

На правах рукописи

УДК 621.584.4

Малахов Андрей Сергеевич

**Совершенствование методик расчета роторного волнового
криогенератора для установок сжижения природного газа**

Специальность 2.4.8 - Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Москва — 2025

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет) (МГТУ им. Н.Э. Баумана) на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

Научный руководитель: Доктор технических наук,
доцент **Семенов Виктор Юрьевич**

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, доцент **Угланов Дмитрий Александрович**, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей ФГАОУ ВО Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королева (г. Самара)

Кандидат технических наук, **Ястребов Арсений Константинович**, доцент кафедры низких температур ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» (г. Москва).

Ведущая организация: АО «Криогенмаш» (г. Балашиха)

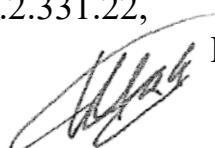
Защита состоится 11.02.2025г. в 16:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.22 при Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица,5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы на автореферат, в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, д. 5, стр. 1, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.22.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.331.22,
д.т.н., доцент

 **Шакуров Алексей Валерьевич**

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования:

В настоящее время широкое применение находит производство и использование сжиженного природного газа (СПГ) в малотоннажном масштабе (производительностью менее 10 т/ч). По прогнозам компании Engie, к 2030 году спрос составит 75–95 млн тонн и распределится следующим образом: электроэнергия –26 %, использование СПГ в качестве судового топлива –32 %, наземный грузовой транспорт – 42 %. Наибольший рост малотоннажного производства СПГ наблюдается в Китае, где активно реализуется инициативный проект создания заправочной инфраструктуры с использованием СПГ под руководством China Clean Energy и ENN Energy Holdings, целью которого является строительство порядка 3000 заправочных станций КПП/СПГ к 2025 году. Рынок СПГ в России сегодня находится на начальной стадии и сдерживается неразвитостью производственно-потребительской инфраструктуры. Сдерживают развитие малотоннажного СПГ, в первую очередь, высокие капитальные затраты на строительство инфраструктуры СПГ и высокие удельные энергозатраты при его производстве. На данном этапе целесообразно производить СПГ на малотоннажных установках, размещаемых на АГНКС и ГРС, отличающихся низкими начальными капитальными вложениями и простотой эксплуатации.

Энергоэффективность и стоимость криогенных установок определяется в том числе совершенством применяемых расширительных устройств. Наиболее эффективным устройством с точки зрения термодинамического совершенства является турбодетандер, однако он имеет сложную конструкцию, высокую стоимость и технические ограничения, связанные с высокой частотой вращения ротора. Традиционные дроссельные расширительные устройства весьма надежны, конструктивно просты и недороги, однако не обладают требуемым изоэнтальпическим КПД. Все вышеперечисленное обуславливает интерес к исследованию генераторов холода, совмещающих высокую термодинамическую эффективность и низкую себестоимость. Одним из таких устройств является роторный волновой криогенератор (РВКГ).

Степень разработанности темы:

Исследование безмашинных волновых криогенераторов началось в 1979 году на базе МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с АО «Криогенмаш» и НПО «Гелиймаш», полученные значения КПД достигали 40%. В начале 2000-х годов исследования продолжились в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», в том числе и роторных волновых детандеров; в области температур расширяемого (активного) природного газа 270–310К были получены значения КПД до 80% и начата успешная промышленная эксплуатация в составе установок отбензинивания газов Сосногорского ГПЗ. В 2013–2016 годах на базе ПК «НПФ ЭКИП», совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана впервые были проведены исследования и собран экспериментальный образец РВКГ для применения в области температур 180–210К. Были достигнуты значения КПД порядка 55–60%,

впервые зафиксирована стабильная работа при образовании капельной жидкости в энергообменных каналах. Несмотря на простоту конструкции, наибольшую сложность при проектировании устройства представляет задача определения оптимальной и работоспособной геометрии РВКГ. Для решения данной задачи необходимо использовать математическую модель процессов, происходящих в РВКГ и алгоритм определения оптимальной геометрии, применимые в широкой области термобарических условий и рабочих сред. В результате работ Козлова А. В. в 2000-х годах был сформулирован алгоритм определения оптимальной геометрии, применимый для метана в ограниченной области температур (270–310 К). В работах Архарова А. М., Семенова В. Ю. и Малахова С. Б. (2013–2016 г.) была доработана математическая модель, предложенная Эрсмамбетовым В. Ш. на основании метода распада произвольного разрыва академика С.К. Годунова, а также сформулирована упрощенная, инженерная методика расчета рабочих параметров РВКГ для газовой области. Практический интерес представляет развитие математических моделей путем учета свойств реального газа для получения более точных прогнозов в области, где эти свойства проявляются наиболее сильно, а также расширение области применения инженерной методики расчета на двухфазную область и, как результат, применение данных моделей для исследования различных режимов работы РВКГ с целью повышения его эффективности и изучения возможностей организации циклов получения холода.

Объект исследования – роторный волновой криогенератор.

Предмет исследования – процессы, протекающие в РВКГ, а также методики их моделирования с учетом свойств рабочего тела, направленные на развитие технологий ожижения природного газа на малотоннажных ГРС путем применения РВКГ.

Целью данного исследования является совершенствование методик расчета РВКГ и их верификация путем сопоставления с экспериментальными данными.

Основные задачи:

1. Совершенствование методики расчета термобарических и расходных характеристик РВКГ, основанной на методе академика С.К. Годунова, путем применения уравнения состояния реального газа и модификации граничных условий.

2. Совершенствование методики определения термобарических характеристик РВКГ, основанной на процессах выхлопа и впуска, путем расширения ее области применения на двухфазную область и разработки метода определения расходных характеристик РВКГ.

3. Разработка методики численного моделирования процесса выхлопа, получение уравнения для определения конечной температуры истечения газа в процессе выхлопа с применением канонических показателей адиабаты.

4. Определение термобарических и расходных характеристик работы РВКГ в различных режимах работы на основе экспериментальных данных.

Исследование режима высоконапорной продувки и влияния разницы температур активного и пассивного газа на изоэнтропный КПД РВКГ.

5. Проведение расчетно-теоретических исследований рабочих процессов в РВКГ в различных режимах работы. Исследование режима превышения давления активного потока.

6. Верификация усовершенствованных методик расчета путем сопоставления расчетных данных с данными, полученными экспериментальным путем.

