

На правах рукописи

УДК 621.59, 621.3.019.3

Шишова Наталья Евгеньевна

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕСУРСА  
МИКРОКРИОГЕНЕРАТОРА

Специальность 2.4.8 Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной  
техники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва, 2024

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

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н.Э. Баумана  
Навасардян Екатерина Сергеевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор, профессор ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей  
Довгялло Александр Иванович

кандидат технических наук,  
генеральный директор  
Общества с ограниченной ответственностью  
«НТЦ «Крионекс», Россия, г. Москва  
Самвелов Андрей Витальевич

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Орион»  
(АО «НПО «Орион»)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года в \_\_\_\_\_ на заседании Диссертационного совета 24.2.331.22 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение», 3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по указанному адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5, стр.1. Ученому секретарю диссертационного совета 24.2.331.22.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.331.22  
кандидат физико-математических наук

А.А. Протопопов

### **Актуальность темы исследования:**

В последние двадцать лет применение микрокриогенераторов (МКГ) для глубокого охлаждения инфракрасных, гамма- детекторов и высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) элементов постоянно расширяется. Наиболее востребованы МКГ для охлаждения матричных фотоприемных устройств (МФПУ) инфракрасных систем «смотрящего типа» в спектральном диапазоне 3...5 мкм и 8...12 мкм при температуре криостатирования 65...120 К на основе фоточувствительных полупроводниковых материалов: Hg-Cd-Te, InSb, InGaAs; технологиях на квантовых ямах и точках (QWIP, QDIP); сверхрешеток 2 рода. Глубокое охлаждение фотонных детекторов необходимо для предотвращения тепловой генерации носителей заряда, которая ограничивает параметры приемников излучения, способствуя появлению шумов. Последние разработки в области охлаждаемых «высокотемпературных» МФПУ 2-ого и 3-го поколения на основе твердого раствора теллуридов кадмия-ртути позволяют существенно повысить рабочую температуру охлаждения фоточувствительного слоя относительно температуры кипения азота до 110...120 К. Однако по-прежнему до 60 % тактических МКГ применяют для криостатирования систем с полезной нагрузкой до 1,8 Вт при температуре 77...80 К.

Геометрические размеры охлаждаемых активных компонентов МФПУ, элементов ВТСП варьируется в диапазоне от 0,1x0,1мм<sup>2</sup> (Ø 0,1 мм) до 10x10мм<sup>2</sup> с тепловыделением от 0,15 до 1,8 Вт. Для обеспечения криостатирования этих объектов применяются преимущественно миниатюрные криогенераторы как периодического действия, время работы которых составляет от 0,2 до 100 часов, так и непрерывного действия со сроком службы от 1 до 5 лет. Актуальным остается вопрос оценки и последующего расчета ресурса, предлагаемого конструктивного решения. Для неремонтопригодных МКГ предъявляются повышенные требования к безотказности, энергопотреблению, термодинамической эффективности, массогабаритным, вибрационным и акустическим характеристикам, точности поддержания температуры криостатирования и другим характеристикам в зависимости от назначения устройства. Численные значения показателей надежности МКГ, представляющие из себя разрозненные данные, сравнить не представляется возможным. Причина - отсутствие международного согласованного стандарта по условиям и режимам испытаний МКГ.

### **Цель работы:**

Разработка методики оценки и расчета ресурса на стадии проектирования новой или совершенствования существующей модели МКГ под заданные технические требования и условия эксплуатации.

**Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:**

1. Систематизация информации по регенеративным циклам и способам их реализации в конструктивных элементах с целью быстрого подбора

принципиальной схемы проектируемого МКГ под заданные технические требования и условия эксплуатации.

