

Коломин Илья Викторович

**РОТОРНО-ЛОПАСТНОЙ КОМПРЕССОР
ДЛЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.07.07
Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева» (СГАУ) на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Довгялло Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Красночуб Евгений Карпович,
ведущий научный сотрудник
ФГУП государственного научно-
производственного ракетно-космического
центра «ЦСКБ-Прогресс»;

кандидат технических наук, доцент
Егорычев Виталий Сергеевич,
доцент кафедры теории двигателей
летательных аппаратов СГАУ

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Самарский государственный университет»

Защита состоится «1» ноября 2007 г. в 13-00 на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева» по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан 24 сентября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



В.Н. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Степень совершенства космических бортовых систем охлаждения в значительной мере определяет возможности для реализации современных направлений развития аэрокосмической техники.

Бортовые системы охлаждения необходимы для функционирования радиоэлектронной аппаратуры, чувствительных элементов фотоприемных устройств инфракрасного (ИК) диапазона в системах наблюдения, пеленгации, наведения и других устройствах. Применительно к аэрокосмической технике это, как правило, микрокриогенные системы, которые выполняют задачи военного и гражданского назначения. В последнем случае микрокриогенные системы в комплекте с фотоприемными устройствами различных частотных уровней могут использоваться в геодезии, геологии, нефтегазодобывающей отрасли для наблюдения и диагностики трубопроводного транспорта, линий электропередач, в строительстве, природопользовании и экологическом мониторинге, в службах МВД и МЧС, а также медицине и научных исследованиях.

Рассматриваемая в диссертации бортовая система охлаждения на базе роторно-лопастного компрессора (РЛК) для фотоприемного устройства инфракрасного диапазона излучения (ФПУ-ИК) относится к новым разработкам. Новизна заключается в использовании многокамерного компрессора для газовой криогенной машины. Применение многокамерного компрессора позволяет обеспечивать поддержание многоуровневых температурных режимов по отдельным элементам криостатируемого объекта.

Таким образом, необходимо выяснить, какими качествами и свойствами будет обладать криогенная система на базе многокамерного компрессора и какова ее перспективность.

Предлагаемый роторно-лопастной компрессор, исходя из предварительного анализа, имеет ряд преимуществ перед другими типами компрессоров, в том числе такие, как уравновешенность, многокамерность, возможность работы с бесконтактными уплотнениями. Новизна и ожидаемая перспективность РЛК требуют разработки экспериментальных образцов и проведения опережающих исследований физических процессов в имитационных условиях, а также привлечения математического моделирования и проведения исследований на специальных стендах, необходимых при создании и отработке новых бортовых систем охлаждения и оборудования аэрокосмического назначения.

Целью работы является повышение эффективности бортовой системы охлаждения летательных аппаратов за счет применения многокамерного роторно-лопастного компрессора.

Объектом исследования являются экспериментальные образцы роторно-лопастного компрессора различных конструктивных схем.

Предметом исследования являются математические модели рабочих процессов и конструктивно-компоновочные схемы роторно-лопастных компрессоров и газовых криогенных машин на их основе.

Задачи исследования:

1. Выявление перспективных и проблемных особенностей роторно-лопастного компрессора, требующих специальной научно-исследовательской и опытно-конструкторской проработки.

2. Разработка методик и рекомендаций по расчету, испытанию и доводке роторно-лопастного компрессора и газовой криогенной машины на его базе. Выявление факторов, определяющих направления оптимизации роторно-лопастного компрессора.

3. Разработка математических моделей для анализа параметров и характеристик роторно-лопастного компрессора с бесконтактными уплотнениями рабочих камер и газовой криогенной машины на его базе.

4. Создание стендов и экспериментальных установок для проведения испытаний роторно-лопастного компрессора. Оценка работоспособности экспериментальных образцов роторно-лопастного компрессора и определение их характеристик.

5. Прогнозирование рабочих характеристик многоуровневой газовой криогенной машины на базе многокамерного роторно-лопастного компрессора.

Методы исследований:

Общий методологический подход при выполнении работы базируется на аналитических исследованиях, методах численного моделирования, экспериментах на имитационных моделях и экспериментальных образцах роторно-лопастного компрессора с привлечением аппарата вычислительной математики и современных программных средств как существующих, так и специально созданных в процессе работы.

Исследования экспериментальных образцов проводились на стендовом оборудовании НИЦ космической энергетики (ОНИЛ 2) СГАУ.

Достоверность, обоснованность и представительность результатов работы обеспечены применением при теоретическом исследовании законов сохранения в общепризнанном виде, корректным использованием экспериментальных данных, полученных на аттестованных стендах.

Положения, выносимые на защиту:

Методики, результаты и рекомендации по расчету, исследованиям и испытаниям многокамерного роторно-лопастного компрессора для газовой криогенной машины, включая:

- методики расчета рабочего процесса роторно-лопастного компрессора и газовой криогенной машины на его базе;
- методики проведения испытаний роторно-лопастного компрессора и рекомендации по оптимизации его конструкции;
- результаты экспериментальных исследований (характеристики и параметры рабочих процессов) роторно-лопастного компрессора;
- результаты исследований эффективности применения роторно-лопастного компрессора в составе бортовых систем охлаждения летательных аппаратов.

Научная новизна:

1. Разработаны методики уточненного расчета роторно-лопастного компрессора с бесконтактными уплотнениями, учитывающие перетечки рабочего тела, и получены характеристики рабочего процесса газовой криогенной машины.