Научная новизна:

1. Усовершенствована математическая модель процессов в канале РВКГ, созданная на основе метода «распада-разрыва» академика С.К. Годунова, путем учета свойств реального газа с применением уравнения состояния явного относительно свободной энергии Гельмгольца.

2. Впервые предложена методика численного моделирования процесса выхлопа, позволяющая проводить расчет при организации процесса в двухфазной области, получено уравнение конечной температуры истечения газа в процессе выхлопа с применением канонических показателей адиабаты.

3. Определены термобарические и расходные характеристики работы РВКГ в режиме высоконапорной продувки на основе экспериментальных данных. Проведено исследование данного режима, показан механизм увеличения изоэнтропного КПД и определена область его рационального применения.

4. Впервые численно определены термобарические и расходные характеристики режима работы РВКГ, в котором степень сжатия пассивного газа выше степени сжатия активного газа – «Режим превышения давления активного потока»).

Теоретическая и практическая значимость:

1. Усовершенствована методика расчета рабочих параметров РВКГ, основанная на процессах выхлопа и впуска, для многофазных рабочих сред.

2. Разработана методика расчета процесса выхлопа применимая в парожидкостной области для любого рабочего тела.

3. Определен способ повышения изоэнтропного КПД РВКГ путем организации «высоконапорной продувки».

4. Исследована и подтверждена расчетом возможность организации режима превышения давления активного потока с целью реализации рецикловых потоков в установках сжижения природного газа.

5. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2024689922, разработанной и апробированной программы расчета показателей адиабаты и построения тепловой карты значений показателя адиабаты на диаграммах состояния.

6. Результаты работы внедрены в деятельность ПК «НПФ ЭКИП».

Методология и методы исследования:

1. Математическое моделирование нестационарных течений рабочей среды в энергообменном канале РВКГ.

2. Исследование и анализ рабочих параметров РВКГ на основании полученных экспериментальных данных.

3. Верификация усовершенствованных методик расчета путем сравнения результатов численного моделирования с данными, полученными экспериментальным путем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная математическая модель, основанная на методе академика С. К. Годунова с учетом свойств реального газа, путем применения показателя адиабаты как функции параметров реального газа.

2. Методика численного моделирования процесса выхлопа для многофазных сред и полученное на ее основе уравнение для определения конечной температуры истечения газа в процессе выхлопа с применением канонических показателей адиабаты.

3. Обоснование механизма повышения изоэнтропного КПД РВКГ в режиме высоконапорной продувки и возможности превышения давления пассивного потока над активным, определена область их оптимальных параметров.

Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждается применением аттестованных измерительных средств, апробированных методик измерения и воспроизводимостью результатов. Основные уравнения представленных автором математических моделей и соотношений величин базируются на фундаментальных законах и уравнениях термодинамики и газодинамики.

Апробация результатов:

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на 3-х конференциях: Международная научно-техническая конференция «Вакуумная техника, материалы и технология» (2025, Москва), российская конференция «Школа молодых ученых имени проф. И. М. Калниня» (2025, Москва), III международная научно-практическая конференция «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (2019, Москва).

Личный вклад автора:

1. Усовершенствованы модель и методика расчета РВКГ, основанные на методе «распада произвольного разрыва» академика С.К. Годунова.

2. Разработана методика моделирования процесса выхлопа, применяемая для парожидкостной области. Получено уравнение для определения конечной температуры истечения с использованием канонических показателей адиабаты.

3. Усовершенствована методика расчета РВКГ, основанная на процессах выхлопа и впуска, а именно: область применения методики расширена для применения как в газовой, так и в двухфазной области, методика дополнена методом определения расходных характеристик РВКГ.

4. Выполнен анализ массива экспериментальных данных и проведена верификация математических моделей и методик расчета.

5. На основании проведенного анализа и расчетов были сформулированы и исследованы режимы высоконапорной продувки и режим превышения давления активного потока.

Публикации:

Основное содержание диссертации изложено в четырех работах, из которых три соответствуют категории индексации журналов К2, одна опубликована в сборнике тезисов докладов конференций. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Основное содержание работы

Первая глава посвящена обзору волновых энергообменных аппаратов и численных методов моделирования нестационарных газодинамических процессов. В результате анализа информационных источников была разработана классификация волновых устройств (Рисунок 1), а также выявлено, что наиболее распространенными классами являются термоакустические и роторно-волновые энергообменные аппараты. При этом роторно-волновая технология применяется в наиболее широком спектре технологических областей: делители потока, эжекция, наддув турбин, роторные ДВС, получение холода.

При анализе математических методов было установлено, что метод академика С.К. Годунова используется в большинстве работ, связанных с расчетом и прогнозированием работы РВКГ, и обеспечивает достаточную точность описания экспериментальных данных, в связи с этим было принято решение взять за основу математическую модель предложенную в работах Семенова В.Ю. и Малахова С.Б. на основании данного метода.

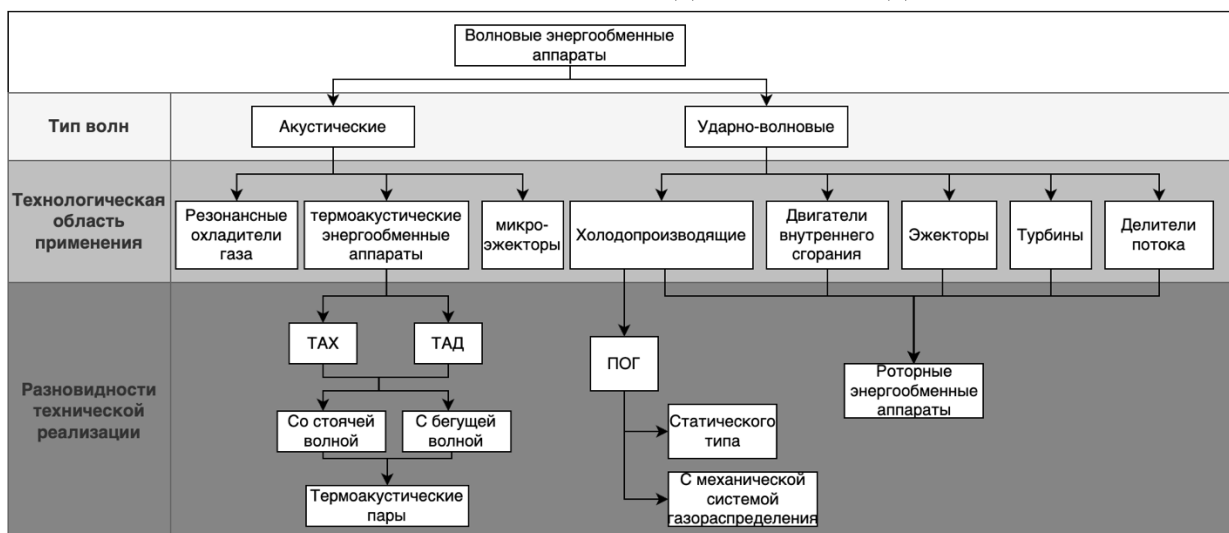


Рисунок 1. Классификация волновых энергообменных аппаратов

Во второй главе приводится описание математической модели для расчета параметров РВКГ. Математическое моделирование заключается в решении системы уравнений, выражающих законы сохранения массы, импульса, и

