

РАМАЗАНОВ ЭЛЬДАР РАМАЗАНОВИЧ

**МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ БЕСКОМПРЕССОРНЫХ
ПАРОВАЗОВЫХ УСТАНОВОК С ПОЛНЫМ УЛАВЛИВАНИЕМ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА
ВНУТРИ ЦИКЛА**

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Объединённый институт высоких температур РАН» (ОИВТ РАН)

Научный руководитель: Синкевич Михаил Всеволодович
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории № 10.1 «Газотурбинные технологии» ОИВТ РАН, доцент кафедры энергетического машиностроения инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» (РУДН)

Официальные оппоненты: Кейко Александр Владимирович
доктор технических наук,
главный научный сотрудник ФГБУН Институт энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН)

Рогалев Андрей Николаевич
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой инновационных технологий наукоемких отраслей Института энергоэффективности и водородных технологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Белова Ольга Владимировна
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры Э5 «Вакуумная и компрессорная техника» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Защита диссертации состоится ____ _____ 2022 года в ____:____ на заседании диссертационного совета ПДС 2022.010 по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Объявление о защите и автореферат диссертации размещены на сайтах <http://vak2.ed.gov.ru/> и <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан ____ _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.010
кандидат технических наук

О.Е. Самусенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Совершенствование технологий генерации энергии, несмотря на высочайшие достижения в этой области, остается и всегда будет оставаться одной из наиболее приоритетных задач человечества. К этим технологиям предъявляются новые требования. Наряду с высокой тепловой экономичностью, в настоящее время требуется минимизация воздействия на окружающую среду. Реализация любых доступных технологий предотвращения выбросов CO_2 от современных энергетических установок неизбежно сопровождается удорожанием производимой энергии. Поэтому ведется поиск технологий, заключающихся не в надстройке действующих энергетических установок оборудованием для улавливания CO_2 , а в разработке принципиально новых термодинамических циклов и создании нового оборудования, реализующего эти циклы. Одна из наиболее перспективных схем, особенно для совместного производства тепла и электричества, получила название «бескомпрессорная парогазовая установка» (далее – БКПГУ), а термодинамический цикл, лежащий в ее основе, называется «цикл БКПГУ» (эта схема принята в качестве объекта для исследования).

Создание современного высокоэффективного энергогенерирующего оборудования – сложная техническая задача, требующая обработки большого количества информации и системного подхода к формированию критериев принятия решений и поиску оптимальных решений. Требуется математический аппарат, описывающий вновь создаваемое оборудование (математические модели, как отдельных элементов, так и энергетических комплексов в целом). Для практического использования такой математический аппарат должен быть реализован в программно-вычислительном комплексе, позволяющем быстро получать адекватные результаты расчетов. Создание такого математического аппарата и реализующего его программно-вычислительного комплекса является актуальной научной задачей, имеющей большое практическое значение.

Степень разработанности темы исследования

Термодинамическими циклами, основанными на технологии улавливания CO_2 при кислородном сжигании топлива, занимаются достаточно давно, но особенно актуальным это направление стало с появлением задач «нулевых» выбросов углекислого газа в атмосферу.

В последнее время активно исследуются альтернативные термодинамические циклы, позволяющие без существенных энергетических затрат выводить из цикла углекислый газ, образовавшийся в результате сгорания топлива. Одна из ключевых задач этих исследований – выбор термодинамических параметров. Циклы, находящиеся на стадии разработки: пароводяные циклы Ренкина с рекуперацией газообразного углекислого газа (Water-steam Rankine cycle with a steam- CO_2 recuperative – reheat cycle, Water-steam Rankine cycle with a steam- CO_2 recuperative – reheat cycle and a topping Brayton cycle), цикл Аллама-Z (Allam-Z cycle), циклы МАТИАНТ (MATIANT, E-MATIANT, CC-MATIANT), полужакрытый цикл с кислородным сжиганием топлива (SCOC-CC), мембранный цикл ZEITMOP, цикл COOLCEP-S, цикл Novel O_2/CO_2 , цикл LNG quasi-combined, мембранные циклы AZEP (AZEP 100%, AZEP 85%), цикл OXYF-REF, цикл ZE-SOLRGT, циклы Graz, S-Graz. Циклы, реализованные в пилотных образцах: цикл CES, проект Callide Oxyfuel, цикл Аллама.

На современном уровне к выбору параметров требуется системный подход, а для поиска оптимальных решений привлекается математическое моделирование. Математическому моделированию энергетических установок, основанных на сжигании органического топлива, таких как ГТУ, ПТУ или ПГУ, и разработке программно-вычислительных средств на их основе, уделяется большое внимание. Как правило, авторы претендуют на универсальность своих моделей и вычислительных средств, но обилие предлагаемых программных продуктов свидетельствует о том, что универсального средства нет. Решаются множество задач – от моделирования отдельных элементов схем различной сложности и общей математической модели установки до усовершенствований и повышения эффективности цикла.

Для моделирования и проектирования стационарных энергетических ГТУ и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) используются различные классы программных продуктов инженерного анализа:

1) Программные продукты, созданные на базе универсальных средств: Dymola (основан

на языке проектирования Modelica), Simulink (интегрирован в среду MATLAB), TRANSEO (основана на среде MATLAB), PROOSIS (основан на системе EcosimPro) и др.

2) Специализированные программные продукты: DVIgWT, EngineSim, GasTurb, Graphical Engine Cycle Analysis Tool (GECAT), Gas turbine Simulation Program (GSP), Numerical Propulsion System Simulation (NPSS), TERA, Uni_TTF, WebEngine, АСТРА.

В качестве основных допущений предлагаемых математических моделей, моделирующих традиционные циклы, рабочее тело рассматривается как идеальный газ, а изобарная теплоемкость зависит только от температуры (не учитывается зависимость от давления). Главная особенность цикла БКПГУ заключается в том, что рабочее тело состоит из нескольких компонент: топливо, чистый кислород, рециркулирующие углекислый газ и/или водяной пар, что является определенной новизной и существенным отличием от традиционных энергетических циклов. Также состав рабочего тела в различных точках цикла переменный. В отдельных точках это чистые вещества, а в других – смесь. При этом рабочее тело в разных точках цикла может быть жидким, газообразным или в сверхкритическом состоянии. Необходимо учитывать фазовые переходы в протекающих термодинамических процессах. Поэтому для параметрической оптимизации цикла БКПГУ использовать существующие математические модели и программные системы традиционных энергоустановок различных схем не представляется возможным.

Цель исследования

Разработка методики параметрической оптимизации бескомпрессорных парогазовых установок с полным улавливанием углекислого газа внутри цикла.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ тенденций развития теплоэнергетической отрасли.
2. Разработка способа представления термодинамических свойств чистых веществ в виде электронных таблиц.
3. Разработка способа представления термодинамических свойств рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ, используя свойства чистых веществ в виде электронных таблиц.
4. Разработка способа описания термодинамических процессов рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ, используя свойства чистых веществ в виде электронных таблиц.
5. Разработка математических моделей отдельных компонент и БКПГУ в целом.
6. Разработка концепции параметрической оптимизации энергетических комплексов, базирующихся на цикле БКПГУ, на основе системного анализа.
7. Определение оптимальных параметров пилотной электростанции, реализованной по циклу БКПГУ, на стадии технического предложения.

Объект исследования

Новая схема энергетической установки, работающей по технологии кислородного сжигания топлива и обеспечивающей вывод образовавшегося в результате сгорания топлива углекислого газа в жидком виде, удобном для его последующей транспортировки, переработки или для захоронения. БКПГУ с полным улавливанием углекислого газа внутри цикла.

Предмет исследования

Методика выбора параметров энергетических установок, выполненных по новой, перспективной схеме. Создание математического аппарата, позволяющего описывать как отдельные части, так и всю БКПГУ в целом, а также анализировать и оптимизировать термодинамические параметры энергетической установки принципиально нового схемного решения.

Достоверность полученных результатов обусловлена тем, что:

- методы исследований базируются на фундаментальных законах исследуемых физических явлений;
- для описания термодинамических свойств использованы общепринятые, сертифицированные базы данных;
- тестовые расчеты показали хорошее совпадение результатов проведенных расчетов с

привлеченными для сравнения опубликованными данными.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Установлено, что предложенные уравнения замены переменных обеспечивают требуемую точность при умеренной густоте интерполяционной сетки и обеспечивают высокую скорость вычислительного процесса.