2. Впервые проведены испытания экспериментальных образцов роторно-лопастного компрессора, позволившие получить результаты, необходимые для создания бортовой системы охлаждения на его основе. Созданы методики проведения испытаний и автоматизированной обработки данных при исследованиях роторно-лопастного компрессора.

3. Предложены конструктивно-компоновочные схемы газовой криогенной машины для бортовой системы охлаждения на базе многокамерного роторно-лопастного компрессора, обеспечивающие несколько температурных уровней охлаждения и проведена оценка эффективности их применения.

Практическая ценность:

Получены теоретические и экспериментальные данные и рекомендации, которые позволяют разработать бортовую систему охлаждения с заданными параметрами рабочих процессов, энергетическими, массогабаритными, ресурсными характеристиками;

оптимизировать геометрические и режимные параметры газовой криогенной машины на базе многокамерного роторно-лопастного компрессора. Проведены испытания, которые рассматриваются как опережающие исследования на экспериментальных образцах роторно-лопастного компрессора, позволяющие повысить эффективность бортовой системы охлаждения на этапе научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок.

Реализация и внедрение результатов работы:

Результаты внедрения диссертационной работы подтверждены актами использования в соответствующих организациях и представлены в отчетах о НИР.

Апробация диссертационной работы:

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

- Международной научно-технической конференции молодых специалистов «Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин» посвященной 80-летию со дня рождения В.Б. Шнеппа, г. Казань, 2004 г.;
- Всероссийской научно-технической конференции (с международным участием) «Современные тенденции развития автомобилестроения в России», г. Тольятти, ТГУ, 2005 г.;
- Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, г. Москва, 2006 г.;
- Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», г. Самара, СГАУ, 2006 г.

Публикации:

По результатам выполненных исследований имеется 8 печатных работ, в том числе одна работа опубликована в ведущем рецензируемом научном издании, определенном Высшей аттестационной комиссией, шесть публикаций в тематических сборниках и трудах конференций и один патент.

Структура и объем работы:

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов к главам, общих выводов и приложения. Список литературы включает 75 наименований. Диссертация изложена на 202 страницах, содержит 71 рисунок, 21 таблицу и приложение на 45 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** изложены основные особенности бортовых систем охлаждения, на основе чего обосновывается актуальность темы и определяется цель исследований.

В **первой** главе представлен анализ современного состояния развития бортовых систем охлаждения и их подсистем.

Отмечается, что большой вклад в развитие криогенной техники в части микроохладителей внесли такие ученые, как А.М. Архаров, В.М. Бродянский, А.Д. Суслов, Е.И. Микулин, В.А. Афанасьев, Н.М. Григоренко, Г.А. Гороховский, Ю.О. Прусман, В.И. Могорычный, В.И. Карагусов. Среди научных школ, как наиболее значимых в этой области, можно отметить московские вузы МЭИ и МГТУ им. Баумана, а среди опытно-конструкторских организаций — НТК «Криогенная техника» (г. Омск), НПО «Криогенмаш» (г. Балашиха, МО), НПО «Гелиймаш» (г. Москва).

Анализ термомеханических систем охлаждения показывает, что период существенного роста их эффективности заканчивается. Возможности принципиальных улучшений связаны с совершенствованием конструкции их подсистем.

В газовых криогенных машинах (ГКМ) Стирлинга, Гиффорда–Мак-Магона, замкнутых дроссельных системах охлаждения (ЗДСО), компрессорный блок определяет их термодинамическую эффективность. Поэтому создание компрессора нового типа, способного

работать в составе бортовой системы охлаждения, независимо от принципа ее действия, является актуальной задачей.

Роторно-лопастной компрессор — это машина объемного вытеснения, имеющая в сравнении с другими типами компрессоров преимущества по массогабаритным, вибрационным характеристикам, эффективности использования рабочего объема, возможности работы с бесконтактными уплотнениями. В составе газовой криогенной машины один многокамерный, регулируемый по частоте вращения, уравновешенный роторно-лопастной компрессор позволяет обеспечить захлаживание конструктивных элементов фотоприемных устройств на разных температурных уровнях либо в качестве элемента тепловой защиты, либо с целью достижения более низких температур криостатируемого объекта в каскадных и ступенчатых схемах.

На основании проведенного анализа в диссертации сформулированы задачи исследований, направленные на решение проблемы повышения эффективности работ по созданию и доводке новых бортовых систем охлаждения.

Во **второй** главе представлены исследования, содержащие теоретический анализ рабочего процесса роторно-лопастного компрессора.

Выполненный анализ конструкции роторно-лопастного компрессора (рис. 1) показал возможность его существования в двух основных модификациях: с «колеблющимися» лопастями (совершает возвратно-поворотное движение за счет механизма привода с некруглыми эллиптическими и цилиндрическими колесами) (рис. 2) и «вращающимися» лопастями (совмещает возвратно-поворотное и однонаправленное вращательное движение благодаря упрощенному механизму привода компрессора с эллиптическими колесами) (рис. 3).

Показано, что РЛК с «вращающимися» лопастями проще по конструкции, может не иметь клапанов, в связи с чем он перспективен для замкнутых дроссельных систем охлаждения.

При этом показано, что для ГKM Стирлинга, которые не предполагают клапанов, РЛК должен быть выполнен с «колеблющимися» лопастями.

Роторно-лопастной компрессор может быть выполнен как с контактными, так и бесконтактными уплотнениями. Однако в связи с тем, что компрессор для ГKM должен удовлетворять требованиям чистоты рабочего тела и работоспособности, выбраны *бесконтактные* уплотнения, а именно — щелевые.