энергии, дополненной уравнением состояния (уравнения 1—6) в одномерной постановке задачи методом академика С. К. Годунова.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F_{ph}(Q)}{\partial x} + \mathbb{C} = 0, \quad (1) \quad e = \rho(\varepsilon + \frac{u^2}{2}), \quad (4)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{pmatrix}, \quad (2) \quad \mathbb{C} = \begin{pmatrix} \delta_u + \delta_c \\ f_{ploss}(\rho, u) + \delta_u U_u + \delta_c U_c \\ \delta_u \left(\varepsilon_u + \frac{P_u}{\rho_u} + \frac{U_u^2}{2} \right) + \delta_c \left(\varepsilon_c + \frac{P_c}{\rho_c} + \frac{U_c^2}{2} \right) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$F_{ph}(Q) = \begin{pmatrix} \frac{\rho u A(x)}{A} \\ \frac{\rho u^2 A(x)}{A} + p \\ \frac{(e+p)uA(x)}{A} \end{pmatrix}, \quad (3) \quad \varepsilon = f(P, \rho) \quad (6)$$

здесь: Q – векторная функция консервативных переменных, F_{ph} – векторная функция потока с учетом площади действия потока, \mathbb{C} – векторная функция дополнительно действующих сил; ρ – плотность; t – время, x – координата, p – давление; u – скорость движения газа; e – полная энергия единицы объема; ε – удельная внутренняя энергия, δ_u, δ_c – «интенсивности» потока, соответственно, источников и стоков; U_u, U_c – скорости источников и стоков; f_{ploss} – закон определения величины гидравлических потерь на трение (как местных так и на длине) зависящий от принятой модели, геометрии ячейки и параметров потока; A – константа, полная площадь поперечного сечения энергообменного канала в месте воздействия потока, $A(x)$ – функция определяющая площадь воздействия потока (например при моделировании частично открытой стенки). В общем случае система замыкается произвольным уравнением состояния газа - $f(P, \rho)$.

Граничные условия моделируются путем добавления дополнительных ячеек на каждое действующее сопло РВКГ (Рисунок 2). Аббревиатуры АВ, АН, ПВ, ПН обозначают стороны сопел активного и пассивного газов высокого и низкого давления соответственно. Параметры в дополнительных ячейках задаются по определенным функциям (уравнения 7–9) на каждой итерации.

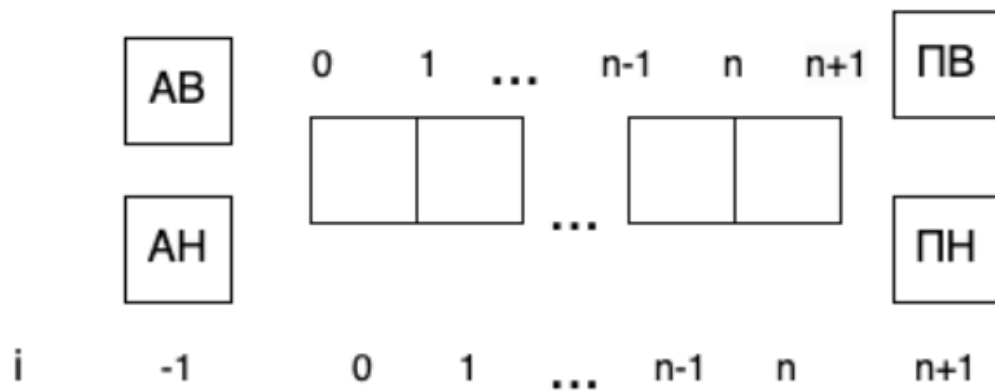


Рисунок 2. Одномерная схема расположения ячеек энергообменного канала и дополнительных ячеек, моделирующих граничные условия

$$u_{\text{соп}_M} = f_u, \quad (7) \quad P_{\text{соп}_M} = f_p, \quad (8) \quad \rho_{\text{соп}_M} = f_\rho \quad (9)$$

где f_u, f_p, f_ρ – функции или законы изменения скорости, давления и плотности в дополнительных ячейках, $u_{\text{соп}_M}, P_{\text{соп}_M}, \rho_{\text{соп}_M}$ – скорость, давление и плотность соответственно в дополнительной ячейке со стороны определённого сопла, моделирующей граничные условия (индекс М обозначает сторону сопла – АН, АВ, ПН, ПВ).

В развитие работ Архарова А. М., Семенова В. Ю., Малахова С. Б. описанная модель усовершенствована следующим образом:

- применяется специализированное уравнение состояния реального газа в виде фундаментального уравнения, явного относительно свободной энергии Гельмгольца для чистого метана при осреднении параметров в ячейках;

- Производится вычисление показателя адиабаты «реального» газа на каждой итерации для каждой ячейки на основании его дифференциального определения (10):

$$k_{\text{реал}} = -\frac{V}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_s \quad (10)$$

- При моделировании граничных условий параметры определяются с учетом заданной скорости течения из закона сохранения энергии и условия не убывания энтропии;

- Дополнительно учитывается кинетическая энергия газа на выходе из РВКГ для осреднения выходных параметров газа.

Усовершенствованные методика и математическая модель позволили уменьшить расхождение расчетных и экспериментальных значений температур на 2-6 градусов для активного газа и на 10 градусов для пассивного газа.

