии получения метанола и высших спиртов.

5. На основе оптимальной организации цикла Ренкина для глубокой утилизации теплоты дымовых газов с применением метода выделения в распределении затрат на организацию процесса обоснован вариант структуры цикла Ренкина с гипотетическим регенератором (в терминологии автора).
6. Разработана квазистационарная математическая модель процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов, адекватно описывающая данный процесс в аппаратах трубчатого типа, позволяющая прогнозировать характеристики процесса.
7. Разработан новый способ получения электроэнергии, холода и диоксида углерода из дымовых газов объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла, в котором подтвержден синергетический эффект тригенерации (патент РФ).

Практическая значимость:

1. Разработаны рекомендации по конструктивным характеристикам элементов кирпичной кладки отопительных простенок печей, позволяющие повысить коэффициент теплоотдачи конвекцией в 1,7 раза для интенсификации процесса коксования и сокращения расхода газа на процесс.
2. Разработана мультифункциональная отопительная система для печных камер коксового производства, позволяющая обеспечить равномерный прогрев коксового пирога, получить дополнительно до 3 МВт мощности на батарею и снизить концентрацию оксида азота в выхлопных газах с 88,2 до 0,63 мг/м³.
3. Разработано техническое решение объединенной системы газификации бурого угля и конверсии в схеме получения метанола и высших спиртов, обеспечивающее повышение эксплуатационных характеристик системы по сравнению с существующими технологическими аналогами.
4. Разработано и принято к внедрению мультифункциональное техническое решение установки на попутном нефтяном газе для обеспечения шельфовых месторождений электроэнергией, теплотой и диоксидом углерода для целей повышения нефтеотдачи, превосходящее по эффективности зарубежный аналог multifunctional установки *VENZ 4*.
5. Разработано и внедрено программно-алгоритмическое обеспечение оптимальной организации теплоэнергетических систем, а также технические предложения по оптимальной организации линейных компрессорных станций по транспортировке природного газа, созданию опытных образцов газотурбинных агрегатов и

модернизации системы рекуператора с нагревательной печью для нефтеперерабатывающих заводов, имеющие коммерческий потенциал использования, подтвержденные актами и заключениями о внедрении.

6. Разработана методика технической реализации процесса получения товарного диоксида углерода из дымовых газов производительностью до 160 тыс. тонн продукта в год в энергоблоке тригенерации для объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других, использующих ископаемые топлива, и проект технического задания на процесс.
7. Разработана экспериментальная установка и проведены исследования процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из газовой смеси, в результате которых была подтверждена возможность получения товарного диоксида углерода из дымовых газов, а также были получены данные для оценки коэффициентов массоотдачи для разработки адекватной математической модели процесса.
8. Разработаны программные комплексы в составе: текст программы, описание программы, описание применения, руководство системного программиста, руководство оператора, выполненные в соответствии с требованиями стандарта (ГОСТ 19.401-78), по расчету цикла Ренкина и процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода, принятые Департаментом приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки России, на которые получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.
9. Представлен для реализации инвестиционный проект по процессу получения товарного диоксида углерода из дымовых газов производительностью до 160 тыс. тонн продукта в год, который превосходит по принятому в мировой практике критерию удельного выброса CO_2 ($\text{кг CO}_2/\text{кВт}$) лучшие зарубежные аналоги и имеет небольшой срок окупаемости от 2 до 6 лет (в зависимости от вида продукции: твердый, жидкий CO_2), что подтверждает его перспективность.

Отдельные результаты диссертационной работы представлены в материалах по Федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2014 годы» в рамках выполнения следующих НИР: Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области разработки высокоэффективных экологически чистых энергоблоков нового поколения по теме: «Создание нового энергосберегающего энергетического блока для утилизации теплоты дымовых газов с высоким термодинамическим КПД без выбросов диоксида углерода на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла» (шифр 2011-

1.6-516-023); Исследование возможности конверсии парниковых газов в полезные товарные продукты по теме: «Исследование возможности получения товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации нового поколения» (шифр 2013-1.5-14-515-0043) и приняты государственным заказчиком.

Научные положения, выносимые на защиту.

- методика количественной оценки дифференциации функций системы между ее элементами и подсистемами на основе информационной модели исходов;
- решение задачи дифференциации функций многоцелевых процессов на основе равенства факторов затрат по потокам продуктов;
- уточненная методика оценки параметров макроуровня для расчета критериев усложнения при увеличении количества элементов в ХТС;
- методы разделения затрат на организацию многопоточных процессов на примере процессов теплообмена: «уравнительный» и «выделения»;
- стратегия и алгоритм оптимизации организованных ХТС с заданным типом и множеством элементов на основе декомпозиции задачи по иерархическим уровням;
- стратегия и алгоритмы проектирования неоднородных ХТС в условиях неопределенности их элементной и топологической структур;
- обоснование применения искусственной турбулизации потока в отопительных каналах для интенсификации теплоотдачи;
- обоснование применения больших коэффициентов рециркуляции совместно с когенерацией и минимизацией выбросов оксида азота в коксовом производстве;
- обоснование применения двухступенчатой высокотемпературной конверсии в интеграции с пылеугольной газификацией бурого угля в производстве метанола и высших спиртов;
- обоснование применения циклов Брайтона и Ренкина с гипотетическим регенератором в интеграции с улавливанием диоксида углерода для совмещения задач энергосбережения, охраны окружающей среды и повышения рентабельности добычи нефти на шельфах, включая арктический шельф;
- способ получения товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации нового поколения на основе интеграции цикла Ренкина и холодильного цикла;
- квазистационарная математическая модель процесса десублимации диоксида углерода из очищенных от оксидов серы и азота дымовых газов в аппарате непрерывного действия трубчатого типа.

Достоверность научных положений обусловлена:

- использованием общих принципов оптимальной организации систем, основанных

на эволюционном законе системной организации К.Ф. Рулье;

- экспериментальными исследованиями теплового двигателя на паре и воздухе, а также экспериментальными исследованиями процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода;
- использованием адекватной математической модели процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов;
- применением параллельных расчетов с использованием зарегистрированных авторских программ и коммерческого пакета ChemCAD;
- не противоречием полученных результатов литературным источникам, включая патентную литературу.

Личный вклад автора. Автору принадлежит: 1) обоснование цели и задач работы; 2) разработка научных и методических основ оптимальной организации мультифункциональных ХТС; 3) разработка уточненной методики оценки весовых коэффициентов; 4) вывод условий оптимальной организации многоцелевых и многопоточных процессов, а также систем по мере их усложнения; 5) стратегии и алгоритмы оптимизации ХТС с заданным типом и множеством элементов и проектирования ХТС в условиях неопределенности элементной структуры и характеристик процессов; 6) математическая модель процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов. А также: научные и практические результаты по оптимальной организации технологических и теплоэнергетических систем переработки природных энергоносителей.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Московской научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Московский салон информационных технологий, системотехники и робототехники» Департамента образования Правительства Москвы (г. Москва, 2010 год) (Успехи в химии и химической технологии); на XXIV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-24 (г. Киев, 2011 год); на Всероссийской молодежной научно-технической конференции «Энергосбережение в секторе исследований и разработок: существующий потенциал и перспективы развития» (г. Москва, 2012 год); на XXVI Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-26 (г. Нижний Новгород и г. Ангарск, 2013 год); на IX Международной научно-практической конференции «ЕКОЛОГИЧНА БЕЗПЕКА: Проблеми и шляхи вирішення» (г. Алушта, 2013 год); на X Международной научно-практической конференции «Kluczowe aspekty naukowej działalności - 2014» (г. Пшемысль, 2014 год), на X Международной научно-практической конференции «Moderní vymoženosti

vědy – 2014» (г. Прага, 2014), на I Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» (г. Санкт-Петербург, 2014 год), на XI Международной научно-практической конференции «Научная мысль информационного века – 2017» (г. Пшемысль, 2017 год) и на XI Международной научно-практической конференции «Современный научный потенциал – 2017» (г. Шеффилд, 2017).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 40 публикациях, в том числе: 20 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК РФ, из которых 14 в журналах, индексируемых в международных системах SCOPUS и Web of Science, 2 патента РФ и 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, включая литературный обзор, выводов, списка использованных литературных источников и приложений. Работа изложена на 487 страницах, включает 116 рисунков и 96 таблиц. Список использованной отечественной и зарубежной литературы содержит 283 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и комплексная задача исследования.

