

На правах рукописи

НАЛЕТОВ ВЛАДИСЛАВ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ИНФОРМАЦИОННО-ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП ОРГАНИЗАЦИИ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ УДАЛЕНИЯ
ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ**

Специальности: 05.17.08 – процессы и аппараты химических технологий
05.13.01 – системный анализ, управление и обработка
информации (химическая технология)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2012 год

Работа выполнена на кафедре кибернетики химико-технологических процессов
Российского химико-технологического университета
имени Д.И. Менделеева» (РХТУ им. Д.И. Менделеева)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Глебов Михаил Борисович,
профессор кафедры КХТП
РХТУ им. Д.И. Менделеева

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Родионов Анатолий Иванович,
профессор кафедры технологии
защиты биосферы
РХТУ им. Д.И. Менделеева

кандидат технических наук,
Игнатов Валентин Николаевич
технический директор ООО
Многопрофильный научно-
технический центр «БИАТ»

Ведущая организация: Национальный исследовательский
университет «Московский
энергетический институт» (МЭИ)

Защита состоится « 5 » апреля 2012 г. в 11 часов на заседании диссертационного
совета Д 212.204.03 в РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047 Москва, Миусская пл., д.9) в
конференц-зале.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-библиотечном центре РХТУ
им. Д.И. Менделеева.

Автореферат диссертации разослан 22 февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.204.03

А.В. Женса

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В докладе Международного энергетического Агентства, определившего стратегию развития энергетики на период до 2050 года, наиболее амбициозные направления представлены в инновационном Сценарии ускоренного развития (**Accelerated Technology scenarios, АСТ**), согласно которому приоритетами являются энергосбережение – 45% (в том числе, когенерация – совместная выработка электроэнергии и теплоты – 34%), а в части сокращения выбросов CO₂ – процессы улавливания и захоронения диоксида углерода (**Carbon Capture and Storage, ССS**) – 12%.

Доминирующее положение по выбросам диоксида углерода занимают отрасли промышленности, использующие ископаемое топливо, в частности, отрасли топливно-энергетического комплекса (ТЭК), химии, нефтехимии, металлургии, коксохимии и ряда других.

Суммарные мировые выбросы дымовых газов, содержащих диоксид углерода, ежегодно оцениваются в 325 млрд. т, а их тепловой потенциал (тепловое загрязнение окружающей среды) – 65 млн. ТВт в год (1ТВт=10¹² Вт), что сопоставимо с энергией термальных вод Земли (ок. 50 млн. ТВт/год).

Таким образом, актуальными являются следующие направления:

- глубокая утилизация остаточной теплоты дымовых газов;
- когенерация – совместная выработка двух полезных продуктов;
- глубокое улавливание диоксида углерода из дымовых газов;
- предотвращение теплового загрязнения окружающей среды.

В работе поставлена и решена комплексная задача: разработка способа глубокого улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов с одновременной выработкой электроэнергии и холода при полной ликвидации теплового загрязнения окружающей среды. Совмещение частных задач требует совмещения различных способов рекуперации теплоты с одной стороны и улавливания диоксида углерода – с другой в рамках интегрированной химико-технологической системы (ХТС), что, в свою очередь, настоятельно требует разработки нового подхода к оптимальной дифференциации (разделению) функций сложной ХТС между ее элементами.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России за 2007-2012 годы», в частности, «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области разработки высокоэффективных экологически чистых энергоблоков нового поколения» (шифр «2011-1.6-516-023»).

Цель работы – разработка информационно-термодинамического принципа организации ХТС и его применение для создания энергосберегающего способа глубокого улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов.

При этом в работе решались следующие задачи:

1. Разработка информационно-термодинамического принципа построения высокоорганизованных ХТС путем дифференциации их функций как между элементами, так и между потоками многоцелевых элементов.

2. Разработка в рамках принципа критериев пошагового усложнения ХТС.
3. Разработка методов разделения затрат на организацию многопоточных процессов ХТС.
4. Анализ способов глубокой рекуперации энергии остаточной теплоты очищенных дымовых газов на основе цикла Ренкина, и глубокого улавливания из них диоксида углерода, совмещаемых с циклом Ренкина.
5. Выбор оптимальной структуры и оптимального низкокипящего рабочего тела (НРТ) в цикле Ренкина, а также оптимальных параметров холодильного цикла, совмещаемого с циклом Ренкина.
6. Экспериментальная проверка полученных результатов при выборе рабочего тела на основе режимных испытаний теплового двигателя на воздухе.
7. Разработка способа тригенерации: получение электроэнергии, холода и диоксида углерода на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла.

Научная новизна:

1. Разработан информационно-термодинамический принцип организации ХТС на основе оптимальной дифференциации ее функций, позволяющий направленно осуществлять синтез организованных ХТС.
2. В рамках информационно-термодинамического принципа представлены:
 - решение общей задачи повышения организованности ХТС при дифференциации ее функций, которое описывается энтропией информации Шеннона, выраженной через статистический вес информационной системы;
 - условие организованности многоцелевого процесса, заключающееся в равенстве факторов затрат на организацию процесса по потокам продуктов;
 - критерии организованности ХТС при ее пошаговом усложнении, имеющие смысл стоимости единицы информации промежуточных потоков или потоков продукта;
 - новые методы распределения затрат на организацию процессов: «уравнительный», который исходит из постулата равенства стоимостей единицы информации потоков продуктов; «выделения», при котором фактор затрат на организацию процесса полностью переносится на выделяемый по постулатам целевой поток продукта;
 - доказательство надежной корреляции предложенных методов распределения затрат с нулевым началом термодинамики, определяющим оптимальное энергосберегающее решение при взаимодействии подсистем в ХТС;
 - методика расчета составляющих критериев пошагового усложнения ХТС.
3. С использованием полученных критериев разработано алгоритмическое и программное обеспечение для выбора оптимального рабочего тела в цикле Ренкина.

