



Жавроцкий Станислав Викторович

Разработка научно-технических основ создания автономных газотурбинных установок, использующих энергию избыточного давления природного газа на газораспределительных станциях

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Брянск
2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Научный руководитель

доцент, кандидат технических наук

Стребков Александр Сергеевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

Беседин Сергей Николаевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», кафедра теплофизических основ судовой энергетики, профессор

кандидат технических наук

Котов Валентин Сергеевич

ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный Центр Военно-морского флота «Военно-морская академия имени Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова» Министерства обороны Российской Федерации, г. Санкт-Петербург, доцент

Ведущая организация

ФГАОУ ВО «Уральский государственный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита состоится «14» декабря 2021 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета У.05.04.12 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Главное здание, аудитория 118).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.spbstu.ru/science/defences.html> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Автореферат разослан «_____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Барсков Виктор Валентинович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Приоритетным направлением в развитии отечественной энергетики и промышленности на современном этапе является энергосбережение и повышение эффективности использования энергетических ресурсов, снижение удельных топливно-энергетических затрат на производство единицы готовой продукции. В 2009 г. распоряжением Правительства России была утверждена документ «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года». Согласно принятой энергетической стратегии в области генерации электроэнергии предполагается применение высокоэффективных энергосберегающих технологических решений, направленных на максимальное использование вторичных энергетических ресурсов при одновременном снижении негативного воздействия электроэнергетики на окружающую среду.

Природный газ является основным видом топлива, транспортирование которого в магистральных газопроводах ведётся при высоких давлениях порядка нескольких МПа, в то время как в большинстве случаев потребление газа производится при давлениях, близких к атмосферному. Такой значительный перепад давлений обуславливает наличие крупного силового потенциала топливного газа в газотранспортной системе, утилизация которого сохраняется в настоящее время актуальной и перспективной задачей.

Высокоэффективным способом утилизации силового потенциала топливного газа является производство электроэнергии с помощью детандер-генераторной технологии, основанной на использовании технологических перепадов давления природного газа в детандер-генераторных агрегатах (ДГА). Без предварительного подогрева потока газа ДГА обеспечивает выработку минимальной мощности, что сопровождается глубоким охлаждением газа за детандером, в отсутствие потребителей холода недопустимым по условиям эксплуатации оборудования ГРС. Подогрев газового потока перед его расширением в детандере позволяет в ограниченном размере достичь повышения мощности ДГА. Однако повышение температуры газа перед детандером требует затрат теплоты на его подогрев.

За последние два десятилетия появилось достаточно много научных работ, посвященных поиску наиболее эффективных способов подогрева потока природного газа перед его расширением в ДГА. Исследовались возможности включения ДГА в тепловые схемы различных энергетических установок – ПТУ, ГТУ, котельных, ТНУ, нетрадиционных источников энергии (ветровых, солнечных установок). Однако реализация предварительного подогрева газового потока в перечисленных случаях сопряжена с дополнительными затратами производимой в ДГА электроэнергии на покрытие собственных нужд таких установок.

Анализ тепловых схем ДГА и ГТУ позволяет сделать вывод, что главным достоинством ДГА является производство электроэнергии с высоким КПД и низкими топливно-энергетическими затратами. Однако производство электроэнергии ДГА требует рациональной организации процесса предварительного подогрева газа, что создаёт определённые затруднения в выборе эффективного источника теплоты. С другой стороны, теория и практика применения ГТУ для производства электроэнергии показывает, что электрический КПД таких установок находится

на сравнительно низком уровне, главным образом из-за необходимости затрачивать часть мощности газовой турбины на привод воздушного компрессора, при одновременном наличии достаточно больших тепловых мощностей, теряемых с выхлопом в атмосферу. Научный интерес в качестве объекта исследования представляет предложенная в настоящей работе двухвальная детандер-компрессорная газотурбинная установка (ДКГТУ), гибридная установка, сочетающая в себе детандер-генераторные и газотурбинные технологии для максимальной выработки электроэнергии при минимизации сопутствующих топливных затрат.

Цель работы. Целью диссертационной работы является определение условий, при которых достигается максимально возможная мощность ДКГТУ при минимизации сопутствующих топливных затрат.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи.

1. Разработка и обоснование структуры тепловой схемы ДКГТУ.
2. Разработка математической модели ДКГТУ.
3. Разработка методики расчёта тепловой схемы ДКГТУ.
4. Исследование влияния параметров тепловой схемы ДКГТУ на показатели её энергетической эффективности.
5. Оптимизация выбора номинальной мощности турбодетандера ДКГТУ на ГРС по критерию достижения максимальной годовой выработки энергии при сезонных изменениях расхода и давления газа в магистральном газопроводе.
6. Разработка практических рекомендаций по проектированию ДКГТУ.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам утилизации силового потенциала топливного газа с помощью применения детандер-генераторных технологий посвящено большое количество научных работ. В России и за рубежом разработано достаточно много принципиальных тепловых схем и конструктивных решений ДГА и установок, работающих с включением ДГА в их тепловые схемы, в том числе с возобновляемыми источниками энергии.

В исследуемой в настоящей работе установке реализуется новая концепция максимального использования энергии избыточного давления топливного газа, сочетающая детандер-генераторные и газотурбинные технологии.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработана тепловая схема ДКГТУ, обеспечивающей максимальный уровень генерации электроэнергии при минимальных удельных топливных затратах.
2. Разработаны аналитические зависимости для определения термодинамических параметров ДКГТУ и её выходных характеристик. На основе разработанных зависимостей представлены методики для расчета тепловых схем ДКГТУ.
3. Получены результаты расчетов выходных характеристик ДКГТУ в зависимости от таких факторов, как степень снижения давления природного газа в турбодетандере, степень повышения давления воздуха в компрессоре, температура наружного воздуха и коэффициент регенерации.
4. Предложена методика определения оптимальных номинальных параметров турбодетандера ДКГТУ с помощью метода Нелдера-Мида, работающей на ГРС в условиях сезонной неравномерности основных влияющих факторов – давления природного газа в магистральном газопроводе и его расхода через ГРС. В

соответствии с полученными значениями произведен примерный расчет основных размеров элементов проточной части газовой турбины.

5. Разработаны практические рекомендации по проектированию ДКГТУ.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что предложена тепловая схема ГТУ нового типа, в которой отсутствуют затраты мощности газовой турбины на привод компрессора, покрываемые за счет использования энергии избыточного давления природного газа в турбодетандере. При этом потенциал высокотемпературных продуктов сгорания используется не только для производства электроэнергии, но и для предварительного подогрева газового потока перед его расширением в турбодетандере. В тепловой схеме ДКГТУ имеется возможность развития максимальной мощности от утилизации силового потенциала топливного газа при минимальных сопутствующих топливных затратах. Разработанные аналитические зависимости и созданные на их основе методики расчёта параметров и выходных характеристик ДКГТУ дополняют существующие методики расчета тепловых схем на основе ГТУ, а также создают предпосылки для развития комбинированных с ДКГТУ энергетических установок и энерготехнологических комплексов.