2. В обосновании приемлемости принятых допущений при описании свойств рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ.

3. Обоснована целесообразность прямого численного интегрирования уравнения состояния при описании термодинамических процессов рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ.

4. Построены математические модели, описывающие термодинамические параметры принципиально новых энергетических комплексов на базе инновационного термодинамического цикла, как отдельных компонент, так и БКПГУ в целом.

5. Разработана концепция поиска оптимальных параметров.

6. Установлены термодинамические параметры реализованной по циклу БКПГУ опытной пилотной электростанции, которые на стадии технического предложения можно принять как оптимальные.

Теоретическая значимость работы

Разработанная методика, математическое описание термодинамических свойств, элементов энергетической установки и БКПГУ в целом, а также созданные программно-вычислительные средства послужат дальнейшему развитию научных исследований направленных на совершенствование технологий генерации тепла и электричества.

Практическая значимость работы

1. Предлагаемая методика параметрической оптимизации бескомпрессорных парогазовых установок с полным улавливанием углекислого газа внутри цикла будет использована при проведении проектных работ направленных на создание новых эффективных объектов генерации тепла и электричества.

2. Рассмотренный пример оптимизации параметров опытной пилотной электростанции, позволил выбрать оптимальные параметры термодинамического цикла и сформулировать основные требования к составным частям проектируемой установки в рамках работ по гранту РФ «Новая концептуальная схема бескомпрессорной парогазовой установки, обеспечивающая высокую топливную эффективность и практически полное улавливание диоксида углерода из продуктов сгорания: разработка фундаментальных научных основ в обоснование практической реализации».

3. Разработанные программно-вычислительные модули, предназначенные для работы в составе вычислительных комплексов, моделирующих энергетические установки, выполненные по кислородно-топливной технологии, могут быть использованы для различных инженерных задач и в учебных процессах.

Методология и методы исследования

Работа базируется на методах математического моделирования и системного анализа при выборе оптимальных решений. Основу разработанных математических моделей представляют фундаментальные законы исследуемых физических явлений. Для описания термодинамических свойств использованы общепринятые, сертифицированные базы данных. Для организации вычислительного процесса использованы численные методы решения систем уравнений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Способ представления термодинамических свойств чистых веществ в виде электронных таблиц.

2. Способ представления термодинамических свойств рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ, использующий свойства чистых веществ в виде электронных таблиц.

3. Способ описания термодинамических процессов рабочего тела, состоящего из

изменяющейся смеси чистых веществ, использующий свойства чистых веществ в виде электронных таблиц.

4. Математическая модель БКПГУ.

5. Концептуальные подходы к параметрической оптимизации энергетических комплексов, базирующихся на цикле БКПГУ, на основе системного анализа.

6. Результаты параметрической оптимизации пилотной электростанции, реализованной по циклу БКПГУ, на стадии технического предложения.

Апробация результатов исследования

Результаты диссертационной работы докладывались на:

1. Международной научно-практической конференции «Технологии машиностроения, энергетики и наземного транспорта», Москва, РУДН, 2019 г.

2. Международной научной конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» (ТТННП 2019), Омск, 2019 г.

3. Международной конференции «Энергетика XXI века: устойчивое развитие и интеллектуальное управление», Иркутск, 2020 г.

4. V Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ 2020), Ялта, 2020 г.

5. Всероссийской молодежной конференции с международным участием «Системные исследования в энергетике – 2021», Иркутск, 2021 г.

6. VI Всероссийской конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (ТФГ2021) и научной молодёжной школе «Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы» (ТФГСВ2021), Севастополь, 2021 г.

Диссертация выполнена в рамках работы над инициативным научным проектом № 19-19-00558 по теме «Новая концептуальная схема бескомпрессорной парогазовой установки, обеспечивающая высокую топливную эффективность и практически полное улавливание диоксида углерода из продуктов сгорания: разработка фундаментальных научных основ в обоснование практической реализации». Работа частично выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00558).

Личный вклад автора

Непосредственное участие автора заключается:

1. В обзоре литературы и анализе опубликованной информации, связанной с направлениями настоящего исследования;

2. В разработке методик представления термодинамических свойств рабочего тела и описания термодинамических процессов;

3. В разработке математической модели БКПГУ;

4. В разработке концептуальных подходов к параметрической оптимизации энергетических комплексов, базирующихся на цикле БКПГУ;

5. В получении результатов параметрической оптимизации пилотной электростанции, реализованной по циклу БКПГУ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав основного текста, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 176 страницах, содержит 55 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 96 наименований и 30 страниц с приложениями.

Содержание диссертации соответствует п.п. 1, 2, 3, 4, 5, 12 Паспорта научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен анализ основных тенденций развития энергогенерирующих комплексов.

Энергетический сектор считается одним из главных источников выбросов парниковых газов, включая метан и CO_2 . На сегодняшний день нет ни технологических, ни экономических предпосылок, позволяющих отказаться от органического топлива и перейти на возобновляемые источники энергии, а атомная энергетика вызывает сомнения в плане долгосрочной безопасности. Современная энергетика базируется преимущественно на сжигании органического топлива, которое, по основным прогнозам, останется главным энергетическим ресурсом до середины нынешнего века. Поэтому защиту окружающей среды при производстве электроэнергии все больше связывают с необходимостью создания новых технологий, позволяющих улавливать углекислый газ при добыче и переработке углеводородов. Таким образом, большое значение приобретают технологии, способные бороться с эмиссией углекислого газа при производстве энергии на базе органических топлив.

Одно из наиболее перспективных направлений энергетических установок с улавливанием CO_2 связано с технологией кислородного сжигания топлива. При сжигании углеводородного топлива в среде чистого кислорода образуется смесь углекислого газа с водяным паром. Такую смесь просто разделить на составляющие. Водяной пар конденсируется и в газообразной фазе остается почти чистый углекислый газ. Анализ литературных источников показал, что в этом направлении ведутся интенсивные работы. Предлагаются различные термодинамические циклы, имеющие те или иные преимущества. В качестве объекта исследования был выбран термодинамический цикл и схема его реализующая, получившие название бескомпрессорная парогазовая установка (БКПГУ) и цикл БКПГУ. Выбор обусловлен тем, что эта схема наиболее эффективна при совместном производстве тепла и электричества, что исключительно важно для России, где традиционно сильно развито совместное производство тепла и электричества.

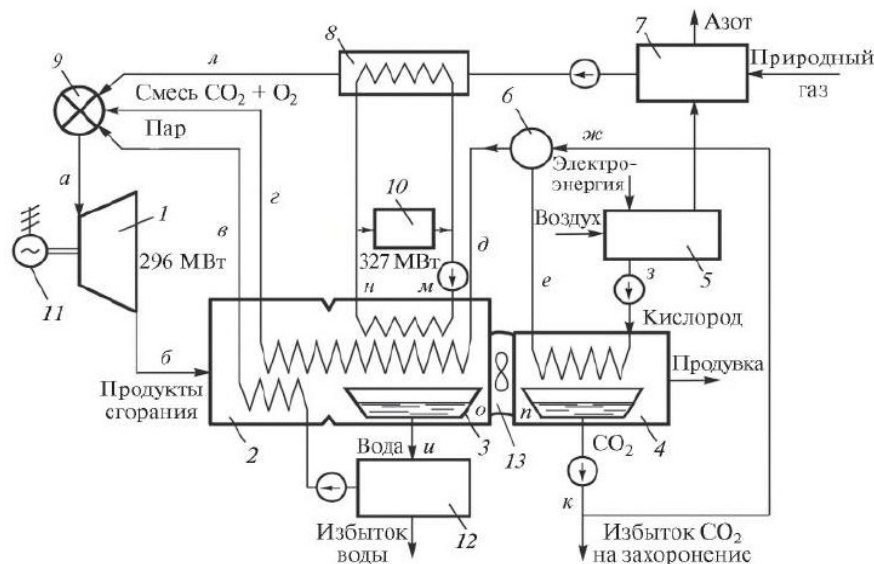


Рис. 1. Принципиальная схема БКПГУ

На рис. 1 показана принципиальная схема БКПГУ, которая работает следующим образом.