Также в работах Архарова А. М., Семенова В. Ю., Малахова С. Б. представлена **упрощенная методика расчета РВКГ**, основанная на процессах выхлопа и впуска (инженерная методика). Существенное влияние на результаты расчета по данной методике оказывает значение показателя адиабаты k , в связи с чем было проведено дополнительное исследование различных методов расчета показателя адиабаты, при этом было установлено, что в зависимости от термобарических условий значения показателя k могут отличаться кратно. Соответственно, при расчете процесса выхлопа результат также существенно разнится, вплоть до превышения физического предела КПД. В связи с этим был разработан итерационный численный метод расчета выхлопа, позволяющий использовать произвольное уравнение состояния реального газа и выполнять прогноз результатов расчета при расширении в двухфазную область.

На основании сформулированного итерационного численного метода расчета выхлопа было получено аналитическое решение с применением канонических показателей адиабаты (11), что позволяет дополнительно учитывать свойства реального газа вблизи двухфазной области.

Легко убедиться, что в случае $k = \varepsilon = \delta$ мы получаем классическое уравнение выхлопа (12).

$$T_k = \frac{T_H}{\delta} \left[1 - \left(\frac{P_k}{P_H} \right)^{\frac{\delta}{k}} + \delta \left(\frac{P_k}{P_H} \right)^{\frac{k\varepsilon - k + \varepsilon}{k\varepsilon}} \right] \quad (11) \quad T_k = \frac{T_H}{k} \left[1 + \frac{P_k}{P_H} (k - 1) \right] \quad (12)$$

Применение итерационного численного метода расчета выхлопа в инженерной методике позволяет расширить область ее возможного применения на двухфазную область для любой рабочей среды.

Третья глава содержит описание экспериментального стенда. Следует отметить, что конструкция РВКГ, экспериментальный стенд, методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных, а также сами экспериментальные данные для стандартных условий работы в режиме детандер-компрессора (далее стандартный режим без продувки) были получены ранее и опубликованы в предыдущих работах. В данной работе впервые приводятся экспериментальные данные для режима высоконапорной продувки, который заключается в целенаправленной организации перетечки части потока активного газа в пассивный. Ниже представлены конструкция РВКГ (Рисунок 3) и экспериментальный стенд (Рисунок 4). Технологическая обвязка РВКГ и установленная система измерений позволяет исследовать аппарат в различных режимах работы, в том числе в режиме высоконапорной продувки. Режим высоконапорной продувки был организован путем размыкания контура пассивного газа (на схеме справа от РВКГ) путем открытия вентиля ВН53, что позволило направить часть потока из контура активного газа (слева от РВКГ) в контур пассивного газа. В качестве рабочего тела использовался природный газ (ПГ), подаваемый с АГНКС.

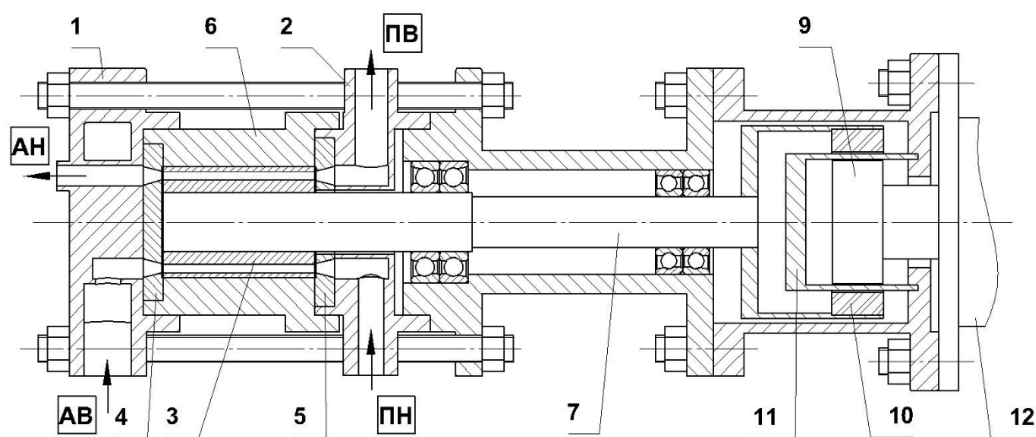


Рисунок 3. Конструкция РВКГ: АВ и АН – вход и выход расширяемого (активного) газа; ПН и ПВ – вход и выход компримируемого (пассивного) газа; 1,2- газораспределитель активного и пассивного газа; 3- ротор; 4,5-сопла активного и пассивного газа; 6-корпус ротора; 7-вал ротора; 9-10-ведущая и ведомая магнитные полушария; 11-керамическая втулка; 12-двигатель