Практическая значимость работы заключается в том, что предлагаемая методика определения оптимальных номинальных параметров турбодетандера ДКГТУ с помощью симплексного метода Нелдера-Мида позволяет наиболее полно использовать силовой потенциал топливного газа в условиях конкретной ГРС. Практические рекомендации по проектированию ДКГТУ позволяют наряду с сохранением наибольшей мощности турбодетандера свести к минимуму потери от аэродинамического несовершенства турбомашин установки. Таким образом, повышается эффективность энергосбережения при производстве электроэнергии, появляется возможность объективной оценки энергосберегающих проектов на основе использования ДКГТУ.

Методология и методы исследования, применяемые в диссертационной работе, включают в себя такие теоретические методы исследования, как анализ и синтез, абстрагирование, моделирование.

Методы исследования включают в себя применение и модернизацию методик расчёта различных термодинамических параметров турбомашин, а также метод многомерной оптимизации при решении задачи определения номинальной мощности турбодетандера ДКГТУ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Принципиальная тепловая схема ДКГТУ, максимально использующая энергию избыточного давления природного газа для производства сжатого воздуха в комбинированном термодинамическом цикле турбодетандера и газотурбинного двигателя с генерацией электроэнергии при минимальных удельных топливных затратах.

2. Аналитические зависимости для определения термодинамических параметров ДКГТУ и её выходных характеристик, а также методики расчета тепловых схем установки.

3. Результаты расчетов выходных характеристик ДКГТУ в зависимости от степени снижения давления природного газа в турбодетандере, степени повышения давления воздуха в компрессоре, температуры наружного воздуха и коэффициента регенерации.

4. Методика определения оптимальных номинальных параметров турбодетандера ДКГТУ, работающей на ГРС в условиях сезонных колебаний давления природного газа в магистральном газопроводе и уровня потребления объемов природного газа, проходящих через ГРС.

5. Результаты вычисления основных размеров элементов проточной части газовой турбины, исходные данные для расчета которых были получены на этапе поиска оптимальных номинальных параметров турбодетандера ДКГТУ и расчета тепловой схемы установки.

6. Практические рекомендации по проектированию ДКГТУ.

Степень достоверности результатов диссертационного исследования обусловлена использованием в качестве базовых апробированных методик расчёта тепловых схем турбоустановок.

Личный вклад автора.

1. Разработано научно-техническое обоснование принципиальной тепловой схемы ДКГТУ, использующей энергию избыточного давления топливного газа для производства сжатого воздуха в комбинированном термодинамическом цикле турбодетандера и газотурбинного двигателя, приводящего электрогенератор.

2. Разработаны математические модели ДКГТУ и основанные на них методики расчета термодинамических параметров и выходных характеристик установки.

3. Проведены расчеты по разработанным методикам, результаты которых показывают влияние на выходные характеристики ДКГТУ степени снижения давления природного газа в турбодетандере, степени повышения давления воздуха в компрессоре, температуры наружного воздуха, а также степени регенерации – для ДКГТУ с регенеративным подогревом воздуха.

4. Разработана методика определения оптимальных номинальных параметров турбодетандера ДКГТУ, и на ее основе выполнен с помощью симплексного метода Нелдера – Мида, адаптированного под специфику задачи, поиск оптимальных номинальных давления природного газа перед турбодетандером и расхода газа через турбодетандер по критерию достижения максимальной годовой энергетической выработки. В соответствии с полученными оптимальными значениями произведен расчет размеров направляющих аппаратов, рабочих колес и диффузора проточной части газовой турбины ДКГТУ.

5. Разработаны практические рекомендации по проектированию ДКГТУ, позволяющие комплексно подойти к задаче нахождения оптимальных конструкции и выходных характеристик при минимизации потерь, обусловленных как неполнотой утилизации располагаемого силового потенциала топливного газа, так и потерями от аэродинамического несовершенства в проточных частях турбомашин ДКГТУ.

Объект исследования. Объектом исследования является принципиально новая гибридная энергетическая установка, воплощающая в себе объединение де-

тандерных и газотурбинных технологий – детандер-компрессорная газотурбинная установка (ДКГТУ).

Предмет исследования. Предметом исследования является повышение энергетической эффективности ДКГТУ посредством выбора оптимальных термодинамических и режимных параметров установки, совершенствования конструкции турбомашин ДКГТУ.

Апробация и публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 13 печатных работах, в том числе 4 статьях в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК Министерства образования и науки РФ, 3 описаниях патентов на полезную модель. Имеется свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основное содержание выполненного исследования опубликовано в 4 статьях, тезисах и докладах на конференциях, описаниях к 3 патентам на полезные модели.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов; содержит 195 страниц машинописного текста, включая 25 таблиц, 98 рисунков, 6 приложений и библиографический список из 166 наименований.

Содержание работы

Во введении раскрыта актуальность темы исследования, представлена общая характеристика работы.

В первой главе приводится краткое описание идеи преобразования силового потенциала топливного газа в электрическую энергию с помощью детандер-генераторного агрегата (ДГА). На основе анализа и систематизации научно-технической литературы представлены основные разработки, использующие ДГА как обособленно, так и комбинированно в составе других энергетических установок, таких как паро- и газотурбинные установки, паровые и водогрейные котлы, теплонасосные установки и установки, работающие на возобновляемых источниках энергии (ветра, солнца).

Выполнен краткий обзор опыта применения ДГА и их основных производителей. Приведены краткие конструктивные особенности и характеристик ДГА. Как показал проведенный обзор в настоящее время существует достаточно мощная материально-техническая база для промышленного производства и освоения детандер-генераторных и газотурбинных установок, работающих в сегменте энергетических установок малой мощности. Российские и зарубежные производители современного оборудования для ДГА и ГТУ представлены рядом серийных установок, на базе которых могут быть созданы более энергоэффективные машины.

Завершается первая глава определением цели и формулированием задач диссертационного исследования.

Во второй главе приводятся тепловые схемы ДГА, разработанные при участии автора, с помощью которых можно достичь некоторого увеличения полезного использования энергии избыточного давления природного газа. В то же время

эти схемы ограничены в возможности более значительного увеличения мощности, а также нахождения более эффективного способа предварительного подогрева топливного газа перед турбодетандером. Рациональным шагом в направлении преодоления этих ограничений является разработка новой комбинированной тепловой схемы, основанной на утилизации силового потенциала топливного газа.

Приводятся разработанные тепловые схемы двухвальных ДКГТУ с отсутствием и наличием регенеративного подогрева воздуха.