2. Анализ рабочих циклов с позиции максимизации ресурсных характеристик.
3. Анализ влияния комплектации и кинематической схемы приводного механизма на ресурс МКГ.
4. Разработка методики качественной оценки и последующего расчета ресурса на этапе проектирования новой или совершенствования существующей модели МКГ на основе закона распределения Вейбулла под заданные технические требования и условия эксплуатации.
5. Анализ возможных путей повышения надежности МКГ.
6. Применение методики оценки и расчета ресурса МКГ для прогнозирования надежности совершенствуемой модели МКГ на примере роторного МКГ типа Стирлинг.
7. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными в соответствии с предложенной методикой.

#### **Научная новизна:**

1. Впервые предложен метод структурирования технических и термодинамических характеристик, конструктивных особенностей различных принципиальных схем МКГ, реализующих регенеративные циклы, в виде круговой диаграммы.
2. Разработана методика оценки и расчета ресурса новой или совершенствования существующей МКГ на основе закона распределения Вейбулла с оценкой влияния различных независимых факторов методом многофакторного анализа.
3. Разработаны новые методы:
  - разработан метод подбора рабочих параметров аппаратов и агрегатов МКГ с позиции максимизации ресурсных характеристик на стадии проектирования;
  - разработан метод предварительной качественной оценки вероятности отказа механизмов движения для полостей сжатия и расширения;
  - разработан метод подбора компоновочных схем проектируемого МКГ на основе статистических данных отечественных и зарубежных производителей МКГ;
  - разработан метод повышения надежности МКГ на стадии проектирования.
4. Разработаны трехмерные номограммы для определения параметра формы  $\beta$  и параметра масштаба  $\eta$  закона распределения Вейбулла при заданном значении МТТФ и/или вероятности отказа  $R(t)$  МКГ.
5. Получены новые экспериментальные данные о степени влияния независимых факторов (давления заправки, частоты вращения ротора, температуры окружающей среды, покрытия поршня) на ресурс роторного МКГ типа Стирлинг.

#### **Практическая значимость работы:**

1. На основании статистических, экспериментальных данных и численного моделирования разработан алгоритм построения конструктивного

- исполнения МКГ под заданные условия работы и требуемый ресурс.
2. Создана методика оценки надежности узлов и всей сборки МКГ в целом на основе закона распределения Вейбулла с оценкой влияния различных независимых факторов методом многофакторного анализа. Это позволяет определить надежность узлов и деталей на этапе проектирования и совершенствования существующей модели МКГ.
  3. Предложены прогностические поверхности наработки на отказ роторного МКГ типа Стирлинг в зависимости от давления заправки, частоты вращения ротора и температуры окружающей среды для определения ресурса при различных условиях эксплуатации.
  4. Разработан и проверен алгоритм повышения надежности МКГ на стадии проектирования, совершенствования существующей модели и на стадии испытаний.
  5. Сформулированы пошаговые рекомендации по совершенствованию новых и существующих моделей МКГ.

#### **Внедрение результатов работы:**

Разработанная методика оценки и расчета ресурса МКГ внедрена в учебный процесс кафедры Холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н.Э. Баумана.

#### **Достоверность и обоснованность полученных результатов:**

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивается проверенными средствами измерения, использованием апробированных методик измерения, сравнением результатов с данными, полученными в процессе численного моделирования с помощью программного продукта ANSYS компании ANSYS Inc.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Круговая диаграмма для подбора регенеративного цикла и принципиальной схемы на этапе проектирования МКГ.
2. Метод подбора рабочих циклов полостей сжатия и расширения МКГ с позиции максимизации термодинамической эффективности.
3. Качественная оценка вероятности отказа механизмов движения МКГ на этапе проектирования на основе статистических и экспертных данных.
4. Методика оценки и расчета ресурса на стадии проектирования новой или совершенствования существующей модели МКГ на основе закона распределения Вейбулла с оценкой влияния различных независимых факторов методом многофакторного анализа.
5. Результаты анализа численного моделирования перетекания рабочего вещества через зазор между поршневой парой компрессорной полости роторного МКГ типа Стирлинг с холодопроизводительностью 0,5 Вт при 77 К. Последующее определение оптимальных геометрических параметров зазора с точки зрения термодинамической эффективности, сохранения несущей способности газостатического слоя и минимизации перетечек.