В первой главе анализируются теоретические разработки по проблеме оптимальной организации химико-технологических систем, рассматриваются актуальные вопросы переработки природных энергоносителей в контексте задач энергосбережения и способов улавливания диоксида углерода. Систематизируются подходы к проектированию оптимальных химико-технологических систем в части применяемых критериев от частных, в виде расходных коэффициентов, до общих, таких как устойчивость и организованность. В этой связи в разделе представлены методы оптимальной организации систем, основанные на эксергетической, эксергоэкономической и информационной концепциях. Подробно представлен широко используемый в современной практике оптимальной организации систем Пинч-анализ, оперирующий с различными критериями. Приведены основные количественные зависимости критериев оценки химико-технологических систем и различные постановки задач оптимизации и синтеза ХТС. Рассмотрены достоинства и недостатки этих концепций и методов. В разделе, посвященном актуальным вопросам переработки природных энергоносителей, в контексте актуальных задач внимание акцентируется на анализе способов восстановления работоспособности технологических потоков, использующих энергию низкого и среднего потенциалов с

выработкой механической работы или электроэнергии. Систематизируются также методы и способы улавливания диоксида углерода. Рассматриваются методы ко- и полигенерации, позволяющие повысить энергоэффективность систем. На основе анализа литературных источников была принята научная парадигма исследования, базирующаяся на наличии взаимосвязи организованности систем с оптимальной дифференциацией их функций между элементами и подсистемами, что позволит реализовать задачи создания оптимальных мультифункциональных технологических систем. В частности, был сделан вывод, что одной из перспективных практических задач является создание мультифункциональных ХТС, способных одновременно решать комплекс проблем улавливания и выделения диоксида углерода из дымовых газов в виде продукта, получения электроэнергии, теплоты или холода при реализации идей полигенерации. В связи с этим, для создания энергосберегающих технических решений по улавливанию диоксида углерода в условиях дефицита работоспособной энергии целесообразно использовать термодинамический цикл Ренкина в сочетании с криогенными процессами, позволяющими получать вещества высокой степени чистоты.

Вторая глава представляет собой теоретическую часть исследования.

В соответствии с целью исследования в работе развиты научные и методические основы информационного подхода, позволяющие сформулировать задачи оптимальной организации мультифункциональных ХТС на основе дифференциации их функций между элементами и подсистемами.

Информация по определению есть характеристика организованности, что позволяет представить организованность системы на основе информационной модели возможных исходов (рис. 1).

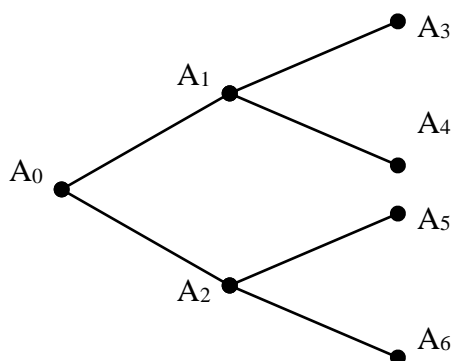


Рисунок 1 - Возможные исходы при дифференциации функций ХТС

В информационной модели системы, представленной тремя уровнями иерархии: ХТС, химико-технологические процессы (ХТП), микросостояния (возможные исходы), можно выделить два вида неопределенностей:

неопределенность того, что система передает свою функцию элементу (ХТП), и неопределенность того, что в данном ХТП, которому передала функцию система, на выходе реализуется один или несколько (если имеет место дифференциация функций в самом ХТП) исходов из числа возможных. Такой процесс упорядочивания в системе учитывает все возможные исходы на каждом уровне. Решение информационной задачи, представленной на рис.1, подразумевает этап раскрытия неопределенности при возможной дифференциации функций системы между ее элементами (разбиение на уровни) и этап раскрытия неопределенности при возможной дифференциации функций между возможными исходами в процессах (разбиение на исходы).

Оба этапа в решении информационной задачи оцениваются независимо в силу статистической независимости возможных уровней и исходов. При этом автором доказано, что их можно описать энтропией информации, выраженной через статистический вес системы, мультипликативно связанный со статистическими весами подсистем:

$$H = K \ln \Delta\Gamma \quad (1)$$

При этом $\Delta\Gamma = \Delta\Gamma_A \cdot \Delta\Gamma_B$, где А и В – подсистемы ХТС, соответствующие, например, исходам A_3 и A_4 (см. рис.1). Величина положительной постоянной K полагается равной статистическому весу информационной системы $\Delta\Gamma$, то есть $K = \Delta\Gamma$, который рассчитывается для характеристик технологического потока на основании зависимости, обратной для расчета вероятности в распределении Больцмана:

$$\Delta\Gamma = \exp\left(-\frac{\Delta Z - \Delta U}{RT}\right), \quad (2)$$

где ΔZ – изменение изобарно-изотермического потенциала в процессе, кДж/кмоль; ΔU – изменение внутренней энергии в процессе, кДж/кмоль; RT – стандартный уровень энергии, кДж/кмоль.

В качестве примера рассмотрим решение задачи оптимальной организации многоцелевого процесса при разделении потока сырья на два потока продукта с позиции информационного подхода (рис. 2).

Энтропия информации процесса как сложной системы равна:

$$H = H_{\text{вх}} \quad (3)$$

Система ограничений для информационной системы, представленной на рис. 2, имеет следующий вид:

$$H_{\text{вых1,2}} = h_{\text{вых1,2}}(H_{\text{вх}}; u) \quad (4)$$

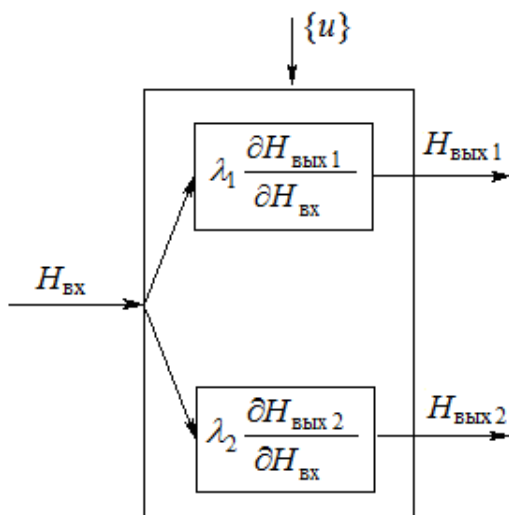


Рисунок 2 – Структура информационных потоков в процессе разделения исходного сырья на потоки продуктов

Обозначения: $H_{\text{ВХ}}$ – энтропия информации на входе; $H_{\text{ВЫХ } 1,2}$ – энтропия информации потоков продуктов; $\{u\}$ – управляющие воздействия; $\lambda_{1,2}$ – безразмерные множители (множители Лагранжа)

Запишем функцию Лагранжа с учетом (3) и (4) для преобразования информации по каждому потоку:

$$L_{1,2} = H_{\text{ВХ}} + \lambda_{1,2} [H_{\text{ВЫХ } 1,2} - h_{\text{ВЫХ } 1,2}(H_{\text{ВХ}}; u)] \quad (5)$$

Система необходимых условий экстремума функции (5) приводит к выражениям для множителей Лагранжа:

$$\lambda_{1,2} = \frac{K_{1,2}}{\eta_T}, \quad (6)$$

где $K_{1,2}$ – статистические веса или факторы затрат по потокам продуктов, η_T – термодинамический КПД многоцелевого процесса.

Учитывая статистическую независимость и мультипликативность факторов затрат по потокам продуктов возможно получить условие оптимальной организации процесса в следующем виде:

$$K_1 = K_2 \quad (7)$$

В работе на примере бинарной ректификации смеси: метанол-вода было показано, что условие (7) приводит к идентичным выводам, что и термодинамические подходы к оптимальной организации процесса при минимизации потерь эксергии, или минимизации производства энтропии.

В процессе проектирования ХТС неопределенность возникает уже на стадии выбора первого элемента, параметры организации которого зависят от рабочих сред или используемого сырья и параметров на входе в систему. При создании нового технического решения аналогичная неопределенность возникает при выборе последующих элементов, которые объединяются в структуру будущей ХТС для решения целевых задач.

Решение задачи дифференциации функций системы между элементами позволяет получить выражения критериев усложнения ХТС в общем виде:

$$\lambda_i = \frac{n_i \cdot K_i}{\eta_{Ti}} + \sum_{j=1}^{i-1} n_j \frac{K_j \cdot K_i}{\prod_{n=j}^i \eta_{Tn}} \frac{\bar{T}_i}{\bar{T}_j} \frac{\Delta \Gamma_j^{\text{БЫХ}}}{\Delta \Gamma_i^{\text{БЫХ}}} \rightarrow \min_{\{U_j\}}, \quad (8)$$

где $\eta_{Ti} = \frac{\Delta S_{pi}}{\Delta S_{0i}}$ – термодинамический КПД i -го процесса в системе;

$\Delta S_{p(0)i} = -\frac{(\Delta Z^{p,T} - \Delta U)_{p(0)i}}{\bar{T}_i}$ – изменение термодинамической энтропии для реального (р) и эталонного (0) процессов; $K_i = \Delta \Gamma_i^{\text{БЫХ}} / \Delta \Gamma_i^{\text{БЫХ}}$ – затраты на организацию процесса, где

$$\Delta \Gamma_i^{\text{БЫХ}} = \exp \left[-\frac{(\Delta Z^{p,T} - \Delta U)_i^{\text{БЫХ}}}{R \bar{T}_i} \right], \quad \Delta \Gamma_i^{\text{БЫХ}} = \exp \left[-\frac{(\Delta Z^{p,T} - \Delta U)_i^{\text{БЫХ}}}{R \bar{T}_i} \right] - \text{объемы фазовых}$$

пространств микросостояний (статистические веса); $\Delta Z^{p,T}$ – изменение термодинамического потенциала Гиббса в процессе, ΔU – изменение внутренней энергии в процессе, \bar{T}_i – средний температурный уровень; U_j – управляющие переменные (режимные, структурные и (или) конструкционные параметры процессов), n_i – весовые коэффициенты процессов в системе (параметры макроуровня).