На рисунке 1 представлена тепловая схема двухвальной ДКГТУ без регенерации. Природный газ высокого давления поступает для предварительного подогрева в подогреватель 9, а затем – в турбодетандер 4 и далее – газопровод сниженного давления за ГРС. Работа расширяющегося газового потока расходуется в компрессоре 5 на сжатие воздуха, подаваемого в камеру сгорания 8. Образующиеся в результате сжигания топлива продукты сгорания направляются в газовую турбину 6, приводящую через редуктор электрогенератор 7. После расширения в газовой турбине поток продуктов сгорания следует в подогреватель 9 природного газа, где отдает ему часть своей теплоты.

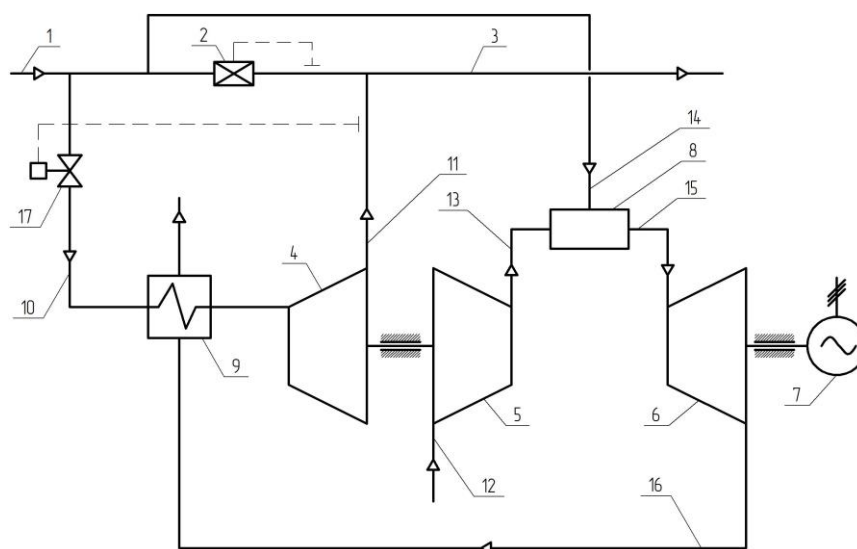


Рисунок 1 – Схема ДКГТУ без регенерации:

1 – магистральный газопровод; 2 – редуцирующее устройство; 3 – газопровод сниженного давления газа; 4 – турбодетандер; 5 – компрессор; 6 – газовая турбина; 7 – электрогенератор; 8 – камера сгорания; 9 – подогреватель газа; 10 – входной газопровод; 11 – выходной газопровод; 12, 13 – всасывающий и напорный воздухопроводы; 14 – газопровод к камере сгорания; 15 – трубопровод продуктов сгорания; 16 – трубопровод выхлопных газов; 17 – регулятор давления

Такая гибридная установка одновременно использует в качестве источника теплоты для подогрева газа перед турбодетандером продукты сгорания на выходе газовой турбины, а с другой стороны исключает затраты мощности газовой турбины на привод воздушного компрессора, что в результате приводит к достижению высокой энергетической эффективности производства электроэнергии. Кроме того, отсутствие кинематической связи между воздушным компрессором и силовой газовой турбиной создает возможность работы обоих агрегатов с различ-

ными частотами вращения, при которых могут быть достигнуты их оптимальные внутренние относительные КПД.

На рисунке 2 приведен термодинамический цикл ДКГТУ без регенерации, работающей с соблюдением условия полной экологичности, при котором выдерживается равенство температур природного газа перед ДКГТУ и за ней.

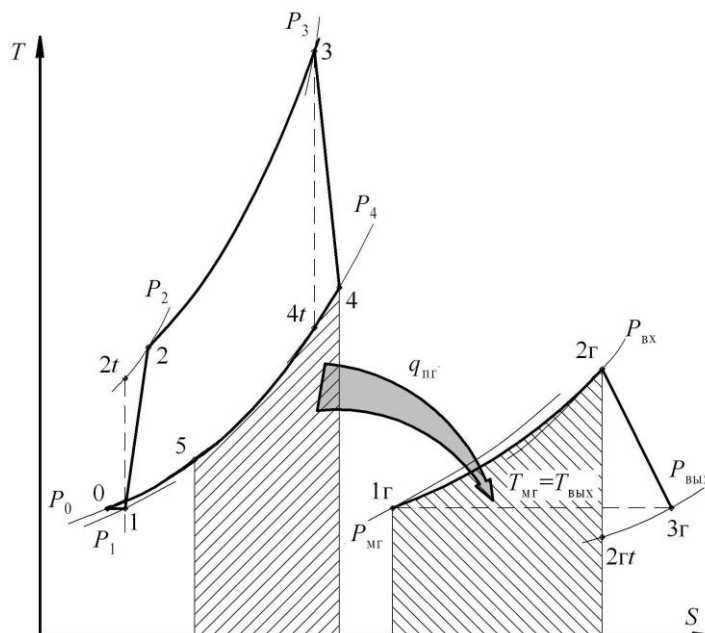


Рисунок 2 – Термодинамический цикл ДКГТУ без регенерации, работающей с соблюдением условия полной экологичности ($T_{MG} = T_{BIX}$)

0-1 – процесс течения воздуха через воздушный фильтр на входе; 1-2t – изоэнтропийный процесс сжатия воздуха в компрессоре; 1-2 – политропный процесс сжатия воздуха в компрессоре; 2-3 – процесс подвода теплоты к рабочему телу в камере сгорания; 3-4t – изоэнтропийный процесс расширения рабочего тела в газовой турбине; 3-4 – политропный процесс расширения рабочего тела в газовой турбине; 4-5 – процесс отвода теплоты от продуктов сгорания в подогревателе природного газа; 5-0 – изобарный процесс отвода теплоты в окружающую среду; 1Г-2Г – процесс подвода теплоты в подогревателе природного газа; 2Г-3Г – политропный процесс расширения потока природного газа в турбодетандере; $q_{пг}$ – удельный расход теплоты на подогрев топливного газа

Особенностью ДКГТУ, в отличие от традиционных ГТУ, для которых характерно отсутствие на уровне энергетического баланса строгой связи между степенью повышения давления и расходом воздуха через компрессор, является наличие жёсткой взаимосвязи между удельной работой компрессора и его производительностью. В ДКГТУ удельная работа компрессора, а значит и степень повышения давления воздуха однозначно связаны с массовым расходом воздуха через компрессор, а поскольку оба этих параметра определяются мощностью турбодетандера, то находятся между собой в соотношении обратной пропорциональности при фиксированной мощности последнего.