Сжиженный природный газ, произведенный в ожижителе метана 7, газифицируется в подогревателе метана 8 и поступает в камеру сгорания 9, где сжигается в смеси чистого кислорода, произведенного в цехе разделения воздуха 5, водяного пара и углекислого газа. Образовавшиеся продукты сгорания поступают в парогазовую турбину 1, расширяются и последовательно проходят секции охлаждения в котле-утилизаторе 2, в котором производится

водяной пар умеренных параметров, регенеративного подогрева смеси CO_2 и O_2 , полученной в смесителе CO_2 и O_2 6, конденсации водяного пара в конденсаторе – подогревателе сетевой воды 3, а также блок ожижения CO_2 4. Механическая энергия, вырабатываемая парогазовой турбиной, преобразуется в электрическую энергию в электрогенераторе 11, тепловая энергия выдается в теплотель 10. Сконденсированная вода проходит блок водоочистки 12 и возвращается в цикл. Повышение всех компонент рабочего тела производится в жидком агрегатном состоянии насосным оборудованием, таким образом, из схемы исключены газовые компрессоры, за исключением изотермического компрессора 13, служащего для повышения давления углекислого газа перед ожижением для исключения образования льда. В блоке ожижения CO_2 предусмотрена продувка избытка кислорода, примесных газов и остатка водяных паров.

Дальнейшее развитие этой схемы требует обстоятельных расчетных исследований. Анализ существующих программно-вычислительных средств показал, что таких средств, учитывающих все особенности БКПГУ нет.

Главные из этих особенностей заключаются в том, что рабочее тело состоит из нескольких компонент: топливо, чистый кислород, рециркулирующие углекислый газ и/или водяной пар, что является определенной новизной и существенным отличием от традиционных энергетических циклов. Также состав рабочего тела в различных точках цикла переменный. В отдельных точках это чистые вещества, а в других – смесь. При этом рабочее тело в разных точках цикла может быть жидким, газообразным или в сверхкритическом состоянии. Необходимо учитывать фазовые переходы в протекающих термодинамических процессах.

Анализ состояния дел по выбранному направлению исследования позволил сформулировать цель исследования и определить задачи исследования.

Вторая глава посвящена описанию способа представления термодинамических свойств веществ, входящих в состав рабочего тела БКПГУ, в виде электронных таблиц.

Важнейшей задачей описания цикла БКПГУ является способ представления термодинамических свойств рабочего тела. Теплофизические свойства большинства веществ можно найти в справочной литературе в табличной форме. Для построения этих таблиц имеются аппроксимирующие системы уравнений, базирующиеся на экспериментальных данных. Но использовать такую форму представления теплофизических свойств в программно-вычислительных комплексах крайне неудобно. Справочная литература не приспособлена к обработке вычислительной техникой, а системы уравнений слишком громоздки и требуют слишком много вычислений. Для широких диапазонов изменения расчетной области простыми полиномами не удастся дать достаточно точное описание. Поэтому был предложен способ представления термодинамических свойств веществ, входящих в состав рабочего тела, в виде электронных таблиц.

Для моделирования свойств чистых веществ были приняты следующие допущения: не рассматривается возможность образования твердой фазы, точка отсчета была выбрана так, что если экстраполировать значения энтальпий жидкой фазы до температуры 0°K , то значение энтальпии становится тоже равной нулю.

Исходные зависимости

$$Z = f(P, T), \quad (1)$$

где Z – вектор значений интересующих свойств; P – давление; T – температура преобразовываются в следующий вид

$$Z = f(IP, IT), \quad (2)$$

где IP и IT – новые переменные, которые выражаются через давление и температуру следующим образом:

$$IP = \log((P/P_0)^a) \quad (3)$$

$$IT = \log((T/T_0)^b), \quad (4)$$

где P_0 – давление приведения, принимается равным давлению в критической точке; T_0 – температура приведения, переменная величина, зависящая от давления (если давление выше критического, принимается равной температуре в критической точке, если давление ниже

критического, принимается равной равновесной температуре фазового перехода при соответствующем давлении); a и b – коэффициенты, определяющие густоту сетки.

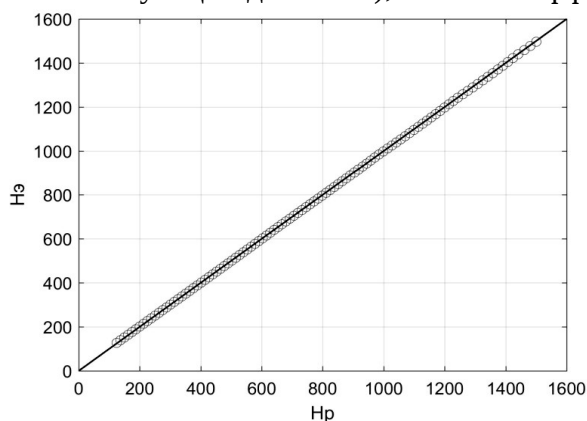


Рис. 2. Соответствие расчетных энтальпий H_2O со справочными данными по изобаре в жидкой области

При наличии части рабочего тела в жидкой фазе, не учитывается растворимость веществ, находящихся в газообразной фазе, в веществах, находящихся в жидкой фазе. Часть рабочего тела, находящаяся в жидкой фазе, является механической смесью отдельных жидкостей, не вступающих между собой ни в какие химические реакции. Равновесное фазовое состояние каждого отдельно взятого вещества рассматривается так, как если бы это вещество было единственным с давлением, равным парциальному давлению этого вещества в смеси. Температура принимается единой для всех веществ, входящих в смесь, независимо от фазового состояния. Исходя из решаемых задач, не рассматривается возможность образования твердой фазы. В тех областях, где возможно появление твердой фазы, рассчитываются так, как если бы жидкая фаза переохлаждалась без фазового перехода. С учетом принятых допущений состояние чистых веществ описывается электронными таблицами:

$$Z_j(D_{gj}, D_{lj}, V_{gj}, V_{lj}, I_{gj}, I_{lj}, \dots) = f(P_j, T_j), \quad (5)$$

где Z – вектор динамических параметров, включающий D – массовую долю, V – удельный объем, I – энтальпию, но не ограниченный перечисленными параметрами; P и T – соответственно давление и температура (тоже входят в вектор Z); индексы g и l – соответственно указывают газообразную или жидкую фазу, а j – порядковый номер чистого вещества, входящего в смесь.

Система уравнений, описывающая состояние смеси:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \sum_{j=1}^m (I_{gj} \cdot D_{gj}) + \sum_{j=1}^m (I_{lj} \cdot D_{lj}) \\ P = \sum_{j=1}^m P_j \\ T_j = T \\ V = \sum_{j=1}^m (V_{gj} \cdot D_{gj}) / m + \sum_{j=1}^m (V_{lj} \cdot D_{lj}) \\ Z_j = f(P_j, T_j) \end{array} \right. \quad (6)$$

Это сложная система нелинейных уравнений в неявной форме, решение которой усложняется тем, что не все частные производные являются неразрывными функциями. Например, $\partial I / \partial T$ для чистого вещества на границе фазового перехода из конечной величины уходит в бесконечность. Решается эта система уравнений численным методом. Быстрый

процесс сходимости был достигнут за счет того, что первым действием определяется, в какой области находятся корни этого уравнения. Рассматриваются четыре возможных областей. Первая область, когда все входящие в состав смеси вещества находятся только в газообразной фазе. Вторая область, когда все входящие в состав смеси вещества находятся только в жидкой фазе. Третья область, когда хотя бы одно из веществ, входящих в смесь, находится в равновесном состоянии и имеет и жидкую и газообразную фазы. И четвертая область, когда все входящие в смесь вещества находятся в сверхкритическом состоянии. Внутри каждой из выделенных областей хорошая сходимость обеспечивается методом Ньютона.