4. Разработан не имеющий аналогов способ получения электроэнергии, холода и диоксида углерода из дымовых газов, в котором достигнут синергетический эффект тригенерации.

Практическая значимость:

1. Разработан новый энергосберегающий блок глубокого улавливания диоксида углерода из дымовых газов мощность 40 МВт для объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других на основе совмещения цикла Ренкина и холодильного цикла.
2. Проведены режимные испытания экспериментального образца теплового двигателя на воздухе и на основе оценки его эксергетического к.п.д. установлена надежная корреляция с результатами выбора оптимального НРТ в цикле Ренкина.
3. Разработана методика технической реализации способа тригенерации, включающая элементную и топологическую его структуры и режимные параметры работы элементов системы.
4. Проведена оценка предотвращенного ущерба от выбросов диоксида углерода для энергоблока заданной мощности на основе текущих биржевых цен на Мировом углеродном рынке, которая составит более 1 млн. Евро в год и дана оценка эксергетического к.п.д. способа тригенерации, которая указывает на достижение синергетического эффекта в интегрированной ХТС.
5. Программный комплекс в составе: текст программы, описание программы, описание применения, руководство системного программиста, руководство оператора, выполненный в соответствии с требованиями стандарта (ГОСТ 19.401-78) принят Департаментом приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки России.

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) и на XXIV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-24 (г. Киев, 2011 год).

Публикации.

Результаты диссертационной работы отражены в 4 публикациях и заявке на патент РФ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК для опубликования результатов диссертации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованных литературных источников и приложений. Работа изложена на 258 страницах, включает 71 рисунков и 51 таблиц. Список использованной отечественной и зарубежной литературы содержит 189 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава представляет собой литературный обзор, включающий в себя три основных раздела.

Первый раздел систематизирует подходы к анализу и синтезу химико-технологических систем, основанные на эксергетической, эксергоэкономической и информационной концепциях. Приведены основные количественные зависимости критериев оценки ХТС и различные постановки задач анализа и синтеза ХТС. Рассмотрены достоинства и недостатки этих концепций и методов на их основе и сделан вывод о необходимости разработки нового системного принципа, позволяющего совмещать различные способы решения частных задач, в частности, задач энергосбережения и экологической чистоты в рамках общей задачи повышения организованности интегрированной ХТС. В соответствии с законом системной организации организмов К.Ф. Рулье, а также всех природных, технических и социальных систем, повышение организованности всех типов систем связано с определенной дифференциацией функций системы как между ее элементами, так и внутри самих элементов для достижения синергетического эффекта, когда «свойство целого больше, чем свойства составных его частей».

Второй раздел содержит систематизацию способов рекуперации энергии различного потенциала. Поскольку объектом исследования являются энергоблоки, выбрасывающие в окружающую среду в больших объемах дымовые газы, имеющие невысокий тепловой потенциал, в разделе акцент сделан на повышение степени рекуперации теплоты на основе использования термодинамических циклов с низкотемпературными рабочими телами для глубокой рекуперации энергии низкого потенциала. В этой связи рассмотрены термодинамические и технологические основы термодинамического цикла Ренкина для использования в системах ко- и тригенерации.

Третий раздел содержит обзор современных методов улавливания диоксида углерода из дымовых газов, прошедших очистку от оксидов серы и азота. Предварительно кратко рассмотрены способы очистки дымовых газов от оксидов серы и азота и показано, что в настоящее время в мировой практике наибольшее распространение получили способы селективной очистки от диоксида серы с выработкой попутного товарного продукта и селективного каталитического восстановления (СКВ) оксидов азота до элементарного азота. Рассмотрены существующие и перспективные способы улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов, основанные на абсорбционных, в том числе хемосорбционных способах, адсорбционных способах, криогенных способах, мембранных способах и ряде других и показано, что достигаемая степень улавливания диоксида углерода не превышает 92%, что не удовлетворяет большинство исследователей. Принимая во внимание, что с повышением степени улавливания диоксида углерода, в особенности, при малых содержаниях диоксида углерода в дымовых газах (для подавляющего большинства энергоблоков, от 6 до 8 об.%), существенно возрастают энергозатраты на процесс, встает необходимость разработки энергосберегающего способа глубокого улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов.

Вторая глава представляет собой новый научный подход к построению высокоорганизованных ХТС на основе оптимальной дифференциации их функций как

между элементами, так внутри самих элементов, в случае, если они являются многоцелевыми с использованием метода информационно-термодинамического анализа.

Из предшествующих работ известно, что в любой ХТС можно выделить три уровня иерархии: ХТС как единое целое (замкнутая термодинамическая система), ХТП как единое целое (замкнутая термодинамическая система) и микросостояния, определяемые вероятностями возможных исходов. В такой информационной системе 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.

На рис. 1 представлена разветвленная структура исходов (решений), которая указывает на возможность дифференциации функций ХТС как между ее элементами, принадлежащими разным технологическим маршрутам, так и внутри самих элементов.

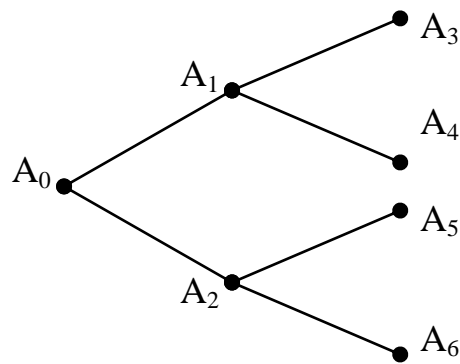


Рис.1. Возможные исходы при дифференциации функций ХТС

Принимая во внимание известный постулат информационного подхода, что каждый технологический поток является носителем информации о его возможных состояниях, в силу чего он отображается как поток информационный, математически было доказано, что организованность такой разветвленной структуры описывается энтропией информации, выраженной через статистический вес системы, мультипликативно связанный со статистическими весами подсистем.