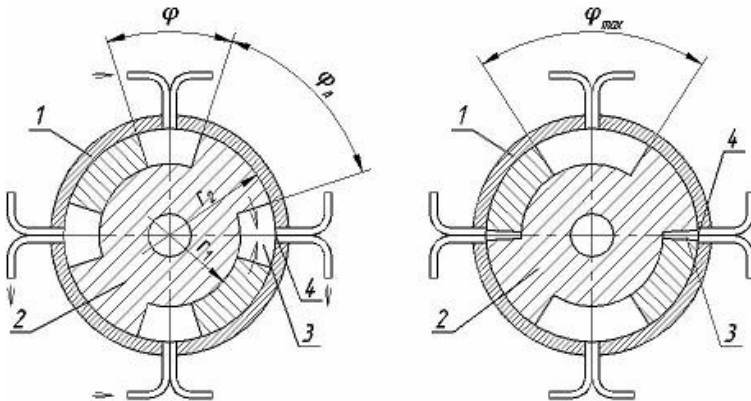


Рис. 1 — Схема роторно-лопастного компрессора



Рис. 2 — «Колеблющийся» вариант роторно-лопастного компрессора

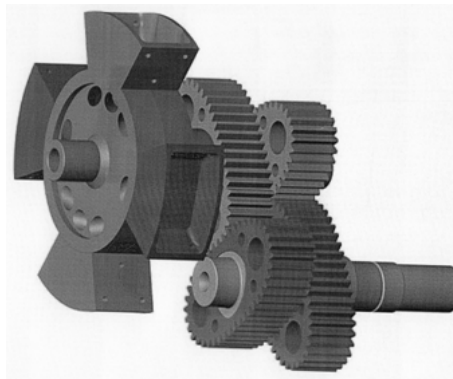


Рис. 3 — «Вращающийся» вариант роторно-лопастного компрессора

Наличие щелевых зазоров между рабочими камерами вносит свои особенности в рабочие процессы как собственно РЛК, так и ГKM в целом. Выявлено, что это обстоятельство ранее не учитывалось в известных методиках. Путем анализа зависимостей для бесконтактных уплотнений предложена формула для расчета расхода газа через гладкую щель (1), в которой характерным размером является периметр условного поршня РЛК: $\Pi_n = 2 \cdot S_{\text{кц}} + 2(r_2 - r_1)$. Эквивалентная длина щели $l_{\text{эк}}$ равна длине дуги при $\varphi_d = 54^\circ$ на среднем диаметре лопасти $d_{\text{cp}} = r_1 + r_2$. Величина щелевого зазора $\delta = 20 \text{ мкм}$; p_2, p_1 — давления перед и после уплотнения.

$$Q_{\text{щц}} = \frac{\Pi_n (p_2 - p_1) \delta^3}{12 \cdot \mu \cdot l_{\text{эк}}} \quad (1)$$

Выполнено сравнение расчетных значений перетечек по формуле (1) с данными для поршневых компрессоров средней производительностью. Показано, что характер поведения перетечек в зависимости от факторов влияния аналогичен при перепадах давлений на уплотнении более 1 МПа и зазорах более 50 мкм . Однако отсутствие данных для микрокомпрессоров, диктует необходимость дополнительного изучения перетечек.

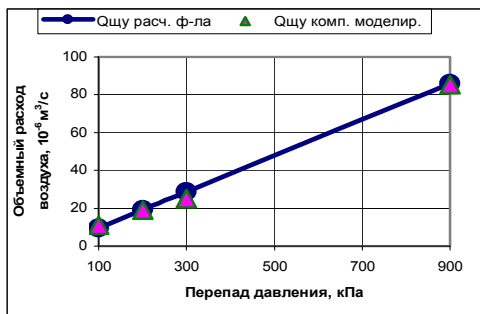


Рис. 4 — Зависимости объемного расхода воздуха через щелевое уплотнение от перепада давления для расчетной и математической моделей

С этой целью в компьютерной программе COSMOSFloWorks был смоделирован процесс течения газа в зазоре (щелевом уплотнении). Выполнен расчет расхода газа $Q_{\text{щц}}$ в зависимости от перепада давления $\Delta p = (p_2 - p_1)$. Результаты, полученные по формуле (1) и при компьютерном моделировании, представлены на рис. 4, из которого следует, что данные, полученные при компьютерном моделировании, подтверждают возможность применения расчетной формулы (1) в областях давлений ниже 10^3 кПа и для величин

щелевых зазоров порядка 20 мкм.

Расчетное моделирование также показало, что формула (1) справедлива для различных рабочих тел как для воздуха, так и для гелия, поскольку учитывает их вязкостные свойства. Кроме этого, использование квазистационарной модели течения газа (при неподвижных стенках) целесообразно, так как абсолютный уровень перетечек в этом случае является максимальным и в расчетах это идет в запас характеристик РЛК.