Для моделирования термодинамических процессов была получена следующая дифференциально-алгебраическая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I = \sum_{j=1}^m (I_{g_j} \cdot D_{g_j}) + \sum_{j=1}^m (I_{l_j} \cdot D_{l_j}) \\ P = \sum_{j=1}^m P_j \\ T_j = T \\ V = \sum_{j=1}^m (V_{g_j} \cdot D_{g_j}) / m + \sum_{j=1}^m (V_{l_j} \cdot D_{l_j}) \\ Z_j = f(P_j, T_j) \\ dU + P \cdot dV + V \cdot dP + dQ = 0 \end{array} \right. \quad (7)$$

Для однозначности накладывается дополнительное условие, определяющее термодинамический процесс. Например, для адиабатического процесса $dQ = 0$. С практической точки зрения, наибольший интерес представляет процесс, в котором часть произведенной работы превращается в тепло. Это условие может быть выражено следующим уравнением:

$$dQ = (1 - \eta_n) \cdot dA \quad (8)$$

где η_n – к.п.д. процесса (мера необратимости процесса).

Таким образом, предложена методика определения параметров состояния рабочего тела, состоящего из смеси веществ. При этом описание чистых веществ, из которых состоит рабочее тело, выполнено в виде электронных таблиц. Предложена методика моделирования термодинамических процессов с использованием свойств веществ, представленных в виде электронных таблиц (интегрирование переходного процесса из одного термодинамического состояния в другое). Предложенные методики реализованы в виде программно-вычислительных модулей. Разработанные программно-вычислительные модули, в первую очередь, предназначены для работы в составе вычислительных комплексов, моделирующих энергетические установки, выполненные по кислородно-топливной технологии. В частности, для исследования энергетических установок, выполненных по циклу БКПГУ. Но, кроме этого, они могут быть эффективно использованы там, где рабочее тело не может быть описано как идеальный газ. В качестве примера таких случаев можно привести установки, предусматривающие влажное сжатие (где процесс повышения давления изотермируют за счет испарения жидкости) или ступени паровых турбин, работающих во влажном паре.

Третья глава посвящена разработке комплексной математической модели БКПГУ, описывающая термодинамические процессы и термодинамический цикл в целом.

Любая энергетическая установка может быть представлена неким условным набором компонент. Математическое описание этих компонент и их взаимодействия и составляет сущность математической модели установки. Условное деление на компоненты может быть разнообразным. Главным образом, отличие будет в детализации этого набора компонент. Соответственно, будут разнообразные математические модели, отличающиеся детализацией расчета. В представляемой работе, на ранней стадии исследований, был выбран относительно

невысокий уровень детализации расчета, но вполне достаточный для решения поставленных задач.

Все основные части установки рассматриваются как «черные ящики» (рис. 3).

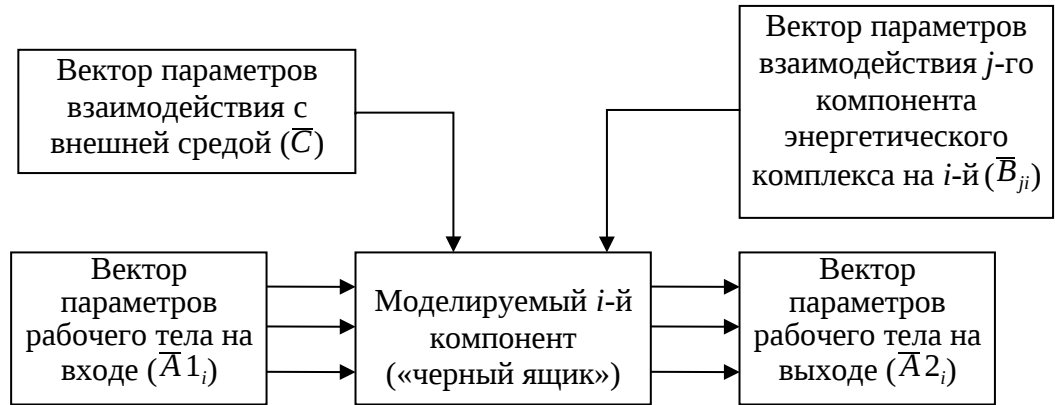


Рис. 3. Объект исследования в общем виде

Каждая из этих компонент описывается системой уравнений. Основа этих уравнений законы сохранения (закон сохранения энергии, закон сохранения вещества, закон сохранения количества движения, уравнение сплошности и др.). Кроме фундаментальных законов, эти уравнения включают в себя показатели и характеристики моделируемых компонент. Системы уравнений, описывающие отдельные части энергетического комплекса, объединяются в общую систему уравнений, которая дополняется уравнениями, определяющими взаимосвязи между отдельными частями энергетического комплекса.

Разрабатываемая математическая модель обладает универсальностью, что позволяет, по мере необходимости, в дальнейшем переходить на более глубокие уровни детализации расчета.

При моделировании приняты следующие основные допущения, упрощающие задачу:

- Топливо – чистый метан CH_4 .
- Для моделирования термодинамических свойств рабочего тела используются предложенные способы представления термодинамических свойств чистых веществ в виде электронных таблиц, представления термодинамических свойств рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ, и описания термодинамических процессов рабочего тела.

- До процесса горения каждая компонента рабочего тела рассматривается отдельно, как чистое вещество.

- После процесса горения в камере сгорания рабочее тело представляет смесь газов.

- Сопротивление движению рабочего тела различными частями установки (газоходы, трубопроводы, арматура, форсунки и др.) учитывается коэффициентом восстановления полного давления (отношение полного давления на выходе к полному давлению на входе соответствующего оборудования).

- Пренебрегается потерями тепла от горячих корпусов оборудования, входящего в состав установки.

В качестве примера приводятся системы уравнений для наиболее характерных частей моделируемых установок:

1) Камера сгорания описывается:

$$I_{\text{вых}} = \sum I_{i\text{вх}} + H_u \cdot \eta_{\text{KC}} - I_o, \quad (9)$$

где коэффициент полноты сгорания топлива принят постоянным на всех исследовавшихся режимах работы;

2) Парогазовая турбина:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \left(\int_{V_1}^{V_2} P dV + \int_{P_1}^{P_2} V dP \right) \cdot \eta_m; \\ I_2 = I_1 + A; \\ M_{e2} = f(I_2, P_2). \end{array} \right. \quad (10)$$

3) Для принятого уровня детализации расчета теплообменные аппараты описываются системой уравнений, в основе которых тепловой баланс и условие выполнения второго закона

термодинамики (на каждом участке процесса теплообмена температура греющего теплоносителя должна быть выше температуры подогреваемого теплоносителя). Исходя из этого условия, можно найти максимальное теоретически возможное количество тепла, которое можно было бы передать ΔI_t . Реальные теплообменные аппараты передают меньшее количество тепла. Это учитывается коэффициентом тепловой эффективности теплообменного аппарата θ . Тогда система уравнений, описывающая теплообменный аппарат, может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \Delta I_z = \Delta I_x = \Delta I_m \cdot \theta; \\ I_{z2} = I_{z1} + \Delta I_z; \\ I_{x2} = I_{x1} + \Delta I_x; \\ T_{z2} = f(I_{z2}, P_{z2}); \\ T_{x2} = f(I_{x2}, P_{x2}). \end{cases} \quad (11)$$

Если теплообменный аппарат контактного типа (теплоносители находятся в непосредственном контакте и кроме теплообменных процессов протекают еще массообменные процессы), то появляются еще уравнения, описывающие массообменные процессы. При этом принят ряд допущений, главные из которых заключаются в следующем. В аппарате работают два теплоносителя. Греющий теплоноситель находится в газообразной фазе, охлаждающий теплоноситель находится в жидкой фазе. В процессе охлаждения часть греющего теплоносителя переходит из газообразной фазы в жидкую. Предполагается, что в аппарате происходит полное отделение жидкой фазы от греющего теплоносителя и на выходе из аппарата он представляет сухой газ, а вся жидкая фаза переходит в охлаждающий теплоноситель. Пренебрегается тем (в расчетной модели не учитывается), что отдельные компоненты греющего теплоносителя растворяются в охлаждающем теплоносителе. Считается, что фазовый переход происходит в равновесном состоянии так, что парциальное давление водяного пара полностью соответствует температуре насыщения.

