

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, профессора Бессарабова Аркадия Марковича о диссертации Владислава Алексеевича НАЛЕТОВА «Разработка мультифункциональных технологических систем переработки природных энергоносителей на основе их оптимальной организации», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям:
05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ и 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий.

Актуальность темы

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой Министерства образования и науки Российской Федерации «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2020 годы», в частности: «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области разработки высокоэффективных экологически чистых энергоблоков нового поколения», «Исследование возможности конверсии парниковых газов в полезные товарные продукты» и «Проведение исследований в области повышения эффективности добычи нефти за счет циклической закачки пара с дымовыми газами, термогазохимического воздействия и переработки попутных нефтяных газов».

Целью работы является 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.

Безусловно, эти направления актуальны для широкого круга отраслей, в том числе, топливно-энергетического комплекса (ТЭК), химии, нефтегазохимии, металлургии, коксохимии и ряда других, использующих ископаемые топлива и выбрасывающих большие количества диоксида углерода и теплоты с дымовыми газами.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, включая литературный обзор, выводов, глоссария основных терминов и понятий, списка

использованных литературных источников и приложений. Работа изложена на 487 страницах, включает 116 рисунков и 95 таблиц. Список использованной отечественной и зарубежной литературы содержит 283 наименования. Диссертация содержит приложения, в том числе акты и заключения о внедрении результатов исследования.

Во введении обоснована актуальность работы, сформированы основная цель и задачи исследования.

В главе 1 представлены результаты аналитического обзора работ по теме диссертационного исследования. Рассмотрены методы оптимальной организации химико-технологических систем (ХТС), основанные на фундаментальных законах преобразования вещества и энергии, такие как: эксергетический и эксергоэкономический, используемый в современной практике научных исследований и проектирования метод Пинч-анализа, а также метод информационно-термодинамического анализа ХТС. Дана классификация используемых при оптимизации химико-технологических систем критериев от частных в виде расходных коэффициентов до общих, основанных законах эволюции Биосферы.

В главе представлены также современные методы рекуперации энергии низкого и среднего потенциалов, используемые для восстановления работоспособности технологических потоков, в частности для генерации энергии на основе циклов Ренкина. Приведены примеры использования цикла Ренкина с низкокипящими рабочими телами в различных отраслях промышленности. Систематизированы способы улавливания диоксида углерода из дымовых газов. Отмечено, что наибольшее распространение на практике получили способы физической и химической абсорбции, однако возможную конкуренцию этим способам могут составить методы криогенного улавливания диоксида углерода, которые позволяют получить продукты высокой чистоты. Рассмотрены также новые способы улавливания диоксида углерода с помощью мембран, адсорбентов и путем образования гидратов.

Исходя из анализа литературных источников, был сделан вывод о необходимости разработки научных и методических основ оптимальной дифференциации функций мультифункциональных технологических систем на основе информационной концепции, позволяющей перевести эту проблему в практическую плоскость.

В главе 2 приведены научные и методические основы разрабатываемого автором подхода. На основе информационной модели исходов, представляющих возможные состояния технологических потоков, была получена характеристика, учитывающая дифференциацию функций системы между элементами и подсистемами, совпадающая с энтропией информации Шеннона, которая выражена через статистический вес системы, мультипликативно связанный со статистическими весами подсистем.

В главе представлены различные варианты дифференциации функций: между потоками продуктов многоцелевого ХТП, между элементами ХТС в процессе их усложнения. Получены выражения оригинальных критериев организованности ХТС в процессе их элементного усложнения, которые включают макро- и микрохарактеристики процессов. Дифференциацию функций между потоками многопоточных элементов предложено осуществлять на основе «уровнительного» метода, либо на основе метода «выделения», которые названы по аналогии с таковыми в эксергоэкономическом подходе. В работе приведена методика оценки макрохарактеристик процессов – весовых коэффициентов на основе эквивалентных температурных флуктуаций.