Критерий согласно (8) имеет смысл «стоимости» единицы информации потока продукта по аналогии с критериями в эксергоэкономическом подходе, имеющими смысл стоимости единицы эксергии потока продукта. Тенденции в задачах оптимизации для обоих критериев одинаковые. Характеристики, входящие в критерий, зависят от параметров конструкции элементов, режимов их работы, нагрузок, которые могут выступать в качестве управляющих переменных в задачах оптимизации или синтеза.

Для оценки весовых коэффициентов используется полученная в работе уточненная зависимость:

$$n_i = \exp \left(-\frac{C_{vi}^{T-T_3}}{2RT_3^2} \Delta T_{3i}^2 \right), \quad (9)$$

где ΔT_3 – значение температуры, эквивалентное изменениям как температуры, так и давления (для газодинамических процессов) и определяющее средний уровень полной энергии процесса (в масштабе средней теплоемкости).

В работе, исходя из аналогичных посылок эксергоэкономического подхода, представлены методы дифференциации функций между потоками многопоточных

процессов: «уравнительный» и «выделения», которые иллюстрируются на процессе теплообмена. Существо уравнительного метода заключается в условии равенства стоимостей единиц информации потоков источника и стока, что достигается, в свою очередь, равенством их весовых коэффициентов (в системе – равенством обобщенных флуктуаций внутренней энергии). Существо метода выделения заключается в отнесении всех затрат на целевой по постулатам процесс (поток), что приводит к уменьшению стоимости единицы информации нецелевого процесса (потока), что возможно, например, при энерготехнологическом комбинировании потоков разных ХТС.

На основе анализа влияния характеристик макро- и микроуровня на организованность ХТС были разработаны стратегии оптимизации для систем с заданным типом и множеством элементов и синтеза вновь проектируемых систем. Стратегия оптимизации реализует алгоритм «сверху-вниз», который сводится к следующему. На макроуровне на основании условия максимизации макроэнтропии H_M определяется оптимальное распределение весовых коэффициентов элементов ХТС в соответствии с нулевым началом термодинамики, характеризующим приближение к устойчивому состоянию системы с минимальными притоками энергии в систему извне. Условием оптимальной организации на макроуровне является:

$$H_M = -\sum_i^N n_i \ln n_i \rightarrow \max_{\{U_j\}}, \quad (10)$$

где n_i – значение весового коэффициента i -того элемента, N – число элементов в системе. Весовые коэффициенты статистически независимы. Решение задачи оптимизации по критерию (10) с учетом ограничений типа равенств осуществлялось с применением метода неопределенных множителей Лагранжа и привело к выражению для расчета оптимальных весовых коэффициентов:

$$n_i^{opt} = \frac{\exp\left(-\frac{\langle U_i \rangle}{RT_3}\right)}{\sum_i^N \exp\left(-\frac{\langle U_i \rangle}{RT_3}\right)}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (11)$$

где $\langle U_i \rangle$ – математическое ожидание, совпадающее в статике со средним уровнем энергии преобразования.

Далее для полученного в соответствии с условием (11) весового коэффициента процесса целевого превращения вещества (например, газогенератор, реактор

конверсии) находятся параметры его организации, отвечающие условию минимизации критерия микроуровня K/η_T .

Стратегия проектирования неоднородной организованной ХТС базируется на постулатах информационного подхода и в целом по логике идентична методу Пинч-анализа, но имеет особенности. В рамках данной методологии реализуется новая идея о возможности оптимальной организации виртуальных систем, состоящих из условно объединенных целевых процессов на основании нулевого закона термодинамики. При этом особенностью алгоритма оптимальной организации виртуальных систем является возможность направленного поиска оптимального решения путем выбора его из исходных альтернатив целевых превращений вещества на основании критериев усложнения соответствующего уровня (рис. 3).

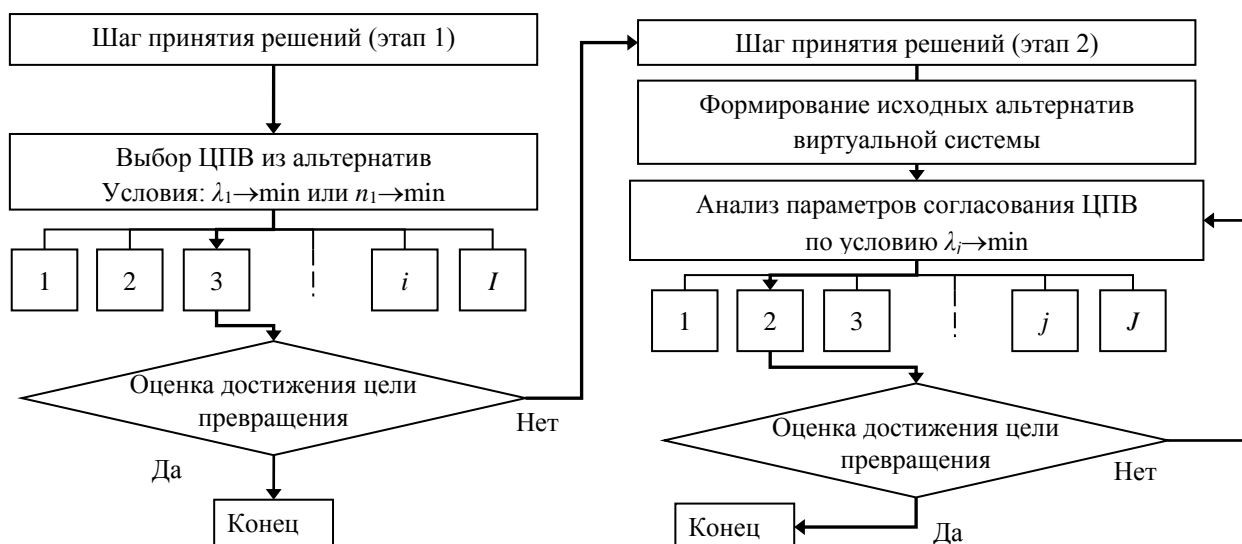


Рисунок 3 – Алгоритм оптимальной организации виртуальной системы, включающей целевые превращения вещества

Обозначения: ЦПВ – целевые превращения вещества; I – число альтернативных способов преобразования исходного сырья; J – число альтернативных способов построения виртуальной системы.

Представленный алгоритм был реализован при разработке технического решения оптимально организованной комбисистемы получения синтез-газа из бурого угля для производства метанола и высших спиртов (соотношение ключевых компонентов $\text{H}_2:\text{CO} = 2:1$). Глава завершается выводами.

В третьей главе рассмотрены вопросы оптимальной организации химико-технологических систем переработки природных энергоносителей с целью разработки мультифункциональных технических решений. При этом вопросы

оптимальной организации технологических систем рассмотрены в двух аспектах: для ХТС с заданным типом и множеством элементов и для проектируемых ХТС в условиях, когда количество и тип элементов может изменяться.

В частности, постановка задачи оптимизации процесса пылеугольной газификации бурого угля на микроуровне представляется следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{cp} = \frac{T_{Вых} - T_{Вх}}{\ln \frac{T_{Вых}}{T_{Вх}}} = idem, T_{Вх} = \frac{\sum G_i^{Вх} C_{pi}^{Вх} T_i^{Вх}}{\sum G_i^{Вх} C_{pi}^{Вх}} \\ G_2 + G_{п} = G_{общ} = idem \\ \frac{K}{\eta_T} \rightarrow \min \end{array} \right. \quad (12)$$

Первое условие характеризует средний температурный уровень процесса, который определяется входной температурой и температурой в зоне газификации и является ограничением (по условию задачи). Второе условие также является ограничением (сумма расходов газифицирующих агентов: кислорода G_2 и пара $G_{п}$), определяющим в совокупности с первым условием постоянное значение оптимального весового коэффициента процесса газификации согласно (11). В качестве оптимизируемых параметров выбираются: температуры на входе в газогенератор потоков кислорода и пара и соотношение газифицирующих агентов.

Анализ системы уравнений (12) показал, что зависимости критерия микроуровня от данных параметров имеют монотонный характер. При постоянстве весового коэффициента оптимальная организация процесса пылеугольной газификации связана с повышением температуры потоков кислорода и пара на входе, а также с уменьшением соотношения газифицирующих агентов – кислород : пар, что соответствует повышению доли водорода в синтез-газе или увеличению соотношения $H_2:CO$ в продукте при уменьшении энергетических затрат на производство кислорода, используемого в качестве газифицирующего агента.