Все системы уравнений, описывающие отдельные части установки, объединяются в общую систему уравнений. В векторной форме она может быть представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \bar{A}1_i = \bar{A}2_{i-1}; \\ \bar{A}2_i = f(\bar{A}1_i, \bar{B}, \bar{C}); \\ \bar{A}\bar{B} = f(P, T, f); \\ \bar{B}j_i = \bar{B}ij. \end{cases} \quad (12)$$

где

$\bar{A}1_i [P, T, G, I, S, \dots]$ – вектор параметров рабочего тела в расчетном сечении на входе в i -ый компонент энергетического комплекса;

$\bar{A}2_i [P, T, G, I, S, \dots]$ – вектор параметров рабочего тела в расчетном сечении на выходе из i -ого компонента энергетического комплекса;

$\bar{B}j_i [N, n, G, I, S, \dots]$ – вектор параметров взаимодействия j -ого компонента энергетического комплекса на i -ый;

\bar{C} – вектор параметров взаимодействия с внешней средой;

$\bar{A}\bar{B}$ – вектор термодинамических свойств веществ, из которых состоит рабочее тело, где f – фактор, учитывающий фазовое состояние вещества на линии насыщения;

i и j изменяются от 1 до n , где n – общее количество моделируемых компонент, из которых состоит энергетический комплекс.

В результате все приводится к большой системе нелинейных алгебраических уравнений с корнями, выраженными в неявной форме. Для решения этой системы уравнений был применен комбинированный метод численного решения алгебраических уравнений. Ряд корней определяется методом простых последовательных приближений. Выбор корней, которые определяются простыми последовательными приближениями, производится на основании знаний о сущности физических явлений, описываемых уравнениями. При этом используется критерий $A = \Delta X_p / \Delta X_n$, где ΔX_n – некое приращение, данное искусственно рассматриваемому

корню, а ΔX_p – результирующее приращение рассматриваемого корня, полученное в результате решения всей системы уравнений при прочих равных условиях (значениях корней) искусственно. Если этот критерий существенно меньше единицы во всем диапазоне возможных значений корня, то при простых итерациях будет удовлетворительная сходимость. Все уравнения были разделены на группы (цепочки) так, что в каждой цепочке, задавшись одним корнем, можно было последовательно решить все уравнения в цепочке. По сути, таким образом, была сокращена размерность системы уравнений. Корни, которые задаются в этих цепочках, находятся с применением метода Ньютона.

Разработанная комплексная математическая модель БКПГУ реализована в программно-вычислительном комплексе.

Четвертая глава посвящена разработке концептуальных подходов к системному анализу и параметрической оптимизации энергетических комплексов, базирующихся на цикле БКПГУ.

При создании новой техники, особенно на ранних стадиях, очень важно находить оптимальные решения. При этом приходится обрабатывать большие потоки информации, а решения приходится принимать в условиях существенной неопределенности. Поэтому в работе было уделено внимание системному подходу к исследованию взаимосвязей между термодинамическими параметрами рассматриваемой установки и выбору оптимальных решений.

Как правило, главной целью разработчиков новых изделий является достижение конкурентных качеств. Так как для любого изделия имеется большой перечень качеств, определяющих его привлекательность, задача достижения конкурентоспособности изделия является многокритериальной. Для электрогенерирующего оборудования основными критериями, определяющими его конкурентоспособность, являются: тепловая эффективность, цена (себестоимость производства), себестоимость обслуживания в эксплуатации, надежность, ресурс, показатели воздействия на окружающую среду. Таким образом, выбор наилучших технических решений в процессе проектирования нового электрогенерирующего оборудования является многокритериальной задачей.

Имеется множество различных подходов к решению многокритериальных задач оптимизации. В выносимой на защиту работе предлагается итерационный подход с формированием суперкритерия на каждой итерации. Сами итерации увязываются с этапами проектирования. На каждом этапе анализируется вектор принимаемых решений, изучаются качественные зависимости между отдельными координатами вектора функции цели и отдельными координатами вектора принимаемых решений. На основании этого анализа может быть сокращена размерность вектора принимаемых решений, и сформирован суперкритерий для данной итерации. Если на какой-то стадии проектирования не удастся найти зависимость какой-то проекции вектора функции цели ни с одной проекцией вектора принимаемых решений, то на итерации, связанной с этой стадией проектирования, такая проекция вектора функции цели просто исключается из рассмотрения. В процессе анализа вектора принимаемых решений, проекции этого вектора систематизируются и делятся на группы. В одну группу сводятся те проекции, по которым очевидна монотонная зависимость. Решения по этой группе принимаются на границе допустимых значений. Вторая группа (назовём ее вектором варьируемых решений) – это именно та часть проекций вектора решений, которая будет исследоваться на предмет поиска оптимума. Таким образом, задача сводится к оптимизации по одному суперкритерию, а размерность вектора варьируемых решений становится достаточно мала, чтобы можно было решить задачу простым перебором.

Для выбора параметров вновь проектируемого электрогенерирующего оборудования на всех стадиях проектирования наиболее объективным глобальным критерием может быть себестоимость производства электроэнергии. Себестоимость производства электроэнергии складывается из большого числа различных составляющих. Эти составляющие могут быть разбиты на несколько групп. В одну группу могут быть отнесены составляющие, которые не зависят от оптимизируемых параметров, и в дальнейшем эта группа исключается из рассмотрения (примеры: налоги, заработная плата и т.п.). Еще одна группа будет состоять из тех составляющих, которые зависят от оптимизируемых параметров, но эти зависимости носят

только качественный характер (примеры: капитальные затраты и их обслуживание может быть оценено на последних стадиях рабочего проектирования, и то по очень упрощенным моделям). Есть составляющие, по которым взаимосвязь с оптимизируемыми параметрами удастся установить только на окончательных стадиях проектирования (примеры: себестоимость технического обслуживания может быть учтена на стадии, когда разрабатываются инструкции по эксплуатации).

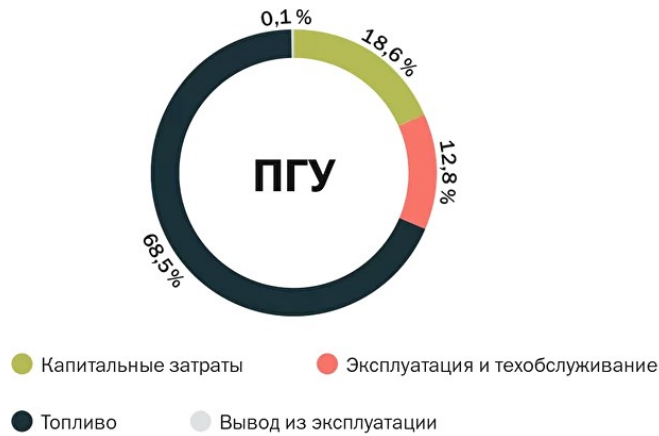


Рис. 4. Структура себестоимости электричества, рассчитанная за весь жизненный цикл объекта генерации

На рис. 4 в качестве примера показана структура себестоимости генерации энергии современной традиционной парогазовой установки, откуда видно, что основные затраты приходятся на топливо (68,5%). Следовательно, на ранних стадиях проектирования в качестве глобального критерия может быть выбран любой параметр, качественно отражающий будущие расходы на топливо. Простой перебор возможных решений позволяет уже на самых ранних стадиях в принимаемые решения вводить отдельные корректировки, которые будут благотворно сказываться на последующих итерациях, когда функция цели будет учитывать большее количество параметров.

Анализ проекций функции цели показал, что на стадии технического предложения реально могут быть учтены только параметры, связанные с топливной составляющей себестоимости энергии. Такими параметрами можно принять КПД по отпуску электроэнергии и коэффициент использования тепла топлива КИТТ. При этом выбор из этих двух сильно зависит от предназначения электростанции. Если планируется генерация только электричества, то может быть использован КПД, а если речь идет о совместном производстве тепла и электричества, то более представительным параметром будет КИТТ. По сути, когда генерации тепла нет, КПД и КИТТ становятся идентичными величинами.

