

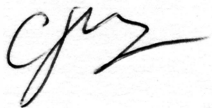
Малахов Сергей Борисович

УДК 621.59

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РОТОРНОГО ВОЛНОВОГО
КРИОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ УСТАНОВОК СЖИЖЕНИЯ
ПРИРОДНОГО ГАЗА**

Специальность 05.04.03- Машины и аппараты, процессы холодильной,
криогенной техники, системы кондиционирования и жизнеобеспечения

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва - 2013

Диссертация выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Архаров Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: Доктор технических наук, профессор,
заместитель директора Инновационного
научно-технического центра
ОАО «Криогенмаш»
Сморodin Анатолий Иванович

Кандидат технических наук, руководи
технологического отдела
ООО «Премиум Инжиниринг»
Сергей Николаевич Пуртов

Ведущая организация: ООО «Газпром ВНИИГАЗ»



Защита диссертации состоится «19» июня 2013 года в 14 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д.1, ауд. 314-Э (конф. зал).

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по адресу: 105005. г. Москва, 2-ая Бауманская д.5, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «14» мая 2013 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д 212.141.16,
кандидат технических наук, доцент

 Колосов М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы: Эффективность криогенных установок определяется совершенством используемых аппаратов, машин и в том числе расширительных устройств - криогенераторов. Наиболее эффективными криогенераторами являются детандеры, в том числе турбодетандеры. Однако создание турбодетандеров для малотоннажных ожижителей легких газов (в том числе природного газа) сопряжено с рядом трудностей связанных с ростом скорости вращения ротора, возможной конденсацией тяжелых фракций в процессе расширения и загрязненности газа. Кроме того сложность конструкции, высокая стоимость и ограниченная надежность вынуждают, в ряде случаев, вообще отказываться от применения турбодетандеров при малотоннажном производстве. Дроссельные расширительные устройства весьма надежны, конструктивно просты и недороги, однако адиабатный процесс расширения в них газа реализуется без совершения внешней работы и поэтому не является холодопроизводящим, что и определяет меньшую, как правило, термодинамическую эффективность установок с дросселированием. Это обуславливает интерес к исследованиям волновых криогенераторов (ВКГ) работающих с совершением внешней работы и отличающихся невысокой стоимостью.

Работы по созданию и исследованию безмашинных волновых криогенераторов были начаты в 1979 году в проблемной и отраслевой лабораториях газодинамических методов получения холода МГТУ им. Н.Э. Баумана с участием ОАО «Криогенмаш», ОАО «Гелиймаш» и акустическим институтом им. Н.Н. Андреева. Созданные волновые криогенераторы эллипсоидного и параболоидного типа позволили получить КПД до 18%, а в криогенераторах с использованием эффекта Коанда, - КПД достигало 40%.

Результатом исследований в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» стало создание и промышленное применение ряда волновых расширительных машин: так называемых пульсационных охладителей газа (ПОГ) статического типа работающих с КПД 35-40% и с механической системой газораспределения с КПД 40-65%, энергообменников и «волновых детандеров» с КПД до 80%. Отметим, что частота вращения газораспределителя в ПОГ с механической системой газораспределения, энергообменников и «волновых детандеров» гораздо меньше, чем у турбодетандеров и составляет от 1000 до 8000 об/мин.

Первые исследования энергообменных аппаратов были направлены на применение их для наддува двигателей внутреннего сгорания. По своему функциональному назначению они были аналогичны турбокомпрессору, используя энергию давления расширяемого (активного газа) для компримирования пассивного газа посредством ударных волн. Детандерно-компрессорный режим энергообменника не является единственным. Путём изменения фаз газораспределения возможна эксплуатация энергообменника в режиме делителя потока (аналог - вихревая труба) и также в режиме

уравнителя давлений (аналог - эжектор), что существенно расширяет область применения данных устройств.

Исследования направленные на применение энергообменников в установках низкотемпературной обработки газа, проведенные ООО «Газпром ВНИИГАЗ», привели к созданию так называемых «волновых детандеров». «Волновые детандеры» по функциональному назначению аналогичны детандерно-компрессорному агрегату. Конечный результат этих работ - успешная промышленная эксплуатация разработанной конструкции «волнового детандера» ВД-1 в составе установок «отбензинивания» газов Сосногорского ГПЗ и исследования технологии извлечения из пласта остаточных запасов ретроградного конденсата на Вуктыльском (Республика Коми) газоконденсатном месторождении. Режимы работы «волновых детандеров» на этих установках ограничены большими объемными расходами перерабатываемого газа (до 20 тыс. м. куб/час) и температурой расширяемого (активного) газа 270...310К.

О применении «волновых детандеров» в области низких температур (ниже 270К) до настоящей работы неизвестно. Перспективность применения «волновых детандеров» в малотоннажных установках сжижения природного газа определяет актуальность настоящей работы. Созданное и исследованное газорасширительное устройство - роторный волновой криогенератор (РВКГ) является продолжением в развитии волновых криогенераторов (ВКГ) и отличается от «волновых детандеров» рядом конструктивных особенностей.

