



Чу Ван Чунг

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ МАЛОГАБАРИТНЫХ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С ПРИМЕНЕНИЕМ
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рассохин Виктор Александрович

Официальные оппоненты: **Барановский Владимир Владимирович**
доктор технических наук, профессор
заместитель генерального директора по энергетическим установкам, судовым системам и устройствам,
Акционерное общество «Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз», г. Санкт-Петербург

Юнаков Леонид Павлович
кандидат технических наук, доцент
доцент кафедры А8 «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ), г. Санкт-Петербург

Защита состоится «08» апреля 2025 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета У.2.4.7.36 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.spbstu.ru федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
У.2.4.7.36, д.т.н., доц.

Барсков Виктор Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Развитие турбиностроения привело к широкому использованию малогабаритных газотурбинных установок (МГТУ) в малой энергетике - в автономных установках. Такие современные МГТУ являются одновальными рекуперативными. Применение автономных МГТУ мощностью до 100...150 кВт может оказаться выгоднее, чем применение традиционных двигателей внутреннего сгорания из-за лучшей компактности, повышенного КПД рабочего цикла, топливно-тепловой эффективности.

Поскольку в автономных установках может использоваться на месте низкосортное органическое топливо, в частности дизельное топливо, то требуется провести исследования и разработать новые варианты высокотемпературных компонентов МГТУ. Высокие требования по ограничению вредных выбросов автономных транспортных энергетических установок (ИМО в частности ppmV), действующие в настоящее время (на пример, предельное значение выбросов NOx не должно быть выше 5 ppmV по новому стандарту ИМО Tier-III) и поэтому увеличивается использование альтернативных видов топлива для их снижения.

Растущие цены на топливо, проблемы защиты окружающей среды и тенденция к повышению эффективности автономных МГТУ оказывают существенное влияние на конструирование МГТУ. Они требуют решения комплекса вопросов, связанных с экономией топлива, в том числе и с утилизацией теплоты уходящих газов. Дальнейшее совершенствование МГТУ должно пойти в направлении увеличения температуры газа перед турбиной для повышения термодинамической эффективности цикла Брайтона или за счет оптимизированной конструкции компонентов существующих МГТУ. Оба эти подхода по-разному влияют на технологический процесс изготовления энергетических установок. Первый подход требует использования современных материалов (в данном случае более жаропрочных сплавов) для высокотемпературных компонентов МГТУ (турбины, рекуператора). Второй подход заключается в модернизации компонентов МГТУ с использованием современных технологий производства.

Целью работы является совершенствование конструкций основных высокоэффективных компонентов автономных МГТУ в соответствии с предложенными подходами. Выбранная схема МГТУ отвечает требованию к повышению эффективности всей установки с учетом влияния всех факторов на её работу.

В работе решались следующие задачи:

- Подготовка и разработка методологического обеспечения, программ для расчета тепловых схем автономных МГТУ и разработка методик проектирования основных элементов МГТУ.
- Оценка влияния всех режимных параметров на работу типовой автономной МГТУ и рекомендации по её совершенствованию.

- Выбор новой конфигурации тепловой схемы автономной МГТУ с повышенной топливной энергетической эффективностью.

- Разработка новых вариантов, изготовление которых требует основных высокоэффективных компонентов проектной МГТУ, с необходимым применением современных технологий.

Объектом исследования является автономная МГТУ мощностью 30 кВт для выработки электрической и тепловой энергии, создание которых востребовано во Вьетнаме в настоящее время.

Предмет исследования – комплексные исследования термодинамических и газодинамических процессов в МГТУ с рекуперативной схемой.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- Разработаны компьютерные программы, с помощью которых рассчитано и исследовано влияние различных факторов на работу автономной типовой МГТУ.

- Показано, что для увеличения температуры газа на входе в турбину предложено использование биметаллической конструкции при изготовлении высокотемпературных рекуператоров. Применение современных материалов вместе с достижением современных технологий производства снижает возможные дефекты биметаллических конструкций рекуператоров.

- Установлено, что для удобства сравнения эффективности исследуемых схем в качестве эталона выбрана схема МГТУ, работающая по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией теплоты уходящих газов. Принятая кинематическая схема МГТУ с приводом компрессора от электродвигателя обеспечивает возможность его вращения с отличной от частоты вращения турбины.

- С применением современных технологий предложены достаточно-сложные конструкции ключевых компонентов автономной МГТУ мощностью 30 кВт при расчетных условиях $\sum \pi_k^* = 4$; $G_v = 0,187$ кг/с; $T_0^* = 1200$ К; $\mu = 0,90$. В том числе разработаны трехмерные модели рабочих колес (РК) высокоскоростных турбомашин (открытого РК радиально-осевой турбины при частоте вращения 100 тыс. об/мин, РК турбины конструкции ЛПИ с бандажом при 50 тыс. об/мин, и закрытых РК центробежных компрессоров при 60,4 тыс. об/мин), так и высокоэффективных теплообменников, выполненных с помощью современных методов.

Практическая ценность работы заключается в прикладном характере исследования:

- Модифицировано методическое обеспечение математического моделирования основных компонентов автономных МГТУ для выработки тепловой и электрической энергии;

- Разработан метод расчета тепловой схемы МГТУ, работающей на разных видах топлива, таких как традиционные и альтернативные «чистые» топлива, в том числе программы на языке Python;

- Разработаны компьютерные программы для численного анализа влияния режимных параметров на работу МГТУ, в том числе программы на языке Python;

- Предложена конфигурация схемы автономной МГТУ с целью экономии топлива и повышения энергетических показателей;

- Разработаны конструкции основных компонентов МГТУ по предлагаемой схеме.

Личный вклад автора

- Созданы компьютерные программ на языке Python для исследования тепловых схем автономных МГТУ.

- Разработаны новые модифицированные методики расчета и математические модели основных элементов МГТУ.

- Рекомендованы высокоэффективные автономные МГТУ по предлагаемой тепловой схеме.

- Обоснованы материалы для применения биметаллической конструкции при изготовлении высокотемпературных рекуператоров.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Трехмерные модели основных компонентов (турбин, компрессоров, рекуператора) автономной МГТУ мощностью до 100 кВт по циклу Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией.

- Вариант новой конфигурации схемы автономной МГТУ с целью повышения эффективности всей установки.

- Результаты анализа влияния режимных параметров на основные характеристики типовой автономной МГТУ.

- Компьютерные коды для расчета тепловых схем автономных МГТУ с учетом зависимости удельной теплоемкости продуктов сгорания от видов топлива.

Методология и методы исследования. Теоретические основы исследования составляют научные труды: В.А. Рассохина, С.Н. Беседина, В.В. Барскова, Ю.Б. Галеркина и других сотрудников ВШЭМ СПбПУ, а также труды отечественных и зарубежных авторов в области турбомашин и турбоустановок. Разработаны математической модели и методики для расчета тепловых схем МГТУ с применением компьютерных программ: Turbo2, ONE, Python 3.10, Ansys workbench 2019.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечены использованием в процессе выполнения работы апробированных методик. Основные научные результаты сравниваются с результатами, полученными другими авторами.

Апробация результатов исследования. Основные результаты, полученные в рамках работы над диссертацией, представлялись и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

- международных конференциях Тинчуринские чтения – 2022, 2023 «Энергетика и цифровая трансформация» (КГЭУ, г. Казань, 2022 г. и 2023 г.)