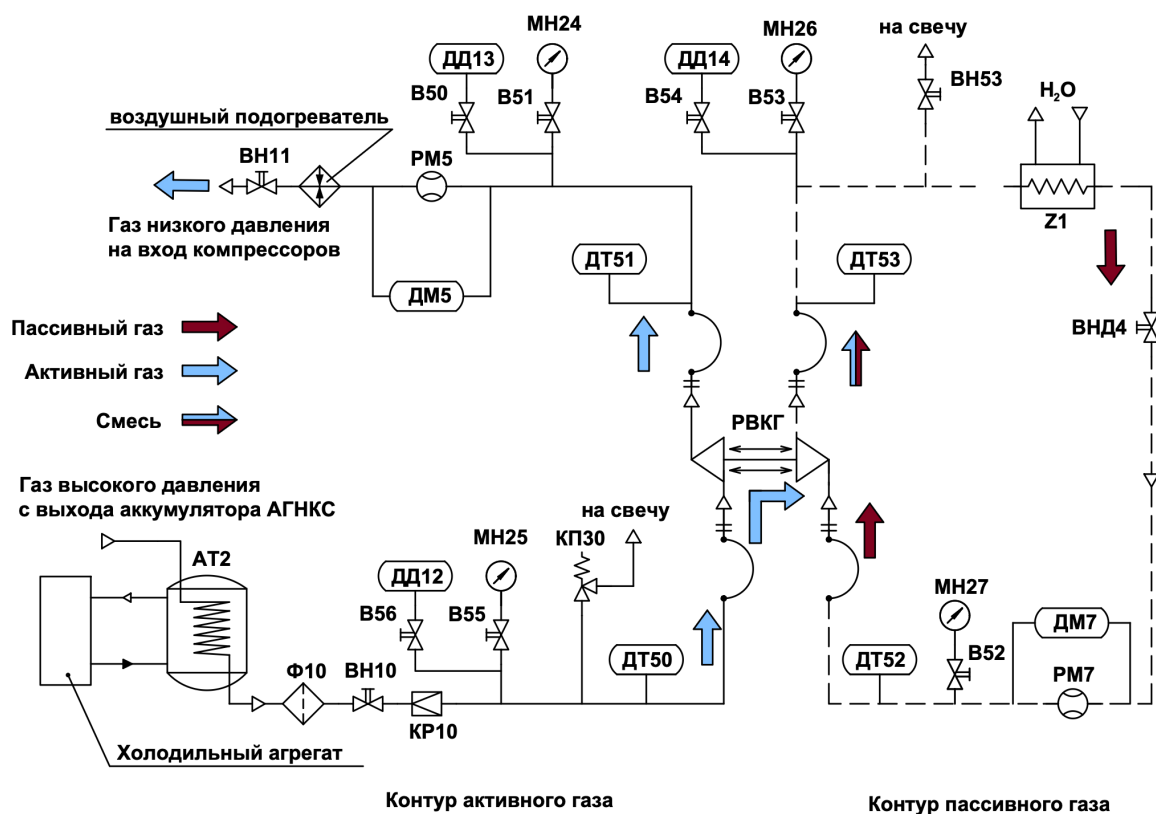


Рисунок 4. Принципиальная технологическая схема экспериментального стенда с отображением движения потока активного и пассивного газа для испытания РВКГ в режиме высоконапорной продувки: В, ВН – ручной вентиль; РМ – расходомер; Ф – фильтр; АТ – теплообменник; Z – змеевик; МН – манометр; КП – клапан предохранительный; КР – клапан регулирующий; ДД, ДТ – датчик давления и температуры; ДМ – дифференциальный манометр

Эксперимент проводился в двух режимах, в стандартном (вентиль ВН53 закрыт) и в режиме высоконапорной продувки (вентиль ВН53 открыт). В обоих режимах исследовалась степень расширения активного газа в диапазоне 1.6–2.55; давление активного газа на выходе составляло 1.3–1.6 МПа; температура пассивного газа на входе равнялась температуре окружающей среды и находилась в диапазоне 270–306 К; начальная температура расширяемого активного газа изменялась от 239 до 196 К. Давления пассивного газа примерно соответствовали давлениям активного газа соответственно. В стандартном режиме работы были достигнуты значения КПД 56–58%, в режиме высоконапорной продувки - 72–86%. Результаты экспериментов, совместно с результатами расчетов приведены на Рисунках 8–10.

В четвертой главе проводится сравнение результатов расчета и результатов эксперимента, а также описываются режимы работы РВКГ и

механика их функционирования. Режимы были разделены на две группы: режимы с корректировкой расходов и режимы с корректировкой давлений.

Режимы с корректировкой расходов: стандартный режим без продувки; режим низконапорной продувки; режим высоконапорной продувки.

Режимы с корректировкой давлений: стандартный режим без корректировки давлений; режим превышения давления активного потока.

При этом режимы с корректировкой давлений могут применяться совместно с расходными режимами. Расходные режимы характеризуются величиной продувки $Flush_a$ (13).

$$Flush_a = \frac{G_{AB} - G_{АН}}{G_{AB}} \quad (13)$$

где G_m – массовый расход через определенное сопло, $m = АН, АН, ПВ, ПН$. Режимы с корректировкой давлений характеризуются отношением давлений АВ, ПВ, и АН, ПН ($\delta P_{АВПВ}, \delta P_{АНПН}$)

$$\delta P_{АВПВ} = \frac{P_{АВ}}{P_{ПВ}}, \delta P_{АНПН} = \frac{P_{АН}}{P_{ПН}}$$

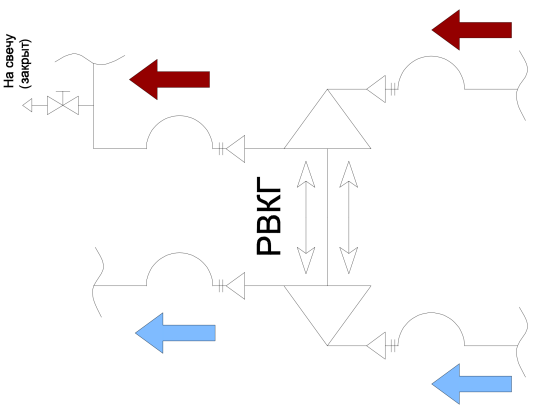
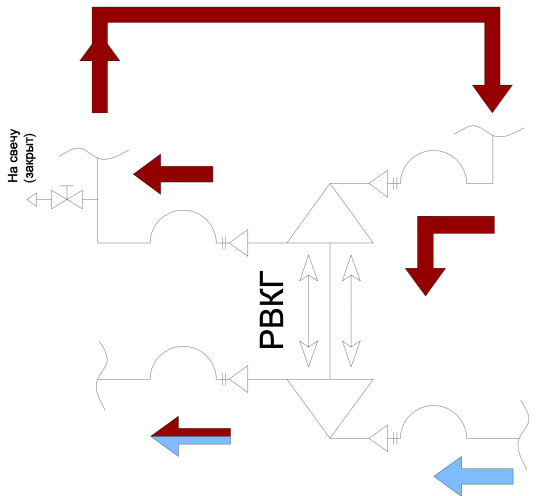
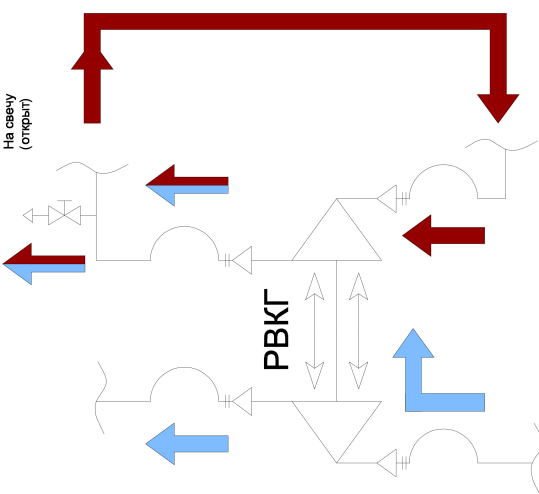
В таблице 1 представлены схемы организации расходных режимов РВКГ, с соотношением основных параметров. Стандартный режим работы без продувки, подразумевает равенство расходов со стороны сопел активного и пассивного газа. Режим низконапорной продувки предполагает проброс горячего пассивного газа в контур активного газа, приводит только к снижению эффективности и подробно не рассматривается. Режим высоконапорной продувки подразумевает проброс части активного газа в контур пассивного и может привести к значительному увеличению изоэнтروпного КПД η_s .