Целью работы является разработка и исследование криогенератора нового типа – роторного волнового криогенератора, научно-методическое обоснование оптимальных геометрических и технологических параметров, а также конструктивных решений, обеспечивающих повышение эффективности его эксплуатации в составе установок сжижения природного газа, работающих на уровне температур 210-180 К.

Основные задачи исследования

1. Разработка математической модели учитывающей особенности рабочих параметров РВКГ.
2. Оработка конструкций основных узлов, обеспечивающих эксплуатационную надёжность РВКГ.
3. Исследование режимных и геометрических параметров РВКГ на природном газе.
4. Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, анализ полученных результатов.
5. Разработка инженерной методики определения рабочих температур РВКГ.

Научная новизна

Впервые определены термобарические и расходные характеристики промышленного образца роторного волнового криогенератора, реализующего принцип волнового энергообмена в области криогенных температур расширяемого газа.

Разработана математическая модель для определения параметров РВКГ учитывающая свойства реального газа (метана) не только в расчете интегральных характеристик, но и непосредственно в методе «распада разрыва» академика РАН С.К. Годунова. Расхождение результатов расчетов температур расширенного активного газа и сжатого пассивного газа по модели на основе метода «распада разрыва» и полученных экспериментально не превышает $\pm 4\%$.

Впервые разработана инженерная методика расчета рабочих температур роторного ВКГ для определения изэнтропного КПД и степени нагрева сжимаемого потока на основе классических уравнений процесса выхлопа и впуска. Расхождение результатов расчетов температур расширенного активного газа и сжатого пассивного газа по инженерной методике и полученных экспериментально не превышает $\pm 7\%$.

Расчеты по инженерной методике позволяют сделать вывод о существенном влиянии процессов смешения активного и пассивного газа на снижение эффективности РВКГ.

Выявлены основные процессы и фазы в РВКГ. На первой фазе активный газ расширяется изэнтропно, на второй фазе происходит его выхлоп. Сжатие и нагрев пассивного газа происходит на первой фазе рабочего процесса.

Защищаемые положения

1. Научное обоснование оптимальных режимных и геометрических параметров РВКГ по результатам стендовых экспериментальных исследований макетного образца.

2. Математическая модель основанная на методе С.К. Годунова (метод «распада разрыва»), учитывающая свойства реального газа.

3. Инженерная методика определения рабочих температур РВКГ основанная на классических уравнениях для процесса выхлопа и впуска.

Личное участие в получении результатов

Все результаты и выводы диссертационной работы получены лично автором в результате проведенных экспериментов и математического моделирования.

Достоверность полученных автором результатов

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.

Практическая значимость

Впервые разработан опытно-промышленный образец роторного волнового криогенератора.

Разработана математическая модель основанная на методе С.К. Годунова (метод «распада разрыва») для расчёта РВКГ, достоверность которой подтверждена результатами экспериментов.

Разработана инженерная методика расчета рабочих температур РВКГ основанная на классических уравнениях для процесса выхлопа и впуска, достоверность которой также подтверждена результатами экспериментов.

Выявлены направления повышения эффективности РВКГ: снижение перетечек за счет уменьшения зазоров, уменьшение торможения потока газа на торце вертикальной стенки канала путем оптимизации ее геометрии.

Экспериментально подтверждена устойчивая работа устройства в условиях сильной загрязненности примесями (вода, масло, тяжелые углеводороды), а также при появлении двухфазной среды на выходе.

Апробация работы

Основные результаты исследований по теме диссертационной работы докладывались на международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур»(ГАСИС, М., 2010 г.), 2-й международной конференции «ПРОМЫШЛЕННЫЕ ГАЗЫ» (МГТУ им. Н.Э. Баумана, М., 2011г.) и на одиннадцатой международной специализированной выставке «Криоген-Экспо - 2012»(ЦВК «Экспоцентр», М., 2012г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 5 научных работ в журналах рекомендованных ВАК РФ.

Объём и структура работы

Диссертационная работа состоит из четырех глав, основных выводов, списка используемой литературы (110 наименований) и приложений. Работа содержит 84 страницы текста, 41 иллюстрацию, 2 таблицы и приложения на 5-и страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведена систематизация материалов о волновых криогенераторах(ВКГ). Условно выделив в волновом криогенераторе пульсатор-газораспределитель (пульсатор) и энергообменный канал(ЭК),

определены основные конструктивные схемы: с одним пульсатором-газораспределителем и с двумя (Рис. 1). Энергообмен с одним пульсатором характерен для резонансных ВКГ и так называемых пульсационных генераторов холода. С двумя - для импульсных трубок с отводом среды в теплой части ЭК и «волновых детандерах». Проведено разделение ВКГ по принципу работы пульсатора на две группы: безприводные и с механической системой газораспределения.