- международной конференции «Энергия-2022» (ИГЭУ, г. Иваново, 2022 г.);
- научно-практической конференции молодых инженеров АО «Силовые машины» (АО Силовые машины, г. СПб, 2022 г.);
- международной конференции «Современные технологии и экономика энергетика» (СПбПУ, г. СПб, 2023 г.);
- конференции «Неделя Науки в Институте энергетике» (СПбПУ, г. СПб, 2023 г.);
- международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова «Перспективы развития двигателестроения» (СУ, г. Самара, 2023 г.);
- научно-практической конференции «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (ТИУ, г. Тюмень, 2023 г. и 2024 г.);
- второй всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы автомобильного транспорта» (ФЭАТ, г. Барнаул, 2023 г.).

Публикации

По теме исследования опубликовано 15 работ, отражающих основные положения исследования, среди которых – 5 публикаций в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по искомой специальности, 8 – работ в сборниках конференций РИНЦ, получено 2 свидетельства РФ о регистрации программ на ЭВМ.

Структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 247 страниц, 129 рисунков, 40 таблиц, списка использованной литературы из 116 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы совершенствования автономных МГТУ; поставлена цель работы; определены задачи; описаны научная новизна и практическая ценность результатов исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор и анализ текущего состояния применения МГТУ мощностью до 100 кВт в качестве автономных источников электроэнергии. Важным компонентом автономной МГТУ является рекуператор. При наличии рекуператора электрическая эффективность МГТУ *повышается примерно в два раза*. Для проектирования таких простых установок необходимо выбрать оптимальные параметры цикла МГТУ по схеме с регенерацией с целью обеспечения компактности и экономичности. Тем не менее, при разработке высокотемпературных компонентов есть несколько практических ограничений, например, сложная конструкция компонентов или дороговизна материалов.

В данной главе приведен обзор и состояние применения современных технологий крупными компаниями Honeywell, MAN Diesel and Turbo, Ansaldo Energia, Mitsubishi Power и Solar Turbines при разработке новых компонентов ГТУ и ремонте оборудования. В России тоже имеется опыт применения

современных технологий в авиационной промышленности («НИАТ», «Салют», «Сухой», УМПО, «Рыбинские моторы», ФГУП «ВИАМ», ФГУП «ЦИАМ»), в энергетическом машиностроении (ОАО «ТМЗ» – Тушинский машиностроительный завод). В том числе в СПбПУ и СПбМГТУ. На практике применяются современные технологии при изготовлении высокотемпературных деталей сложной конструкции или из дорогих жаропрочных материалов.

Во второй главе исследован термодинамический цикл типовой автономной МГТУ простого цикла Брайтона с рекуперацией (рисунок 1). В данной главе рассмотрены и разработаны математические модели и методики расчета основных элементов МГТУ простого типа с регенерацией.

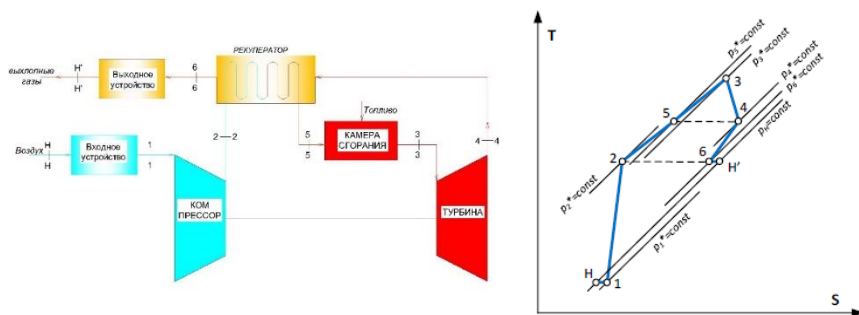


Рисунок 1 - Тепловая схема и T-s диаграмма рассматриваемой автономной МГТУ

В данном расчете удельная теплоемкость продуктов сгорания $C_{p,г}$ в процессе горения топлива считается функцией не только средней температуры T_g , а относительного расхода топлива g_T по формуле:

$$C_{p,г} = f(T_g, g_T) = C_{p,г}(T_g) + [g_T / (1 + g_T)] \cdot C_{T_g} \quad (1)$$

Но при анализе влияния различных видов топлива величина $C_{p,г}$ при разном составе газов может определяться по следующей формуле:

$$C_{p,г} = \frac{[RO_2]M_{RO_2}C_{p,RO_2} + [H_2O]M_{H_2O}C_{p,H_2O} + [N_2]M_{N_2}C_{p,N_2} + [O_2]^{изб}M_{O_2}C_{p,O_2}}{[RO_2]M_{RO_2} + [H_2O]M_{H_2O} + [N_2]M_{N_2} + [O_2]^{изб}M_{O_2}}, \quad (2)$$

где: $[RO_2]$, $[H_2O]$, $[N_2]$, $[O_2]^{изб}$, соответственно объемные доли составляющих смесь газов (RO_2 , H_2O , N_2 и O_2). M_{RO_2} , M_{H_2O} , M_{N_2} , M_{O_2} – молекулярные веса газов, составляющих смесь. C_{p,RO_2} , C_{p,H_2O} , C_{p,N_2} , C_{p,O_2} – удельные теплоемкости газов, составляющих смесь.