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

При этом $\Delta \Gamma_C = \Delta \Gamma_A \cdot \Delta \Gamma_B$, где А и Б – подсистемы ХТС, соответствующие, например, исходам А₃ и А₄ (см. рис.1). Статистический вес является обратной величиной вероятности, которая рассчитывается на основании распределения Больцмана.

На рис. 2 представлена произвольная ХТС с многопоточными и многоцелевыми процессами. Для вывода характеристик, определяющих, в какой степени ХТС дифференцирует и передает свои функции каждому элементу системы, на первом этапе рассматривается информационная задача вывода критериев пошагового усложнения ХТС в рамках произвольно выбранного маршрута.

В качестве критерия организованности ХТС выбирается энтропия информации в виде:

$$H_C = \sum n_{ji} H_{ji \text{ ВХ}}, \quad (2)$$

где n_{ji} – весовой коэффициент, учитывающий в вероятностном виде вклад j -того элемента i -того технологического маршрута в решение общей задачи системы; $H_{ji \text{ ВХ}}$ – энтропия информации j -того элемента i -того технологического маршрута (входное значение).

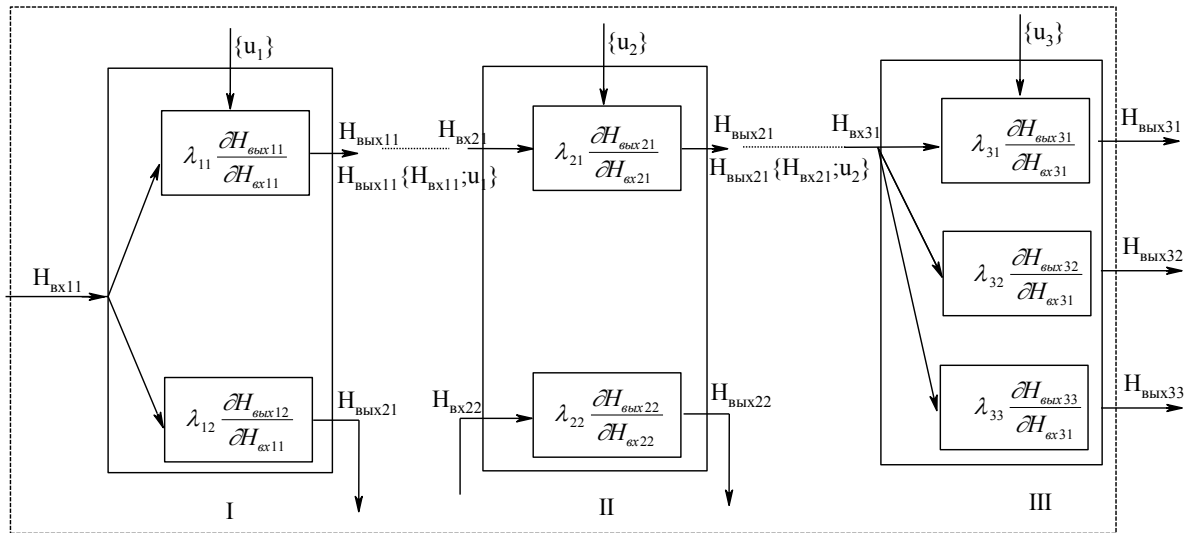


Рис.2. Фрагмент гипотетической химико-технологической системы

Для определения критериев пошагового усложнения ХТС на основании метода неопределенных множителей Лагранжа осуществляется поиск экстремума функция вида (2) с учетом ограничений следующего вида:

$$\begin{aligned} H_j^{\text{ВЫХ}} &= h_j^{\text{ВЫХ}}(H_j^{\text{ВХ}}; U_j) \quad j = \overline{1,3} \\ H_1^{\text{ВЫХ}} &= f_2^1 H_2^{\text{ВХ}} \\ H_2^{\text{ВЫХ}} &= f_3^2 H_3^{\text{ВХ}} \end{aligned} \quad (3)$$

где f_2^1, f_3^2 – функции невязок по каналам 1-2 и 2-3 соответственно.

Показано, что в качестве критериев пошагового усложнения выступают собственно неопределенные множители Лагранжа. По аналогии с эксергоэкономическим подходом, полученным выражениям для неопределенных множителей Лагранжа был придан физический смысл условных стоимостей единицы информации потоков продуктов (или промежуточных потоков), которые в задаче повышения организованности ХТС минимизируются. Критерии пошагового усложнения ХТС имеют следующий вид (представлены для маршрута 1):

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= n_1 \frac{K_1}{\eta_{T1}} \\ \lambda_2 &= n_2 \frac{K_2}{\eta_{T2}} + n_1 \frac{K_1 K_2}{\eta_{T1} \eta_{T2}} \frac{\overline{T_2}}{T_1} \frac{\Delta \Gamma_1^{\text{ВЫХ}}}{\Delta \Gamma_2^{\text{ВХ}}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\lambda_3 = n_3 \frac{K_3}{\eta_{T3}} + n_2 \frac{K_2 K_3}{\eta_{T2} \eta_{T3}} \frac{\bar{T}_3}{\bar{T}_2} \frac{\Delta \Gamma_2^{\text{ВЫХ}}}{\Delta \Gamma_3^{\text{ВХ}}} + n_1 \frac{K_1 K_3}{\eta_{T1} \eta_{T2} \eta_{T3}} \frac{\bar{T}_3}{\bar{T}_1} \frac{\Delta \Gamma_1^{\text{ВЫХ}}}{\Delta \Gamma_3^{\text{ВХ}}}$$

В приведенных выражениях (4) были использованы следующие зависимости для составляющих критериев:

- весовой коэффициент: $n = \exp\left(-\frac{L_{\min}}{RT_0}\right) = \exp\left(-\frac{\Delta U_i - T_0 \Delta S_i + p_0 \Delta V}{RT_0}\right)$, где T_0, p_0 –