Для определения герметичности рабочей полости РЛК разработана соответствующая методика, позволяющая найти массу газа, перетекшую через щелевые уплотнения в процессе сжатия и выпуска:

$$m_{пер} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} Q_{щв}(\tau) \cdot \rho_{ср} \cdot d\tau. \quad (2)$$

В результате получены следующие расчетные характеристики четырехкамерного РЛК общим рабочим объемом $V_p = 41,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$: коэффициент герметичности $\lambda_z = 0,77$, коэффициент наполнения $\lambda_n = 0,88$, коэффициент производительности $\lambda_\Sigma = 0,68$ при степени повышения давления $\varepsilon = 3$, индикаторная работа $L_{инд} = 1,62 \text{ Дж}$, индикаторная мощность $N_{инд} = 23,8 \text{ Вт}$, производительность $Q_{пр} = 286,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ при заданной частоте $f = 10 \text{ Гц}$, изотермический КПД $\eta_{из} = 0,67$.

Проведена геометрическая оптимизация рабочей полости РЛК в соответствии с разработанным алгоритмом, содержащим ограничение по наружному габариту r_2 при сохранении рабочего объема, зазора и кинематики привода. Путем вариации величин внутреннего радиуса r_1 и толщины кольцевой полости $S_{кц}$ найден оптимум геометрических параметров рабочей полости РЛК, отклонение от которого в диапазоне $\pm 10\%$ ведет к росту доли перетечек на 15% и потере производительности компрессора $Q_{пр}$ на 17%.

Таким образом, для проектируемого роторно-лопастного компрессора первым этапом проектировочного расчета являются оптимизация геометрических параметров и обработка элементов конструкции.

В третьей главе содержатся результаты экспериментальных исследований роторно-лопастного компрессора на специально созданных испытательных стендах.

Изготовлены и прошли предварительные испытания две модификации роторно-лопастного компрессора. Первая, (см. рис. 3) с суммарным рабочим объемом $V_p = 510,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, расчетной производительностью $18,4 \text{ м}^3/\text{ч}$, совмещает возвратно-поворотное и однонаправленное вращательное движение. При этом впуск и выпуск рабочего тела производится через окна, каждая пара полостей осуществляет рабочий цикл (впуск-сжатие-выпуск) за 180° . Во «вращающемся» роторно-лопастном компрессоре газораспределение осуществляется самими лопастями, выполняющими функцию золотников.

Испытания на установке, изображенной рис. 5, 6, показали полную работоспособность механизма привода и возможность получения компрессора объемного действия при работе без клапанов.



Рис. 5 — Внешний вид установки для испытаний «вращающегося» РЛК

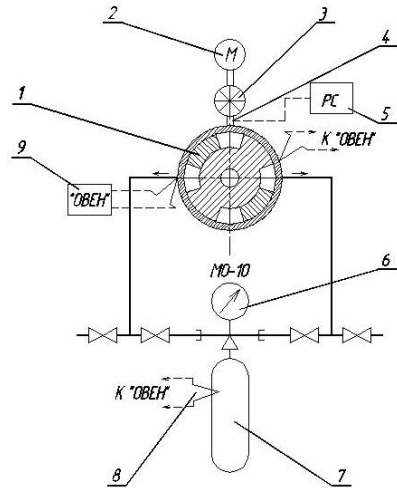


Рис. 6 — Принципиальная схема установки для испытаний «вращающегося» РЛК

- 1 – роторно-лопастной компрессор;
- 2 – электродвигатель привода;
- 3 – ременная передача; 4 – датчик Холла;
- 5 – персональный компьютер;
- 6 – манометр образцовый; 7 – баллон;
- 8 – термопара; 9 – измеритель-регулятор

Методом наполнения баллона $V_0=50 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ были получены следующие характеристики: производительность (при различных оборотах привода), коэффициент подачи по давлению нагнетания, показатель политропы процесса сжатия (рис. 7, 8). Все эти данные позволили определить «вращающийся» РЛК как бесклапанную машину, имеющую перспективы по дальнейшему применению в дроссельных системах охлаждения.

Второй испытанной модификацией роторно-лопастной машины (см. рис. 2) был также четырехкамерный микрокомпрессор, но с суммарным рабочим объемом $V_p=41,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$, расчетной производительностью $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и «колеблющимися» лопастями (рис. 9 и 10), $V_0=2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$.

Испытания проводились по аналогичной методике, при этом снимались характеристики как при работе на всех четырех камерах, так и попарно, а также по отдельности для каждой камеры.

В целом данные, полученные на «колеблющемся» РЛК, позволяют считать микрокомпрессор как перспективный для ГКМ (рис. 11 и 12).

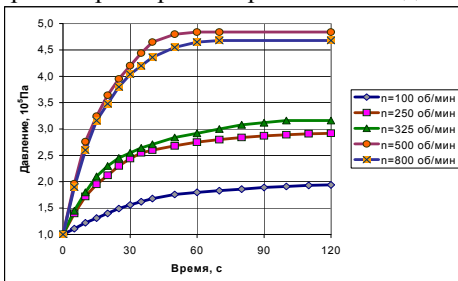


Рис. 7 — Темп наполнения баллона при

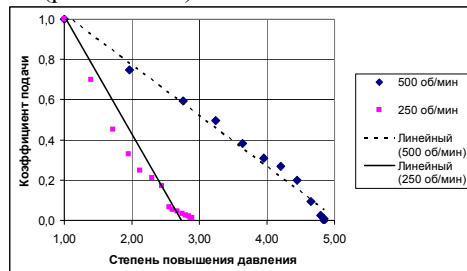


Рис. 8 — Зависимость коэффициента

испытаниях «вращающегося» РЛК

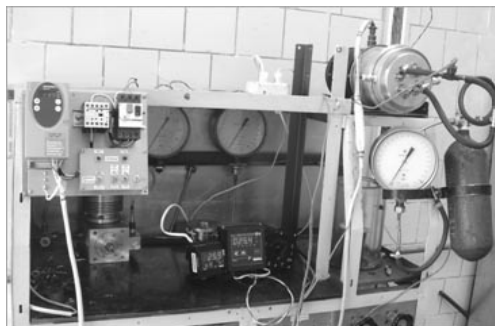


Рис. 9 — Внешний вид установки для испытаний «колеблющегося» роторно-лопастного компрессора