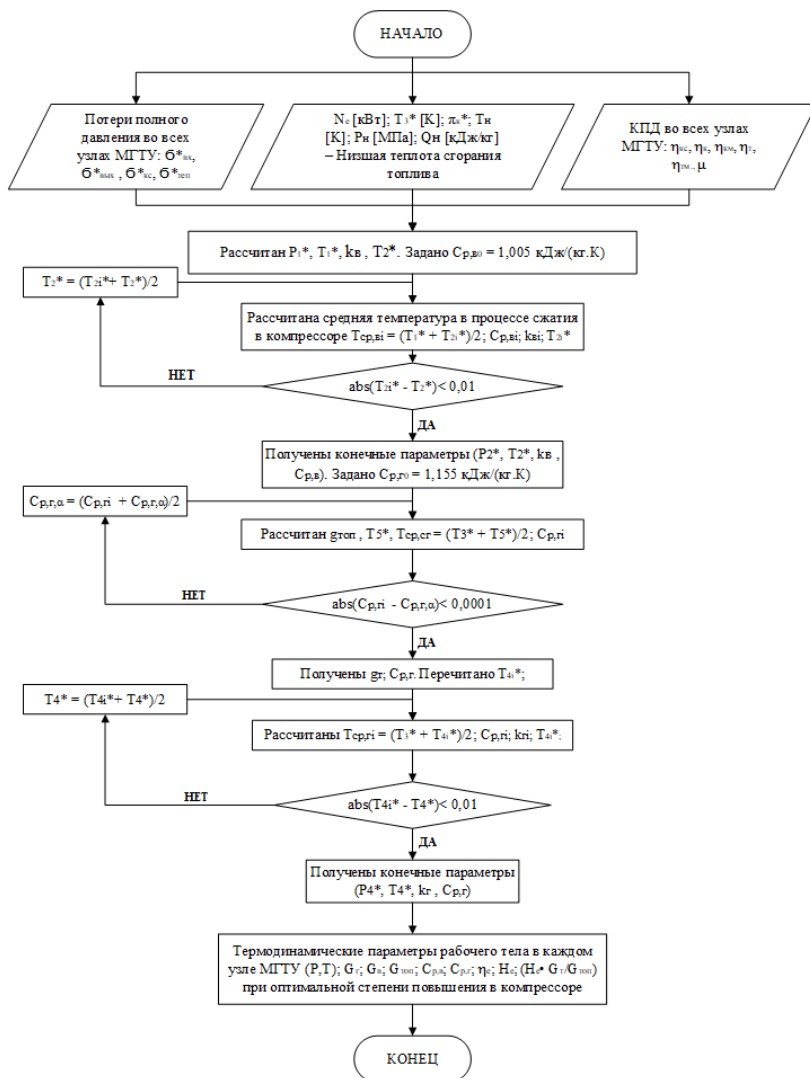
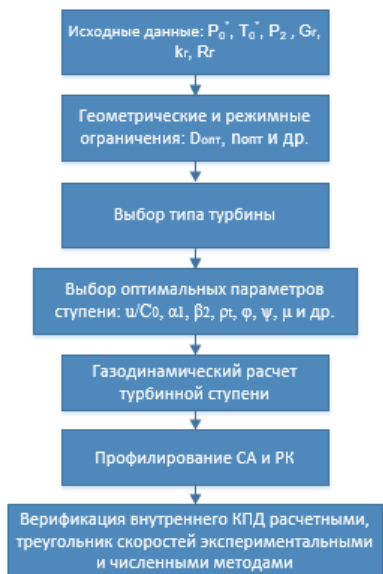
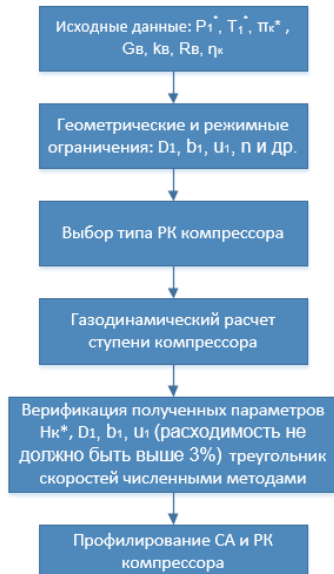


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчета тепловой схемы МГТУ с регенерацией

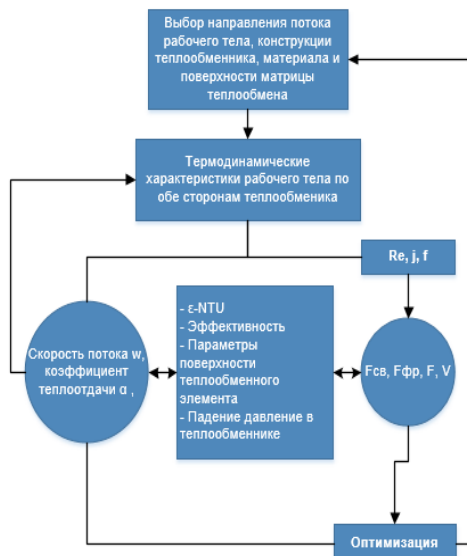
В данной главе описаны модифицированные методики расчетов основных элементов МГТУ, входящих в состав установки: малорасходные турбины (МРТ), центробежные компрессоры (ЦК), высокоэффективные рекуператоры, газодинамические подшипники лепесткового типа (ЛПП).



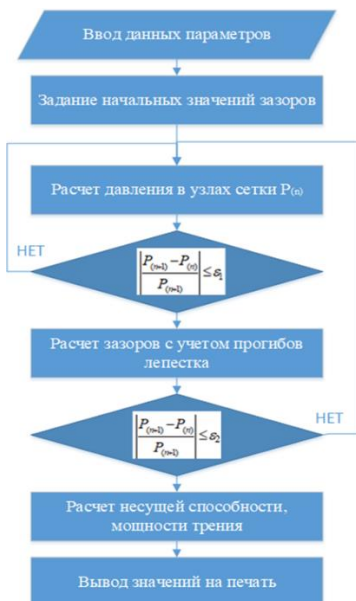
(а) – алгоритм расчета МРТ



(б) – алгоритм расчета ЦК



(в) – алгоритм расчета рекуператора



(г) – алгоритм расчета ЛПП

Рисунок 3 – алгоритмы расчетов основных компонентов в автономной МГТУ

В третьей главе представлен численный анализ влияния режимных параметров на работу автономных МГТУ. С помощью авторской программы **microCHPPy** выполнены расчеты тепловой схемы автономной типовой МГТУ мощностью 30 кВт. Варьировались различные параметры: температура воздуха окружающей среды, вид топлива, температура газа перед турбиной, степень регенерации, коэффициенты потерь полного давления во всех узлах установки, потери энергии в основных компонентах (компрессоре, турбине, рекуператоре). Для оценки топливно-энергетической эффективности МГТУ использовались эффективный КПД установки η_e и коэффициент полезной мощности турбины к расходу топлива ($\Omega_{пол} = H_e \cdot G_T / G_{топ}$).

В таблице 1 представлены результаты расчетов тепловой схемы МГТУ с температурой газов перед турбиной $T_3^* = 1100$ К и работающей на разных видах топлива. Из таблицы 1 видно, что переход с традиционного углеводородного топлива на чистый водород целесообразен. Чтобы использовать традиционные камеры сгорания, то есть не изменять конструкцию камеры сгорания текущей МГТУ, *перспективен способ добавления небольших количеств водорода к топливному природному газу.*

Таблица 1 - Влияние топлива на основные показатели МГТУ при $T_3^* = 1100$ К

Тип топлива	η_e	H_e , кДж/кг	$G_{топ} \cdot Q_p''$, (кДж/ч)	G_T , кг/с	$\Omega_{пол}$, кВт/кг/с	$Q_{ухол,газ}$, кДж/кг
Дизельное	0,354	140,72	304414	0,215	13152	46,66
Природный газ	0,350	143,23	315365	0,212	14762	46,91
Водород	0,349	145,64	302400	0,207	41997	46,67
Аммиак	0,343	153,16	318096	0,201	6599	47,83

Лучшие значения КПД рассматриваемой автономной МГТУ получены при интервалах КПД компрессоре в (0,80...0,85) и КПД турбины в (0,85...0,90). Для текущих рекуперативных МГТУ мощностью десятки киловатт оптимальное значение степени повышения давления в компрессоре составляет $(\pi_k^*)_{опт} = 3...4$. Текущая допустимая температура газов на входе в турбину типовой автономной МГТУ находится в интервале 850...900 °С.

На рисунке 4 показана предельная линия по доступной температуре газа на входе в рекуператор из нержавеющей стали $T_{пр,ст.} = 923$ К. Данная предельная линия ограничена, что при степени повышения давления в компрессоре $\pi_k^* = 3,5$ и наличии современного металлического рекуператора с высокой степенью регенерации $\mu = 0,9$ и величиной потерь давления равной 4 %, тогда до 1173 К максимально повышает температура на входе в турбину T_3^* типичной МГТУ. В данном случае эффективный КПД установки может достигать 37...38 %. Учитывая влияние температуры на входе в рекуператор на общую эффективность МГТУ, использование супер-сплавов и керамики по-прежнему остается первым выбором для дальнейшего развития высокоэффективных рекуператоров.