температура и давление окружающей среды соответственно;

- термодинамический к.п.д.: $\eta_{T1} = \frac{\Delta S_{p1}}{\Delta S_{01}}$, где $\Delta S_{p(0)1} = -(\Delta Z^{p,T} - \Delta U)_{p(0)1} / \bar{T}_1$ – изменение

термодинамической энтропии;

- фактор затрат на организацию процесса $K_1 = \Delta \Gamma_1^{\text{ВХ}} / \Delta \Gamma_1^{\text{ВЫХ}}$, где

$$\Delta \Gamma_1^{\text{ВХ}} = \exp\left[-\frac{(\Delta Z^{p,T} - \Delta U)_i^{\text{ВХ}}}{RT_1}\right], \Delta \Gamma_1^{\text{ВЫХ}} = \exp\left[-\frac{(\Delta Z^{p,T} - \Delta U)_i^{\text{ВЫХ}}}{RT_1}\right]$$
 – объемы фазовых пространств

микросостояний.

Задачами следующих этапов работы являлось рассмотрение случаев дифференциации функций многоцелевых процессов между потоками продуктов и дифференциации функций ХТС между многопоточными элементами, объединяющими потоки разных маршрутов, например, при совмещении разных способов в интегрированной ХТС.

На рис. 3 представлена в упрощенном виде задача дифференциации функций многоцелевого процесса между потоками продуктов.

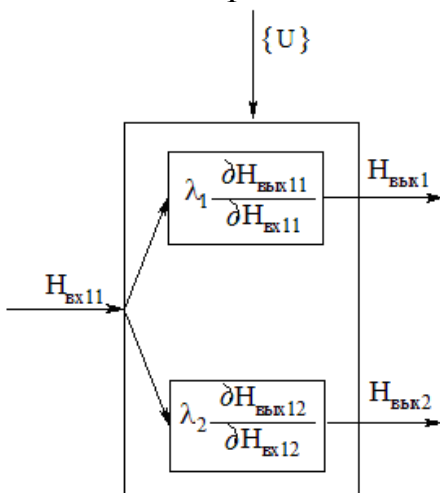


Рис.3. Пример дифференциации функций многоцелевого ХТП.

На основе метода неопределенных множителей Лагранжа, аналогично рассмотренной ранее задаче, было получено условие оптимальной дифференциации функций многоцелевого процесса между потоками продуктов, соответствующее равенству факторов затрат или статистических весов по потокам продуктов. Например, для представленного на рис.3 процесса с двумя продуктовыми потоками это условие можно представить в виде:

$$K_1 = K_2, \quad (5)$$

Для решения задачи повышения организованности при дифференциации функций ХТС между многопоточными элементами,

принадлежащими разным технологическим маршрутам предлагается два метода распределения затрат: метод уравнивающий и метод выделения (экспертный метод), которые были представлены в общем виде и затем численно подтверждены на примерах двухпоточного процесса теплообмена.

Согласно исходному постулату, существование уравнивающего метода заключается в условии равенства стоимостей единиц информации выходных потоков многопоточного элемента. При этом численно на примере теплообмена было показано, что реально этого равенства возможно достичь при совмещении в одном элементе потоков разных маршрутов (рис.4 «а») и лишь в пределе (асимптотически) возможно достичь при совмещении потоков одного маршрута (рекуперативный теплообмен) (рис.4 «б»).

Одновременно на рис.4 представлено изменение весовых коэффициентов по потокам, которые имеют ту же тенденцию и тот же предел, что и условие уравнивающего метода. Последнее надежно коррелирует с нулевым началом термодинамики, устанавливающим оптимальное условие взаимодействия подсистем внутри замкнутой системы и отвечающее ее максимальным энергосберегающим показателям.