Аналогично была решена задача оптимальной организации процесса конверсии синтез-газа. Результаты оптимизации были использованы в качестве контрольных на следующем этапе – синтезе организованной объединенной системы получения синтез-газа с заданным соотношением целевых компонентов $H_2:CO = 2:1$ для производства метанола и высших спиртов из бурого угля.

Оптимизация отопительной системы коксового производства производилась по критерию вида (10). Технологическая интерпретация результатов на основании

условия (10) осуществлялась двумя путями: на основе возможных конструкционных и структурных инновационных решений.

На основе математической модели $k-\varepsilon$ турбулентности с применением компьютерного моделирования исследовались варианты искусственной турбулизации потока в отопительном канале за счет применения конструкционных элементов кладки простенков с выступами особой формы. На рис. 4 представлены профили скоростей в отопительном канале без и с искусственной турбулизацией.

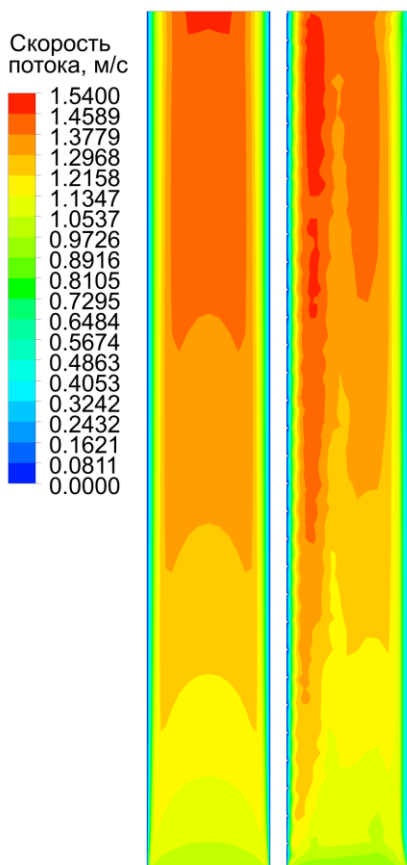


Рисунок 4 – Профили скоростей по высоте по высоте отопительного канала: слева канал без турбулизации, справа канал с искусственной турбулизацией (стенка с выступами слева) при $t=130$ мм $d=6.5$ мм.

Были получены рекомендации по увеличению коэффициента теплоотдачи конвекцией в 1,7 раза при определенном шаге расположения турбулизаторов заданной высоты, что приводит к интенсификации процесса коксования. В части применения новых структурных решений был предложен способ и схема multifunctionальной отопительной системы коксового производства для горизонтальных печей с нижним подводом теплоносителя, в которых путем совмещения рециркуляции и когенерации могут быть решены задачи энергосбережения и снижения выбросов оксидов азота при улучшении равномерности

нагрева коксового пирога. Полученные рекомендации могут применяться совместно.

Вторая стратегия была реализована в задаче синтеза объединенной системы газификации бурого угля и конверсии в схеме производства метанола и высших спиртов из угля. В качестве примера представим виртуальную систему, условно объединяющую газогенератор и реактор конверсии (рис.5). В качестве критерия оптимизации использовался критерий вида (8) соответствующего уровня: λ_2 – в случае одноступенчатой конверсии и λ_3 – в случае двухступенчатой конверсии.

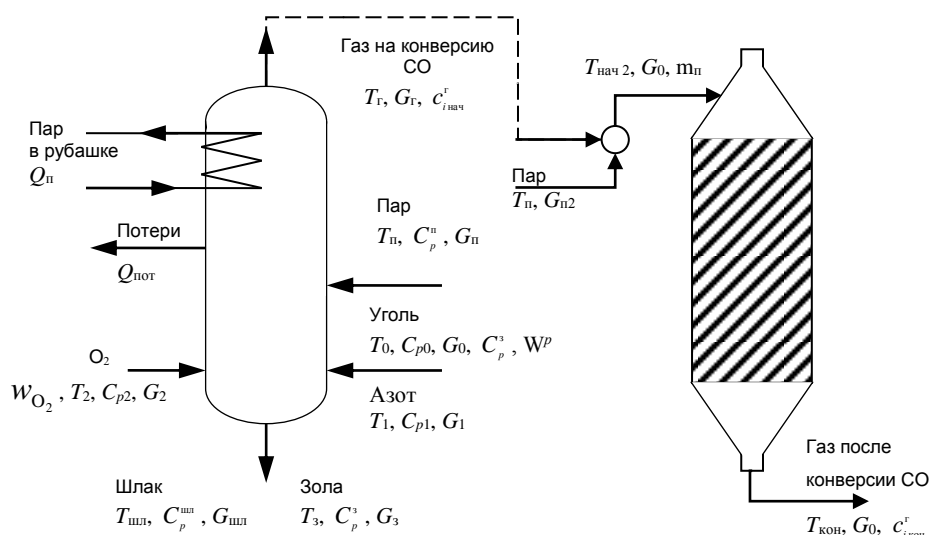


Рисунок 5 – Виртуальная система, условно объединяющая целевые процессы

Результаты изменения критериев при реализации алгоритма (рис. 3) даны в табл.1.

Таблица 1 – Изменения критерия в ходе согласования целевых процессов

Вариант	исходный	оптимальный	
Критерий	λ_2	λ_2	λ_3
Значение	1,5037	0,0065	0,0017

В итоге была синтезирована организованная технологическая система (рис. 6).

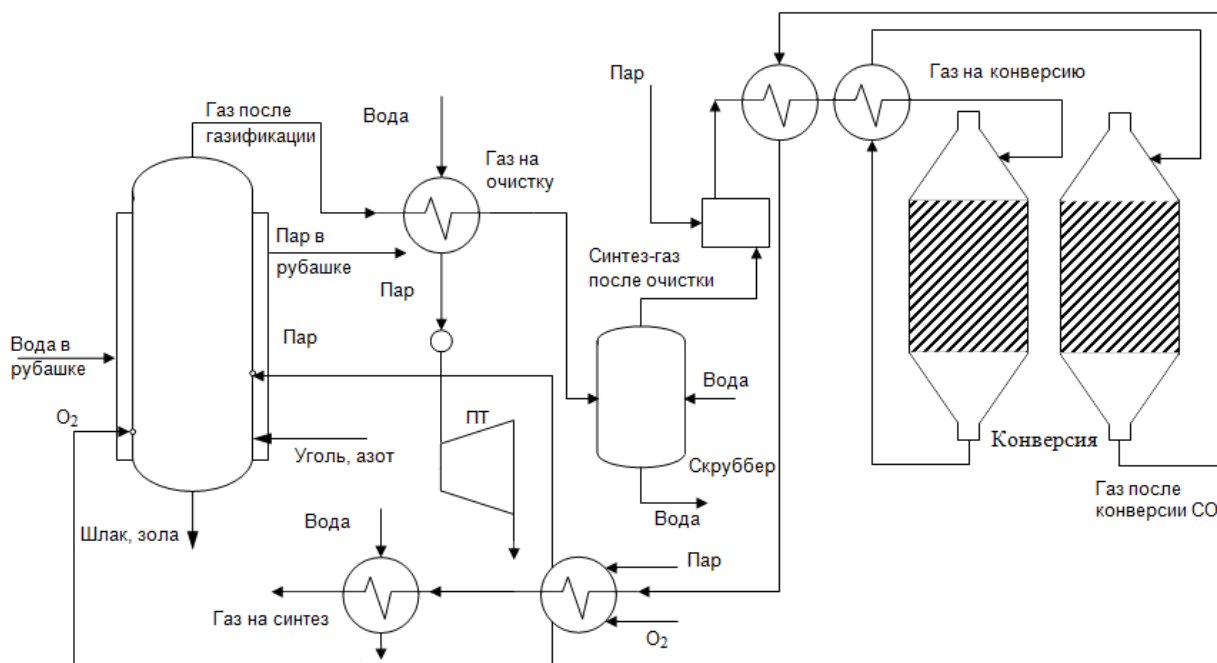


Рисунок 6 – Организованная химико-технологическая система получения синтез-газа заданного состава газификацией бурого угля (принципиальная схема)

В табл. 2 представлены сравнительные данные существующего и синтезированного вариантов технологической системы при одном и том же расходе бурого угля (1000 кг/ч) и одинаковой средней температуре в газогенераторе.

Таблица 2 – Сравнительные данные вариантов системы

Вариант схемы	Характеристики установки (расходные показатели и мощность паровой турбины)			
	Производительность по целевому продукту (H ₂ +CO), кг/ч	Расход кислорода, кг/ч	Расход пара общий, кг/ч	Мощность паровой турбины, кВт
Существующий	716,0	751,8	722,0	330,6
Оптимальный	727,8	733,8	633,9	329,6

Синтезированный оптимальный вариант технологической системы характеризуется увеличением выхода целевого продукта – синтез-газа заданного состава при неизменном расходе бурого угля, общим снижением расходов и затрат на получение кислорода в качестве газифицирующего агента при практически идентичных значениях мощности паровой турбины. При этом полученные оптимальные характеристики целевых процессов объединенной системы корреспондируются с данными оптимизации процессов газификации и конверсии.