В третьей главе приводятся математические модели и методики расчёта ДКГТУ. Исходными данными для расчёта тепловых схем ДКГТУ являются давление газа P_{MG} и его температура T_{MG} в магистральном газопроводе, давление P_{BIX} и температура T_{BIX} газа на выходе установки, по условию полной экологичности

равная $T_{\text{ВЫХ}} = T_{\text{МГ}}$; расход газа через турбодетандер G_{Γ} ; степень повышения давления воздуха в компрессоре π_{κ} ; давление P_0 и температура T_0 окружающей среды; коэффициенты изоэнтроп для природного газа k_{Γ} и воздуха k ; газовые постоянные природного газа R_{Γ} и воздуха R ; теплоты сгорания природного газа Q_p^H и условного топлива $Q_{\text{в.т}}$, стехиометрический коэффициент для природного газа L_0 ; коэффициенты потерь давления в газоздушном тракте установки ($\xi_{\text{ПГ}}, \xi_{\text{PB}}^B, \xi_{\text{PB}}^{\Gamma}, \xi_{\text{BC}}, \xi_T, \xi_{\text{КС}}$); внутренние относительные КПД турбодетандера $\eta_{oi}^{\text{ТД}}$, компрессора $\eta_{oi}^{\text{К}}$, газовой турбины $\eta_{oi}^{\text{Т}}$; механический КПД детандер-компрессорного блока $\eta_{\text{МEX}}$, механический КПД газовой турбины $\eta_{\text{МEX}}^{\text{ТТ}}$, КПД камеры сгорания $\eta_{\text{КС}}$ и степень регенерации r для схемы ДКГТУ с регенеративным подогревом воздуха.

Коэффициент μ , выражающий отношение количества топлива, сжигаемого в камере сгорания к расходу воздуха через компрессор, и температура продуктов сгорания $T_{\text{ВЫХЛ}}$ на выхлопе в атмосферу задаются с последующим уточнением в ходе расчёта с помощью итераций.

Согласно разработанной методике, выходные характеристики ДКГТУ без регенерации рассчитываются по ниже приведенным аналитическим зависимостям.

Мощность, кВт:

$$N = G_{\Gamma} \frac{R_{\Gamma}}{m_{\Gamma}} \frac{T_{\text{МГ}}}{T_0} \frac{X}{Y} (1-Z) \frac{\eta_{oi}^{\text{ТД}} \eta_{oi}^{\text{Т}} \eta_{\text{МEX}}^{\text{ТТ}}}{1 - \eta_{oi}^{\text{ТД}} X} \frac{T_{\text{ВЫХЛ}} (1 + \mu) \eta_{oi}^{\text{К}} \eta_{\text{МEX}} + T_0 Y}{1 - \eta_{oi}^{\text{Т}} (1 - Z)} \quad (1)$$

Удельный расход условного топлива, кг/(кВт·ч):

$$b_{\text{в.т.}} = 3600 \frac{Q_p^H}{Q_{\text{в.т}}} \left(Q_p^H \eta_{\text{КС}} + \frac{R_{\Gamma}}{m_{\Gamma}} \{ T_{\text{МГ}} - K [P_{\text{МГ}} - \pi_{\kappa} P_0 (1 - \xi_{\text{BC}})] \} \right)^{-1} \frac{1}{1 - Z} \frac{1}{\eta_{oi}^{\text{Т}} \eta_{\text{МEX}}^{\text{ТТ}}} \times \left[1 - \frac{T_0 \eta_{\text{МEX}} (Y + \eta_{oi}^{\text{К}}) [1 - \eta_{oi}^{\text{Т}} (1 - Z)]}{T_{\text{ВЫХЛ}} (1 + \mu) \eta_{oi}^{\text{К}} \eta_{\text{МEX}} + T_0 Y} \right] \quad (2)$$

Эффективный КПД ДКГТУ без регенерации

$$\eta_e = \frac{Q_p^H \eta_{\text{КС}} + \frac{R_{\Gamma}}{m_{\Gamma}} \{ T_{\text{МГ}} - K [P_{\text{МГ}} - \pi_{\kappa} P_0 (1 - \xi_{\text{BC}})] \}}{Q_p^H} \frac{(1 - Z) \eta_{oi}^{\text{Т}} \eta_{\text{МEX}}^{\text{ТТ}}}{1 - \frac{T_0 \eta_{\text{МEX}} (Y + \eta_{oi}^{\text{К}}) [1 - \eta_{oi}^{\text{Т}} (1 - Z)]}{T_{\text{ВЫХЛ}} (1 + \mu) \eta_{oi}^{\text{К}} \eta_{\text{МEX}} + T_0 Y}} \quad (3)$$

Вспомогательные коэффициенты в формулах (1) – (3) равны

$$m_{\Gamma} = (k_{\Gamma} - 1) / k_{\Gamma}; \quad X = 1 - \pi_{\text{ТД}}^{-m_{\Gamma}}; \quad Y = \pi_{\kappa}^m - 1; \quad Z = \left(\pi_{\kappa} \frac{(1 - \xi_{\text{BC}})(1 - \xi_{\text{КС}})}{1 + \xi_T} \right)^{-m}.$$

В четвёртой главе рассмотрено влияние на выходные характеристики ДКГТУ степени снижения давления в турбодетандере $\pi_{\text{ТД}}$, степени повышения давления воздуха в компрессоре π_{κ} , температуры окружающей среды T_0 и коэффициента регенерации r – для тепловой схемы ДКГТУ с регенерацией.

На рисунках 3 – 4 представлены графики выходных характеристик ДКГТУ без регенерации в зависимости от температуры окружающей среды t_0 .