В пятой главе, в качестве примера, приводятся исследования, проведенные в рамках работ по гранту РФ «Новая концептуальная схема бескомпрессорной парогазовой установки, обеспечивающая высокую топливную эффективность и практически полное улавливание диоксида углерода из продуктов сгорания: разработка фундаментальных научных основ в обоснование практической реализации». В задачи исследований по этому гранту входила разработка (на уровне технического предложения) опытной пилотной электростанции с использованием цикла БКПГУ. Для разработки технического предложения необходимо было выбрать параметры энергоустановки, обеспечивающие наилучшим образом подтверждение достижения ее конкурентоспособности по множеству критериев эффективности (энергетическим, экономическим, экологическим). На ранней стадии проектирования принимать решения приходится в условиях неопределенности, и решить такую задачу стандартными методами не представляется возможным. Поэтому выбор оптимальных параметров осуществляется с применением экспертного подхода. Учитывается, что выбираемые оптимальные параметры должны коррелироваться с параметрами будущих промышленных энергоустановок, реализованных по бескомпрессорному циклу.

Поскольку рассматривается применение БКПГУ для совместного производства электричества и тепла, очень важно выбрать как номинальную электрическую мощность, так и номинальную и максимальную тепловую мощность опытного образца.

В качестве номинального¹ режима БКПГУ принят режим максимальной длительной мощности в условиях по ГОСТ Р 52200-2004 ($t = 15^\circ\text{C}$, $p = 101,3 \text{ кПа}$, $\varphi = 60\% \dot{i}$).

На экспертной основе в качестве номинальной электрической мощности было

¹ здесь и далее, под номинальным режимом будем понимать режим максимальной длительной мощности

рекомендовано выбрать величину 60 МВт. Такое решение хорошо коррелируется с выбором мощности действующих пилотных установок на базе кислородно-топливной технологии (цикла Аллама – 50 МВт и цикла CES – 50 МВт), что подтверждает правильность выбранных решений.

Выбор тепловой мощности осуществляется исходя из принятого номинального режима, а также соотношения тепловой мощности, требуемой для отопления и горячего водоснабжения. По статистическим данным соотношение электрической мощности и тепловой мощности, требуемой для горячего водоснабжения, составляет 40%. Также исходя из статистики потребления тепловой мощности, мощность горячего водоснабжения составляет 20% от максимальной тепловой мощности. Таким образом, на экспертной основе в качестве номинальной тепловой мощности было рекомендовано выбрать величину 24 МВт, а в качестве максимальной тепловой мощности – 130 МВт.

В качестве критерия эффективности, наилучшим образом характеризующего топливную экономичность установки на различных эксплуатационных режимах, может выступать КИТТ (КПД по отпуску электроэнергии, в частном случае). Основные параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на значение КИТТ: начальные параметры цикла (температура и давление на входе в турбину), степень понижения давления в турбине и соотношение расходов, подаваемых в камеру сгорания $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$.

Температуру на входе в турбину рекомендуется выбирать максимально возможной, которую можно технически реализовать без чрезмерных затрат. По экспертной оценке, такая температура составляет 1373 К.

Таким образом, в качестве критерия оптимальности принимается КИТТ (КПД по отпуску электроэнергии, как частный случай). Вектор принимаемых решений \bar{X} представляется следующими величинами: номинальная электрическая мощность, номинальная и максимальная тепловая мощность, начальные параметры цикла (температура и давление на входе в турбину), степень понижения давления в турбине, соотношение расходов, подаваемых в камеру сгорания $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$. Целевая функция, выраженная через интегральные параметры, представляется в виде:

$$Z_{33} = \frac{Z_{27} + Z_7}{B_{69}} \quad (13)$$

и

$$Z_{28} = \frac{Z_{27}}{B_{69}}, \quad (14)$$

где Z_{33} – массив КИТТ; Z_{28} – массив КПД по отпуску электроэнергии; Z_{27} – массив мощности, выдаваемой в электросеть; Z_7 – массив мощности, выдаваемой в теплосеть; B_{69} – компонент вектора \bar{X} , соответствующий высшей теплотворной способности топлива.

В вектор \bar{X} также входят характерные показатели отдельных частей разрабатываемой электростанции. На стадии технического предложения знаний об отдельных компонентах электростанции крайне мало, особенно, если речь идет об их влиянии на будущую себестоимость производства энергии. Есть качественные взаимосвязи. Например, если взять какой-нибудь теплообменный аппарат, то очевидно, что чем выше тепловая эффективность и чем меньше гидравлические потери, вносимые этим аппаратом, тем выше будет эффективность термодинамического цикла, сам такой аппарат будет иметь большие массогабаритные показатели и будет дороже. Для проведения оптимизационных расчетов необходимо наполнить математическую модель БКПГУ конкретной информацией об элементной базе. Необходимо определить показатели отдельных элементов. На стадии технического предложения рекомендовано задаться показателями отдельных элементов на экспертной основе. Численные величины этих показателей приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Технические решения, принятые на экспертной основе

Наименование компоненты	Величина, характеризующая эффективность		
Турбомашины	$\eta_{ад}$		
Турбина	0,9		
Компрессор CO ₂	0,85		
Теплообменное оборудование	θ	$v_{г}$ Горячий теплоноситель	$v_{х}$ Холодный теплоноситель
Рекуператоры CO ₂ и H ₂ O	0,9	0,97	0,95
Контактные конденсаторы низкого и высокого давления	0,95	0,97	0,9
Подогреватели (топлива, кислорода и CO ₂)	0,9	0,95	0,95
Утилизаторы холода (топлива и кислорода)	0,95	0,95	0,95
Подогреватель сетевой воды	0,95	0,95	0,95
Трубопроводы и арматура	Коэффициент восстановления полного давления		
Трубопроводы и арматура	0,95		
Форсунки	0,9		
Насосное оборудование	Коэффициент полезного действия		
Питательные, циркуляционные, сетевой	0,8		
Комплексы			
Энергозатраты на производство кислорода, кДж/кг	900		
Коэффициент эффективности холодильной машины оживителя CO ₂	0,65		

На последующих стадиях проектирования, когда будут разрабатываться детально эти компоненты электростанции, все характеризующие их показатели будут уточняться.

Таким образом, задача сведена к зависимости функции цели от начального давления, степени расширения в турбине и соотношения расходов.

Аналізу для выбора начального давления цикла было уделено отдельное внимание. Ряд выполненных расчетов показал, что при прочих равных условиях начальное давление цикла очень незначительно влияют и на КПД и на КИТТ электростанции (рис. 5).

Давление рабочего тела на входе в турбину не оказывает существенного влияния на показатели тепловой экономичности, поскольку для цикла важно не абсолютное давление, а степень повышения/понижения давления. В то же время, при равных размерах проточной части турбины, мощность будет пропорциональна давлению. Потому, повышая давление, можно будет уменьшить удельную металлоемкость энергетической установки. Как видно, влияние начального давления на тепловую эффективность очень невелико.

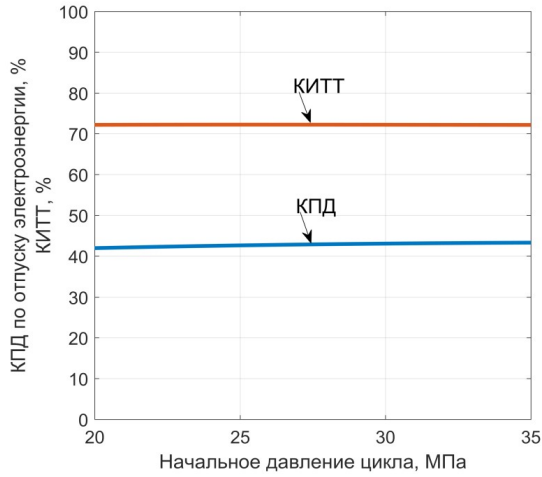


Рис. 5. Зависимость КПД и КИТТ от начального давления цикла

Был выполнен комплекс вариантных расчетов исследуемой БКПГУ. Область исследования определялась границами изменения оптимизируемых параметров: $\pi_m = 10 - 100$ с интервалом 10; $G_{CO_2}/G_{H_2O} = 0,1 - 10$ с интервалом 0,2. На рис. 6 и 7 показаны соответственно зависимость КИТТ и зависимость КПД от степени понижения давления в турбине и соотношения расходов, подаваемых в камеру сгорания CO_2/H_2O .