Завершают главу методология и алгоритмы оптимальной организации ХТС с заданным типом и множеством элементов и вновь проектируемых. Оптимальная организация ХТС с заданным типом и множеством элементов предложено проводить в соответствии с алгоритмом «сверху-вниз» от определения оптимального весового коэффициента до подстройки параметров процесса под данное значение его характеристики макроуровня.

Особенностью алгоритма вновь проектируемых ХТС является возможность согласования целевых процессов в рамках виртуальных систем по общим правилам дифференциации функций системы между элементами и подсистемами, что позволяет осуществлять синтез технологических решений в алгоритме без обратных связей.

В главе 3 даются примеры реализации различных стратегий создания организованных ХТС на примерах технологий переработки природных энергоносителей.

Стратегия оптимальной организации на макроуровне была реализована на примере отопительной системы печи коксования. Двухуровневая стратегия по принципу «сверху-вниз» частично реализована на примерах

процессов пылеугольной газификации бурого угля и конверсии синтез-газа. Алгоритм оптимальной организации ХТС в условиях неопределенности ее элементной и топологической структур был реализован на примерах системы газификации бурого угля в интеграции с конверсией синтез-газа в процессе получения метанола и высших спиртов и при разработке multifunctionальной системы энерготехнологического использования попутного нефтяного газа. В результате были разработаны ряд новых технических решений:

- multifunctionальная отопительная система печей коксования;
- multifunctionальная технологическая система получения синтез-газа заданного состава и энергии на основе интеграции газификации и конверсии;
- multifunctionальная система получения электроэнергии, теплоты и диоксида углерода для повышения извлечения нефти на месторождениях арктического шельфа;
- варианты multifunctionальных теплотехнических систем различного назначения.

Результаты исследований и выводы были приняты к реализации заинтересованными организациями, что подтверждается актами и заключениями, представленными в приложении.

В главе 4 диссертации представлена разработка способа и методики технической реализации процесса получения товарного диоксида углерода из очищенных дымовых газов.

На первом этапе автор разрабатывал структуру энергоблока, способного обеспечить глубокую рекуперацию теплоты дымовых газов в сочетании с глубоким улавливанием из них диоксида углерода на основе интеграции цикла Ренкина и холодильного цикла среднего давления. Для этой цели проводился анализ вариантов оптимальной организации подсистемы цикла Ренкина с использованием различных рабочих тел класса легких углеводородов. Было разработано техническое решение по элементной и топологической структурам энергоблока тригенерации, являющегося замыкающим звеном технологических систем, использующим ископаемые топлива. На способ получения электроэнергии, холода и диоксида углерода из дымовых газов получен патент РФ. С целью подтверждения выбора

характеристик энергоблока автором проводились режимные испытания теплового двигателя поршневого типа на паре и воздухе.

На втором этапе была разработана квазистационарная математическая модель процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода из очищенных дымовых газов в аппаратах трубчатого типа. Адекватность математической модели проверялась в ходе экспериментальных исследований на лабораторной установке по низкотемпературной десублимации диоксида углерода из газовой смеси: $\text{CO}_2 - \text{N}_2$. Проведенные исследования позволили произвести корректировку коэффициентов массоотдачи, которые существенно отличались от рассчитанных теоретическим путем на основании зависимостей, приведенных в литературных источниках. На основе разработанной математической модели были определены параметры процесса десублимации, отвечающие требуемой производительности энергоблока до 160 тыс. тонн продукта в год, которые совместно с другими элементами энергоблока вошли в методику технической реализации разработанного технического решения. При этом было показано, что параметры энергоблока позволяют получать товарный диоксид углерода из очищенных дымовых газов с содержанием CO_2 от 6 до 10 об.% (в расчете на влажный газ), что является характерным диапазоном для большинства технологий, использующих ископаемые топлива.

В главе 5 диссертации приводится технико-экономическая оценка полученных в 4 главе результатов. На основании расчетов эксергетических КПД интегрированной системы и системы с отдельными способами было показано, что предлагаемое техническое решение отличается высоким эксергетическим КПД за счет синергетического эффекта при интеграции подсистем цикла Ренкина и холодильного цикла. Кроме того, по показателю удельного выброса CO_2 – кг/кВт мощности предложенное техническое решение превосходит лучшие мировые аналоги, реализующие процессы улавливания диоксида углерода. В работе представлены также финансовые показатели проекта, указывающие на перспективность его реализации.