подачи от степени повышения давления «вращающегося» РЛК

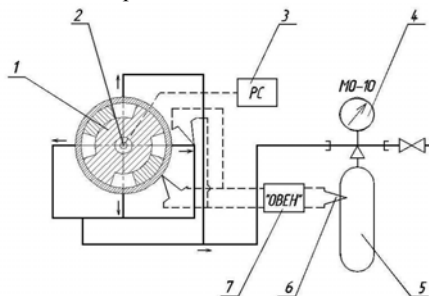


Рис. 10 — Принципиальная схема установки для испытаний «колеблющегося» РЛК

1 – роторно-лопастной компрессор с электродвигателем привода; 2 – датчик ЛПР-158; 3 – персональный компьютер; 4 – манометр образцовый; 5 – баллон; 6 – термонара; 7 – измеритель-регулятор

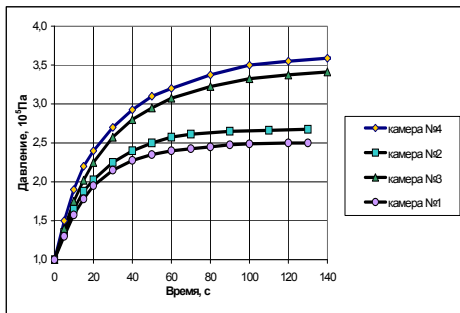


Рис. 11 — Темп наполнения баллона при испытаниях «колеблющегося» РЛК

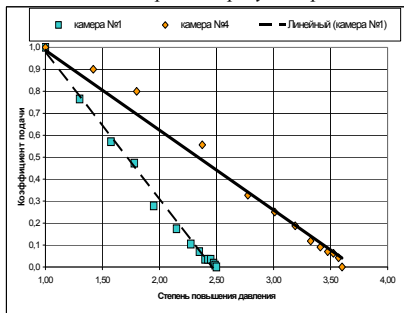


Рис. 12 — Зависимость коэффициента подачи от степени повышения давления «колеблющегося» РЛК

Проведение опережающих исследований роторно-лопастного компрессора является важным этапом, так как главная задача создания РЛК — комплектация им криогенных систем охлаждения.

Вследствие того, что при работе в составе ГKM перетечки рабочего тела нежелательны, но допустимы, но их величина также определяет совершенство рабочих процессов. Для оценки степени совершенства компрессорной полости ГKM до этапа комплексных испытаний проведены испытания компрессора с присоединенным объемом $V_{np}=5,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Установка (рис. 13) содержит: испытуемый «колеблющийся» вариант РЛК; электродвигатель привода с пультом управления; системы замера, контроля и регистрации параметров.

Результаты каждого измерения обрабатывались специально созданной программой и записывались на компьютер в виде отдельного файла (рис. 14).

По каждому измерению получен график изменения давления в компрессоре (рис. 14) с привязкой к текущему углу поворота вала (объему камеры сжатия) и график единичных импульсов оборотов вала привода РЛК.

Получена расчетная модель изменения давления в роторно-лопастном компрессоре с присоединенным объемом, как имитаторе ГКМ.



Рис. 13 — Внешний вид установки для испытаний роторно-лопастного компрессора с присоединенным объемом

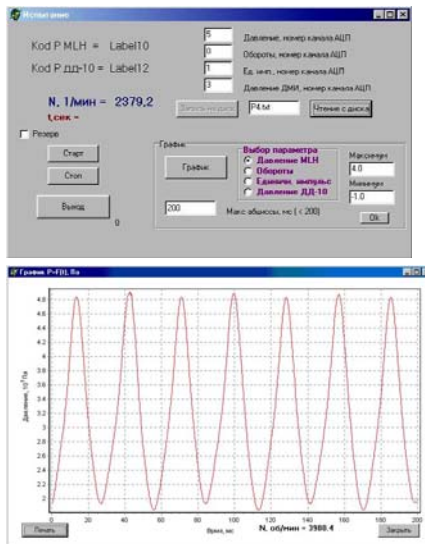


Рис. 14 — Программа обработки

Наложением соответствующих графиков давления, полученных расчетным путем, на результаты экспериментальных данных можно оценить коэффициент герметичности компрессорной полости ГКМ, задаваясь различными значениями зазора щелевого уплотнения. Данная методика позволяет без испытания в составе газовой криогенной машины (холодной и горячей полостей) производить отладку компрессора на допустимый уровень утечек через щелевые уплотнения.

Проведенные расчеты и испытания роторно-лопастного компрессора показали необходимость его конструктивной доработки. Так называемый второй вариант роторно-лопастного компрессора (РЛК-2) выполнен по качающейся схеме с одной парой колеблющихся и одной парой неподвижных лопастей. Это позволяет избежать паразитных утечек в картер компрессора за счет использования одного качающегося ротора вместо двух. В результате доработки конструкции коэффициент герметичности РЛК-2, рассчитанный по разработанным методикам, составляет $\lambda_z = 0,95$. При этом производительность компрессора возрастает на 29,4% в сравнении с первоначальным вариантом роторно-лопастного компрессора.