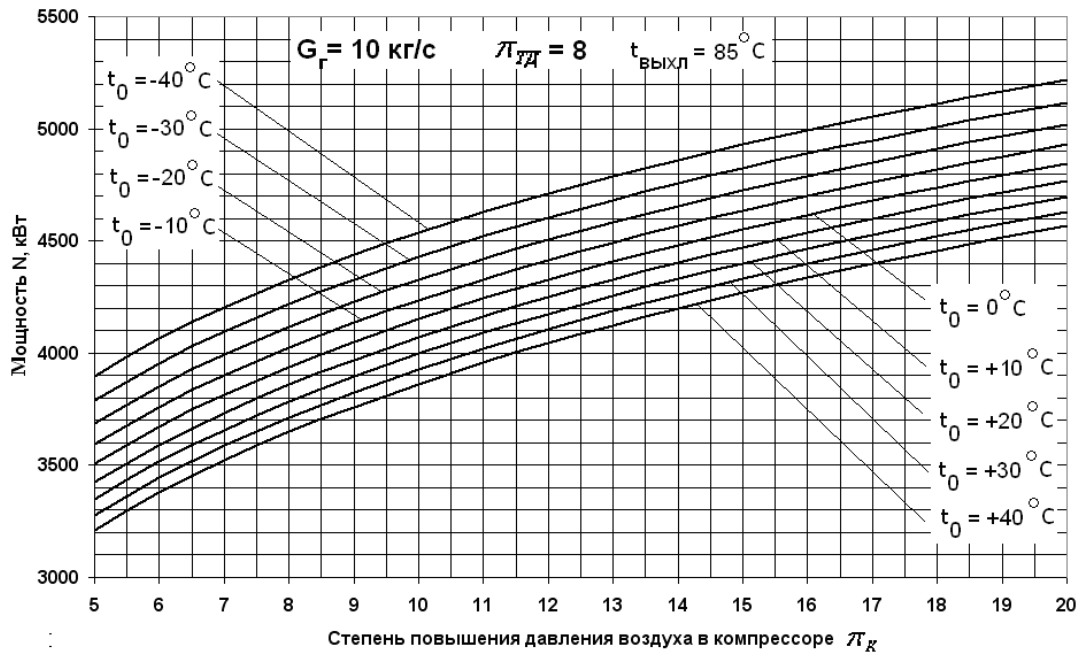


Рисунок 3 – Мощность N ДКГТУ без регенерации

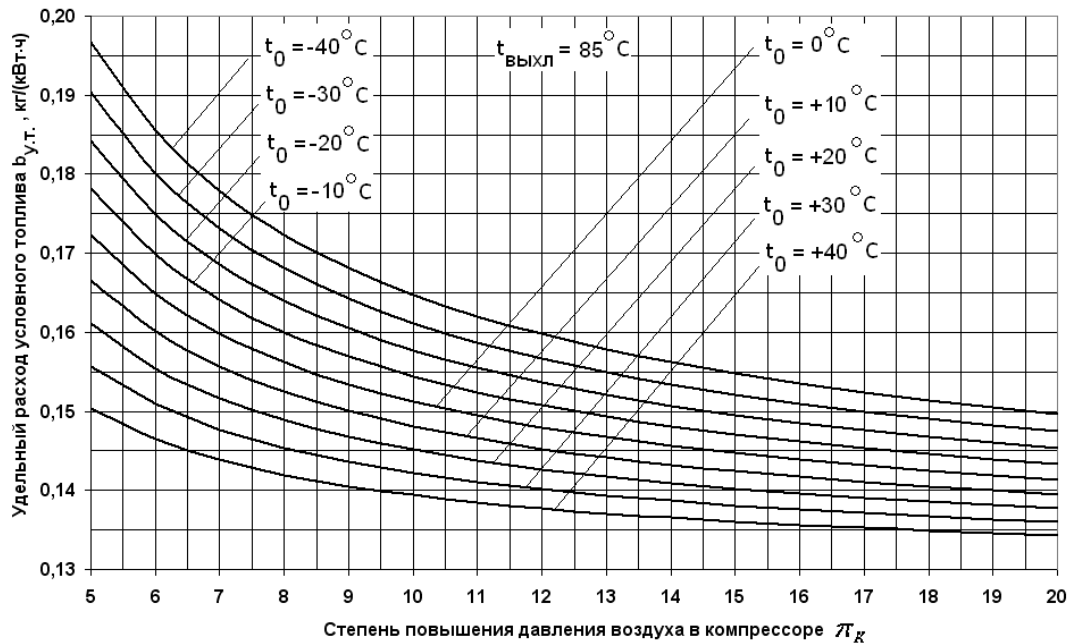


Рисунок 4 – Удельный расход условного топлива $b_{v.t.}$ ДКГТУ без регенерации

Влияние коэффициента регенерации на энергетические показатели ДКГТУ при температуре продуктов сгорания на выходе $t_{\text{выхл}} = 85^\circ \text{C}$ и температуре окружающей среды $t_0 = 0^\circ \text{C}$ представлено на рисунках 5 – 6.

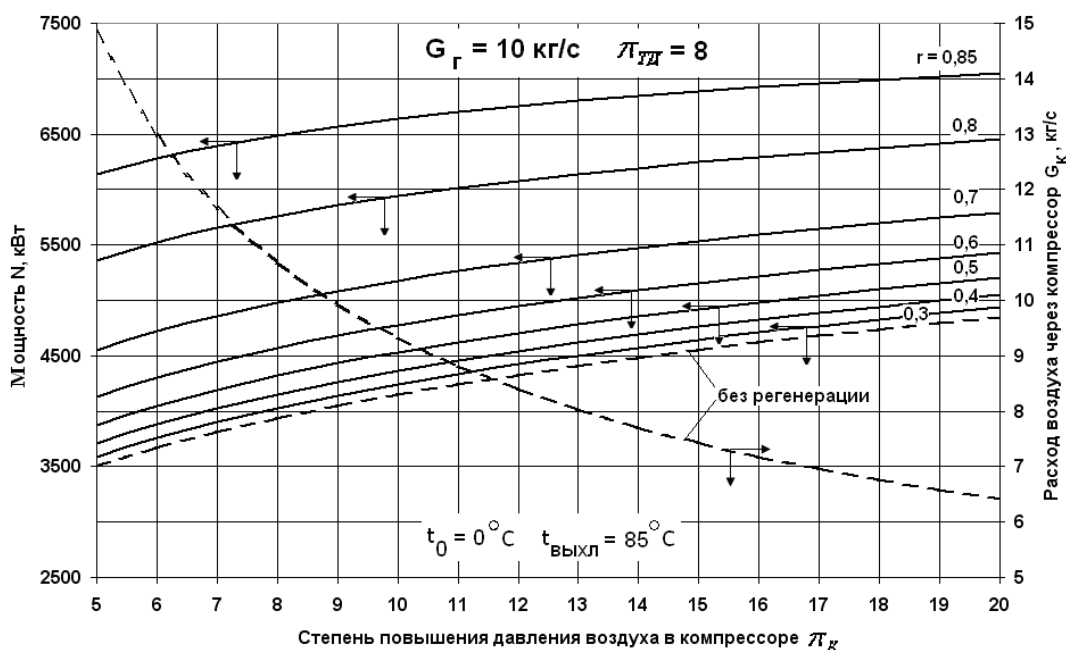


Рисунок 5 – Мощность N и расход воздуха через компрессор G_K для ДКГТУ с регенерацией