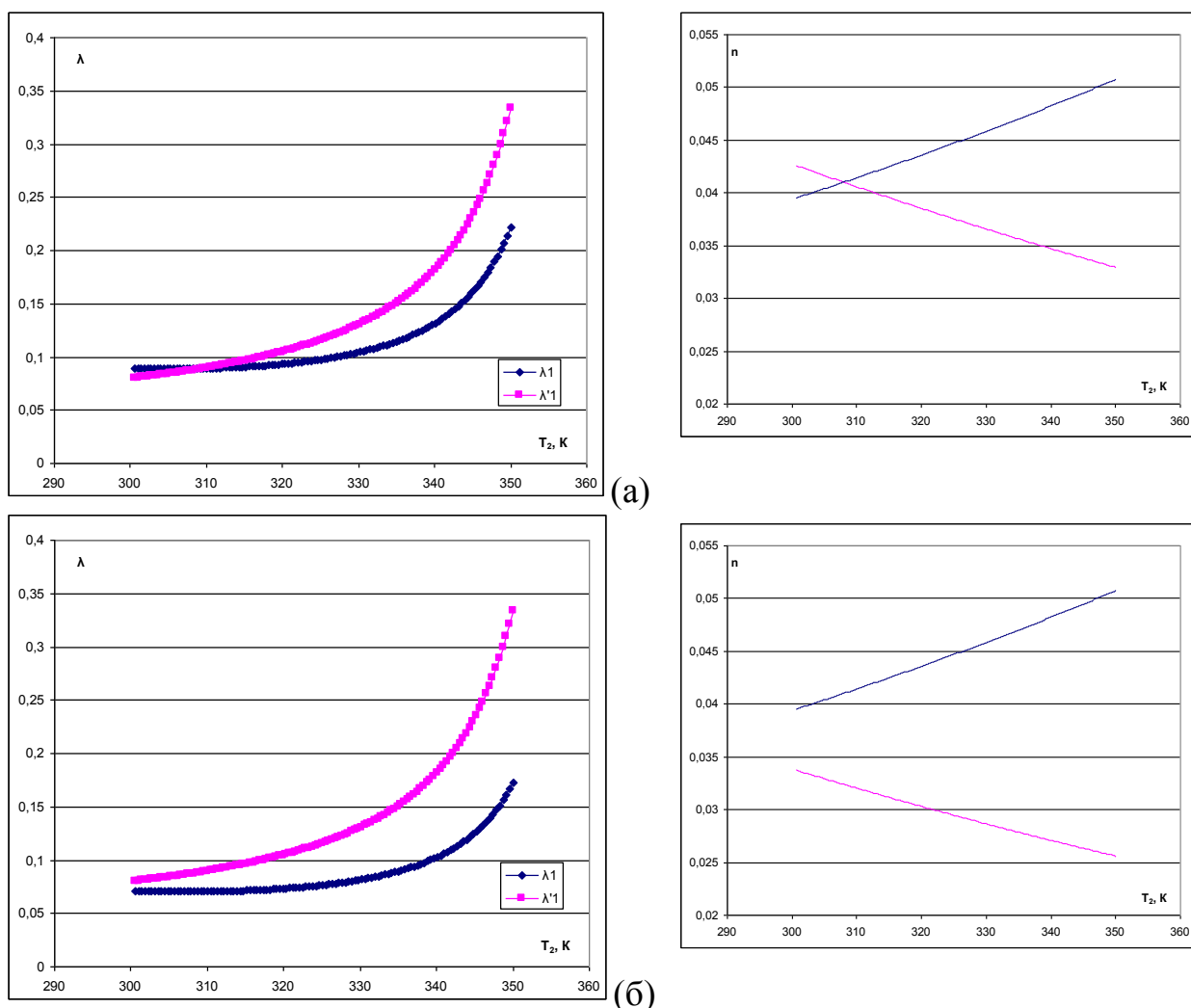


Рис. 4. Существование уравнивающего метода распределения затрат; а – совмещение потоков разных маршрутов (разных ХТС); б – рекуперативный теплообмен.

В развитие уравнительного метода в работе представлено условие оптимально организованной ХТС, содержащей произвольное число теплообменных элементов и имеющей, в силу этого, произвольное число источников и стоков теплоты на основе минимизации рассогласования обобщенных флуктуаций энергии источников и стоков.

В качестве критерия оптимально организованной ХТС выбирается энтропия, выраженная через весовые коэффициенты, или макроэнтропия вида:

$$H_U = -\sum_{i=1}^I n_i \ln n_i, \quad (6)$$

где n_i – весовой коэффициент i -го процесса преобразования энергии, I – общее число элементарных преобразований энергии, максимизация которой, в соответствии с нулевым началом термодинамики, соответствует условию минимума величины

$$\Delta T_{\Sigma} = \Delta T_{\Sigma}^{ucm} - \Delta T_{\Sigma}^{cm}, \quad (7)$$

где $\Delta T_{\Sigma}^{ucm(cm)} = \sqrt{\sum_i \Delta T_{\Sigma i}^2} / L$ – обобщенная флуктуация источника (стока), $\Delta T_{\Sigma i}$ –

флуктуации внутренней энергии i -го процесса, L – число технологических процессов, объединенных в обобщенный источник (сток).

Согласно исходному постулату, существо экспертного метода выделения заключается в возможности при совмещении в многопоточном процессе разных маршрутов уменьшить стоимость единицы информации потока нецелевого продукта за счет исключения доли фактора затрат на данный процесс и перенесения его целиком на стоимость единицы информации потока целевого продукта, в частности, при совмещении различных способов в рамках интегрированной ХТС, что априори позволяет минимизировать критерий усложнения системы соответствующего уровня.

В третьей главе представлена апробация разработанного информационно-термодинамического принципа организации ХТС для оптимизации структуры системы при выборе оптимального НРТ в цикле Ренкина. В качестве исходной выборки рабочих тел, применяемых в цикле Ренкина, были выбраны органические соединения класса легких углеводородов от метана до н-пентана, отвечающие требованию экологической целесообразности. На рис.5 представлена технологическая схема цикла Ренкина, используемого для глубокой рекуперации теплоты очищенных дымовых газов.

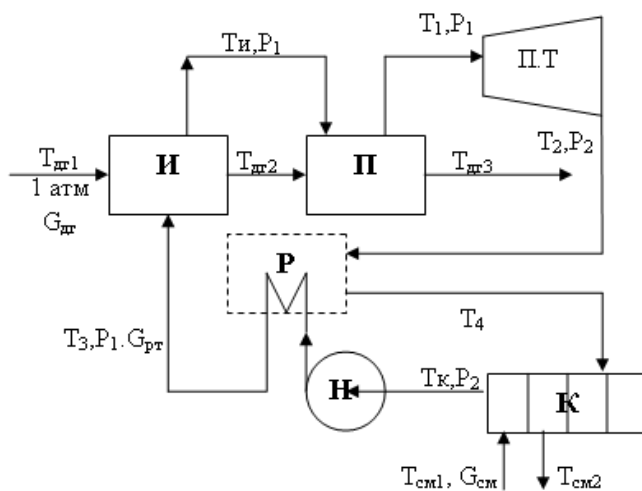


Рис. 5 Схема цикла Ренкина

Поток очищенных от оксидов азота дымовых газов (завершающая стадия очистки) направляется в испаритель (И) и далее в пароперегреватель (П), где происходит изобарный нагрев, испарение, перегрев НРТ до заданной температуры перегрева T_1 за счет остаточной теплоты очищенных дымовых газов. После этого пары НРТ поступают в паровую турбину (ПТ), в которой в результате адиабатного расширения от давления P_1 до P_2 производится работа. Последняя преобразуется в расположенном на одном

валу с турбиной электрогенераторе в электрическую энергию (на схеме не показан). Отработавшие пары НРТ в классическом варианте структуры поступают в конденсатор (К), где конденсируются при T_k . Далее с помощью насоса (Н) конденсат поступает снова в испаритель-пароперегреватель, завершая цикл. В модифицированном варианте структуры отработавшие пары НРТ поступают в регенератор (Р), где за счет их теплового потенциала происходит подогрев жидкого НРТ, нагнетаемого насосом в испаритель. Принимая во внимание, что реальная нагрузка на регенератор, ввиду совмещения в нем разных потоков одного маршрута – потока НРТ, может привести лишь к асимптотическому равенству стоимостей единиц информации потоков, в работе рассмотрен вариант цикла Ренкина с гипотетическим регенератором в соответствии с представленным методом выделения.