Выполнение указанных рекомендаций позволяет получить характеристики роторно-лопастного компрессора, повышающие эффективность его работы в составе газовой криогенной машины.

В **четвертой** главе изложена уточненная методика расчета цикла газовой криогенной машины на базе РЛК с бесконтактными уплотнениями и рассмотрены варианты использования РЛК в составе бортовых систем охлаждения.

Методика расчета термодинамического цикла газовой криогенной машины Стирлинга на основе роторно-лопастного компрессора учитывает фазы натекания рабочего тела по холодным и горячим полостям; текущие изменения температур в полостях и регенераторе;

перетечки рабочего тела в компрессорной полости. Отработка методики производилась на схеме ГКМ, включающей компрессор (РЛК), регенератор, детандер-расширитель (РЛМ).

В результате расчета одноступенчатой роторно-лопастной газовой криогенной машины (РЛГКМ) на уровень температуры криостатирования 65 K , получены: индикаторная холодопроизводительность $Q_0=47,1\text{ Вт}$, количество отводимого тепла $Q_m=224,6\text{ Вт}$, потребляемая мощность $N_{ГКМ}=177,5\text{ Вт}$ (см. рис. 15, 16).

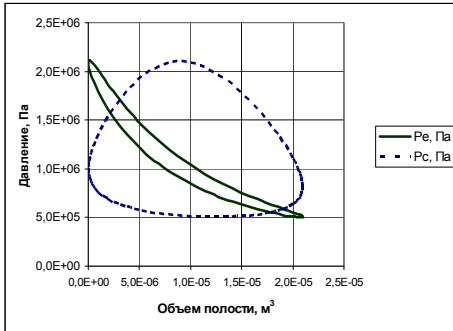


Рис. 15 — Расчетные индикаторные диаграммы полостей расширения и сжатия РЛГКМ

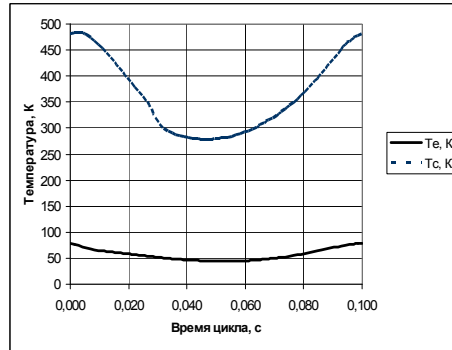


Рис. 16 — Изменение температур полостей расширения и сжатия

Для учета влияния перетечек газа в полости сжатия (из одной пары рабочих камер в другую через щелевые уплотнения) на параметры ГКМ была разработана уточненная методика (рис. 17). В результате численного моделирования рабочего процесса показано, что при величине щелевого зазора 20 мкм (рис. 18, 19) между полостями перетекает в среднем порядка 2% рабочего тела за цикл, что ведет к снижению холодопроизводительности также на 2%. Переход на зазор 10 мкм позволяет добиться расчетной холодопроизводительности и герметичности на уровне 99,8% (рис. 18), но это значительно усложняет технологию изготовления, ведет к удорожанию изделия и, главное, снижает надежность ГКМ. Увеличение щелевого зазора до 40 мкм ведет к десятикратному увеличению перетечек по массе, в то же время индикаторная холодопроизводительность снижается только на 16%, и это может быть признано целесообразным с точки зрения увеличения надежности, ресурса и снижения стоимости роторно-лопастной ГКМ в целом.

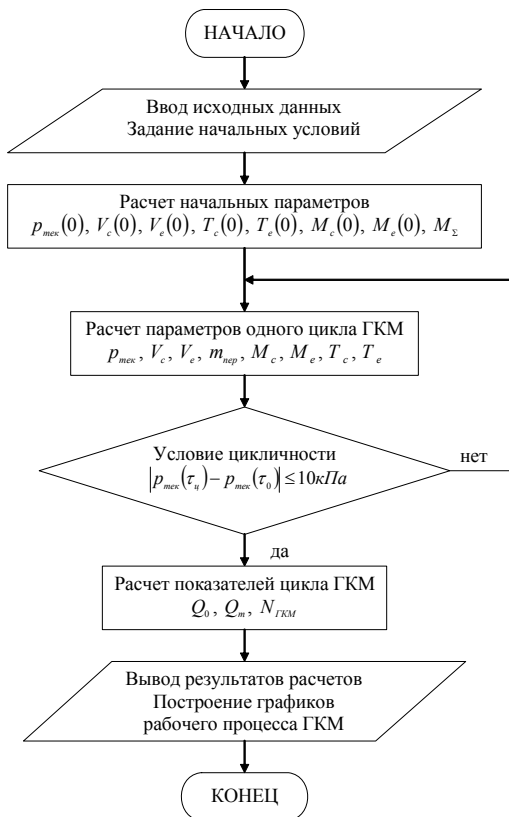


Рис. 17 — Структурная схема расчета цикла ГKM с учетом перетечек рабочего тела в полости сжатия

Таким образом доказано, что принципиально возможно создание ГKM на базе роторно-лопастного компрессора с использованием бесконтактных уплотнений рабочих камер на зазорах до 40 мкм.

Особой сложностью при разработке новых конструктивно-компоновочных вариантов газовой криогенной машины является отсутствие решений для многокамерного компрессора, обслуживающего сразу несколько расширительных частей холодного контура. Таким образом, задача получения необходимых значений холодопроизводительности на различных температурных уровнях для такой холодильной машины является не только новой, но и актуальной.