Пульсатор является ключевым элементом ВКГ обеспечивая пульсацию давления в ЭК(генерируя волны сжатия и разрежения) путем подачи и сброса сред высокого и низкого давления. Смещение, время подачи и сброса рабочего тела, задаваемые пульсатором, определяют эффективность всего устройства в целом. Основной задачей энергообменного канала(ЭК) является интенсификация энергообменного процесса. Рабочая(внутренняя) поверхность ЭК может представлять собой простой цилиндр или параллелепипед, а может и поверхность со сложным переменным сечением(эллипсоидная, параболоидная поверхность и т.д.).

Для ВКГ с двумя пульсаторами представлены конструктивные схемы энергообмена для так называемой «петлевой» и «прямоточной» схемы расположения источников и стоков, а так же для режима уравнивателя давлений и режима подобного работе эжектора.

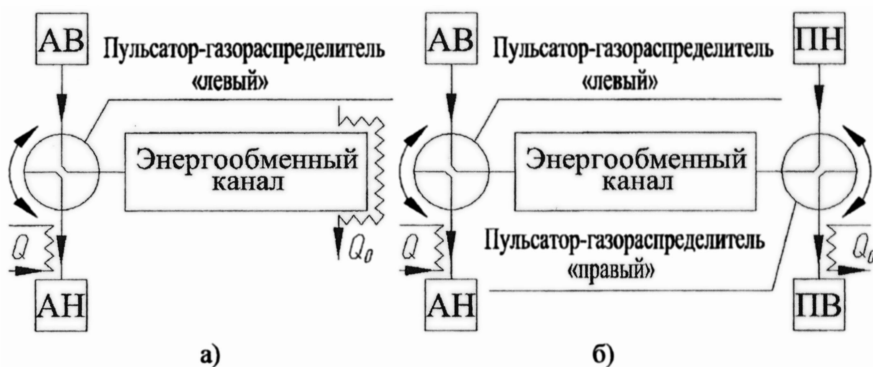


Рис. 1.

Конструктивные схемы ВКГ: а) - с одним пульсатором; б) - с двумя пульсаторами и «петлевой» схемой расположения источников и стоков

AB — Активный поток высокого давления

PB — Пассивный поток высокого давления

AH — Активный поток низкого давления

PH — Пассивный поток низкого давления

Для описания работы применены понятия «активной» и «пассивной» части рабочего тела (среды). Активная среда - среда, расширяемая в ВКГ. Пассивная среда – среда сжимаемая в энергообменном канале. Работу всех ВКГ можно условно разделить на две фазы. Первая фаза начинается с подачи активной среды высокого давления (АВ) в ЭК заполненный пассивной средой низкого давления (ПН). В начальный момент формируется контактная поверхность (КП1), разделяющая пассивную среду находящуюся в канале с активной средой, подаваемой в канал (Рис. 2). Активная среда сжимает (нагревает) пассивную, что позволяет осуществлять отвод энергии в виде тепла Q_0 . Для машин с одним пульсатором 1-ая фаза заканчивается завершением подачи активной среды в ЭК (Рис. 2, а), отвод энергии в виде тепла Q_0 осуществляется с нагретого торца ЭК. Для машин с двумя пульсаторами первая фаза рабочего процесса заканчивается сбросом сжатой пассивной среды через «правый» пульсатор (Рис. 2, б), что позволяет организовать отвод энергии за пределами ЭК в виде тепла Q_0 , и в дальнейшем использовать механическую энергию сжатого пассивного газа. Вторая фаза рабочего процесса начинается со сброса активной среды из ЭК через «левый» пульсатор. Для машин с двумя пульсаторами помимо сброса активной среды из ЭК происходит подача пассивной среды низкого давления (ПН) через «правый» пульсатор. Известны более сложные конструктивные схемы ВКГ с большим количеством пульсаторов, обеспечивающих ступенчатое сжатие пассивной среды и ступенчатое расширение активной. Но они не меняют основных принципов организации энергообмена в канале описанных ранее.

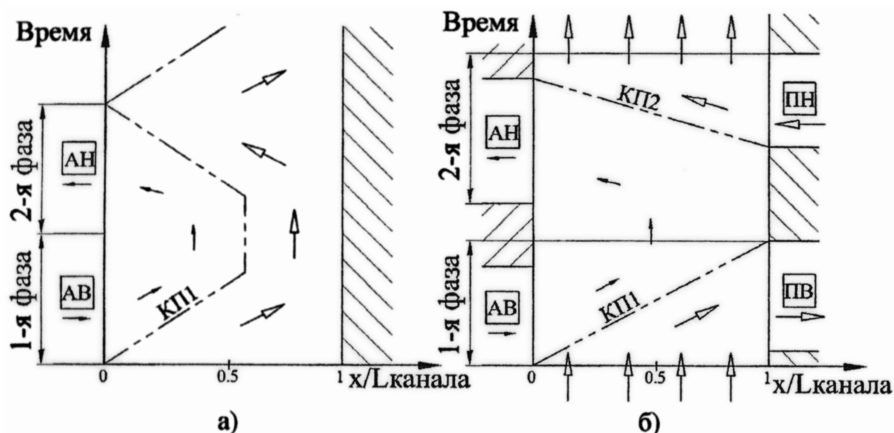


Рис. 2.