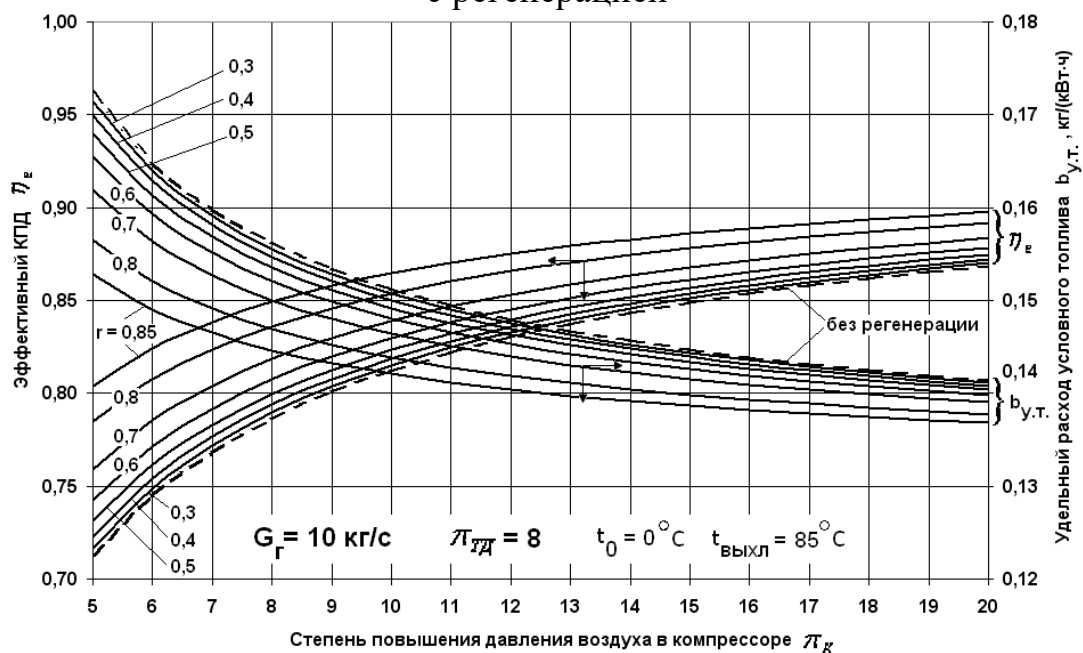


Рисунок 6 – Удельный расход условного топлива $b_{у.т.}$ и эффективный КПД η_e ДКГТУ с регенерацией

С увеличением π_K от 5 до 20 прирост мощности установки без регенерации составляет около 30%. С повышением температуры всасываемого воздуха на каждые 10°C мощность ДКГТУ снижается примерно на 2,5%, а удельный расход условного топлива уменьшается на 1,5...3,5%.

Использование регенеративного подогрева воздуха в тепловой схеме ДКГТУ позволяет увеличить мощность установки на 30...70%. С увеличением степени повышения давления воздуха относительное снижение удельного расхода топлива уменьшается с 8% до приблизительно 2,5% при увеличении коэффициента регенерации от $r = 0,6$ до $r = 0,85$.

Для учета влияния изменения теплоемкостей рабочих тел в процессах термодинамического цикла ДКГТУ и снижения погрешности определения удельного расхода условного топлива и эффективного КПД к зависимостям (2) и (3) был введен поправочный коэффициент ψ . Уточнённые значения удельного расхода условного топлива $b_{v.T.}^*$, кг/(кВт·ч) и эффективного КПД η_e^* ДКГТУ определяются по формулам

$$b_{v.T.}^* = b_{v.T.} (1 + \psi) \quad (4)$$

$$\eta_e^* = \eta_e (1 - \psi), \quad (5)$$

где $b_{v.T.}$ и η_e – удельный расход условного топлива и эффективный КПД, рассчитанные по разработанной методике по зависимостям (2) и (3) соответственно. С учётом введённой поправки относительная погрешность определения удельного расхода топлива и эффективного КПД не превышает 0,6%.

В пятой главе рассмотрен порядок определения оптимальных параметров турбодетандера ДКГТУ по критерию достижения наибольшей утилизации силового потенциала топливного газа на примере одной из региональных ГРС. При этом были использованы методика расчёта турбодетандера на переменных режимах работы, представленная в виде схемы на рисунке 7, и методика оптимизационного поиска оптимальных номинальных параметров турбодетандера.

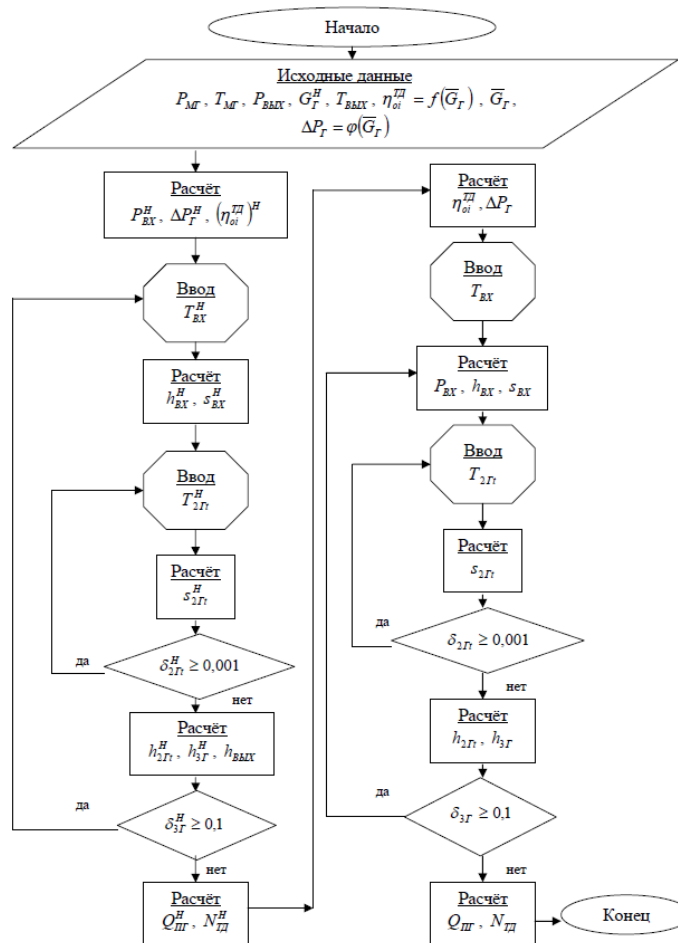


Рисунок 7 – Последовательность расчёта параметров турбодетандера на переменных режимах его работы

Исходными данными для расчёта являются графики изменения расхода газа через ГРС, его давления в магистральном газопроводе и давления газа в газопроводе за ГРС. В результате выполненных расчётов с помощью специально разработанной программы «GasTD Opt» получены следующие оптимальные параметры турбодетандера ДКГТУ, обеспечивающие в заданных условиях максимальную годовую выработку механической энергии на привод компрессора и, соответственно, наиболее полную утилизацию силового потенциала топливного газа. Оптимальный номинальный расход газа через турбодетандер составил $G_{opt}^H = 79744$ $\text{нм}^3/\text{ч}$; оптимальное номинальное давление газа на входе в турбодетандер $P_{BX(opt)}^H = 3,705$ МПа. Оптимальная мощность турбодетандера $N_{TD(opt)}^H = 4081,62$ кВт.