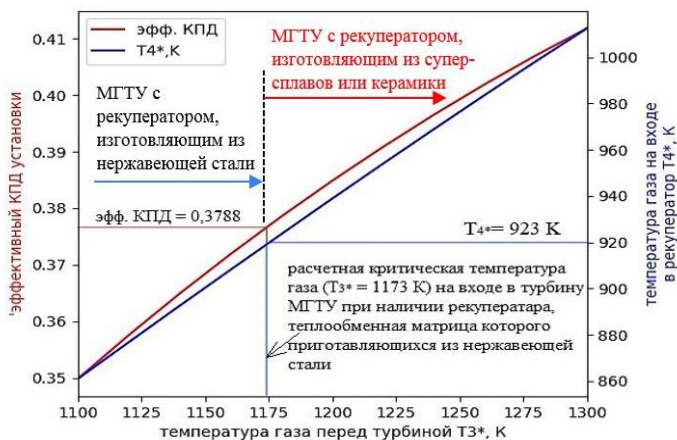


Рисунок 4 – График зависимостей эффективного КПД и максимальной температуры газа на входе в настоящий металлический рекуператор от температуры газа перед турбиной.

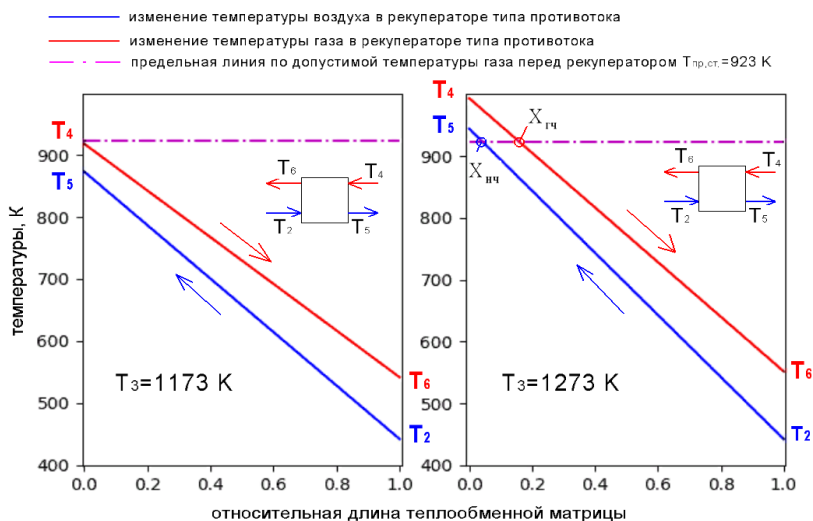


Рисунок 5 - Графики температурных режимов работы МГТУ двух вариантов рекуператоров (из только нержавеющей стали, и биметаллического: Ni-сплав + нержавеющей стали)

Чтобы повысить эффективность типовой МГТУ путем увеличения температуры газов перед турбиной предложено использование биметаллического рекуператора. Для этого, возможно применение более дешевых конструкционных материалов совместно с высокотемпературным никелевым сплавом в разных пропорциях при создании высокотемпературных

рекуператоров с приемлемой стоимостью. На рисунке 5 изложены точки $X_{вч}$, $X_{гч}$, с помощью которых возможно определить пропорцию по объему Ni-сплава (Inconel625), соответственно воздушной и газовой сторонам, в составе биметаллической конструкции рекуператора, при наличии которого КПД высказанной МГТУ может увеличиваться до 40...41 % при повышении T_3^* до 1273 К, так и экономичность топлива может достигать на 7,22 % (в таблице 2).

В четвертой главе были рассмотрены концепции автономных гибридных установок (МГТУ и топливные элементы), обеспечивающие высокий коэффициент использования топлива и существенное сокращение выбросов вредных компонентов. Но в настоящее время эффективность МГТУ в гибридных установках еще мала по сравнению с КПД ТЭ в рассмотренных концепциях. Для решения поставленных задач целесообразно разработать модели тепловых схем МГТУ, совершенствование которых в технической литературе известно, как «карнотизация» цикла Брайтона. Это усовершенствование связано с применением дополнительных вариантов теплообменных аппаратов и схем их включение в цикл. По результатам расчетов показано, что лучшие эффективности были получены во всех схемах установок с регенерацией. В целом *для совершенствования автономных МГТУ важна разработка высокоэффективных рекуператоров.*

В главе приведены расчеты двух тепловых схем МГТУ из числа «карнотизации»: при наличии только рекуператора - (Бр+Р) и при наличии обоих воздухоохладителя и рекуператора - (ПО+Р). Была разработана программа **MGT with Intercooler** для расчета тепловой схемы МГТУ при наличии воздухоохладителя и рекуператора.

Расчетные результаты представлены в таблице 2 и ими демонстрируется их преимущество в топливной экономичности путем сравнения с традиционной схемой МГТУ. Видно, что при оптимальном значении степени повышения давления в компрессоре π_k^* можно ожидать повышение эффективного КПД по схеме (ПО+Р) на 8,64 %, удельной работы установки на 20,97 %, как и отношения полезной мощности установки к расходу условного топлива на 8,42 %, вместе со снижением расхода топлива до 19,51 %, по сравнению с показателями МГТУ по схеме (Бр+Р).

Таблица 2 - Сравнение основных параметров автономной МГТУ мощностью 30 кВт по трем вариантам тепловой схемы (Capstone C30, схема (Бр+Р) и схема (ПО+Р))

Наименование, [размерность]	Capstone C30	Расчетный вариант по схеме (Бр+Р) (и) рекуператор из 100 % SUS347 (б) биметаллический рекуператор		Расчетный вариант по схеме (ПО+Р)
		(и)	(б)	
Расход воздуха, кг/с	0,30745	0,22622	0,19114	0,18722
Степень сжатия	3,39	3,50	3,50	4,00
КПД компрессора	0,8265	0,80	0,80	0,80
Наличие воздухоохладителя	нет	нет	нет	$\Delta T_k = 75 \text{ }^\circ\text{C}$

Наименование, [размерность]	Capstone C30	Расчетный вариант по схеме (Бр+Р) (н) рекуператор из 100 % SUS347 (б) биметаллический рекуператор		Расчетный вариант по схеме (ПО+Р)
		(н)	(б)	
Тип топлива	дизельное топливо	стандартное углеводородное	стандартное углеводородное	стандартное углеводородное
Расход топлива, кг/с	0,00255	0,00180	0,00167	0,00165
Степень регенерации	0,86	0,90	0,90	0,90
КПД турбины	0,8555	0,86	0,86	0,86
Температура газа перед турбиной, К	1133	1173	1273	1200
Температура газа на входе в рекуператор, К	-	918,15	993,13	917,53
Эффективный КПД установки	0,2534	0,3762	0,4053	0,4085
Удельная работа, кДж/кг	-	132,61	156,95	160,42
$\Omega_{\text{пол}}$, кВт/(кг·с ⁻¹ топлива)	-	16800	18112	18215

На рисунке 6 изображена предлагаемая тепловая схема МГТУ с приводом компрессора от отдельного электродвигателя. Преимуществами предлагаемой схемы являются возможность проектирования компрессора и турбины при независимом числе оборотов для каждого из них и уменьшение размеров РК при увеличении степени сжатия π_k^* в компрессорах. Независимость чисел оборотов турбины и компрессора в работе установки будет пригодна, когда МГТУ работает на био-топлива. В данном случае требует более объемных расходов чтобы достигалась расчетная температура T_3^* .