Показано, что запатентованные особенности конструкции РЛК позволяют применить его в составе различных схем газовых криогенных машин для БСО: ГKM Стирлинга классической схемы; Сплит-Стирлинга; Гиффорда–Мак-Магона; замкнутой дроссельной системы охлаждения.

Схемные решения возможных вариантов исполнения детандерных полостей ГKM с компрессорной частью на основе РЛК представлены на рис. 20.

Анализ предложенных схем проведен с использованием эксергетического метода, который заключается в применении эксергетической функции для получения приведенной холодопроизводительности, обладающей свойством аддитивности:

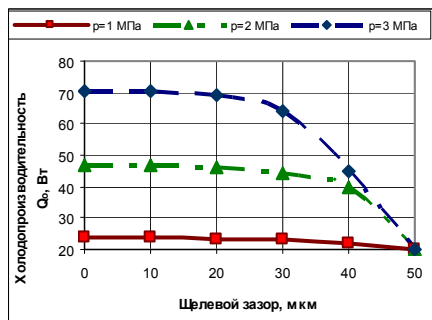


Рис. 18 — Зависимость холодопроизводительности от щелевого зазора при различных давлениях

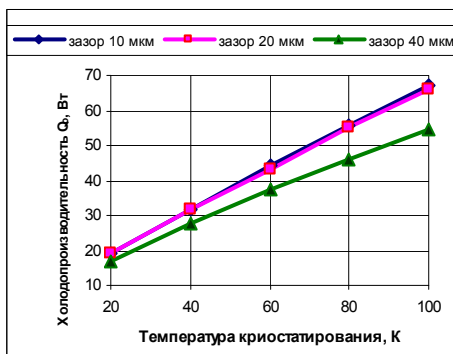


Рис. 19 — Зависимость холодопроизводительности от температуры криостатирования

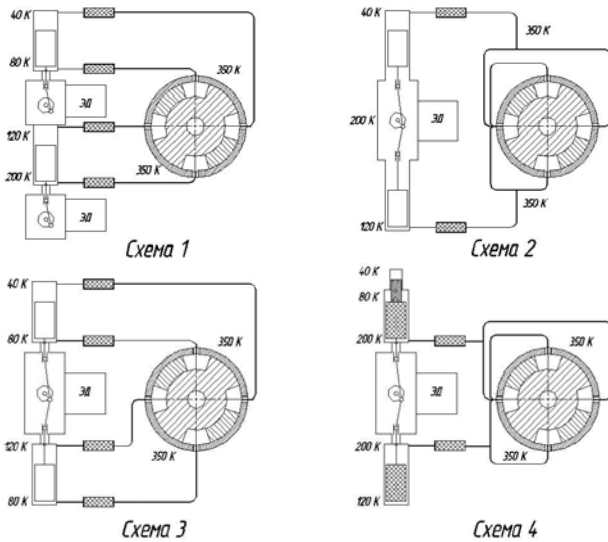


Рис. 20 — К выбору облика газовой криогенной машины Стирлинга на базе РЛК



Рис. 21 — РЛГКМ в поле энергетических характеристик серийных ГKM Стирлинга

обладает как минимум в два раза большим ресурсом порядка 30 тыс. ч.

При захлаживании двух температурных уровней, например на 20 K для линейки фотоприемного устройства и 80 K для фоновозащитной бленды, необходимо использование двух машин Стирлинга или одной ГKM на базе многокамерного РЛК по схеме 4. Сравнительный анализ параметров микрокриогенных систем, представленных в таблице, показывает преимущества по энергетическим (15%) и массовым (10%) характеристикам в случае применения многокамерного РЛК для ГKM, обслуживающей несколько температурных уровней. При этом параметры РЛГКМ лежат у нижних границ зоны эффективности Бродянского (рис. 21).

Таблица — Сравнение двухуровневой ГKM на базе РЛК по схеме 4 и бортовой системы охлаждения на базе двух машин Стирлинга

$$Q_e = Q_0 \cdot |\tau_e|, \quad (3)$$

$$\text{где } \tau_e = \frac{T_{\text{хол}} - T_{\text{ос}}}{T_{\text{хол}}}.$$

Отношение приведенной холодопроизводительности к затратам эксергетической мощности ГKM Q_e/n_e характеризует совершенство рассмотренных схем. Исходя из полученных результатов, следует отметить четвертую схему, которая дает наилучшие показатели за счет ступенчатого захлаживания привода детандера и применения двухступенчатого охлаждения в верхней головке расширительной части ГKM. Эта схема принята в качестве основной для создания многоуровневой ГKM на базе РЛК.

Многокамерный РЛК

позволяет организовать несколько каскадов на различных уровнях охлаждения, вводить в схему участки предварительного захлаживания рабочего тела от других каскадов. В этом смысле РЛК обладает большими возможностями для реализации многокаскадных систем криостатирования бортовых систем охлаждения с различными компоновочными и параметрическими характеристиками.