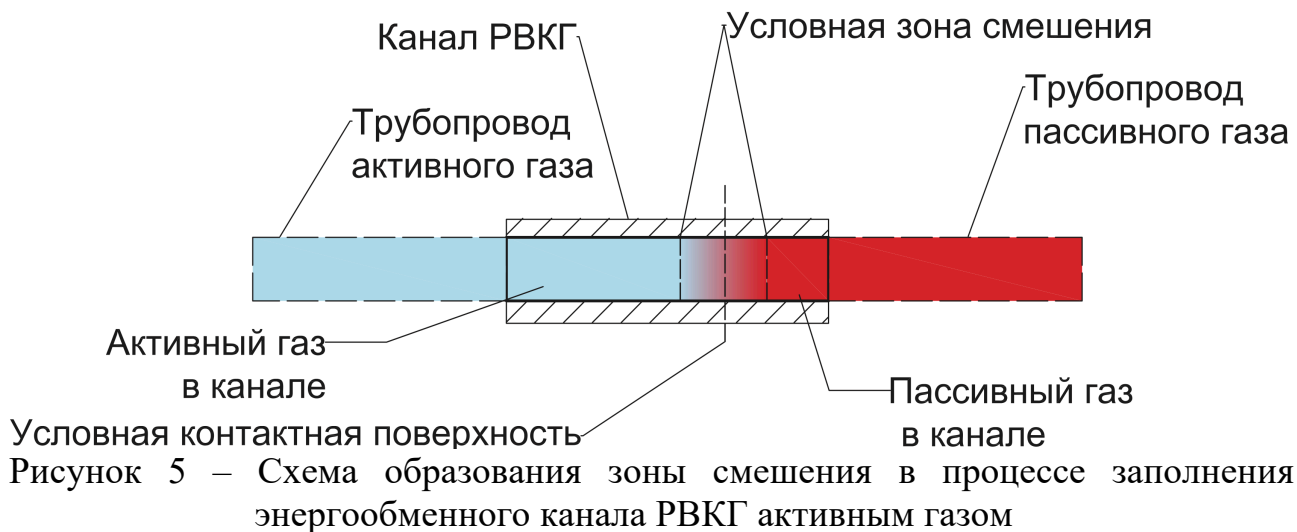
Очевидный практический интерес с точки зрения возможности организации рецикловых потоков представляет режим, при котором давление пассивного потока становится выше активного. Данный режим был назван режимом превышения давления активного потока.

Наибольший интерес представляет режим высоконапорной продувки. В результате проведенных экспериментальных и расчетных исследований были определены факторы, влияющие на снижение термодинамической эффективности РВКГ. Можно предположить, что ввиду отсутствия герметичной перегородки между активным и пассивным газом существенное влияние на снижение эффективности оказывает процесс смешения активного и пассивного потоков в объеме энергообменного канала РВКГ. Большой температурный градиент между расширяемым (активным) и сжимаемым (пассивным) потоками, характерный для криогенных детандер-компрессоров, является фактором, интенсифицирующим процесс смешения. Процесс заполнения энергообменного канала активным газом с образованием зоны смешения иллюстрирует Рисунок 5.

Таблица 1

Схемы организации расходных режимов РВКГ

Стандартный (без продувки)	Низконапорная продувка	Высоконапорная продувка
		
$P_{AB} \cong P_{ПВ},$ $0.98 < \delta P_{ABПВ} < 1.03$ $G_{AB} = G_{АН}; G_{ПВ} \cong G_{ПН}$ $Flush_a = 0$	$P_{AB} \cong P_{ПВ}$ $G_{AB} < G_{АН}; G_{ПВ} < G_{ПН}$ $Flush_a < 0$ $\eta_s \downarrow$	$P_{AB} \cong P_{ПВ}$ $G_{AB} > G_{АН}; G_{ПВ} > G_{ПН}$ $Flush_a > 0$ $\eta_s \uparrow$ - при определенных условиях
Режим превышения давления активного потока совместно с расходными режимами		
$P_{AB} < P_{ПВ}$ $1.03 < \delta P_{ABПВ}$ $G_{AB} = G_{АН}; G_{ПВ} \cong G_{ПН}$ $\eta_s \downarrow$	$P_{AB} < P_{ПВ}$ $1.03 < \delta P_{ABПВ}$ $G_{AB} < G_{АН}; G_{ПВ} < G_{ПН}$ $\eta_s \downarrow$	$P_{AB} < P_{ПВ}$ $1.03 < \delta P_{ABПВ}$ $G_{AB} > G_{АН}; G_{ПВ} > G_{ПН}$ $\eta_s \uparrow$ или const- при определенных условиях



Механизм снижения влияния процесса смешения на изоэнтропный КПД РВКГ качественно можно представить следующим образом. Без высоконапорной продувки (Рисунок 6 (а)) зона смешения образуется в начале процесса заполнения энергообменного канала активным газом. Очевидно, что при движении условной контактной поверхности от сопла активного газа высокого давления к соплу пассивного газа высокого давления в энергообменном канале объем зоны смешения увеличивается. В этих режимах весь объем смешанного газа остается в канале.

В режимах с высоконапорной продувкой происходит сброс части объема смешанной зоны в контур пассивного газа (Рисунок 6 (б)). Объем зоны смешения уменьшается и оказывает меньшее негативное влияние на следующую фазу работы РВКГ – сброс активного газа в сопло низкого давления.