Используя данную схему при достаточной электрической мощности и при требовании об большей роли теплоснабжения в автономной энергетике, КПД турбины не должен быть высоким. Таким образом, возможно применение турбины конструкции ЛПИ в составе МГТУ для когенерации. При попытке получения подобной эффективной мощности применение и турбины ($\eta_t^*=0,75$) конструкции ЛПИ получаем рост расхода топлива 21,82 % и одновременно повышение тепловой мощности на 41,79 % по сравнению с установкой турбины ($\eta_t^*=0,86$) радиально-осевого типа. В обоих вариантах общий коэффициент использования теплоты сгорания топлива примерно равный (83 %). Но при применении турбины конструкции ЛПИ возможно использование более жаропрочных материалов при создании теплообменника с рабочей температурой выше 950 К.

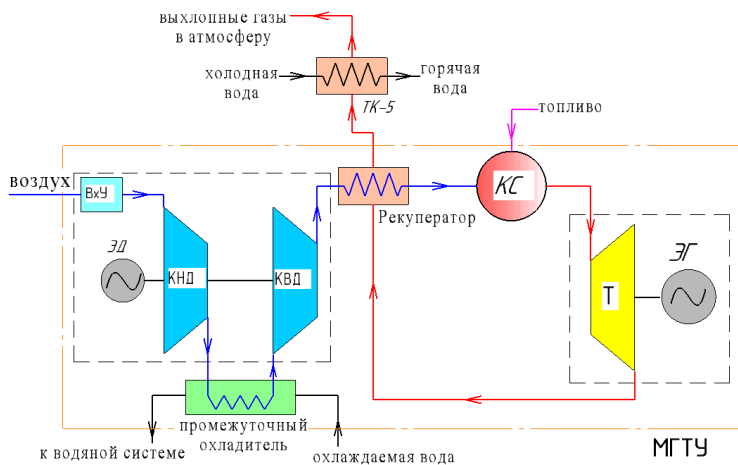


Рисунок 6 - Предлагаемая тепловая схема автономной МГТУ с приводом компрессоров от отдельного электродвигателя и при наличии воздухоохладителя и рекуператора

В пятой главе для тепловой схемы МГТУ по варианту (ПО+Р) был выполнен весь комплект расчетов. Главные начальные условия следующие: $\sum \pi_k^* = 4$; $G_B = 0,187 \text{ кг/с}$; $T_{0, \text{КВД}}/T_{0, \text{КНД}} = 1,014$; $T_3^* = 1200 \text{ К}$; $\mu = 0,90$. В качестве компонентов установки приняты высокоэффективный рекуператор печатного типа, двухкаскадный компрессор с КПД 0,80 и два типа турбины: турбины радиально-осевого типа и турбины конструкции ЛПИ. С помощью современного пакета Ansys Workbench 2019 были выполнены проектирование вышеуказанных компонентов и анализы их статической конструкционной прочности.

В исследовании центробежных компрессоров, так и радиально-осевой турбины автором воздух считается идеальным газом. Профилирование рабочих лопаток РК было выполнено с помощью Ansys Vista CCD. Была проведена оптимизация геометрии рабочего колеса данных компрессоров и турбины с лопатками на основе варьирования значений угла $\beta(m)$ лопаток. В частности, при проектировании РК ЦК на наружном меридиональном обводе угол β_n достигает к минимуму в 50% меридиональной длины m ; а на втулочном меридиональном обводе $\beta_{вт}$ стремится минимумом в 75% меридиональной длины m (на рисунке 7).

Расчет и обработка результатов численной модели осуществляется в программе Ansys Workbench. В работе рассмотрены небольшие по размеру рабочие колеса центробежного компрессора. Кроме малых размеров и соответственно повышенных скоростей вращения (60400 об/мин), указанные колеса имеют существенные конструктивные особенности – наличие покрывного диска и двухъярусная решетка рабочих лопаток.

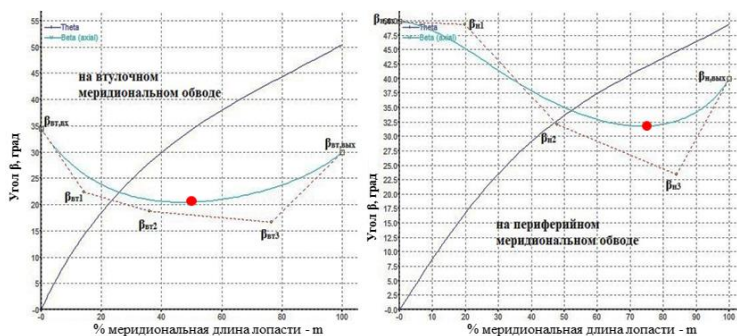
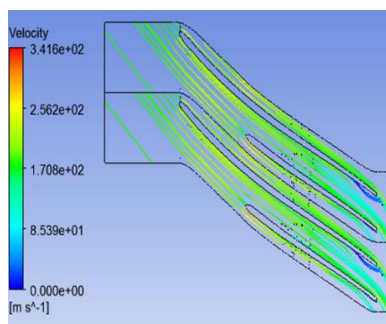


Рисунок 7 – Оптимальный выбор распределения углов лопастей $\beta(m)$ на втулочном и наружном меридиональных обводах РЛ КНД

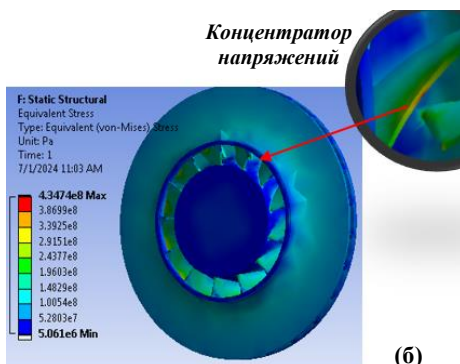
Технологические выгоды современных технологий сопровождаются необходимостью повышенного внимания к вопросам прочности (рисунок 8). Основные размеры РК компрессоров представлены в таблице 3. Статическая прочность данных РК, изготовленных из титанового сплава Ti6Al4V, обеспечена – минимальный запас по пределу текучести больше 1,8; минимальный запас по пределу прочности больше 1,9.

Таблица 3 - Основные размеры РК ЦК в составе расчетной МГТУ

Параметры	КНД	КВД
Наружный диаметр РК на выходе, мм	102,4	96,1
Высота РЛ на выходе, мм	5	2,7
Наружный диаметр РК на входе, мм	52,8	53,6
Диаметр втулки РК, мм	30,5	39,6
Геометрический угол выхода из РК на периферийном диаметре, град	40 ⁰	30 ⁰
Число лопаток (включены сплитеры), шт.	15+15	13+13



(а)



(б)

Рисунок 8 – CFD-расчет поля скорости потока (а) и расчет статической конструкционной прочности проектного КНД (б)

Расчетные исследования позволят определить серию радиально-осевых турбин, имеющих внутренний КПД не менее 86%. При проведении расчетного исследования варьировались число оборотов и характеристическое число u/C_o . На рисунке 9, что достигнут внутренний КПД расчетной турбины радиально-осевого типа $\eta_{т, \text{рот}} = 0,864$ выбрано число оборотов $n_{\text{рот}} = 100000$ об/мин, соответственно характеристическому числу $(u/C_o)_{\text{рот}} = 0,635$. В работе рекомендовано рабочее колесо турбины – открытого типа с наружным диаметром, равным 105,1 мм и не имеет центрального отверстия. В РК имеет 15 рабочих лопаток, высота входной кромки которых 6 мм.