На рис. 6 представлены результаты расчета классического и модифицированного циклов Ренкина, а также цикла Ренкина с гипотетическим регенератором и показано, что с усложнением молекулярной структуры НРТ расход НРТ и вырабатываемая мощность для всего диапазона температур дымовых газов уменьшаются, при этом эти показатели для каждого рабочего тела наибольшие в варианте цикла Ренкина с гипотетическим регенератором. Для структуры модифицированного цикла Ренкина показано, что наибольшая степень рекуперации собственных ресурсов теплоты достигается при работе на изопентане.

Сравнительный анализ оптимальных решений для различных вариантов структуры цикла Ренкина по критерию стоимости единицы информации потока продукта представлен в табл. 1, из которой следует, что оптимальным вариантом структуры цикла Ренкина является схема с гипотетическим регенератором и рабочим телом метаном.

Табл. 1

Сравнение оптимальных решений (температуры дымовых газов одинаковые)

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	$4,49 \cdot 10^7$

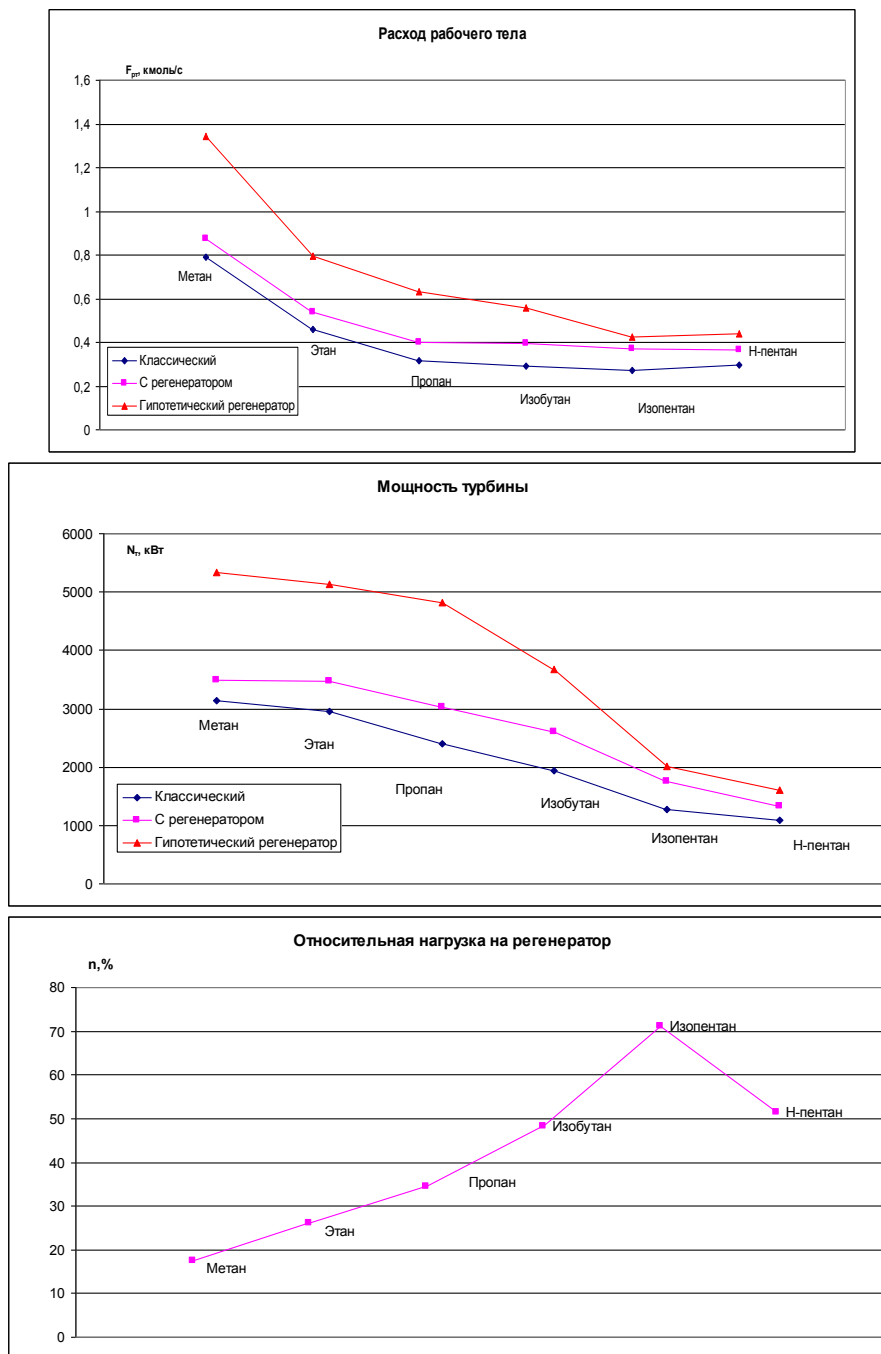


Рис. 6. Результаты расчета различных вариантов структуры цикла Ренкина.

Для подтверждения надежной корреляции выводов на основе информационно-термодинамического принципа с технико-экономическими показателями был проведен сравнительный анализ двух вариантов совмещения способов в интегрированной ХТС. Первый вариант включал совмещение двух способов: цикла Ренкина с регенератором на изопентане и коммерчески используемого способа получения жидкого воздуха на основе цикла Гейландта. Второй вариант представлял собой интегрированную ХТС на основе совмещения цикла Ренкина с гипотетическим регенератором на метане с тем же циклом Гейландта. В первом варианте способы интегрируются лишь частично и только по работе. Во втором варианте способы интегрируются полностью как по работе, так и

по холоду. Расходные показатели (расход дымовых газов и расход воздуха) принимались одинаковыми.