Область исследований, результаты которых систематизированы в диссертационной работе В.А. Налетова, соответствует паспортам специальностей: 05.17.07 – «Химическая технология топлива и

высокоэнергетических веществ» и 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий».

По области исследования специальности 05.17.07:

П.2 «Технологии и схемы процессов переработки нефтяного сырья на компоненты. Конструктивное оформление технологий и основные показатели аппаратуры установок для переработки сырья. Технологии подготовки нефти к переработке. Энергосберегающие технологии. Технологии приготовления товарных нефтепродуктов» (Глава 3, раздел 3.5).

П.8 «Разработка новых процессов переработки органических и минеральных веществ твердых горючих ископаемых с целью получения продуктов топливного и нетопливного назначения» (Гл. 3, разделы 3.2, 3.3, 3.4).

П. 9 «Научные основы промышленного процесса коксования углей. Теория формирования кускового кокса, пластического состояния, спекание углей и угольных шихт. Новые способы подготовки углей к производству кокса и химических продуктов коксования. Производство углеродистых восстановителей и сорбентов. Непрерывные способы коксования. Разработка путей и способов сохранности огнеупорной кладки коксовых печей» (Глава 3, разделы 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3).

П.12 «Экологические аспекты переработки топлив. Разработка технических и технологических средств и способов защиты окружающей среды от вредных выбросов производств по переработке топлив» (Глава 3, раздел 3.6, главы 4, 5).

По области исследования специальности 05.17.08:

«Методы изучения и создания ресурсо- и энергосберегающих процессов и аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности, обеспечивающие минимизацию отходов, газовых выбросов и сточных вод» (Глава 2, разделы 2.1–2.6).

«Принципы и методы синтеза ресурсосберегающих химико-технологических систем с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов и конструкционных материалов» (Глава 2, раздел 2.7).

«Способы, приемы и методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещения сыпучих материалов, исследование тепловых

процессов в технологических аппаратах и технологических схемах, исследования массообменных процессов и аппаратов» (глава 4, раздел 4.2).

Основные положения и выводы диссертации обоснованы и достоверны.

Соискателем опубликовано 40 печатных работ, из которых 20 – в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве образования и науки Российской Федерации, из которых 14 в журналах, индексируемых в международных системах SCOPUS и Web of Science, 2 патента, 2 свидетельства на программы для ЭВМ. Без соавторов опубликовано 8 печатных работ, включая 1 монографию.

Оценка научной новизны работы

Решена научная проблема по созданию организованных мультифункциональных технологических систем на основе количественных механизмов оптимальной дифференциации функций систем между элементами и подсистемами. С целью расшифровки количественных механизмов разработаны научные и методические основы оптимальной дифференциации функций систем на основе объединения трех начал термодинамики: первого, второго и нулевого, что потребовало развития информационной концепции анализа и синтеза химико-технологических систем.

Разработаны и реализованы на конкретных примерах стратегии и алгоритмы создания ХТС с высокими степенями организованности: для однородных ХТС, неоднородных ХТС с заданным типом и множеством элементов и для ХТС в условиях неопределенности их элементной и топологической структур.

На основе прогноза оптимального распределения нагрузок между элементами отопительной системы печей коксования были обоснованы оригинальные способы повышения эффективности процесса путем искусственной турбулизации потоков в отопительных каналах и принудительной рециркуляции газовых потоков, обеспечивающие одновременно несколько эффектов: равномерность прогрева коксового пирога, когенерация и сокращение выбросов термических оксидов азота.

Обосновано применение двух высокотемпературных ступеней конверсии синтез-газа в интеграции с процессом пылеугольной газификации

бурых углей Бородинского месторождения (Россия) в производстве метанола и высших спиртов.