А для второго варианта турбины конструкции ЛПИ в составе МГТУ подобной мощностью, такие параметры, соответственно, $\eta_{т, \text{лпи}} = 0,726$, $n_{\text{лпи}} = 50000$ об/мин, $(u/C_o)_{\text{лпи}} = 0,427$. Геометрические параметры РК турбины ЛПИ представлены на рисунке 11. В данном случае при хорде профиля лопатки, равном 13 мм число рабочих лопаток в колесе турбины ЛПИ равно 21. Рабочие лопатки с малым углом $(9,35^\circ)$ входа потока в РК имеют высоту, равную 17,02 мм.

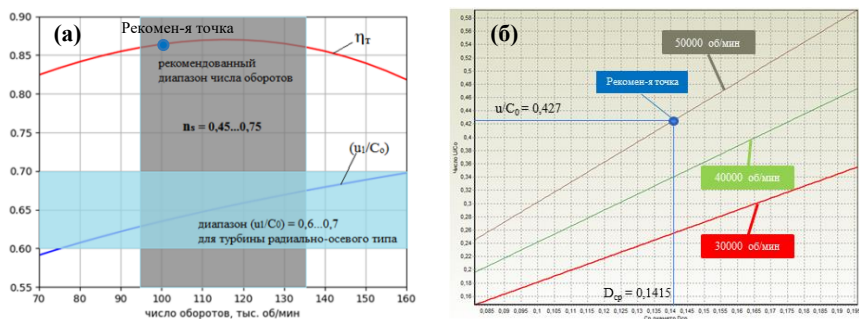


Рисунок 9 – К выбору чисел оборотов турбин радиально-осевого типа (а) и конструкции ЛПИ (б)

В работе для обеспечения надежности турбинных деталей был выбран керамический материал – нитрид кремния (Si_3N_4), который подходит к современному производству высокотемпературных малоразмерных турбинных колес. Турбинное колесо из данного материала может работать при очень высокой температуре (до 1400°C).

Результаты расчета напряженного состояния РК турбины приведены на рисунках 10 и 11. В процессе расчета напряженно-деформационного состояния в РК турбин только определялись напряжения, вызванные центробежными силами из-за частоты вращения вала. А напряжения, вызываемые нагрузками от газовых сил, имеют существенно меньшую величину, поэтому не учитывались. Температурные напряжения не учитывались – температура различных участков рабочего колеса принималась неизменной. Статическая прочность РК турбины радиально-осевого типа,

изготовленного из сплава Si_3N_4 ($\sigma^{1200^\circ\text{C}} = 525$ МПа), обеспечена запас по пределу текучести больше 1,5; а для турбины конструкции ЛПИ, больше 1,2.

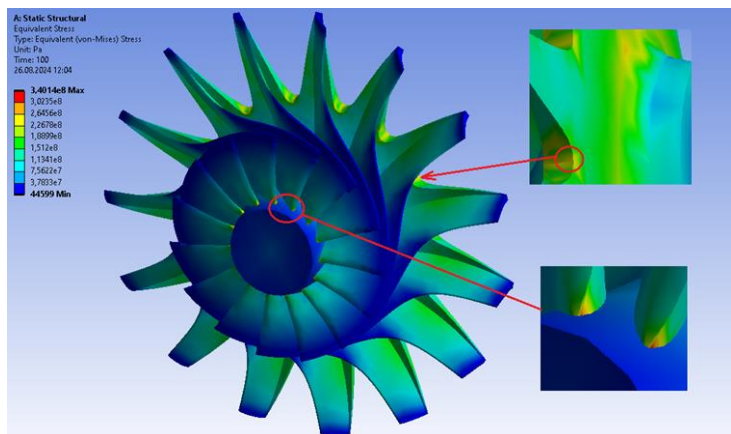


Рисунок 10 – Эпюра распределения эквивалентного напряжений по РК расчетной радиально-осевой турбины

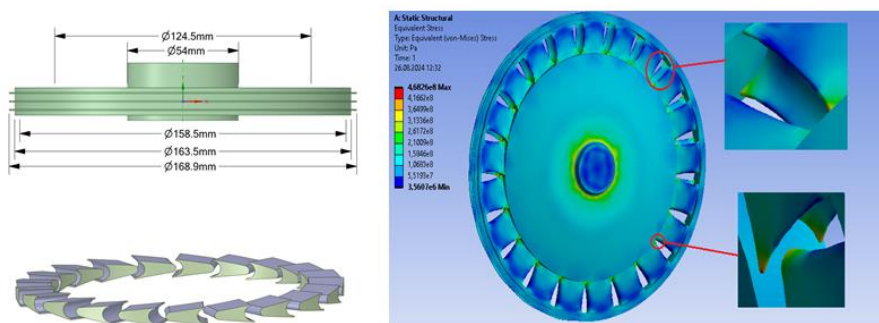


Рисунок 11 – Трехмерная модель РК турбины ЛПИ и эпюра распределения эквивалентного напряжений на РК турбины

В работе предложено использование печатного теплообменника в качестве рекуператора, так и в качестве охладителя. К выбору размеров (ширины, высоты, длины) теплового элемента теплообменника, как и диаметра канала был проведен анализ для оценки падения давления в теплообменнике. Падение давления в рекуператоре было исследовано путем варьирования только одного из трех рассматриваемых геометрических параметров (ширины, высоты, длины в диапазоне 0...1000 мм) при сохранении всех остальных. Выбранные габариты должны обеспечить падение полного давления в рекуператоре не выше 5% и достаточно компактные размеры.

Конструкция теплообменного элемента с габаритами приведена на рисунке 10. Расчетные параметры рекуператора и его характеристики представлены в таблице 4. На основе расчета теплового состояния элемента теплообмена ($T_{\text{макс}} = 773 \text{ K}$) был выбран материал для его изготовления с применением современных технологий – нержавеющей стали марки 316.