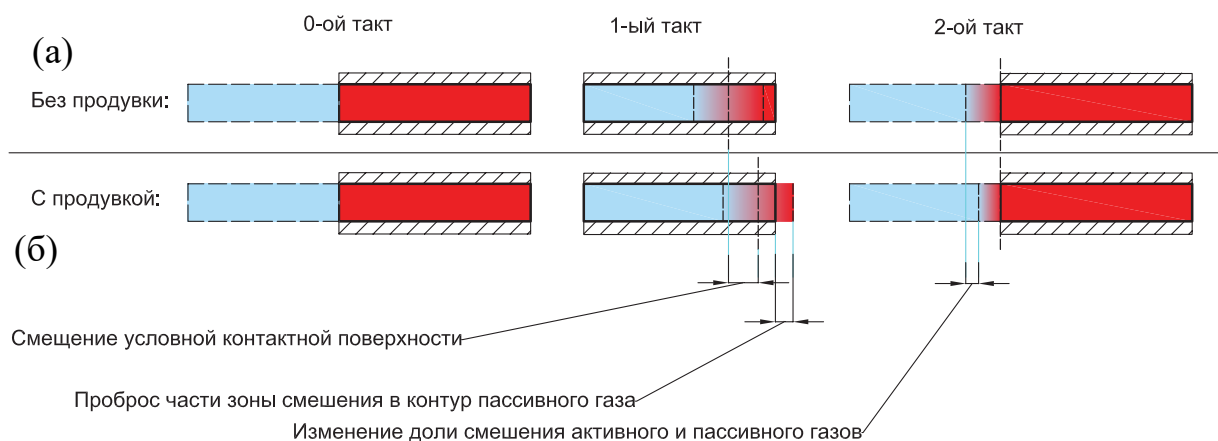


Рисунок 6. Схемы заполнения энергообменного канала активным газом с зоной смешения активного и пассивного газа в режимах: (а) – без высоконапорной продувки, (б) - с высоконапорной продувкой и сбросом части зоны смешения в пассивный поток

Данный механизм подтверждается результатами экспериментов и численного моделирования. На Рисунках 8, 9, 10 показаны экспериментальные данные и результаты расчетов, полученные по методу распада-разрыва и по инженерной методике для трех степеней расширения π_t . Ниже представлены зависимости для КПД изэнтропного расширения, расхода активного газа низкого давления и полной холодопроизводительности соответственно.

Из графиков видно, что в определенный момент достигается максимум для значений Q_x и η_s и дальше при увеличении продувки происходит снижение показателей. При этом оптимальное значение $Flush_a$ может отличаться для Q_x и η_s . Расхождение результатов расчетов температур расширенного активного газа и сжатого пассивного газа с экспериментальными данными по модели на основе метода «распада разрыва» не превышает $\pm 4\%$, по инженерной методике не превышает ± 2 градуса по активному газу и ± 14 градусов по пассивному газу. Расхождение результатов расчетов для массовых расходов не превышает $-5\% - +14\%$ для активного газа и $\pm 30\%$ для пассивного газа. Что подтверждает ее применимость в исследованном диапазоне степеней расширения.

Для определения возможности существования режима превышения давления пассивного потока над давлением активного были проведены расчеты по методу распада-разрыва академика С.К. Годунова, путем изменения граничных условий, а также углов со стороны сопла ПВ. Из анализа результатов расчетов для изэнтропного КПД (Рисунок 7) можно сделать следующие предположения: теоретически данный режим возможно организовать при правильном подборе геометрии, КПД понижается тем сильнее, чем выше давление сжатого пассивного газа относительно высокого давления активного газа. Расчетами показано, что возможно превысить АВ на 10% и выше.

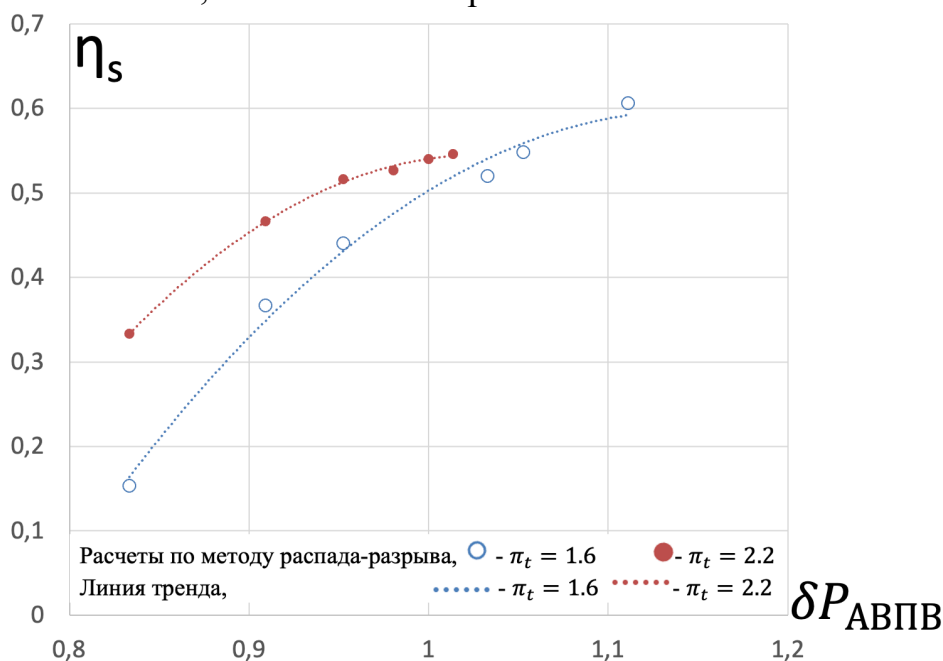


Рисунок 7. Влияние соотношения давления пассивного и активного потоков на КПД РВКГ