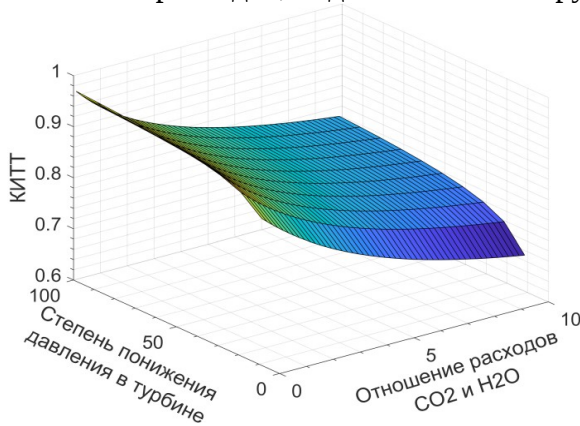


Рис. 6. Зависимость КИТТ от степени понижения давления в турбине и соотношения расходов CO_2/H_2O

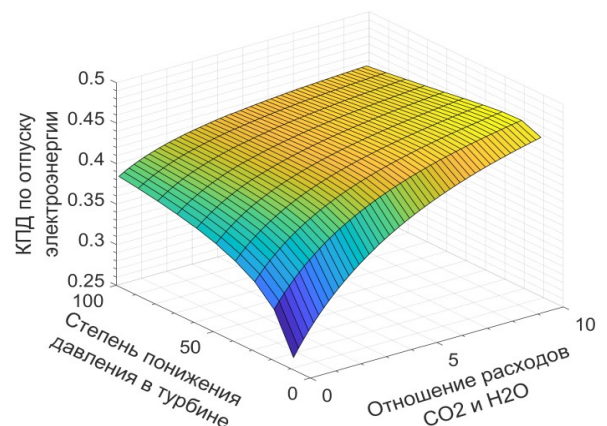


Рис. 7. Зависимость КПД по отпуску электроэнергии от степени понижения давления в турбине и соотношения расходов CO_2/H_2O

Зависимость КПД по отпуску электроэнергии от степени понижения давления имеет экстремум при высоких соотношениях расходов CO_2/H_2O . Значения степени понижения давления, соответствующие максимальным значениям КПД по отпуску электроэнергии, зависят от отношения расходов CO_2/H_2O . При увеличении этого отношения степень понижения давления, соответствующая максимальному КПД, уменьшается и при самом большом отношении находится в пределах 15-25. Соотношение расходов CO_2/H_2O оказывает разнонаправленное влияние на КПД и КИТТ. Наибольшие КПД по отпуску электроэнергии достигаются при наибольших отношениях расходов CO_2/H_2O , тогда как наибольшие значения КИТТ достигаются при минимальных отношениях расходов CO_2/H_2O . Расчеты показали, что степень понижения давления в турбине и соотношения расходов подаваемых в камеру сгорания CO_2/H_2O , существенно влияют на соотношение генерируемых тепла и электричества (рис. 8). Особенно сильное влияние оказывает соотношение CO_2/H_2O . При изменении этого отношения от 0,1 до 10, при прочих равных условиях, соотношение генерируемых тепла и электричества может изменяться более чем в четыре раза. На рис. 9 показана зависимость КИТТ от степени понижения давления в турбине при различных отношениях тепла и электричества. При генерации только электроэнергии максимальное значение КИТТ (КПД) достигается при степени понижения давления в турбине в районе 20. При совместной генерации тепла и электричества с относительным увеличением генерируемого тепла степень понижения

На выбор начального давления цикла, очевидно, будут оказывать другие факторы, в первую очередь, связанные с технической реализуемостью и себестоимостью изготовления оборудования. Поэтому начальное давление выбрано тоже на экспертной основе (30 МПа).

Размерность вектора принимаемых решений, по которым ведется поиск, сократилась до двух величин (степени понижения давления в турбине и соотношения расходов, подаваемых в камеру сгорания CO_2/H_2O). Таким образом, вектор \bar{X} сведен к двум переменным – степени понижения давления в турбине π_m и соотношению расходов CO_2/H_2O (G_{CO_2}/G_{H_2O}), подаваемых в камеру сгорания. Это те величины, которые будут варьироваться в процессе оптимизации.

давления в турбине, при которой достигается максимальный КИТТ, растет. Но при степенях понижения давления в турбине выше 40, почти во всей исследованной области прирост КИТТ носит символический характер. Учитывая то, что создаваемая электростанция может работать как в режиме совместного производства тепла и электричества, так и в режиме генерации только электричества, в качестве номинальной целесообразно выбрать степень понижения давления в турбине, равной 32.

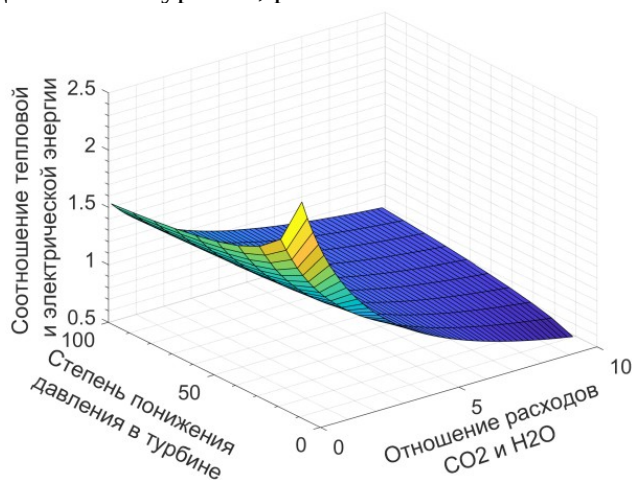


Рис. 8. Зависимость соотношения тепловой и электрической энергии от степени понижения давления в турбине и соотношения расходов $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$

Проведенные исследования показали, что оптимальное соотношение расходов $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ зависит, в первую очередь, от соотношения выдаваемых сеть тепла и электричества. Потребители тепла и электричества работают независимо, и поэтому соотношение требуемого тепла и электричества величина переменная во времени. Для генерирующего объекта крайне важно иметь возможность независимого регулирования тепла и электричества. При проектировании БКПГУ целесообразно закладывать в конструкцию возможность независимого регулирования подачи CO_2 и H_2O в камеру сгорания, что позволит независимо регулировать производство электрической энергии и тепла с высокими значениями КИТТ.

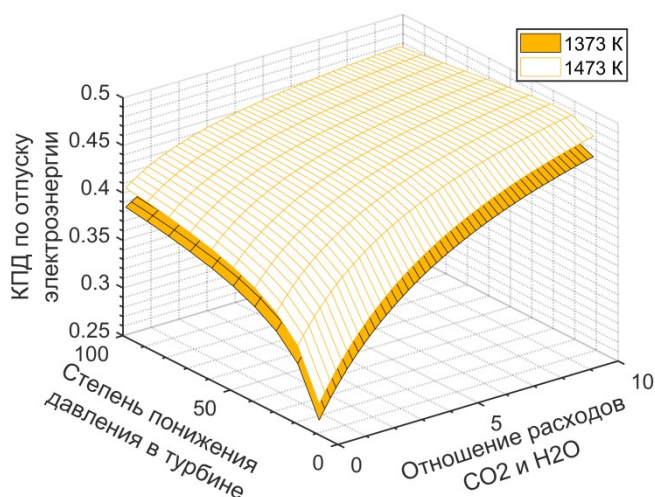


Рис. 10. Сопоставление зависимостей КПД при разных температурах рабочего тела на входе в турбину (1373 и 1473 К) от степени понижения давления в турбине и соотношения расходов $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$

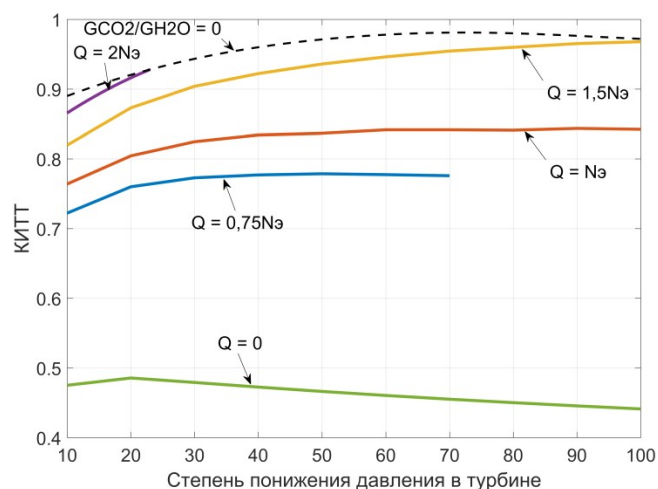


Рис. 9. Зависимость КИТТ от степени понижения давления в турбине при различных отношениях тепла Q и электричества N_e

Начальная температура цикла принята на экспертной основе, но важно иметь представление, как она влияет на КПД цикла. На рис. 10 показано как изменяется КПД по отпуску электроэнергии при повышении температуры газа перед турбиной.