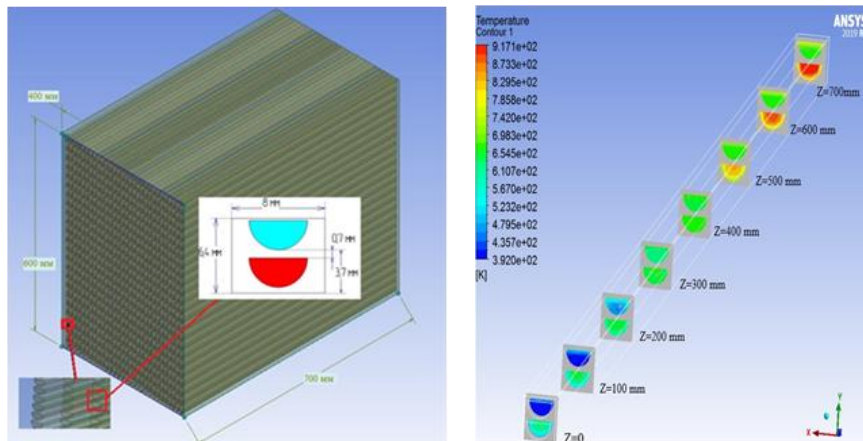


Рисунок 12 - Габариты элемента теплообмена расчетного рекуператора и распределение температурного поля в каналах в его поперечных сечениях вдоль направления потока жидкостей

Таблица 4 - Параметры к проектированию печатного рекуператора

Параметры [ед.]	Величины
Габариты теплообменного элемента Д x Ш x В, мм	700x400x600
Диаметр канала, мм	5
Расстояние между двумя каналами по вертикали, мм	3,2
Падение давления по воздушной стороне, %	0,9
Падение давления по газовой стороне, %	2,2
Компактность, м ² /м ³	3352,9
Коэффициент теплоотдачи для воздуха, Вт/м ² .К	37
Коэффициент теплоотдачи для газа, Вт/м ² .К	41
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² .К	19,5
Тепловая мощность, кВт	92,16

С применением проектных компонентов предлагается создание разработанных автономных малогабаритных газотурбинных установок

АМГТУ-01 для выработки электрической и тепловой энергии и компрессорной установки АМКУ-01 для выработки сжатого воздуха. Разработанная схема автономных МГТУ с промежуточным охлаждением и регенерацией обеспечивает повышение КПД установки на 7...15 % при начальной температуре газов перед турбиной (900 °С). С учетом рекомендации по применению биметаллического рекуператора возможно еще повышение эффективности установки с ростом температуры газов на входе в турбину благодаря керамическому колесу турбины.

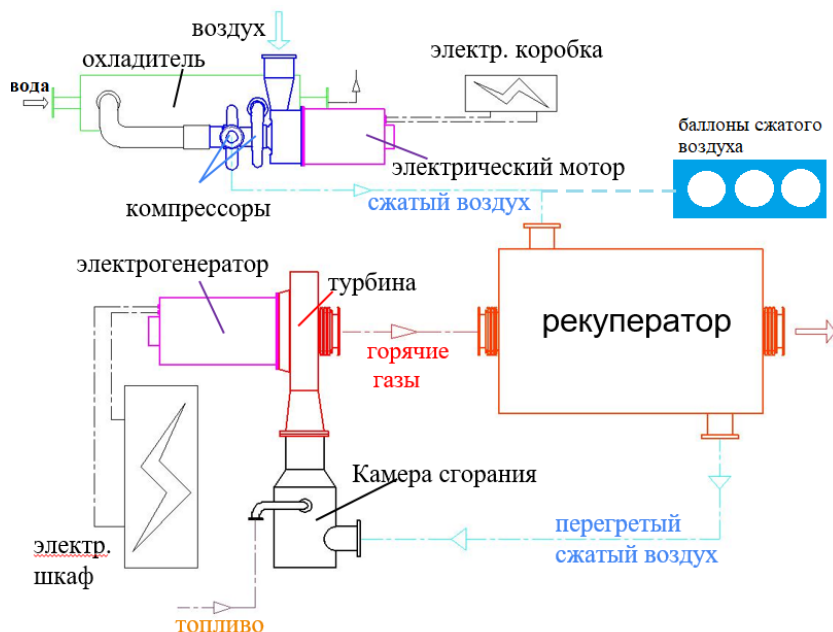


Рисунок 13 - Конструктивные схемы разработанных автономных МГТУ для выработки электрической, тепловой энергий и сжатого воздуха

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На практике при совместной выработке электричества и тепла проведены обзор и анализ настоящего технического состояния МГТУ в качестве автономных энергетических установках малой мощности. Представлены подробное описание особенностей конструкции автономных МГТУ. На основе опыта мировой и российской практики при использовании современных технологий для создания турбоустановок малой мощности определена возможность применения данных передовых технологий с целью разработки автономных МГТУ.

2. Разработана методика, созданы и зарегистрированы компьютерные программы для расчетов тепловых схем МГТУ, работающей на разных видах

топлива (дизельном топливе, традиционных углеводородных топливах, альтернативных топливах). Модифицированы методики предварительного проектирования основных компонентов МГТУ, таких как центробежные компрессоры, малорасходные турбины, высокоэффективные рекуператоры, аэродинамические радиальные подшипники.

3. Выполнен анализ и расчет тепловой схемы типовой МГТУ мощностью 30 кВт в качестве автономного источника электроэнергии и тепла для собственных нужд. Основные параметры установки для расчета: $\pi_k^*=3,5$; $T_3^*=1100$ К; $\mu=0,86$; $\eta_{кк}=0,99$. Рассмотрено и доказано по авторскому расчетному методу, что целесообразность использования добавок чистого водорода к топливному газу с целью повышения энергетических характеристик и снижения выброса CO_2 в автономных МГТУ.

4. Представлен путь совершенствования автономной типовой МГТУ в дальнейшем время повышением температуры газов на входе турбины. Для этого, предложено в качестве первого шага повышения температурного режима рекуператора, а значит и эффективности МГТУ поднять температуру на 100 °С и обеспечить допустимое температурное поле комбинированной конструкции сложного рекуператора (теплообменные пластины по объему состоят из 19,4 % Ni-сплав Inconel 625 и 80,6 % нержавеющей стали SUS347). Такой шаг в росте 100 °С (с 1173 К до 1273 К) позволит повысить эффективность установки на 7,7 % и ее экономичность по расходу топлива на 7,22 %. Возможно изготовление методами современных технологий биметаллической конструкции из разных видов материалов.

5. В автономной энергетике предложено использование цикла Брайтона с промежуточным охлаждением и регенерацией. Представлены оптимальные параметры: $\sum \pi_k^*=4,0$; $T_{о,квд}/T_{о,кнд}=1,014$ выбранного цикла для проектирования МГТУ 30 кВт при $\mu=0,90$; $T_3^*=1200$ К. Предполагаемая схема позволит повысить эффективный КПД установки до 40...41% и снизить расход топлива на 8,33 % при сравнении с типичной схемой. МГТУ с приводом компрессора от отдельного электродвигателя также позволит проектирование турбины и компрессора в их каждой оптимальной частоте вращения. Рекомендация по применению привода компрессоров от отдельного двигателя еще перспектива при переходе на использование био-топлив на базе увеличения их объемного расхода. В данном случае возможно применение турбины конструкции ЛПИ в составе МГТУ для когенерации без изменения коэффициента использования теплоты сгорания топлива (83%).