Диаграммы подачи сред ВКГ: а) - с одним пульсатором; б) - с двумя пульсаторами и «петлевой» схемой расположения источников и стоков

Анализ основных схем энергообмена показал, что схема с двумя пульсаторами и «петлевым» расположением источников и стоков является наиболее эффективной, а наиболее совершенным пульсатором является роторный пульсатор-газораспределитель. Этим критериям удовлетворяют «волновые детандеры» (ВД).

Во второй главе проведен анализ существующих математических моделей расчета параметров рабочего тела в энергообменном канале, представлена созданная математическая модель, учитывающая особенности работы роторного волнового криогенератора.

Анализ существующих математических моделей показал, что наиболее совершенная нелинейная математическая модель, применяемая для расчета энергообменников, была разработана Эрсамбетовым В.Ш. Эта модель в дальнейшем была доработана с учетом экспериментального материала специалистами ООО «Газпром ВНИИГАЗ» и применена для расчета так называемых «волновых детандеров». Результаты этих работ использованы при создании нелинейной математической модели для расчета РВКГ.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(P + \rho u^2)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho \left(\varepsilon + u^2/2 \right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho u \left(\varepsilon + u^2/2 \right) + P u \right)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{P + \chi P_0}{(\chi - 1)\rho} \quad (4)$$

где: ρ - плотность, u - скорость, P - давление и ε - внутренняя энергия среды, χ - показатель адиабаты; P_0 - корректирующий коэффициент

В основе разработанной математической модели уравнения сохранения массы (1), импульса (2) и энергии (3) дополненные уравнением состояния (4). Отличительной особенностью представляемой модели является учет свойств реального газа не только в расчете интегральных характеристик расхода и температуры, но и непосредственно в методе Годунова («распада разрыва»). Вычисления в методе Годунова уточняются с помощью корректирующих коэффициентов определяемых на основе уравнения состояния с вириальными коэффициентами для чистого метана. Введение

учета скорости газа в источниках и стоках при определении времени итерации совместно с осреднением параметров газа в расчетной ячейке (используемом в методе «распада разрыва») позволяет моделировать зону смешения при подаче газа в канал. В модели учитывается: влияние перетечек в зазорах, гидравлическое сопротивление в канале. Теплообмен газа со стенками энергообменного канала не учитывается. Математическая модель позволяет получить трехмерную картину изменения параметров в канале (Рис. 3). Результаты математического моделирования представлены на графиках расчетных значений давления, температуры и скорости газа в крайних расчетных ячейках и расчетной волновой картины энергообмена в РВКГ.

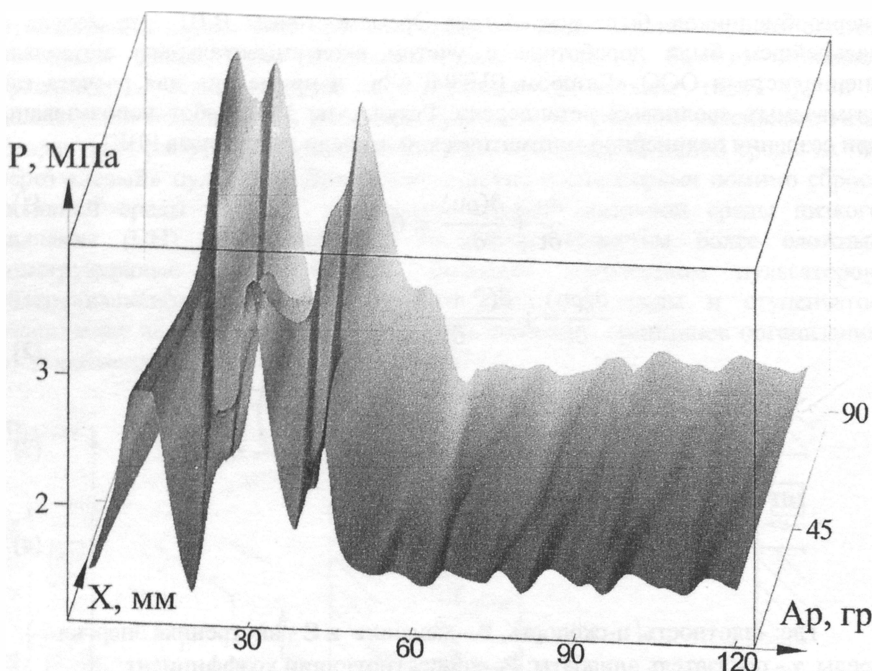


Рис. 3.