Разработан способ получения электроэнергии, холода и товарного диоксида углерода из дымовых газов объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других, защищенный патентом РФ, в котором подтвержден синергетический эффект тригенерации.

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.

Оценка практической значимости работы

Разработана multifункциональная отопительная система коксового производства, позволяющая более чем вдвое уменьшить градиент температур по высоте печных камер, выработать дополнительно до 3 МВт электрической мощности на одну батарею в энергосистеме на основе цикла Брайтона, усиленного циклом Ренкина, а также снизить концентрацию термических оксидов азота в выхлопных газах с 88,2 до 0,63 мг/м³.

Предложены новые конструктивные решения элементов кирпичной кладки, позволяющие создать турбулизацию потока в отопительных каналах печей коксования и увеличить теплоотдачу конвекцией в 1,7 раза, что приведет к сокращению коксового газа на процесс. Рекомендации по повышению эффективности процесса коксования приняты компанией ООО УК «Мечел Майнинг», входящей в холдинг ПАО «Мечел».

Разработано техническое решение энергосберегающей химико-технологической системы газификации бурого угля в интеграции с конверсией синтез-газа в процессе получения метанола и высших спиртов, обеспечивающие повышение эксплуатационных характеристик процесса по сравнению с существующими технологическими аналогами.

Разработано multifункциональное техническое решение установки на попутном нефтяном газе для обеспечения месторождений арктического шельфа электроэнергией, теплотой и диоксидом углерода (для повышения нефтеотдачи пластов), превосходящее по эффективности зарубежный аналог multifункциональной установки *VENZ 4*. Рекомендации приняты к

внедрению Институтом Арктических нефтегазовых технологий Российского университета нефти газа им. И.М. Губкина

Разработан программный комплекс по оптимальной организации теплоэнергетических систем различного назначения, который внедрен на предприятии ООО «Бушевецкий завод» (г. Бологое).

Разработаны оригинальные технические решения по оптимальной организации теплоэнергетических систем, имеющих коммерческий потенциал использования:

– газоперекачивающих агрегатов на линейных компрессорных станциях по транспортировке природного газа (приняты к реализации ООО «НИИГазэкономика», входящего в холдинг ПАО «ГАЗПРОМ»);

– опытных образцов газотурбинных агрегатов (внедрены на предприятии АО «Специальное конструкторское бюро «ТУРБИНА»» (г. Челябинск);

– системы рекуператора с нагревательной печью для Хабаровского нефтеперерабатывающего завода (внедрены на предприятии ООО «Бушевецкий завод» (г. Бологое) в рамках поставки рекуператора по программе модернизации нагревательных печей).

Разработана методика технической реализации процесса получения товарного диоксида углерода из дымовых газов в энергоблоке тригенерации производительностью до 160 тыс. тонн в год для объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и смежных отраслей, использующих ископаемые топлива, а также проект технического задания на данный процесс (приняты компанией ООО «Теплотехнический независимый институт» г. Москва и государственным заказчиком).

Разработаны программные комплексы по расчету цикла Ренкина и процесса низкотемпературной десублимации диоксида углерода, защищенные свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ (приняты Департаментом приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки России).

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

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

Рекомендации по использованию результатов диссертации и выводов

Результаты исследования и выводы могут быть использованы государственными учебными заведениями высшего образования по направлениям обучения ресурсо-энергосбережение в химической и смежных отраслях промышленности, а также публичными акционерными обществами «Газпром», «Лукойл», «Роснефть» при реализации энергосберегающих мероприятий в рамках собственных программ по энергосбережению и охране природной среды.

Замечания по диссертационной работе в целом

Высоко оценивая результаты диссертационного исследования, тем не менее, следует высказать автору на ряд замечаний и пожеланий.

1. В работе используется понятие замкнутой термодинамической системы, однако не дается обоснования необходимости такой формализации. Ведь на самом деле мы имеем дело с открытыми системами.

2. Выбор неопределенных множителей Лагранжа в качестве критериев усложнения ХТС при увеличении в ней количества элементов автор мотивирует аналогией с эксергоэкономическим подходом. Это недостаточно обосновано.