6. На основе комплекса расчетных работ и численного моделирования выполнены результаты исследований аэродинамики компрессорных ступеней, турбинных ступеней и термодинамики печатного теплообменника. По трудности из-за достаточно-сложной конструкции проектных малоразмерных деталей и обеспечению прочности компонентов даны практические рекомендации применения современных технологий для создания деталей:

- РК центробежных компрессоров низкого давления и высокого давления ($\pi_{кнд}^*=2,04$; $\pi_{квд}^*=1,96$; $T_{о,квд}/T_{о,кнд}=1,014$; $G_v=0,187$ кг/с, $n=60400$ об/мин) в составе

МГТУ мощностью 30 кВт по предполагаемой схеме. Применение современных технологий изготовления центробежных колес закрытого типа может позволить повысить надежность и экономичность компактных компрессоров. Для обеспечения прочности РК при данной высокой частоте вращения рекомендован материал РК компрессоров – титановый сплав Ti6Al4V;

- РК высокоскоростной малорасходной турбины радиально-осевого типа ($P_0^*=0,3744$ МПа, $T_0^*=1200$ К, $G_T=0,189$ кг/с, $n=100000$ об/мин, $\eta_T^*=0,91$, $u/C_0=0,635$) и РК малорасходной турбины конструкции ЛПИ с бандажом ($P_0^*=0,3744$ МПа, $T_0^*=1200$ К, $G_T=0,203$ кг/с, $n=50000$ об/мин, $\eta_T^*=0,756$, $u/C_0=0,427$) в составе МГТУ мощностью 30 кВт по предполагаемой схеме. Для повышения прочности РК турбин при высоком числе оборотов перспективно использование керамического материала Si_3N_4 . В данном случае методы современных технологий могут использоваться для изготовления таких колес из керамических порошков.

- рекомендован теплообменный элемент высокоэффективного рекуператора печатного типа (габариты $D \times Ш \times B = 700 \times 400 \times 600$ мм) к снижению потерь давления в рекуператоре. В данном случае по расчету падение полного давления в рекуператоре равно 3,1%. Число каналов 5610. Гидравлический диаметр канала 5 мм. Компактность – величина теплообменной поверхности в единице объема элемента теплообмена рекуператора $\beta = 3352,9$ м²/м³. Выбранный материал – нержавеющая сталь марки 316 достаточно удовлетворяет требованию прочности проектного теплообменного элемента, изготавливающего с помощью современных технологий.

7. На основании проведенного исследования разработаны конструктивные схемы автономных малогабаритных газотурбинной установки АМГТУ-01 и компрессорной установки АМКУ-01 для выработки электрической, тепловой энергий и сжатого воздуха.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК по направлению:

1. М. Басати Панах, В. А. Рассохин, В. В. Барсков, Ю. В. Матвеев, Н. Н. Кортиков, М. А. Лаптев, Б. Гун, В. Ч. Чу. Повышение экономичности и надежности газотурбинных установок за счет применения аддитивных технологий // Надежность и безопасность энергетики. – 2022. – Т. 15, № 2. – С. 102-110. – DOI 10.24223/1999-5555-2022-15-2-102-110.

2. М. Басати Панах, В. А. Рассохин, В. В. Барсков, Е. И. Окунев, М. А. Лаптев, Н. Н. Кортиков, В. Ч. Чу, Б. Гун. Влияние охлаждения высокотемпературных лопаточных аппаратов на эффективность газотурбинных установок с учетом зависимости удельной теплоемкости рабочего тела от температуры // Известия МГТУ МАМИ. – 2022. – Т. 16, № 2. – С. 115-124. – DOI 10.17816/2074-0530-106231.

3. В. Ч. Чу, В. А. Рассохин, В. В. Барсков, Ю. В. Матвеев, М. А. Лаптев, М. Басати Панах. Использование высокоэффективных биметаллических рекуператоров малогабаритных газотурбинных установок мощностью до 100 кВт //

Известия МГТУ МАМИ. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 5-16. – DOI 10.17816/2074-0530-106091.

4. М. Басати Панах, В. А. Рассохин, В. В. Барсков, Ю. В. Матвеев, М. А. Лаптев, Б. Гун, В. Ч. Чу. Влияние характеристик потерь кинетической энергии на экономичность газотурбинных установок // Газовая промышленность. – 2023. – № 6(850). – С. 82-89.

5. В. Ч. Чу, М. Басати Панах, А. И. Суханов, Т. К. Фам, В. А. Рассохин, В. В. Барсков, Ю. В. Матвеев. Выбор материала для аддитивного производства рабочего колеса закрытого типа высокоскоростного центробежного компрессора // Надежность и безопасность энергетики. – 2024. – Т. 17, № 4. – С. 272-279. – DOI 10.24223/1999-5555-2024-17-4-272-279.

Свидетельства:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024683629 Российская Федерация. Программа для теплового расчета параметров рабочего цикла микротурбинной установки с промежуточным охлаждением и регенерацией - MGT with Intercooler : № 2024682341 : заявл. 27.09.2024 : опубл. 14.10.2024 / В. Ч. Чу, В. А. Рассохин, В. В. Барсков [и др.]

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684823 Российская Федерация. Программа для теплового расчета параметров рабочего процесса микротурбинных установок с регенерацией – microCHPpy : № 2024682356 : заявл. 27.09.2024 : опубл. 21.10.2024 / В. Ч. Чу, В. А. Рассохин, В. В. Барсков [и др.]

В других изданиях:

8. В. Ч. Чу, М. Басати Панах, М. А. Лаптев. Повышение эффективности малогабаритных газотурбинных установок мощностью до 100 кВт использованием биметаллических рекуператоров // Тинчуринские чтения - 2022 "Энергетика и цифровая трансформация" : Сборник статей по материалам конференции. В 3-х томах, Казань, 27–29 апреля 2022 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 342-345.

9. В. Ч. Чу. Оптимизация параметров цикла судовых малоразмерных газотурбинных установок // Энергия-2022. Теплоэнергетика: СЕМНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ (ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ) НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ. В 6 т., Иваново, 11–13 мая 2022 года. Том 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – С. 179.

10. В. Ч. Чу. Влияние видов топлива на основные показатели рекуперативных малогабаритных газотурбинных установок // Перспективы развития двигателестроения : материалы международной научно-технической конференции имени Н.Д. Кузнецова, Самара, 21–23 июня 2023 года / Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева. Том 2. – Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2023. – С. 45-46.

11. В. Ч. Чу, В. В. Барсков, Ю. В. Матвеев, Т. К. Фам. Повышение энергоэффективности судовых малогабаритных газотурбинных установок за счет совершенствования тепловой схемы Брайтона // Тинчуринские чтения - 2023 "Энергетика и цифровая трансформация" : Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26–28 апреля 2023 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. – С. 812-816.

12. В. Ч. Чу, В. А. Рассохин, В. В. Барсков, Ю. В. Матвеев, М. Басати Панах. Снижение расхода топлива и выброса диоксида углерода в судовых малогабаритных газотурбинных установках с добавлением водорода к топливному газу // Современные технологии и экономика в энергетике : Материалы Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 27 апреля 2023 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2023. – С. 139-141.

13. В. Ч. Чу, В. А. Рассохин, В. В. Барсков. Влияние эффективности турбины на потери тепловой энергии в когенерационной энергетической установки малой мощности // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов, Тюмень, 20–22 декабря 2023 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 121-124.

14. В. Ч. Чу, В. А. Рассохин, В. В. Барсков [и др.] Выбор оптимальных параметров ступени для предварительного проектирования радиально-осевой турбины в агрегатах наддува поршневых двигателей на автомобильном транспорте // Актуальные вопросы автомобильного транспорта (АВАТ-2023) : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Барнаул, 15 декабря 2023 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2024. – С. 50-53.

15. Чу, В. Ч. Выбор габаритных размеров компактных теплообменников с формой каналов, изготавлиющихся с помощью аддитивных технологий / В. Ч. Чу, В. А. Рассохин, А. К. Нгуен // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе : Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов. В 2-х томах, Тюмень, 18–20 декабря 2024 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2024. – С. 260-263.