Расчетное распределение давления P по длине канала (ось « X ») в зависимости от углового положения ротора при $\pi_k = 2.16$
 A_r - угловое положение ротора

В третьей главе представлена: конструкция созданного РВКГ, схема и описание экспериментального стенда, методика проведения эксперимента и обработки результатов, а также результаты экспериментальных исследований.

Основные конструктивные элементы исследованного РВКГ с петлевой схемой подачи сред показаны на рис. 4.

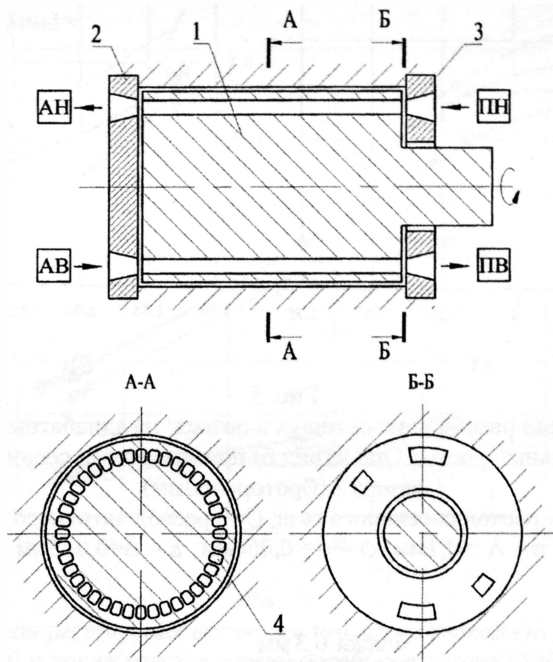


Рис. 4.

Основные конструктивные элементы РВКГ с петлевой схемой подачи сред
 АВ - активная среда высокого давления; АН - активная среда низкого давления; ПВ - пассивная среда высокого давления; ПН - пассивная среда низкого давления. 1 - ротор; 2 - газораспределительный диск активной среды, 3 - газораспределительный диск пассивной среды; 4 - энергообменные каналы

На рисунке 5 представлен график влияния степени расширения активного потока на адиабатный КПД при изменении среднего осевого зазора Δ . При увеличении степени сжатия активного газа с 1.6 до 2.6 отмечается снижение изэнтропного КПД криогенератора с 0.53-0.6 до 0.47-0.51. При этом величина π_t (степень сжатия пассивного потока) в проведенных экспериментах близка к степени расширения активного потока π_k . Уменьшение среднего осевого зазора с 0.1 до 0.045 мм позволило повысить КПД на 3...7% на всех исследованных степенях расширения π_k . При снижении степени расширения активного потока π_k наблюдается повышение относительного расхода с 0,18-0,23 до 0,27-0,33 (Рис. 5, б).

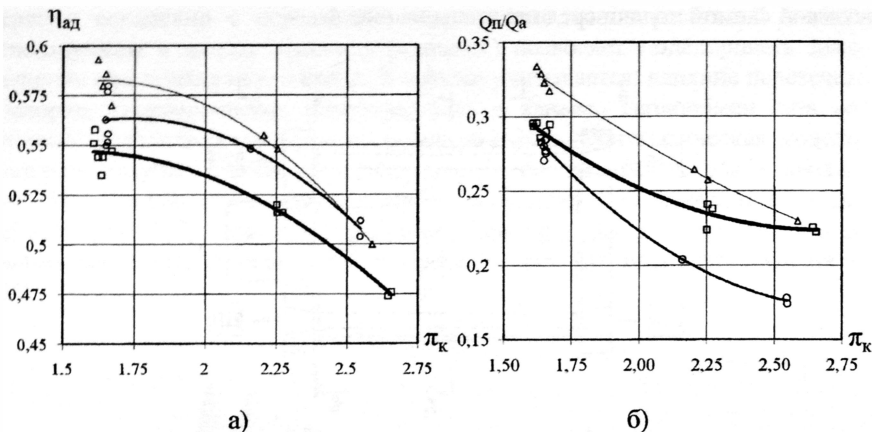


Рис. 5.

Влияние степени расширения активного потока: на адиабатный КПД (вид а) и относительный расход Q_p/Q_a (вид б) при изменении среднего осевого зазора Δ ($\Phi_{ротора}=60$ мм)

Q_p - расход пассивного газа; Q_a - расход активного газа

$\square$ - $\Delta = 0,1$ мм; $\circ$ - $\Delta = 0,066$ мм; Δ - $\Delta = 0,045$ мм

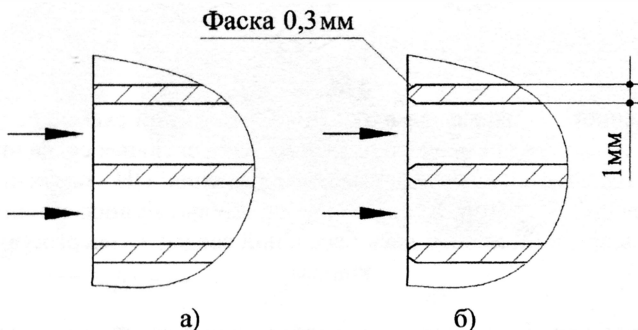


Рис. 6.