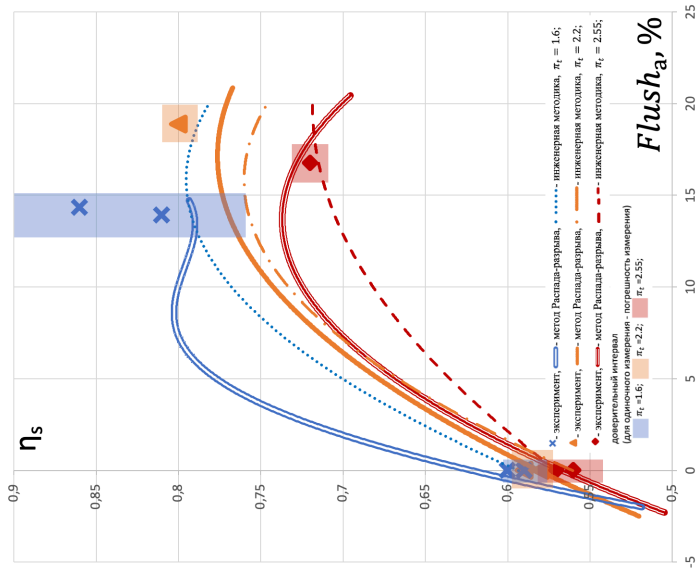


Рисунок 8 Зависимость КПД от величины продувки активного газа

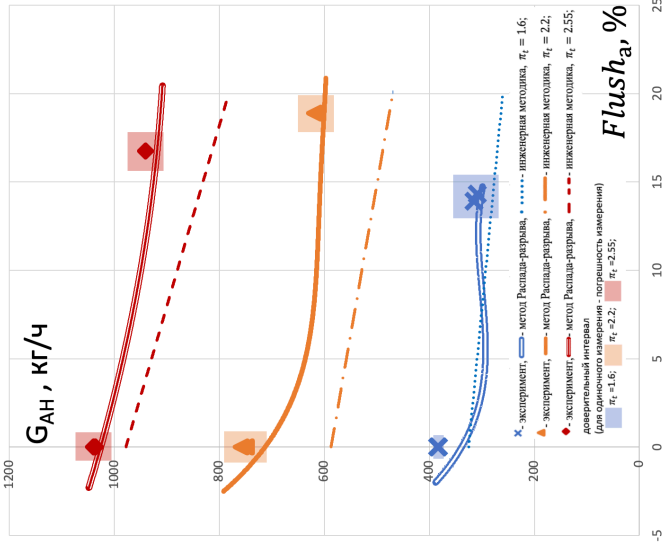


Рисунок 9. Зависимость расхода активного газа низкого давления от величины продувки активного

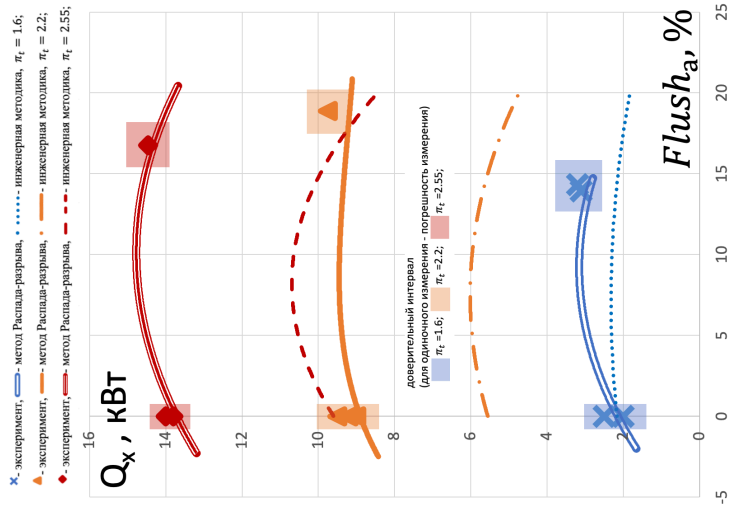


Рисунок 10. Зависимость полной холодопроизводительности от величины продувки активного газа

Основные выводы и заключение

1. Усовершенствована методика расчета термобарических и расходных характеристик РВКГ, основанная на методе академика С.К. Годунова, путем применения уравнения состояния реального газа явного относительно свободной энергии Гельмгольца и модификации граничных условий.

2. Усовершенствована методика определения термобарических характеристик РВКГ, основанная на процессах выхлопа и впуска путем расширения ее области применения на двухфазную область, разработана методика определения расходных характеристик РВКГ.

3. Разработана методика численного моделирования процесса выхлопа, позволяющая проводить расчет при организации процесса в двухфазной области. Получено уравнение для определения конечной температуры истечения газа в процессе выхлопа с применением канонических показателей адиабаты:

$$T_k = \frac{T_n}{\delta} \left[1 - \left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{\frac{\delta}{k}} + \delta \left(\frac{P_k}{P_n} \right)^{\frac{k\varepsilon - k + \varepsilon}{k\varepsilon}} \right]$$

4. Определены термобарические и расходные характеристики работы РВКГ в различных режимах работы на основе экспериментальных данных. Исследованы режим высоконапорной продувки и влияние разницы температур активного и пассивного газа на изоэнтропный КПД РВКГ. Достигнутая величина адиабатного КПД в режиме высоконапорной продувки составляет 72–86% в диапазоне степеней расширения 1.6–2.55. Анализ результатов экспериментальных и расчётных исследований позволил сформулировать влияние разницы температур АВ и ПН на изоэнтропный КПД расширения РВКГ. При продувке 13%–18% прирост КПД составляет 17–26% для разницы температур в 80К и 3–6% при равенстве температур активного и пассивного газа на входе при степени расширения 1.6–2.55.

5. Проведено расчетно-теоретическое исследование рабочих процессов в РВКГ в различных режимах работы. Исследован режим превышения давления активного потока. Показано, что возможно увеличение давления сжатого пассивного газа на 10 % и более при этом отмечено снижение изоэнтропного КПД расширения на 10–17%.

6. Проведена верификация усовершенствованных методик расчета путем сопоставления расчетных данных с данными, полученными экспериментальным путем. Методика, основанная на процессах выхлопа и впуска, позволяет определять расход активного газа с погрешностью -5%–+14%, расход пассивного газа с погрешностью ±30% и определять температуру газа с ошибкой ±2 градуса по активному газу и ±14 градусов по пассивному газу. Для усовершенствованной методики расчета, созданной на основе метода «распада-разрыва» академика С.К. Годунова Расхождение результатов расчета и полученных экспериментальных данных не превышает ±4%.

7. Разработана программа для расчета показателей адиабаты и построения тепловой карты значений. (Государственная регистрация программы для ЭВМ № RU 2024689922/ Малахов А.С. заявл.01.12.2024; опубл.11.12.2024).

Публикации автора по теме диссертации

1. Современные тенденции развития энергообменных аппаратов и установок / А.С. Малахов [и др.] // Вестник МАХ. 2025. №2. С.3-12. (1,7 п.л./1,3 п.л.).
2. Итерационный метод определения параметров процесса выхлопа / А.С. Малахов [и др.] // Вестник МАХ. 2024. №3. С.84-91. (1,04 п.л./0,8 п.л.).
3. Высокоэффективный роторный волновой криогенератор / А.С. Малахов [и др.] // «Химическое и нефтегазовое машиностроение». 2020. №2. С.21-25. (0,58 п.л./0,44 п.л.).
4. Программа для расчета показателей адиабаты и построения тепловой карты значений на диаграммах состояния. Государственная регистрация программы для ЭВМ № RU 2024689922/ А.С. Малахов; заявл. № 2024689347 от 01.12.2024; опубл.11.12.2024. Бюлл. №3.

Малахов Андрей Сергеевич

Совершенствование методик расчета роторного волнового
криогенератора для установок сжижения природного газа

Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук

Подписано в печать __. __. __. Заказ № _____
Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____