По полученным результатам расчета параметров турбодетандера ДКГТУ был выполнен расчет тепловой схемы установки. Выполненный расчет геометрических размеров основных элементов проточной части газовой турбины подтверждает возможность обеспечения высоких энергетических показателей турбоагрегатов установки при рациональном выборе соотношения между степенью повышения давления и массовым расходом воздуха в компрессоре.

Конструктивная схема проточной части газовой турбины представлена на рисунке 8.

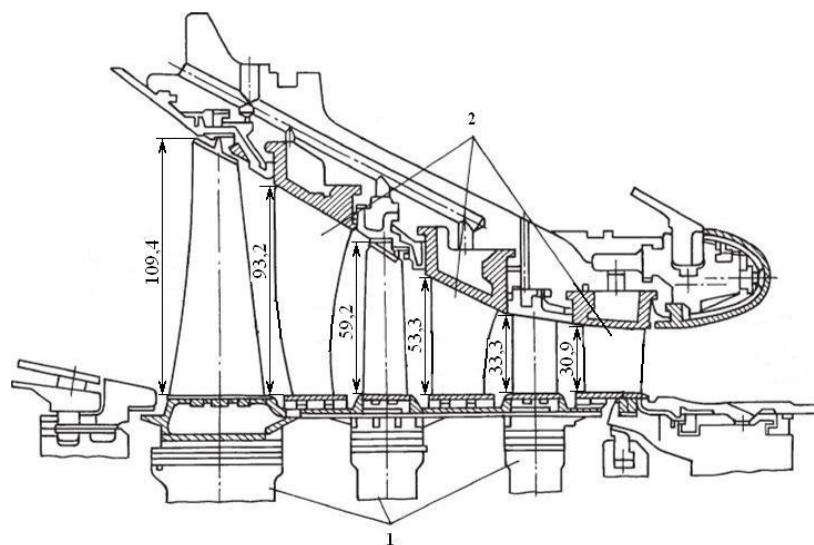


Рисунок 8 – Конструктивная схема проточной части газовой турбины
1 – рабочие лопатки; 2 – направляющий аппарат

Предложены практические рекомендации по проектированию ДКГТУ в виде алгоритма, с помощью которого можно обеспечить в условиях конкретной ГРС наиболее полную утилизацию силового потенциала топливного газа. Последовательность оптимального проектирования ДКГТУ представлена в виде схемы на рисунке 9.

Задача оптимизации заключается в поиске оптимальной конструкции основных элементов схемы ДКГТУ (турбодетандера, компрессора, газовой турбины) по критерию достижения минимальных потерь в проточной части турбомашин, соответственно, максимального КПД, при максимальном использовании силового потенциала топливного газа.

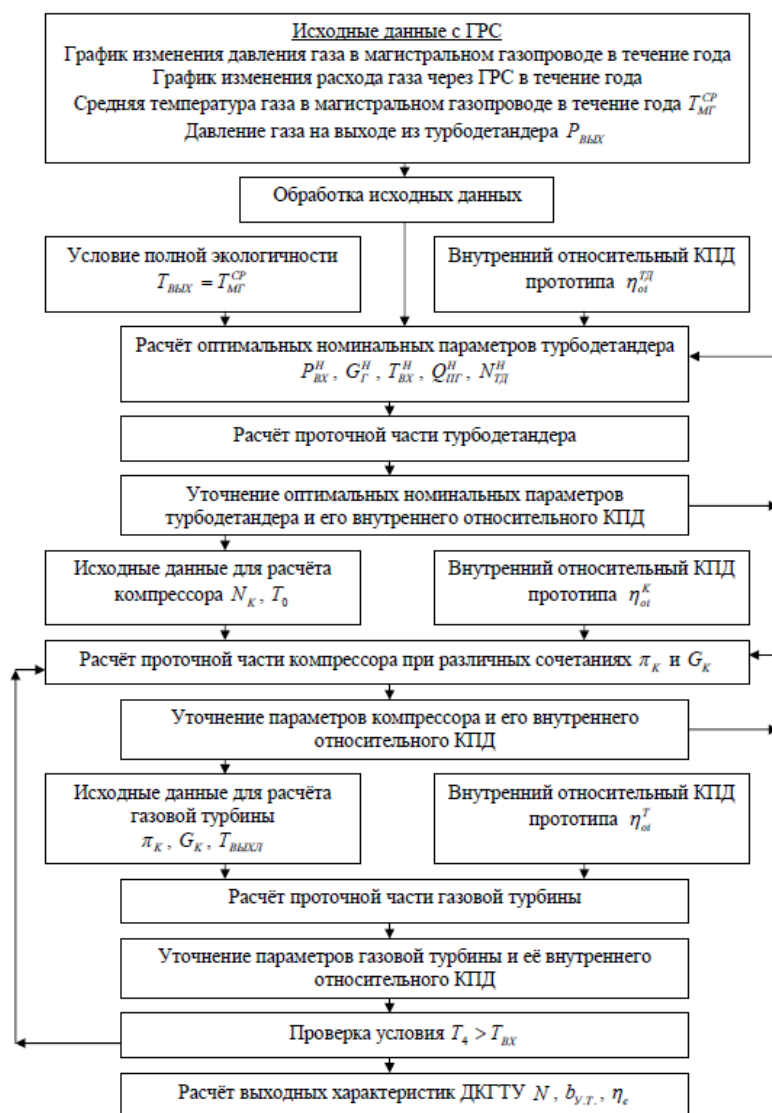


Рисунок 9 – Последовательность оптимального проектирования ДКГТУ

Основные результаты и выводы

1. В результате синтеза детандер-генераторных и газотурбинных технологий была разработана тепловая схема гибридной установки – детандер-компрессорной газотурбинной установки (ДКГТУ) для максимального производства электроэнергии посредством утилизации силового потенциала топливного газа при минимизации сопутствующих топливных затрат.

2. Разработаны аналитические зависимости, устанавливающие связь между параметрами установки и выходными характеристиками – мощностью, эффективным КПД и удельным расходом топлива на производства электрической энергии.

3. Разработаны методики расчёта тепловых схем ДКГТУ без регенерации и с регенеративным подогревом воздуха.

4. Расчёты, выполненные по разработанной методике, показывают, что с увеличением степени повышения давления воздуха в компрессоре π_k удельный расход условного топлива снижается, а эффективный КПД увеличивается. По сравнению с производством электроэнергии в турбодетандером агрегате, приводящем электрогенератор, при использовании одного и того же силового потенциала топ-

ливного газа ДКГТУ без регенерации может произвести электроэнергии в 1,5 – 1,7 раза больше.