Развертка по среднему диаметру каналов ротора (а - до доработки, б - после доработки)

С целью снижения гидравлического сопротивления при поступлении расширяемого активного газа в энергообменный канал торцевые поверхности стенок каналов ротора РВКГ (со стороны подачи активного газа) были доработаны. С торцевых кромок сняты фаски 0.3 мм, при толщине стенки

1мм(Рис. 6). После доработки ротора расход активного газа увеличился на 6 ... 9%, а пассивного на 7... 17%(Рис. 7).

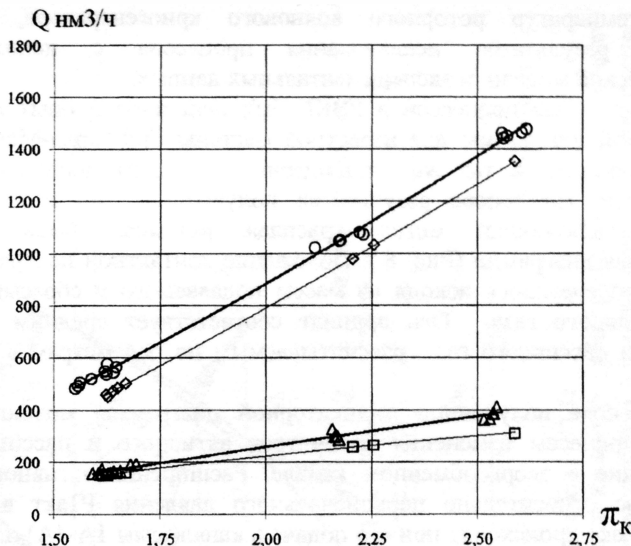


Рис. 7.

Влияние степени расширения активного потока на расход Q_p и Q_a до(тонкая линия) и после(толстая линия) доработки ротора ($\Delta=0.045$)

- , △ - расход активного и пассивного газа после доработки
- ◇, □ - расход активного и пассивного газа до доработки

Примененный способ снижения гидравлического сопротивления на входе в энергообменный канал позволяет увеличить надежность конструкции за счет увеличения толщины радиальной стенки энергообменного канала при сохранении производительности.

Зафиксированная в экспериментах (с использованием холодильной машины для охлаждения природного газа) температура 158K при давлении 1.58МПа расширенного активного газа позволяет утверждать что, РВКГ устойчиво работает в двухфазной области.

На разработанной и апробированной в реальных условиях конструкции РВКГ был достигнут адиабатный К.П.Д. 60% на уровне температур активного газа минус 35 ÷ минус 110⁰С. Подтверждена устойчивая работа устройства в условиях сильной загрязненности примесями (вода, масло, тяжелые углеводороды). Эксперименты подтвердили эффективность принятых конструктивных решений: схемы базирования с консольным

размещением ротора, применение магнитной муфты и уплотняющего элемента в виде спиральной пружины во фторопластовой оболочке.

В четвертой главе представлена инженерная методика расчета рабочих температур роторного волнового криогенератора, проведено сравнение результатов исследования процессов с использованием математической модели и экспериментальных данных.

Для изучения процессов в РВКГ был использован опыт построения индикаторной диаграммы для известной машины Гиффорда-Мак-Магона с газовым поршнем, а так же «детандера» с газовым поршнем в работе О.Е.Панковой. На основе результатов полученных по математической модели использующей метод «распада разрыва» была построена индикаторная диаграмма (Рис. 8.). Положение контактной поверхности (ось абсцисс) определялось исходя из массы подаваемого и сбрасываемого из канала активного газа. Ось ординат соответствует средним давлениям активного и пассивного газа, рассчитываемым по параметрам в расчетных ячейках.

На основе полученной индикаторной диаграммы можно выделить основные процессы изменения параметров активного и пассивного газа, происходящие в энергообменном канале. Расширение активного газа на первой фазе относительно первоначального давления $P_{1акт}$ в сопле до давления $P_{2акт}$ происходит при его подаче в канал (углы 1А-4А) и в процессе выхлопа (углы 1П-4П) где активный газ является газом остающимся в «баллоне», а в роли газа вышедшего из «баллона» выступает пассивный газ. Поэтому процесс расширения активного газа с давления $P_{1акт}$ до $P_{2акт}$ с большой степенью точности можно считать изотропным. Вторая ступень расширения активного газа с давления $P_{2акт}$ до $P_{3акт}$ на углах 5А-8А является процессом выхлопа. Так как при этом подаваемый пассивный газ на углах 5П-8П полностью заменяет активную среду в канале то температуру выходного активного газа можно вычислить по зависимости (5) для выхлопа с учетом смешения оставшегося в «баллоне» и вышедшего газа.

$$T_{3акт} = \frac{T_{2акт} \left(1 + \frac{P_{3акт}}{P_{2акт}} (k - 1) \right)}{k} \quad (5)$$

где $T_{2акт}$, $P_{2акт}$ – начальная температура и давление активного газа, $T_{3акт}$, $P_{3акт}$ – температура и давление активного газа после выхлопа, k - показатель адиабаты.