3. Не ясно насколько общим является вывод о применимости стратегии, названной автором «сверху-вниз», для произвольных неоднородных ХТС с заданным типом и множеством элементов.

4. Не показано достаточно ли точность математических моделей рассмотренных процессов (например, процесса пылеугольной газификации) для оптимизации этих процессов и будут ли полученные оптимальные результаты достоверны.

5. Автор утверждает, что оптимальное согласование целевых процессов, условно соединенных в рамках виртуальной системы, должно привести к экономии энергетических ресурсов в проектируемой энерготехнологической системе. Хотелось бы иметь этому какое-либо объяснение.

6. Некоторые из оптимальных технических решений, в частности по multifunctionальной установке для месторождений арктического шельфа (табл. 3.38 на стр.255), даны в интегральных показателях. Это следовало бы обосновать.

7. В работе отсутствуют выводы автора относительно перспектив практического использования multifunctionальных установок.

8. При ознакомлении с диссертацией возникли некоторые замечания технического характера. Например, ряд рисунков в диссертации на бумажном носителе выполнены черно-белыми (рис. 3.5 на стр.158; рис. 4.21 на стр. 326 и рис.4.22 на стр.327), а комментарии к ним даются как к рисункам, выполненным в цвете.

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации Владислава Алексеевича НАЛЕТОВА «Разработка multifunctionальных технологических систем переработки природных энергоносителей на основе их оптимальной организации», отличающейся определенной научной новизной и имеющей несомненную практическую значимость.

Заключение

Критический анализ диссертации Налетова В.А. позволяет заключить о высоком теоретическом уровне и практической значимости полученных в ней результатов, сделанных выводов и предложенных рекомендаций. Работа представляет собой логически выстроенное, оригинальное исследование. Материал представлен в полном соответствии с поставленными целями и раскрывающими их задачами. При выводе формул соискатель корректно применяет методы математического моделирования, анализа, оптимизации и

синтеза ХТС, а также методы термодинамики, теории информации, теории вероятностей и математической статистики.

На основании приведенных выше доводов, можно сделать заключение о том, что диссертация Владислава Алексеевича НАЛЕТОВА «Разработка multifunctionальных технологических систем переработки природных энергоносителей на основе их оптимальной организации», является завершенной научно-квалификационной работой, в целом отвечающей требованиям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.17.07 – «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ» и 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий».

Работа отвечает критериям, установленным требованиями пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (с изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук.

Диссертационная работа содержит теоретические положения по оптимальной организации химико-технологических систем путем дифференциации их функций между их элементами и подсистемами, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы создания multifunctionальных технологических систем с оптимальными удельными расходами сырья, топливно-энергетических ресурсов, минимальным воздействием на окружающую среду и высокими термодинамическими КПД, имеющей важное социально-экономическое и хозяйственное значение.

Работа содержит оригинальные технические решения по созданию оптимальных систем переработки природных энергоносителей, в частности: отопительной системы коксового производства, системы газификации бурого угля и конверсии в производстве метанола и высших спиртов, системы энерготехнологического использования попутного нефтяного газа месторождений арктического шельфа, теплоэнергетических систем, а также системы получения товарного диоксида углерода из дымовых газов, в которых прогнозируемые эксплуатационные показатели превосходят лучшие зарубежные аналоги.

Автор обсуждаемой диссертационной работы, Владислав Алексеевич НАЛЕТОВ, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора технических наук по специальностям: 05.17.07 – «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ» и 05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий».

Официальный оппонент:

Заместитель директора по науке
АО Научный центр «Малотоннажная химия»
доктор технических наук, профессор

А.М. Бессарабов

28.05.18г.

107564, Россия, Москва,
ул. Краснобогатырская, д.42, стр.1
Тел. (495) 983-58-88
bessarabov@nc-mtc.ru

Подпись Заместителя директора по науке
д.т.н., профессора Бессарабова А.М. удостоверяю
Директор АО Научный центр
«Малотоннажная химия»



В.Е. Трохин