На основании данной стратегии была также решена задача по энерготехнологическому использованию попутного нефтяного газа шельфовых, в том числе арктических месторождений, и разработано техническое решение multifunctionальной установки получения электроэнергии, теплоты и диоксида углерода в жидком или сверхкритическом состояниях для повышения нефтеотдачи, которая по эффективности превосходит зарубежный аналог установки *VENZ 4*. Результаты приняты к внедрению Институтом арктических нефтегазовых технологий ФГБОУ ВО РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

В главе приведены также примеры использования теоретического аппарата для разработки новых технических решений по оптимальной организации теплоэнергетических систем, в частности, эффективного использования топлива на линейных компрессорных станциях по транспортировке природного газа газоперекачивающими агрегатами (ГПА). Рекомендации имеют широкое тиражирование. Например, реализация предложений только для ООО «Газпром трансгаз Югорск», в ведении которого находится 220 компрессорных станций, включающих 1167 ГПА общей мощностью 15718 МВт, позволит при неизменных затратах на топливо дополнительно выработать для собственных нужд в сумме свыше 8000 МВт мощности. Глава завершается выводами.

Четвертая глава посвящена решению одной из актуальных практических задач – разработке способа и процесса получения товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации нового поколения, которая имеет два аспекта:

- разработка оптимально организованного технического решения энергоблока тригенерации для улавливания и выделения диоксида углерода из очищенных дымовых газов;
- разработка математической модели процесса получения диоксида углерода из очищенных дымовых газов и экспериментальные исследования процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из газового потока и теплового двигателя на паре и воздухе.

С учетом поставленных задач, анализа литературных источников и результатов режимных испытаний теплового двигателя на паре и воздухе был сделан вывод о целесообразности разработки технического решения энергоблока тригенерации с получением электроэнергии, холода и продукта (CO_2) на основе совмещения цикла Ренкина и подсистемы улавливания диоксида углерода из дымовых газов. Анализ вариантов структурных решений цикла Ренкина на основе критериев вида (8) с учетом использования метода выделения при распределении затрат показал, что оптимальным низкокипящим рабочим телом (НРТ) в цикле Ренкина (из всей выборки: от метана до пентана) является метан, процесс подогрева которого до температуры кипения (структура с гипотетическим регенератором – в терминологии автора) осуществляется в основном в аппарате низкотемпературной десублимации, в котором выделяется целевой продукт – диоксид углерода. Таким образом, с учетом специфики выбранного НРТ был сделан вывод, что подсистема улавливания и выделения диоксида углерода должна быть представлена холодильным циклом, структура которого идентична структуре цикла Гейландта.

В табл. 3 представлены результаты сравнения оптимальных решений для трех структур цикла Ренкина.

Таблица 3 – Сравнение оптимальных решений (диапазоны изменения температур дымовых газов приняты одинаковыми)

Вариант структуры цикла Ренкина	Оптимальное рабочее тело	Стоимость единицы информации продукта – λ_3
Классический	Н-пентан	$2,215 \cdot 10^{11}$
С регенератором	Изопентан	$6,31 \cdot 10^7$
С гипотетическим регенератором	Метан	$4,49 \cdot 10^7$

Окончательный вариант технического решения энергоблока тригенерации представлен на рис. 7.

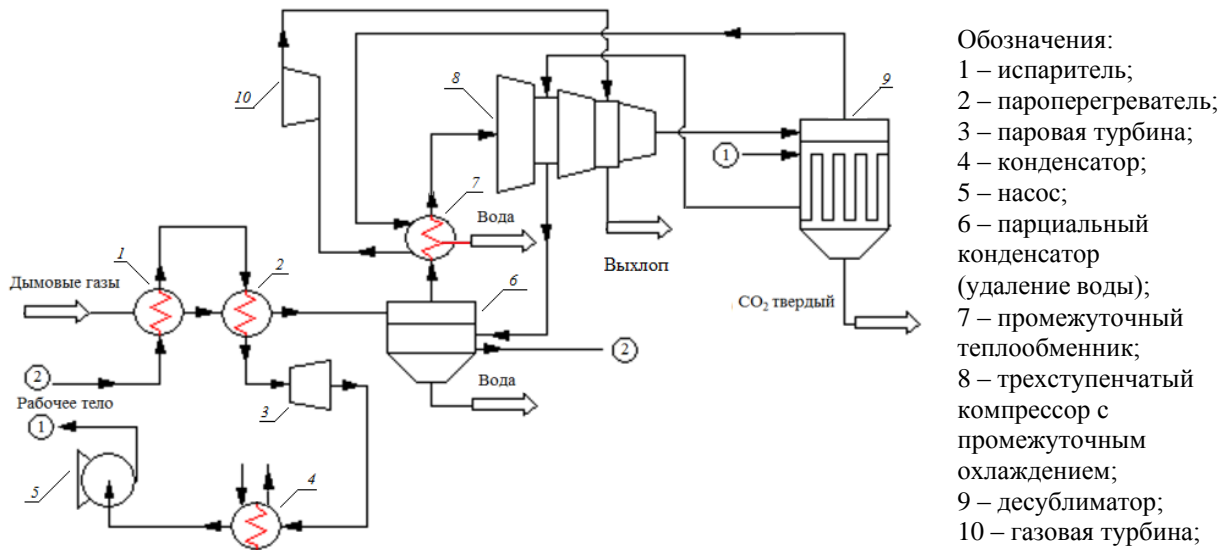


Рисунок 7 – Технологическая схема энергоблока тригенерации для улавливания и выделения диоксида углерода из очищенных дымовых газов (потoki 1 и 2 совмещены)

Процесс образования твердого диоксида углерода протекает преимущественно по механизму поверхностной десублимации. Такой процесс характеризуется взаимодействием двух фаз – газовой и твердой (кристаллической), ограниченной поверхностью раздела. Для описания процесса десублимации диоксида углерода в аппарате трубчатого типа была построена квазистационарная модель следующего вида:

$$\begin{cases}
 \frac{du}{dx} = \frac{1}{1 - \frac{\rho u^2}{P}} \left(\frac{u F_{тр}}{P} - \frac{1}{c_p T \rho} (q_v + j_v c_p T) + \frac{\pi u (d_{вн} - 2\delta)}{S} \frac{\partial \delta}{\partial x} \right) \\
 \frac{dc_1}{dx} = \frac{j_v}{\rho u} (c_1 - 1) \\
 \frac{dP}{dx} = -\rho u \frac{du}{dx} - F_{тр} \\
 \frac{dT}{dx} = -\frac{q_v}{c_p u \rho} \\
 \frac{d\rho}{dx} = \frac{\rho}{P} \frac{dP}{dx} - \frac{\rho}{T} \frac{dT}{dx} \\
 \frac{\partial \delta}{\partial t} = \frac{j_v}{4\rho_{мс}} (d_{вн} - 2\delta) \\
 \frac{dT_{хл}}{dx} = -\frac{N_{тр} q_{Vхл}}{c_{Pхл} u_{хл} \rho_{хл}}
 \end{cases} \quad (13)$$

Начальные и граничные условия определяются следующим образом:

$$u(t, x=0) = \frac{4G_{\text{см}}^0}{\rho(t, x=0)\pi(d_{\text{вн}} - 2\delta(t, x=0))^2}; \quad c_1(t, x=0) = c_1^0; \quad P(t, x=0) = P_{\text{см}}^0; \quad T(t, x=0) = T_{\text{см}}^0;$$

$$\rho(t, x=0) = \frac{P_{\text{см}}^0 M_{\text{см}}^0}{RT_{\text{см}}^0}; \quad \delta(t=0, x) = 0; \quad T_{\text{хл}}(t, x=L) = T_{\text{хл}}^0.$$

Здесь T – температура газовой смеси, К; c_1 – текущее значение массового содержания CO_2 в газовой смеси, масс. доли; P – давление газа в аппарате, Па; ρ – плотность газового потока, кг/м^3 ; δ – толщина слоя десублимата, м; u – скорость газового потока (для одной трубки теплообменника), м/с; S – площадь свободного сечения для газового потока, м^2 ; c_p – теплоемкость газового потока, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; j_V – объемный поток массы от газового потока к слою десублимата, $\text{кг}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$; q_V – объемный поток теплоты от газового потока к слою десублимата, Вт/м^3 ; $F_{\text{тр}}$ – приведенная сила трения газового потока о слой десублимата, Н/м^3 ; x – координата длины, м; L – длина аппарата, м; $d_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубки, м; $N_{\text{тр}}$ – число труб теплообменника, $T_{\text{хл}}$ – температура хладагента, К; $\rho_{\text{хл}}$ – плотность хладагента, кг/м^3 ; $u_{\text{хл}}$ – скорость потока хладагента, м/с; $c_{p_{\text{хл}}}$ – теплоемкость хладагента, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $G_{\text{хл}}$ – общий расход хладагента, кг/с ; $\Pi_{\text{н}} = \pi d_{\text{н}}$ – внешний периметр для одной трубки, м; $S_{\text{н}} = \pi d_{\text{н}}^2/4$ – наружная площадь одной трубки теплообменника, м^2 ; Π – внутренний периметр канала для одной трубки, $\Pi = \pi(d_{\text{вн}} - 2\delta)$, м; c – концентрация диоксида углерода в газовом потоке, кг/м^3 ; $c_s(T_{\text{пов}})$ – равновесная концентрация диоксида углерода при температуре поверхности десублимата, кг/м^3 .