Для вычисления $T_{3акт}$ помимо параметров газа подаваемого в РВКГ ($P_{1акт}$, $T_{1акт}$), необходимо определить давление $P_{2акт}$. На всех режимах исследуемого РВКГ давление $P_{2акт}$ приблизительно равнялось половине всего интервала $P_{1акт} - P_{3акт}$.

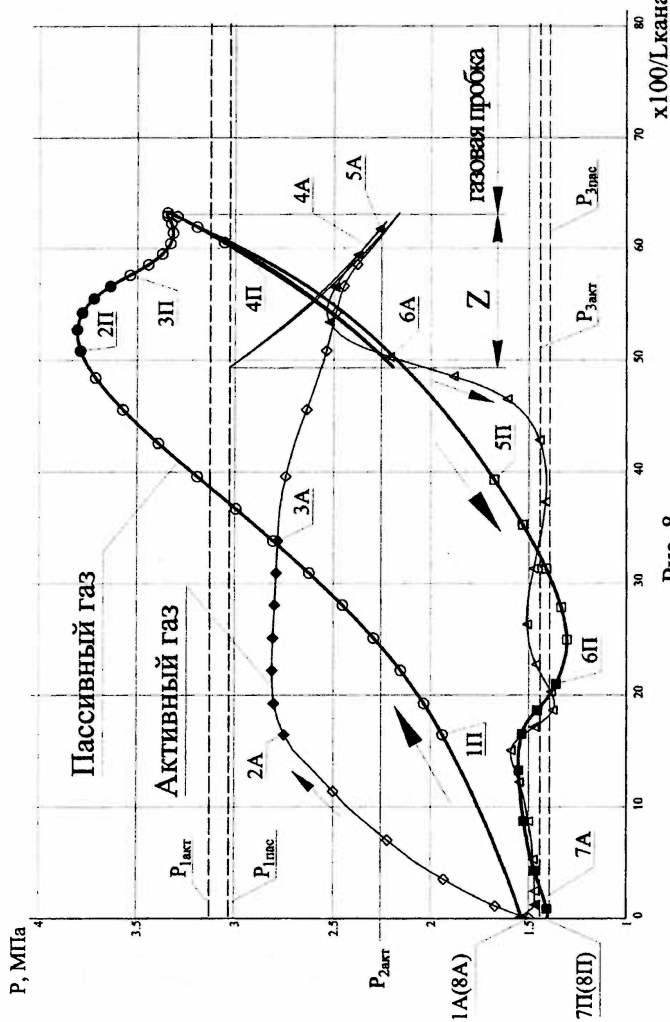


Рис. 8.

Расчетная индикаторная диаграмма $\tau_k = 2.16$

подача активного газа : $\blacklozenge$ - при полностью открытом канале, $\diamond$ - при открытии/закрытии канала;
сброс активного газа : $\blacktriangle$ - при полностью открытом канале, $\blacktriangleleft$ - при открытии/закрытии канала;
сброс пассивного газа : $\bullet$ - при полностью открытом канале, $\circ$ - при открытии/закрытии канала;
подача пассивного газа : $\blacksquare$ - при полностью открытом канале, $\square$ - при открытии/закрытии канала;
1А-8А, 1П-8П - основные углы положения ротора по активной и пассивной стороне соответственно

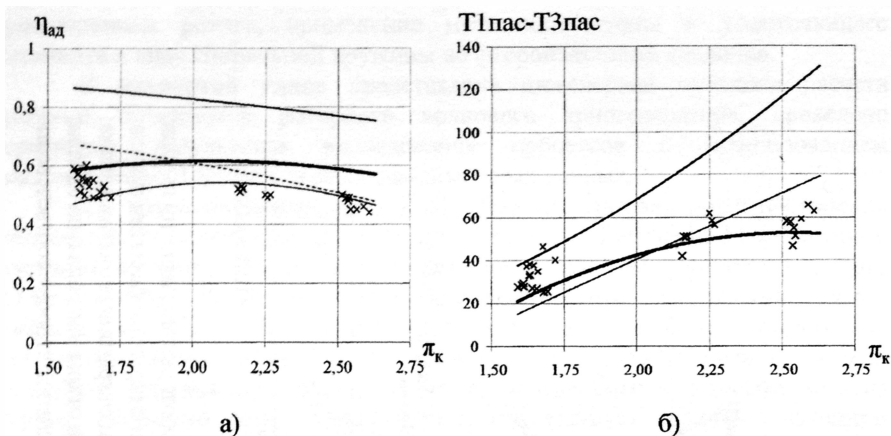


Рис. 9.