Как следует из сравнения прогнозируемых характеристик одноступенчатой РЛГКМ с одноступенчатой машиной Стирлинга, при сопоставимых затратах мощности РЛГКМ на 30% меньше по удельной массе, а в связи с отсутствием трения в рабочих камерах и благодаря возвратно-поворотному движению лопастей потенциально

МКС	Уров-ни	T_n, K	T_e, K	Q_n, Bm	Q_e, Bm	$Q_{e\ n}, Bm$	$Q_{e\ e}, Bm$	N_{Σ}, Bm	n_e, Bm	$\epsilon_{\text{ЭКС}}$	$m_{\text{МКС}}, кг$
Две ГKM Стирлинга	2	20	80	0,4	1,7	4,4	4,675	330	3045	0,00298	29
Одна ГKM на базе РЛК	2	20	80	0,4	1,7	4,4	4,675	257	2411	0,00354	26

Представленные в четвертой главе результаты, методики и рекомендации являются необходимыми при создании многоуровневых ГKM на базе многокамерного роторно-лопастного компрессора.

Разработка последовательности проведения экспериментальных исследований, расчетов, уточненных методик, проведение дополнительных исследований и испытаний — всё это является необходимым комплексом и основой при исследовании новых бортовых систем охлаждения, что и было выполнено в процессе проведенной диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:

В результате выполнения теоретических и экспериментальных исследований разработаны методология и методики по расчету, проектированию и испытаниям многокамерного роторно-лопастного компрессора для бортовых систем охлаждения.

1. Разработана методика уточненного расчета рабочего процесса газовой криогенной машины Стирлинга на базе многокамерного роторно-лопастного компрессора для различных конструктивно-компоновочных схем бортовых систем охлаждения до уровня температур 20 K, в том числе на уровень 65 K с индикаторной холодопроизводительностью до 47 Bm.

2. Предложена методика расчета рабочего процесса роторно-лопастного компрессора с бесконтактными уплотнениями, которая позволяет оценить влияние различных конструктивных параметров на характеристики компрессора и выполнить его геометрическую оптимизацию с учетом компоновки.

3. Создана методика расчета перетечек между камерами роторно-лопастного компрессора, позволяющая в десять раз сократить временные затраты при расчете характеристик системы охлаждения.

4. Разработано методическое и программное обеспечение проведения испытаний, обработки результатов экспериментальных исследований и доводочных работ, существенно снижающее трудоемкость на этапе научно-исследовательской и опытно-конструкторской разработки роторно-лопастного компрессора для бортовых систем охлаждения.

5. Стендовые испытания экспериментальных образцов роторно-лопастного компрессора двух типоразмеров с различной организацией рабочих процессов, расчетной производительностью 18,4 м³/ч и 1,5 м³/ч позволили получить экспериментальные характеристики, подтвердившие их работоспособность, а также возможность применения в бортовых системах охлаждения летательных аппаратов.

6. Разработаны рекомендации по модернизации роторно-лопастного компрессора, позволяющие достичь расчетного коэффициента герметичности $\lambda_c = 0,95$ и повысить производительность компрессора на 29,4% в сравнении с первоначальным вариантом, тем самым улучшить характеристики газовой криогенной машины на его основе.

7. Численным моделированием проведено опережающее исследование по прогнозированию рабочих характеристик многоуровневой газовой криогенной машины на базе многокамерного роторно-лопастного компрессора, подтвердившее эффективность ее применения по энергетическим (на 15%) и массовым (на 10%) характеристикам в сравнении

с двумя газовыми криогенными машинами Стирлинга для поддержания различных температурных уровней охлаждения, тем самым доказана перспективность развития данного направления.

Основные научные результаты диссертации изложены в следующих работах:

1. Коломин, И.В. Предварительные испытания роторно-лопастной машины [Текст] / И.В. Коломин, А.И. Довгялло, Ю.М. Русанов, В.В. Лысенков, Ю.М. Трубников // Вестник СГАУ 2006 №2(10) Ч.1. – С. 302-305.
2. Пат. 56501 Российская Федерация, МПК⁷ F04C 18/30. Роторно-лопастной компрессор [Текст] / Коломин И.В., Довгялло А.И., Семенов Б.П., Русанов Ю.М., Трубников Ю.М.; заявитель и патентообладатель Самарск. гос. аэрокосм. ун-т, ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС». – №2006103403/22; заявл. 06.02.06; опубл. 10.09.06, Бюл. № 23 – 2 с.: ил.
3. Rotor-Vane Compressor for Onboard Cooling System [Text] / A.I. Dovgjallo, I.V. Kolomin // XIX International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices: ABSTRACTS – М., 2006. – P. 144.
4. Довгялло, А.И. Роторно-лопастной компрессор для бортовой системы охлаждения [Текст] / А.И. Довгялло, И.В. Коломин // XIX Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения: тезисы докладов – М., 2006. – С. 162-163.
5. Довгялло, А.И. Предварительный анализ потребного и располагаемого расхода воздуха через ЭХГ электромобиля [Текст] / А.И. Довгялло, И.В. Коломин // Современные тенденции развития автомобилестроения в России: сб. тр. / Всеросс. науч.-техн. конф. Ч.2. – Тольятти: ТГУ, 2005. – С. 150-152.
6. Коломин, И.В. Роторно-кольцевой компрессор [Текст] / И.В. Коломин, А.И. Довгялло // Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин: тезисы докладов. – Казань, 2004. – С. 21-23.
7. Коломин, И.В. Влияние геометрических параметров на производительность роторно-лопастного компрессора [Текст] / И.В. Коломин // Аспирантский вестник Поволжья – 2005. – №2. – С. 42-45.
8. Коломин, И.В. Предварительные испытания роторно-лопастной машины [Текст] / И.В. Коломин, А.И. Довгялло // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. 21-23 июня 2006 г. Ч.1. – Самара: СГАУ, 2006. – С. 193-194.

Подписано в печать 29.06.07

Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинала макета в типографии СГАУ