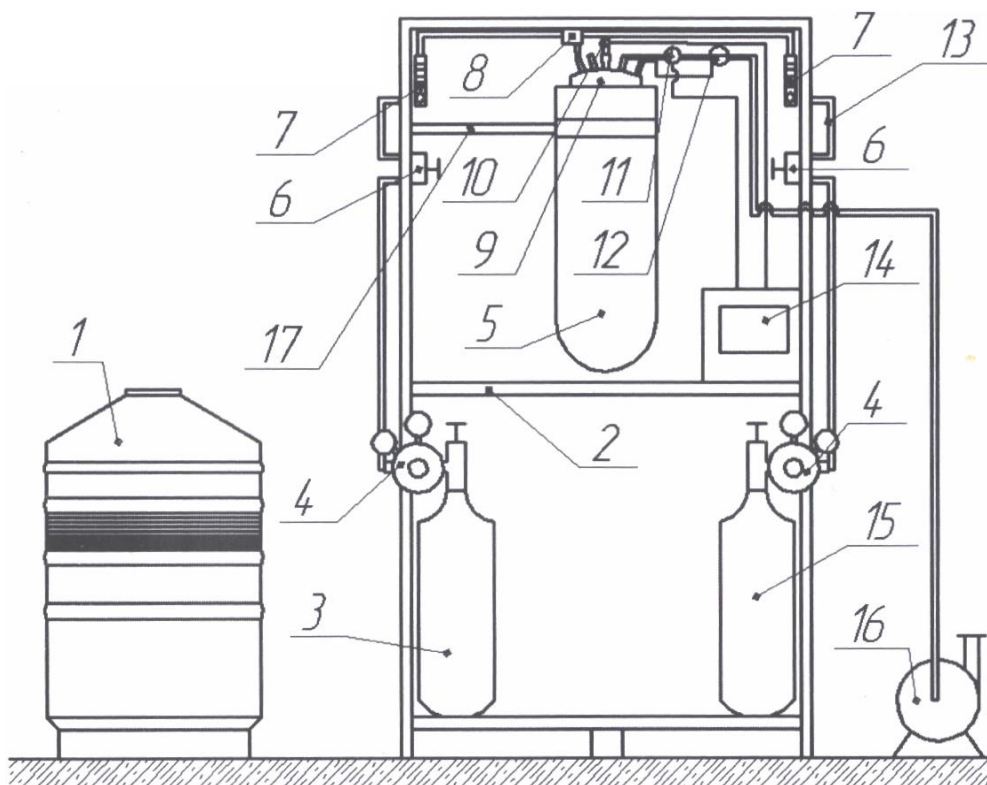
Теплоотдача и массоотдача для теплоносителя описываются уравнениями:

$$j_{V_{\text{см}}} = \beta_{\text{ссм}} \frac{\Pi_{\text{вн}}}{S_{\text{вн}}} (c_{\text{см}} - c_s(T_{\text{пов}})) \quad (14)$$

$$q_{V_{\text{см}}} = \alpha_{\text{ссм}} \frac{\Pi_{\text{вн}}}{S_{\text{вн}}} (T_{\text{см}} - T_{\text{пов}}) \quad (15)$$

$$q_{V_{\text{хл}}} = \alpha_{\text{схл}} \frac{\Pi_{\text{н}}}{S_{\text{н}}} (T_{\text{ст2}} - T_{\text{хл}}) \quad (16)$$

Для определения коэффициентов массоотдачи с целью проверки адекватности математической модели и анализа полученного продукта автором были проведены экспериментальные исследования процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из газовой смеси на созданной лабораторной установке (рис. 8). Исследования проводились на модельной смеси, близкой по составу к очищенным дымовым газам.



Экспериментальный образец установки для получения товарного диоксида углерода состоит из следующих элементов: 1 – большой сосуд Дьюара; 2 – каркас установки; 3 – баллон со сжатым CO_2 ; 4 – редуктор; 5 – малый сосуд Дьюара; 6 – игольчатый вентиль; 7 – расходомер; 8 – смеситель; 9 – измерительная ячейка; 10 – термopара; 11 – датчик давления; 12 – трехходовой кран; 13 – шланги; 14 – многоточечный измеритель ЭЛЕМЕР ТМ5103; 15 – баллон со сжатым N_2 ; 16 – вакуумный насос; 17 – держатель.

Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки для получения диоксида углерода

В измерительную ячейку 9 подается смесь газов (диоксид углерода и азот), из которой вследствие десублимации на внутренней поверхности измерительной ячейки выделяется твердый продукт. В верхней части измерительной ячейки располагаются стеклянные патрубки для подачи исходной газовой смеси, расход и соотношение компонентов в которых контролируется расходомерами. Отвод газовой смеси из измерительной ячейки осуществляется через стеклянную трубку 12, опущенную практически до дна ячейки, с тем, чтобы поступающий газ проходил через всю ячейку прежде, чем покинет ее. Как показали исследования, эффективность выделения твердого продукта (степень десублимации) слабо зависит от содержания диоксида углерода в газовой смеси для требуемого диапазона его варьирования (от 5 до 10 об. %), а изменяется в наибольшей степени от времени пребывания потока в

аппарате, зависящего от расхода газовой смеси, а также от температуры хладагента. Анализ полученного продукта показал, что в данном процессе существует возможность получения технического диоксида углерода в соответствии с ГОСТ 8050-85.

На основании расчета математической модели процесса были получены профили изменения температур, толщины слоя десублимата и скоростей потока по длине, а также параметры процесса, которые вместе с полученными ранее данными по параметрам других процессов энергоблока вошли в состав методики технической реализации процесса получения товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации производительностью до 160 тыс. тонн продукта в год. На основе данной методики технической реализации с участием автора был разработан проект технического задания на ОКР по аналогичной теме.

На рис. 9 в качестве примера представлены профили температур по длине аппарата, соответствующего производительности энергоблока тригенерации.

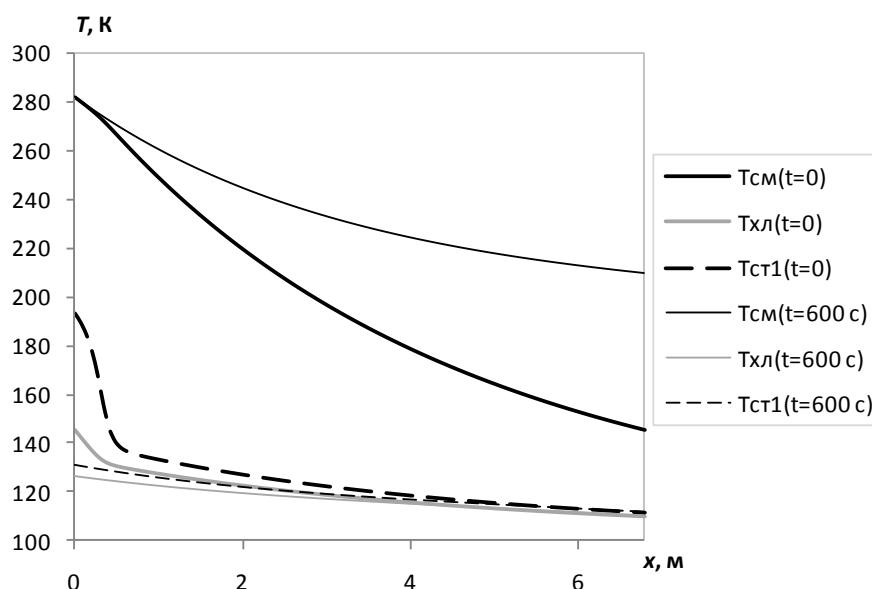


Рисунок 9 – Температурный профиль десублиматора, жирными линиями выделены профили температур по газовому потоку ($T_{см}$), по стенке со стороны газового потока ($T_{ст1}$) и по температуре хладагента ($T_{хл}$) по длине соответственно на момент времени $t=0$; более тонкими линиями – по истечении времени исследования (10 мин.)

Глава завершается выводами.