Сравнение влияния степени расширения активного потока π_k на экспериментальное и расчетное адиабатное КПД (вид а) и на перепад экспериментальных и расчетных температур пассивного газа (вид б)

- $---$ – расчет по уравнению для выхлопа $T_{закт} = \frac{T_{1акт} (1 + \frac{P_{закт}}{P_{1акт}} (k - 1))}{k}$;
 $---$ – расчет по инженерной методике с учетом смешения газов (11%);
 $---$ – расчет по инженерной методике без учета смешения газов;
 $---$ – расчет по математической модели на основе метода Годунова («распада разрыва»); $\times$ – экспериментальные данные

Температуру пассивного газа $T_{1пас}$ можно определить по уравнению для процесса «впуска» (6).

$$T_{1пас} = \frac{1 + (k - 1) \frac{P_{1пас}}{P_{зпас}}}{k} T_{зпас} \quad (6)$$

где $T_{зпас}$, $P_{зпас}$ – начальная температура и давление пассивного газа, $T_{1пас}$, $P_{1пас}$ – температура и давление пассивного газа после сжатия.

Температуры $T_{закт}$ и $T_{1пас}$, вычисленные с использованием формул (5) и (6), позволяют определить рабочие температуры идеального РВКГ (без смешения газов). Результаты расчетов по инженерной модели с учетом смешения активного и пассивного газов и без учета представлены на графике рис. 9.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Впервые разработан опытно-промышленный образец роторного волнового криогенератора, реализующего принцип волнового энергообмена в области криогенных температур расширяемого газа. Определены термобарические и расходные характеристики РВКГ с энергообменными каналами постоянного сечения.

Разработана математическая модель для определения параметров РВКГ учитывающая свойства реального газа (метана) не только в расчете интегральных характеристик, но и непосредственно в методе академика РАН С.К. Годунова (метод «распада разрыва»). Расхождение результатов расчетов температур расширенного активного газа и сжатого пассивного газа по модели на основе метода «распада разрыва» и полученных экспериментально не превышает $\pm 4\%$, что подтверждает ее применимость для расчета параметров роторного волнового криогенератора в исследованном диапазоне степеней расширения.

Впервые разработана инженерная методика расчета рабочих температур роторного ВКГ для определения изэнтропного КПД и степени нагрева сжимаемого потока на основе классических уравнений процесса выхлопа и впуска. Расхождение результатов расчетов температур расширенного активного газа и сжатого пассивного газа по инженерной методике и полученных экспериментально не превышает $\pm 7\%$. Расчеты по инженерной модели показали существенную роль процессов смешения активного и пассивного газа в снижении эффективности РВКГ.

Выявлены основные процессы и фазы в РВКГ. На первой фазе активный газ расширяется изэнтропно, на второй фазе происходит его выхлоп. Сжатие и нагрев пассивного газа происходит на первой фазе рабочего процесса.

Экспериментально показана возможность увеличения производительности исследованной конструкции РВКГ путем снижения величины гидродинамического сопротивления на входе в энергообменный канал со стороны газораспределителя активного газа.

Подтверждена возможность повышения эффективности криогенератора за счет уменьшения величины торцевых зазоров.

Анализ результатов экспериментального исследования РВКГ подтвердил выводы о максимальной эффективности устройств данного типа в области π_k (степень расширения активного потока) менее 2,5, что определяется термодинамическими особенностями процесса выхлопа.

На разработанной и апробированной в реальных условиях конструкции роторного волнового криогенератора был достигнут адиабатный К.П.Д. 60% на уровне температур минус 35 + минус 110°C. Подтверждена устойчивая работа РВКГ в условиях сильной загрязненности рабочего тела примесями (вода, масло, тяжелые углеводороды), а также при появлении двухфазной парожидкостной среды на выходе.

Анализ основных схем энергообмена показал, что схема с двумя пульсаторами и «петлевым» расположением источников и стоков является наиболее эффективной, а наиболее совершенным пульсатором является роторный пульсатор-газораспределитель.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Результаты экспериментальных исследований криогенного волнового детандер-компрессора / В.Ю. Семенов [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. №4. С. 23-25.

2. Результаты экспериментальных исследований криогенного волнового детандер-компрессора / А.М. Архаров [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. С. 122-127.

3. Архаров А.М., Семенов В.Ю., Малахов С.Б. Анализ принципов организации энергообмена в волновых криогенераторах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. №8. С. 77-83.

4. Развитие технологии сжиженного природного газа в московском регионе / А.М. Архаров [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. С. 214-229.

5. Анализ рабочих процессов в роторном волновом криогенераторе / А.М. Архаров [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. №7. С. 15-20.