В табл. 2 представлены результаты сравнения вышеуказанных вариантов и показано, что интегрированная ХТС на основе совмещения цикла Ренкина с гипотетическим регенератором и холодильным циклом Гейландта имеет почти в 1,5 раза выше производительность по целевому продукту и существенно меньшие затраты электроэнергии, что указывает на наличие синергетического эффекта при интегрировании.

Табл.2

Сравнение вариантов комбинирования

	Затраты работы, ГДж/год	Затраты на конденсацию в цикле Ренкина, ГДж/год	Затраты на охлаждение в компрессоре, ГДж/год	Выработанный продукт, т/год
Вариант 1	Затраты: 266597.6	241335.4	354359.88	106367
Вариант 2	Затраты: 0 Дополнительная выработка: 72121.7	547419.6	–	141823

На основании полученных данных по сравнению вариантов интегрированной ХТС был сделан вывод о перспективности применения разработанного теоретического аппарата для анализа и оптимизации интегрированных ХТС и решения комплексной задачи: разработки энергосберегающего способа глубокой утилизации теплоты очищенных дымовых газов и глубокого улавливания из них диоксида углерода.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям и решению практической задачи – созданию энергосберегающего способа (схемы) глубокого улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов.

Для подтверждения результатов, полученных при выборе оптимального НРТ в цикле Ренкина в работе были проведены режимные испытания экспериментального образца теплового двигателя мощностью до 6 кВт. В качестве рабочего тела использовался осушенный и охлажденный до комнатной температуры воздух при избыточном давлении в диапазоне от 0,1 до 0,5 МПа. На основании замеров мощности двигателя при изменении входного давления воздуха путем изменения его расхода (выходное давление равно атмосферному) была проведена оценка его эксергетического к.п.д. (рис.7) и установлено, что эти данные согласуются с результатами выбора оптимального НРТ в цикле Ренкина.

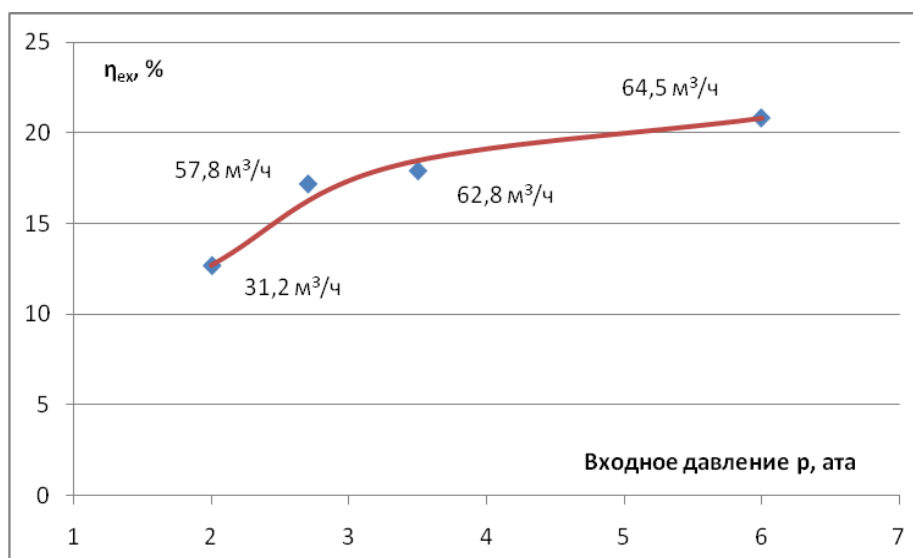


Рис.7 Зависимость эксергетического к.п.д. экспериментального образца теплового двигателя по данным его режимных испытаний

Для оценки реального содержания, а также изменений количеств диоксида углерода, содержащегося в дымовых газах, было проведено обследование производства кокса на промышленной площадке ОАО «Москокс» (г. Видное Московской области). Выбор промышленной площадки был обусловлен наименьшим содержанием диоксида углерода в дымовых газах коксохимических производств, использующих в качестве топлива очищенный коксовый газ. Замеры содержания диоксида углерода в очищенных дымовых газах, произведенные на коксовой батарее №4 (КБ №4), показали, что оно колеблется в пределах от 6,5 до 6,7 об.%, (принято среднее значение 6,6 об.%), что является наименьшим показателем для энергоблоков при использовании любых других видов топлива.

Анализ промышленных способов улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов энергоблоков, интегрируемых с циклом Ренкина с гипотетическим регенератором на метане, имеющим низкую температуру кипения (110 К), указывает на необходимость выбора холодильного (криогенного) цикла, реализующего процесс низкотемпературной десублимации, позволяющий получить продукт (твердый диоксид углерода) высокой чистоты. Схема холодильного цикла предусматривает осушку очищенных дымовых газов, их предварительное охлаждение, сжатие очищенных и осушенных дымовых газов в 3-х ступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением, десублимацию и отделение диоксида углерода и расширение потока очищенных и осушенных дымовых газов, лишенных диоксида углерода, в турбине для выработки дополнительных количеств холода и работы, суммируемой с работой цикла Ренкина. На первом этапе интеграции цикла Ренкина и холодильного цикла на основании уравнительного метода был выбран первый элемент холодильного цикла - десублиматор, в который направляется поток метана цикла Ренкина. В целом по данным оптимизации холодильного цикла были определены: общее давление, указывающее, что данный цикл относится к циклам среднего давления, и распределение давлений по ступеням, исходя из критерия минимума суммарной

мощности на сжатие при условии ограничений по отсутствию десублимации в предварительном и межступенчатых охладителях.