В пятой главе приводится технико-экономическая оценка инвестиционного проекта получения товарного диоксида углерода из очищенных дымовых газов в энергоблоке тригенерации мощностью до 160 тыс. тонн продукта в год.

Сравнительный анализ оптимально организованной системы получения товарного диоксида углерода по сравнению с объединением отдельных подсистем

рекуперации теплоты дымовых газов и улавливания из них диоксида углерода дан на основании оценки эксергетического КПД систем (табл. 4).

Таблица 4 – Сравнение эксергетических КПД для двух вариантов систем

Схема	Цикл Ренкина, рабочее тело метан	Холодильный цикл	Вариант 1 (раздельные подсистемы)	Вариант 2 (интегрированная комбисистема)
Эксергетический КПД η_{ex} , %	70,63	50,31	35,53	73,56

Согласно данным табл. 4, значение эксергетического КПД интегрированной ХТС практически вдвое превосходит аналогичный показатель системы с раздельными способами. При этом эксергетический КПД для системы с последовательно соединенными подсистемами меньше наименьшего значения эксергетического КПД подсистем, а для интегрированной ХТС эксергетический КПД больше наибольшего значения эксергетического КПД подсистем, что указывает на синергетический эффект, достигаемый в разработанном процессе получения товарного диоксида углерода в энергоблоке тригенерации.

В работе представлен финансовый план реализации инвестиционного проекта: «Получение товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации мощностью до 160 тыс. тонн продукта в год» с возможностью реализации на мировом углеродном рынке углеродной квоты, равной предотвращенному выбросу диоксида углерода.

Экономические характеристики проекта были рассчитаны для трех вариантов при возможности диверсификации продукции (только твердый, жидкий и твердый, только жидкий диоксид углерода). Реализация данного проекта позволит России получить дополнительную квоту на выброс CO_2 , которую можно представить на мировой углеродный рынок. Расчет показал, что данный проект является инвестиционно привлекательным, поскольку, несмотря на существенные затраты, срок его окупаемости лежит в пределах от 2 до 6 лет, что является минимальным сроком для проектов аналогичного масштаба.

В главе также дается сравнение разработанного способа получения товарного диоксида углерода в энергоблоке тригенерации по отношению к лучшим зарубежным аналогам на основании принятого в международной практике единого критерия оценки аналогичных проектов в CO_2 -эквиваленте. По данным сравнительного анализа был сделан вывод, что решение комплекса проблем в мультифункциональных установках является целесообразным, а разработанный процесс получения товарного

диоксида углерода в энергоблоке тригенерации превосходит лучшие зарубежные аналоги.

Основные результаты работы и выводы

1. Разработан новый научный подход для создания мультифункциональных ХТС с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов, минимальным воздействием на окружающую среду и высокими термодинамическими КПД на основе оптимальной дифференциации функций систем между элементами и подсистемами.
2. Разработаны стратегия и алгоритм повышения организованности ХТС с заданным типом и множеством элементов на основе декомпозиции задачи по иерархическим уровням по принципу «сверху-вниз».
3. Разработаны оригинальные стратегия и алгоритмы проектирования (синтеза) ХТС в условиях неопределенности их элементной и топологической структур, позволяющие рассматривать согласование целевых процессов в рамках виртуальной системы по общему правилу дифференциации функций системы между элементами и подсистемами.
4. Решена задача оптимальной организации отопительной системы коксового производства и предложены новые технические решения по интенсификации процесса на основе искусственной турбулизации потока в отопительных каналах, а также мультифункциональная система отопления с разделением потоков воздуха на первичный – на процесс коксования с одновременным увеличением кратности рециркуляции потока дымовых газов, и вторичный – на энергетическую систему на основе циклов Брайтона и Ренкина, которые совместно обеспечивают повышение энергосберегающих и экологических характеристик процесса. Рекомендации приняты к внедрению ООО УК «Мечел Майнинг», входящим в холдинг ПАО «Мечел».
5. На основе механизма оптимальной организации систем с заданным типом и множеством элементов проведена оптимизация процессов пылеугольной газификации бурого угля и паровой конверсии синтез-газа для получения требуемого состава ключевых компонентов и получены оптимальные параметры их проведения.
6. Осуществлен синтез организованной объединенной ХТС, состоящей из отделений газификации бурого угля и конверсии. Синтезированное технологическое решение характеризуется лучшими эксплуатационными показателями.
7. Разработано и принято к внедрению новое техническое решение по энерготехнологическому использованию попутного нефтяного газа шельфовых, в

том числе арктических месторождений, обеспечивающее выработку электроэнергии, теплоты и диоксида углерода в жидком или сверхкритическом состояниях для реализации газовых методов повышения нефтеотдачи.

8. Разработано и внедрено программно-алгоритмическое обеспечение по оценке энергоэффективности теплоэнергетических систем, которое было использовано для разработки предложений, имеющих коммерческий потенциал использования на предприятиях ООО «Бушевецкий завод» г. Бологое и АО «Специальное Конструкторское Бюро «ТУРБИНА» (СКБ ТУРБИНА) г. Челябинск.
9. Разработаны технические предложения по оптимальной организации линейных компрессорных станций по транспортировке природного газа на основе создания интегрированных систем когенерации, принятые ООО «НИИ Газэкономика», входящим в холдинг ПАО «Газпром», применительно к газотранспортным объектам холдинга.
10. Разработана математическая модель процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов, позволяющая производить расчет характеристик процесса улавливания и выделения диоксида углерода, адекватность которой была проверена в ходе экспериментальных исследований на созданной лабораторной установке по низкотемпературной десублимации диоксида углерода из газовой смеси.
11. Проведены режимные испытания теплового двигателя на водяном паре и воздухе с целью анализа его энергоэффективности и было показано, что в установках ко- и полигенерации целесообразно генерировать холод при максимальных параметрах давления рабочего тела в цикле Ренкина.
12. Разработан новый способ получения электроэнергии, холода и товарного диоксида углерода из очищенных дымовых газов объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла, в котором подтвержден синергетический эффект (патент РФ).
13. Доказано, что по показателю принятого в мировой практике критерия удельного выброса CO₂ (кг CO₂/кВт) предложенный способ превосходит современные зарубежные аналоги, а оценка финансовых показателей проекта свидетельствует, что срок его окупаемости составляет от 2 до 6 лет в зависимости от вида продукции (твердый, жидкий CO₂), что подтверждает его перспективность.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

Издания, рекомендованные ВАК РФ

1. Налетов, В.А. Новая природоохранная концепция в химии и коксохимии [Текст]/ В.А. Налетов, А.Ю. Налетов // Кокс и химия. – 2007. - №5. - с. 31-37.
2. Налетов, В.А. Методика эволюционного синтеза химико-технологических систем на основе информационного подхода [Текст]/ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов //Химическая технология. - 2010. - №4. - с.244-252.
3. Налетов, В.А Информационно-термодинамический принцип организации химико-технологических систем [Текст]/ В. А. Налетов, Л.С. Гордеев, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов // Теоретические основы химической технологии ТОХТ. - 2011. - том 45, № 5. - с. 541–549.
4. Шишанов, М.В. Оптимальная организация технологической схемы производства кокса на основе информационно-термодинамического принципа. 1.Механизм реализации оптимального прогноза режимов работы отопительного тракта коксовой печи на основе теории рециркуляции [Текст]/ М.В. Шишанов, А.Ю.Налетов, В.А. Налетов // Кокс и химия.- 2012.- №9.- с.9-13.
5. Налетов, А.Ю. Оптимальная организация технологической схемы производства кокса на основе информационно-термодинамического принципа. 2. Уменьшение выбросов оксидов азота и когенерация в схеме обогрева кокса потоком газа с рециркуляцией [Текст]/ А.Ю.Налетов, В.А. Налетов, М.В. Шишанов // Кокс и химия.- 2012.- №10.- с.30-37.
6. Налетов, В.А. Информационно-термодинамический подход к построению организованных комбинированных химико-технологических систем [Текст]/ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов// Химическая технология.- 2012.- т.13.- №11.- с.688-696.
7. Налетов, В.А. Оптимальная организация химико-технологической системы на основе макроскопического ее описания с позиции теории информации [Текст]/ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов// Химическая технология. - 2014. - т.15. - №5. – с. 315-320.
8. Налетов, В.А. Математическое моделирование процесса десублимации диоксида углерода из дымовых газов теплоэнергетических систем. [Текст]/В.А. Налетов, Л.С. Гордеев, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов // Теоретические основы химической технологии. - 2014. - т.48. - №1. - с.30-36.
9. Налетов, В.А. Экспериментальное исследование десублимации диоксида углерода из газовой смеси. [Текст]/В.А. Налетов, В.Л. Лукьянов, Н.Н. Кулов, А.Ю.Налетов, М.Б. Глебов // Теоретические основы химической технологии. – 2014. - Т.48. - № 3. – с. 335-343.
- 10.Налетов, В.А. Выбор оптимальной топологии ХТС на основе уравнительного метода распределения затрат на ее организацию [Текст]/ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов// Химическая технология. - 2014. - т.15. - №3. – с. 187-192.
- 11.Налетов, В.А. Улавливание диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации [Текст]/ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов//Экология промышленного производства. - 2013. - вып.4 (84). – с. 6-11.