При повышении температуры газа перед турбиной на 100 К, при прочих равных условиях, КПД по отпуску электроэнергии повышается на 5,5-6,5 % (относительных).

Выполненные оптимизационные исследования позволили дать рекомендации по выбору пилотной опытно-промышленной электростанции с использованием цикла БКПГУ. Показано, что рассмотренный цикл БКПГУ, при рекомендованных параметрах, позволяет достичь весьма высоких показателей тепловой экономичности.

Даже при относительно умеренной температуре рабочего тела перед турбиной (1373 К), КПД по отпуску электроэнергии может достигать 45,5 %, а КИТТ – 91,2 % (отнесенные к высшей теплотворной способности топлива).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ тенденций развития теплоэнергетической отрасли на современном этапе, когда одной из приоритетных задач является переход на технологии с «нулевым углеродным следом». Проведенный анализ показал, что разработка метода системного анализа термодинамических параметров энергетических комплексов на базе цикла БКПГУ является новой актуальной задачей.

2. Разработан способ представления термодинамических свойств чистых веществ в виде электронных таблиц. Этот способ обеспечивает приемлемую для поставленной задачи точность и обеспечивает минимальное время вычислительных процессов, что особенно важно для определения свойств в итерационных процессах. Разработанный способ реализован в программно-вычислительных модулях.

3. Разработан способ представления термодинамических свойств рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ. Допущения, принятые в этом способе, приемлемы для решаемых задач. Разработанный способ реализован в программно-вычислительных модулях.

4. Разработан способ описания термодинамических процессов рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ.

5. Разработана математическая модель новых энергетических комплексов, базирующихся на цикле БКПГУ. Разработанная математическая модель реализована в виде программно-вычислительного комплекса.

6. Разработана концепция поиска оптимальных термодинамических параметров новых энергетических комплексов, базирующихся на цикле БКПГУ.

7. На основании выполненных исследований, даны рекомендации по выбору параметров опытной пилотной электростанции с использованием цикла БКПГУ. Получены расчетные параметры электростанции с КПД по отпуску электроэнергии 45,5% в режиме работы генерации только электричества и КИТТ 91,2% в режиме работы с максимальным отпуском тепла (КПД и КИТТ отнесены к высшей теплотворной способности топлива). При этом весь углекислый газ можно вывести из цикла в жидкой фазе, удобной для последующей транспортировки и переработки или захоронения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных реферативных базах данных и системах цитирования**

1. Ramazanov E.R., Kosoy A.A., Khalife H. A presentation method of the thermophysical properties of matter in the form of spreadsheets // Journal of Physics: Conference Series. 2020. V.1675. 012094.
2. Sinkevich M., Borisov Yu., Kosoy A., Ramazanov E. Potential advantages of using compressorless combined cycles in power engineering // E3S Web of Conferences. 2020. V. 209. 03022.
3. Borisov Yu., Fominykh N., Ramazanov E., Popel O. Analysis of the compressorless combined cycle gas turbine unit performance efficiency in district heating systems // E3S Web of Conferences. 2020. V. 209. 03008.
4. Ramazanov E.R., Kosoy A.A. Modeling of thermodynamic processes using the properties of matter presented in the form of spreadsheets // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2057. 012050.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень РУДН

5. Рамазанов, Э.Р. Решение задачи параметрической оптимизации принципиально новых энергетических установок на самой ранней стадии проектирования // Научно-технический вестник Поволжья. Технические науки. 2022. № 3. с. 47-50.

Публикации в других изданиях

6. Синкевич М.В., Борисов Ю.А., Косой А.А., Рамазанов Э.Р., Попель О.С. Анализ работы системы рекуперации и утилизации тепла бескомпрессорных парогазовых установок // Омский научный вестник. Серия «Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение». 2019. Том 3. №3. с. 56-62.
7. Синкевич М.В., Рамазанов Э.Р., Борисов Ю.А., Попель О.С., Косой А.А. Анализ влияния параметров на эффективность термодинамического цикла бескомпрессорной парогазовой установки // Теплофизика высоких температур. 2021. Том 59. № 5. с. 707-714.
8. Sinkevich M., Ramazanov E., Kosoy A. Conceptual methods of starting and controlling operating modes of compressorless combined cycle gas turbine unit // E3S Web of Conferences. 2021. V. 289. 02005.

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ**Рамазанов Эльдар Рамазанович****Методика параметрической оптимизации бескомпрессорных парогазовых установок с полным улавливанием углекислого газа внутри цикла**

Исследование посвящено разработке фундаментальных научных основ проектирования энергетических установок нового типа, получивших название бескомпрессорная парогазовая установка (БКПГУ). Эти установки используют технологию кислородного сжигания топлива. Технология кислородного сжигания топлива позволит при относительно небольших энергетических затратах весь углекислый газ, образовавшийся в процессе сгорания топлива, вывести из цикла в жидком виде удобном для его дальнейшей транспортировки, переработки или захоронения. Целью работы является разработка метода системного анализа термодинамических параметров принципиально новых энергетических комплексов на базе инновационного цикла БКПГУ. В рамках выполненной работы решены следующие задачи: разработан способ представления термодинамических свойств чистых веществ в виде электронных таблиц; разработан способ представления термодинамических свойств рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ, использующего свойства чистых веществ в виде электронных таблиц; разработан способ описания термодинамических процессов рабочего тела, состоящего из изменяющейся смеси чистых веществ, использующего свойства чистых веществ в виде электронных таблиц; разработаны математические модели отдельных компонент и БКПГУ в целом; разработана концепция параметрической оптимизации энергетических комплексов, базирующихся на цикле БКПГУ, на основе системного анализа; определены оптимальные параметры пилотной электростанции мощностью 60 МВт на стадии технического предложения. Получены расчетные параметры электростанции с КПД по отпуску электроэнергии 45,5% в режиме работы генерации только электричества и КИТТ 91,2% в режиме работы с максимальным отпуском тепла (КПД и КИТТ отнесены к высшей теплотворной способности топлива).

DISSERTATION ABSTRACT**Ramazanov Eldar R.****Parametric optimization technique of compressorless combined cycle gas turbine with full carbon dioxide capture inside the cycle**

The study is devoted to development of the fundamental scientific engineering foundations of new type of power plants, called compressorless combined cycle gas turbine (CCCGT). These power units use oxy-fuel combustion technology. The oxy-fuel combustion technology allows, at relatively low energy costs, all carbon dioxide formed during the fuel combustion to be removed from the cycle in a liquid form convenient for its further transportation, processing or storage. The aim of the work is to develop a system analysis method of thermodynamic parameters of fundamentally new energy complexes based on an innovative thermodynamic cycle (CCCGT cycle). As part of the performed work, the following tasks were solved: a presentation method of the thermodynamic properties of matter in the form of spreadsheets is developed; a presentation method of the thermodynamic properties of a working fluid consisting of a changing mixture of substances, where the pure substances are presented in the form of spreadsheets; a description method of the thermodynamic processes of a working fluid consisting of a changing mixture of substances, where the pure substances are presented in the form of spreadsheets; mathematical models of individual components and the CCCGT as a whole are developed; the concept of parametric optimization of energy complexes based on the CCCGT cycle based on system analysis is developed; optimal parameters of a 60 MW pilot power plant at the technical proposal stage are determined; the calculated parameters of a power plant with an electrical supply efficiency of 45.5% in the operation mode of generating electricity only and utilization factor of 91.2% in the operation mode with maximum heat release were obtained (efficiency and utilization factor are attributed to the higher heating value).