Также на основании расширенной трактовки уравнительного метода для сложной ХТС, имеющей несколько источников и стоков теплоты по критерию минимального рассогласования обобщенных флуктуаций источников и стоков из 6 возможных вариантов топологии был получен оптимальный вариант структуры холодильного цикла, представленный на рис. 8.

Достижение синергетического эффекта в интегрированной ХТС доказано при оценке ее эксергетических показателей. Эксергетический к.п.д. интегрированной ХТС составил 73,56% при показателях совмещаемых способов: цикла Ренкина – 70,63% и холодильного цикла – 50,31%, то есть превышает большее значение, в то время как простое объединение отдельных способов приводит к значению к.п.д. – 35,53%, меньше меньшего значения.

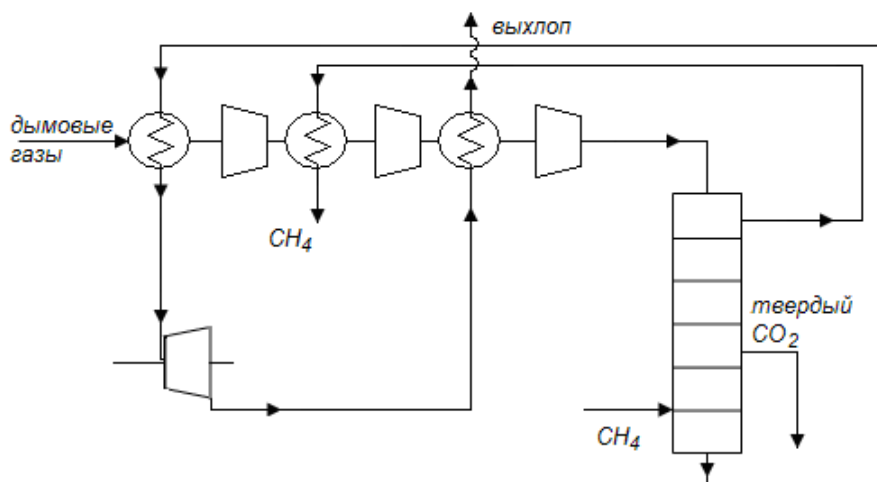


Рис.8. Оптимальная структура холодильного цикла (минимальное рассогласование обобщенных флуктуаций эквивалентных температур источника и стока – 52,9 К).

Практическим результатом применения разработанного принципа стало техническое предложение энергосберегающего блока мощностью 40 МВт без выбросов диоксида углерода, для которого получены следующие характеристики:

- обеспечение процесса глубокого улавливания диоксида углерода (более 99%) целиком за счет собственных (выработанных) ресурсов электроэнергии и холода;
- выработка дополнительного количества электроэнергии в размере 4,6 МВт;
- выработка дополнительного количества холода в размере 2,1 МВт;
- полное исключение теплового загрязнения окружающей среды.

Способ может интегрироваться с основными энергоблоками, использующими различные ископаемые топлива, в качестве замыкающего звена.

Оценка предотвращенного ущерба от выбросов диоксида углерода на основе текущих биржевых цен для энергоблока мощностью 40 МВт составит более 1 млн. Евро в год.

Основные результаты работы и выводы

1. Разработан новый информационно-термодинамический принцип организации объектов химических технологий, позволяющий создавать высокоорганизованные ХТС путем оптимальной дифференциации функций как между потоками многомаршрутных ХТС, так и между потоками многоцелевых ХТП.
2. Разработаны критерии пошагового усложнения ХТС при увеличении в ней количества элементов, имеющие смысл стоимости единицы информации потоков продукта.
3. В рамках принципа предложены два метода распределения затрат в ХТС при дифференциации ее функций: уравнительный метод и метод выделения, позволяющие дифференцировать затраты между потоками многопоточных элементов.
4. Разработана методика расчета составляющих критериев организованности, позволяющая производить количественную их оценку на основе данных материального и теплового балансов.
5. Разработанный теоретический аппарат был использован при выборе оптимального рабочего тела цикла Ренкина для глубокой утилизации теплоты дымовых газов, прошедших стадии очистки от соединений серы и оксидов азота, а также при выборе оптимальной топологии холодильного цикла для глубокого улавливания диоксида углерода, интегрируемого с циклом Ренкина.
6. Работоспособность информационно-термодинамического принципа была подтверждена на тестовом примере построения интегрированной ХТС на основе совмещения циклов Ренкина и Гейландта (получение жидкого воздуха).
7. На основе режимных испытаний экспериментального образца теплового двигателя на воздухе и оценки его эксергетического к.п.д. установлена надежная корреляция с результатами выбора оптимального рабочего тела в цикле Ренкина.
8. Проведено обследование производства кокса на промышленной площадке ОАО «Москокс» (г. Видное Московской области) и установлены режимные параметры работы коксовых батарей и пределы изменения количества диоксида углерода в дымовых газах.
9. Разработан не имеющий аналогов энергосберегающий блок (ХТС) глубокого улавливания диоксида углерода из очищенных дымовых газов мощностью 40 МВт для объектов электроэнергетики, металлургии, химии, нефтехимии, коксохимии и других.
10. На основе оценки эксергетического к.п.д. разработанного энергоблока в сравнении с ХТС, объединяющей аналогичные отдельные способы доказано, что в разработанном технологическом решении достигается синергетический эффект тригенерации.
11. Проведена оценка предотвращенного ущерба от выбросов диоксида углерода на основе текущих биржевых цен Мирового углеродного рынка, которая для энергоблока заданной мощности составит более 1 млн. Евро в год.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

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. 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.
5. Налетов, В.А. Получение электроэнергии, холода и диоксида углерода из дымовых газов: Заявка на способ № 2011146134, МПК F25B11/00, F25B29/00 от 15.11. 2011 г./ В.А. Налетов, М.Б. Глебов, А.Ю. Налетов.