5. С повышением температуры окружающей среды на каждые 10°С мощность установки снижается на 2,5%, удельный расход условного топлива уменьшается, на 1,5...3,5%.

6. Сравнивая ДКГТУ с регенерацией и без регенерации, при $t_{\text{ВЫХЛ}} = 85^{\circ}\text{C}$ и прочих равным условиях эффективный КПД установки с регенерацией больше на 3...8%, чем установки без регенерации. При степени регенерации $r = 0,85$ относительное увеличение мощности установки достигает 70% от мощности ДКГТУ без регенерации.

7. Относительная погрешность определения мощности ДКГТУ при учете изменения теплоемкостей рабочих тел установки в процессах ее термодинамического цикла не превышает 3...4%. Погрешность определения удельных расходов условного топлива и эффективных КПД, с учётом поправочного коэффициента составляет не более 0,6%.

8. На примере одной из региональных ГРС России были получены оптимальные номинальные параметры турбодетандера, обеспечивающие максимальную годовую выработку механической энергии на привод компрессора ДКГТУ по критерию достижения максимальной годовой энергетической выработки при сезонных изменениях расхода и давления газа в магистральном газопроводе в течение года. В результате проведенных расчётов с использованием оптимизационного метода Нелдера-Мида оптимальный номинальный расход газа через турбодетандер составил 79744 нм³/ч, оптимальное давление газа на входе в турбодетандер – 3,705 МПа, а его мощность – 4081,62 кВт.

9. Определены основные геометрические параметры проточной части трехступенчатой газовой турбины ДКГТУ, свидетельствующие о возможности обеспечения высоких энергетических показателей установки при рациональном соотношении между степенью повышения давления и массовым расходом воздуха в компрессоре. Высоты рабочих лопаток составили 109, 59 и 33 мм соответственно.

10. Предложены практические рекомендации для оптимального проектирования ДКГТУ, позволяющие разработать установку для наиболее полного использования энергии избыточного давления природного газа при минимизации потерь от аэродинамического несовершенства проточной части турбомашин установки.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

1. Жавроцкий, С.В. Снижение удельных энергозатрат при производстве силикатных материалов за счет использования силового потенциала топливного газа / С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков // Материалы III межд. науч.-практ. конф. в 2 ч. «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании»: часть 1; под ред. И.А. Лагерова. – Брянск: БГТУ, 2011. – 268 с. – С. 113-114.

2. Жавроцкий, С.В. Обеспечение максимальной выработки электроэнергии при использовании силового потенциала топливного газа по результатам моделирования режимов газопотребления цементного завода / С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков // Информационные технологии, энергетика и экономика (электроэнергетика и электротехника, теплофизика и энергосбережение, электроника): Сб. трудов девятой межд. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, Т. 2 (г. Смоленск, 19-20 апреля 2012 г.). – Смоленск: Изд-во «Универсум» филиала МЭИ, 2012. – 226 с. – С. 124-128.

3. Жавроцкий, С.В. Энергетическая эффективность утилизационных турбодетандерных установок в сравнении с показателями работы турбоагрегатов ТЭЦ / С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков // *Материалы IV междунауч.-практ. конф. «Достижения молодых учёных в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании»*/под ред. И.Л.Лагерева.–Брянск: БГТУ, 2012.–368 с.–С. 66-68.

4. Жавроцкий С.В. Оценка энергетических характеристик утилизационной турбодетандерной установки в системе газоснабжения промышленных и коммунальных потребителей / С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков // *Материалы V международной научно-практической конференции «Достижения молодых ученых в развитии инновационных процессов в экономике, науке, образовании»*; под ред. О.М. Голембиовской. – Брянск: БГТУ, 2013. – 248 с. – С. 20-22.

5. Стребков, А.С. Оценка эффективности производства электрической энергии при использовании силового потенциала топливного газа / А.С. Стребков, С.В. Жавроцкий // *Вестник Брянского государственного технического университета.*–2013. –№ 4(40)–С. 77-86.

6. Стребков, А.С. Влияние конфигурации турбодетандерного оборудования на эффективность использования силового потенциала топливного газа / А.С. Стребков, А.В. Осипов, С.В. Жавроцкий // *Вестник Брянского государственного технического университета.* – 2014. – № 4 (44). – С. 109-113.

7. Жавроцкий, С.В. Повышение эффективности утилизации избыточного давления топливного газа в двухступенчатом детандере / С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков, А.В. Осипов // *Научно-технические ведомости СПбГПУ.* Санкт-Петербург: Изд-во Политех. ун-та. – 2015. – № 2 (219). – С. 72-82.

8. Утилизационная турбодетандерная установка с последовательно-параллельным распределением потоков природного газа: пат 157232 Рос. Федерация: МПК F25B11/00, F01K27/00 / А.С. Стребков, А.В. Осипов, С.В. Жавроцкий; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Брянский государственный технический университет (RU). – № 2015109538/06, заявл. 18.03.2015; опубл. 27.11.2015.

9. GasTD Opt: свидетельство о государственной регистрации программ ЭВМ № 2016619126 Рос. Федерация / И.С. Каштанов, А.С. Стребков, С.В. Жавроцкий; правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет (ФГБОУ ВО «БГТУ») (RU). - № 2016616367, заявл. 17.06.2016; в Реестре программ для ЭВМ 15.08.2016.

10. Стребков, А.С. Энергетическая эффективность использования детандерного агрегата в составе газотурбинной установки / А.С. Стребков, А.В. Осипов, С.В. Жавроцкий, И.С. Каштанов // *Совершенствование энергетических машин: Сб. науч. тр. / под ред. В.И. Попкова и В.В. Роголёва.* – Брянск: Изд-во Брянского государственного технического университета, 2017. – 214 с. – С. 190-198.

11. Газораспределительная станция с детандер-компрессорной газотурбинной энергетической установкой: пат 176799 Рос. Федерация: МПК F04D25/02, F17D1/04 / С.В. Жавроцкий, А.С. Стребков, А.В. Осипов, И.С. Каштанов; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» (RU). – № 2016132948, заявл. 09.08.2016; опубл. 29.01.2018.

12. Газораспределительная станция с детандер-компрессорной газотурбинной энергетической установкой с разрезным валом: пат 199019 Рос. Федерация: СПК F04D25/02, F17D1/04 / А.С. Стребков, А.В. Осипов С.В., Жавроцкий, И.С. Каштанов; патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет» (RU). – № 2019143902, заявл. 25.12.2019; опубл. 07.08.2020.

13. Стребков, А.С. Термодинамические основы использования детандер-компрессорной газотурбинной установки / А.С. Стребков, Осипов А.В., Жавроцкий С.В. // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение.* – 2021. – №1 (136). – С. 166-184.