12. Налетов, В.А. Оптимальная организация химико-технологических систем заданной структуры на основе декомпозиции задачи по иерархическим уровням [Текст]/В. А. Налетов, М. Б. Глебов, А. Ю. Налетов// Кокс и химия. – 2015. – № 7. – С. 34-40.
13. Налетов, В.А. Оптимальная организация процесса газификации бурого угля [Текст]/В. А. Налетов, М. Б. Глебов, А. Ю. Налетов// Кокс и химия. – 2015. – № 8. – С. 19-26.
14. Налетов, В.А. Информационный подход к оптимальному распределению нагрузок подсистемы генерации пара в отделении газификации бурого угля [Текст]/В. А. Налетов, М. Б. Глебов, А. Ю. Налетов// Кокс и химия. – 2016. – № 10. – С. 42-45.
15. Налетов, В.А. Информационный подход к выбору оптимальной топологии конверсии синтез-газа в системе с газификацией бурого угля [Текст]/В. А. Налетов, М. Б. Глебов, А. Ю. Налетов// Кокс и химия. – 2016. – № 12. – С. 33-38.
16. Налетов, В.А. Анализ области допустимых решений в процессе оптимальной организации отопительной системы печи коксования [Текст]/В. А. Налетов // Кокс и химия. – 2017. – № 2. – С. 29-32.
17. Налетов, В.А. Интенсификация процесса теплоотдачи в обогревательных простенках печных камер коксовых батарей на основе искусственной турбулизации потока [Текст]/В. А. Налетов// Кокс и химия.– 2017.– № 3.– С. 28-33.
18. Налетов, В.А. Разработка многофункциональной установки на попутном нефтяном газе для шельфовых месторождений [Текст]/В. А. Налетов// Технологии нефти и газа. – 2017. – № 2(109). – С. 38-43.
19. Налетов, В.А. Технология переработки природных энергоносителей на основе концепции оптимальной организации химико-технологических систем [Текст]/В.А. Налетов, В.А. Колесников, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов, В.Б. Глебов// Теоретические основы химической технологии. – 2017. - Т.51. - № 2. – с. 140-148.
20. Налетов, В.А. Информационный подход к выбору целевых превращений вещества в задачах проектирования технологических систем [Текст]/В. А. Налетов// Кокс и химия.– 2017.– № 12.– С. 50-54.

Патенты и свидетельства о регистрации

21. Налетов, В.А. Получение электроэнергии, холода и диоксида углерода из дымовых газов: Патент RU2482406C1, МПК F25B11/00, F25J3/00, F01K25/00 от 20.05. 2013./ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов.
22. Налетов, В.А. Программа для ЭВМ: «Расчет модели десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов ТЭС в кожухотрубчатом теплообменнике»: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013617120 от 01.08.2013 года./ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов
23. Налетов, В.А. Программа для ЭВМ: «Расчет схемы: модифицированный цикл Ренкина на НРТ с регенератором»: Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013617121 от 01.08.2013 года./ Налетов В.А., Налетов А.Ю., Глебов М.Б.

24. Налетов, В.А. Энергосберегающая установка теплоснабжения с когенерацией. Патент на полезную модель №147508 от 07.10. 2014/ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов.

Другие издания

25. Налетов, В.А. Информационный критерий усложнения химико-технологической системы [Текст]/ В.А. Налетов, М.Б. Глебов // Тез. Докл. XXIV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24» Сб. трудов: в 10 т. Т. 2. / ред. В.С. Балакирева. - Киев: Национ. техн. ун-т Украины «КПИ», 2011. - С. 44-46.
26. Налетов, В.А. Выбор оптимальной топологии ХТС на основе уравнительного метода распределения затрат на ее организацию [Текст]/ Налетов В.А., Глебов М.Б., Налетов А.Ю. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. трудов XXVI Международной научной конференции: в 10 т. Нижний Новгород: Нижегород. гос. тех. ун-т, 2013. - Т.9, Секция 11. - с. 235.
27. Налетов, В.А. Математическое моделирование процесса десублимации диоксида углерода из дымовых газов теплоэнергетических систем [Текст]/ Налетов В.А., Глебов М.Б., Налетов А.Ю. // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: сб. трудов XXVI Международной научной конференции: в 2-х ч. Ангарск: Ангарск. гос. технолог. акад., 2013. - Ч.1. - с. 179-180.
28. Налетов, В.А. Создание нового энергосберегающего энергетического блока для утилизации теплоты дымовых газов с высоким термодинамическим КПД без выбросов диоксида углерода на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла [Текст]/ Налетов В.А., Глебов М.Б., Налетов А.Ю. // Энергосбережение в секторе исследований и разработок: существующий потенциал и перспективы развития: Тезисы докладов Всероссийской молодежной научно-технической конференции, 2012. - с. 43-45.
29. Налетов, В.А. Метод информационно-термодинамического анализа в химической технологии. Новый подход к энергосбережению [Текст]/ Налетов В.А. - LAP Lambert Academic Publishing, 2013. - 84 с.
30. Налетов, В.А. Исследование процесса десублимации углекислого газа в лабораторных условиях [Текст]/ Налетов В.А. Глебов М.Б., Дубровский И.И., Налетов А.Ю.// Тезисы доклада IX Международной научно-практической конференции: ЕКОЛОГИЧНА БЕЗПЕКА: Проблеми и шляхи вирішення. Алушта, Україна, 2013. - Т.1. - с. 211-214.
31. Налетов, В.А. Оптимальная организация химико-технологической системы на основе декомпозиции задачи по иерархическим уровням. Информационный подход [Текст]/ Налетов В.А., Глебов М.Б., Налетов А.Ю. // Kluczowe Aspekty Naukowej Działalności – 2014: materiały X międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji. Volume 19. Ekologia. Chemia i chemiczne technologie. / Przemysł: Nauka i studia, 2014. – с. 60-64.
32. Налетов, В.А. Оптимальная организация процесса паровой конверсии газа газификации на основе информационного подхода [Текст]/ Налетов В.А., Глебов

- М.Б., Налетов А.Ю. // Moderní Vymoženosti Vědy - 2014: Materiály X mezinárodní vědecko - praktická konference. Volume 31. Chemie a chemická technologie. Zeměpis a geologie. / Praha: Publishing House «Education and Science» s.r.o, 2014. – с. 15-20.
33. Налетов В.А. Информационный подход к оптимальной организации химико-технологических систем [Текст]/В.А. Налетов // I Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки, технологии и производства». Международный союз ученых «Наука. Техника. Производство». №16, 2014. – с.39-42.
34. Налетов, В.А. Основы проектирования технологии топлива и углеродных материалов: Часть 1. Объект, метод и механизмы принятия решений [Текст]: учеб. пособие / В.А. Налетов, А.Ю. Налетов. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. – 104 с.
35. Налетов, В.А. Основы проектирования технологии топлива и углеродных материалов: Часть 2. Оптимальная организация химико-технологических систем. Теория и практика информационного подхода [Текст]: учеб. пособие / В.А. Налетов, А.Ю. Налетов. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. – 104 с.
36. Налетов, В.А. Оптимальная организация процесса газификации бурого угля на основе информационного подхода [Текст] /В.А. Налетов // Успехи в химии и химической технологии. - Т. 28, № 10 (159), 2014. — С 46–48.
37. Налетов, В.А. Энергосбережение в системах теплоснабжения на основе установок когенерации [Текст] /В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов // Вестник энергоэффективности Минобрнауки России. - № 1(01), 2015. – С. 80-85.
38. Налетов, В.А. Результаты компьютерного моделирования теплоотдачи в отопительных каналах печей коксования с искусственной турбулизацией потока [Текст] /В.А. Налетов, О.В. Онянова // XI Международная научно-практическая конференция «Научная мысль информационного века – 2017». № 3, Volume 6. / Przemysł: Nauka i studia, 2017. – С. 3-7.
39. Налетов, В.А. Эффективное техническое решение для добычи нефти на шельфах [Текст] /В.А. Налетов //XI Международная научно-практическая конференция «Современный научный потенциал – 2017». № 3, Volume 10. Sheffield: News of Science and Education, 2017. – С. 26-30.
40. Налетов, В.А. Вычислительные эксперименты в области построения экотехнологий. [Текст]: метод. рекомендации / В.А. Налетов, А.Ю. Налетов., М.Б. Глебов – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2018. – 48 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке исследований Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014-2020 годы» (проект №14.583.21.0064, уникальный идентификатор проекта RFMEF158317X0064).

Для справки: После защиты кандидатской диссертации автором опубликовано 35 печатных работ, включая 21 публикацию, в которых изложены основные научные результаты диссертации, в том числе 17 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК РФ.