6. Результаты апробации методики оценки и расчета ресурса МКГ и последующая выработка рекомендаций по совершенствованию роторного МКГ типа Стирлинг для достижения ресурса 3000 часов и более.

**Методы исследования:**

В работе использовались теоретические методы (анализ, синтез, индукция моделирование) и экспериментальные методы исследования. Теоретические и экспериментальные методы исследования проводились на кафедре «Холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Обработка экспериментальных и модельных данных осуществлялась косвенным и прямым способами анализа с применением методов математической статистики – корреляционный, многофакторные регрессионный и дисперсионный анализы.

**Апробация работы:**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- III Международной научно-практической конференции «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (Москва, 2019 г.).
- III международной научной конференции SEWAN – 2021 «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (Санкт-Петербург, 2021 г.).
- The 16th Cryogenics 2021, IIR International Conference (Praha, 2021).
- Международной научно-практической конференции «Применение низких температур в науке и промышленности» (Москва, 2022 г.).
- The 17th Cryogenics 2023, IIR International Conference (Dresden, 2023).

**Личный вклад автора:**

1. Выполнен анализ МКГ, работающих по циклам Стирлинга, Гиффорда-МакМагона, Пульсационной трубы, Сольвея, Вюлемье и их модификаций, а также кинематических схем существующих конструктивных исполнений МКГ и области их применений для криостатирования объектов различного назначения при температуре криостатирования в диапазоне от 4,2 до 120 К и требуемой холодопроизводительности до 2 Вт.
2. Предложена круговая диаграмма для выбора оптимального термодинамического цикла и принципиальной схемы на стадии проектирования новой МКГ.
3. Разработана методика оценки и расчета ресурса на стадии проектирования новой или совершенствования существующей модели МКГ на основе закона распределения Вейбулла с оценкой влияния различных независимых факторов методом многофакторного анализа.
4. Установлена функциональная взаимосвязь между независимыми факторами (давлением заправки, температурой окружающей среды, рабочей частотой) и наработкой до отказа для различных условий эксплуатации роторного МКГ типа Стирлинг.
5. Определен оптимальный зазор между поршнем и цилиндром полости сжатия роторного МКГ типа Стирлинг при температуре криостатирования

77 К и холодопроизводительности 0,5 Вт.

6. Предложены рекомендации по совершенствованию новых и существующих моделей МКГ.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** приведена краткая информация об области применения МКГ, обоснована актуальность разработки методики оценки и расчета ресурса на стадии проектирования новых, совершенствования существующих МКГ.

**В первой главе** проведен обзор существующих конструктивных решений МКГ и области их применения. Объектом исследования выбраны наиболее востребованные автономные МКГ для миниатюрных систем и микросистем криостатирования инфракрасных датчиков и ВТСП элементов гражданского и специального назначения, обеспечивающие холодопроизводительность до 2,0 Вт на температурных уровнях криостатирования от 4,2 до 120 К с точностью поддержания температуры  $\pm 1$  К и ресурсом от 100 до 10000 ч. (и выше). Представлен сравнительный анализ технических характеристик, термодинамической эффективности и ресурса МКГ с рабочими циклами: пульсационной трубы, обратным циклом Стирлинга, циклов Гиффорда-МакМагона, Сольвея, Вюлемье и их модификациями. Дана оценка основным показателям надежности МКГ в эксплуатационной и конструкторской практиках, которые применяются для сравнения устройств с подобными техническими и термодинамическими характеристиками различных производителей. Проведен обзор существующих методик прогнозирования и расчета надежности МКГ компаний: Thales Cryogenics (Нидерланды), ВАЕ Systems (США), RICOR (Израиль), Калифорнийский университет (США). Рассмотрены различные условия стандартных, ускоренных испытаний, проводимые производителем.

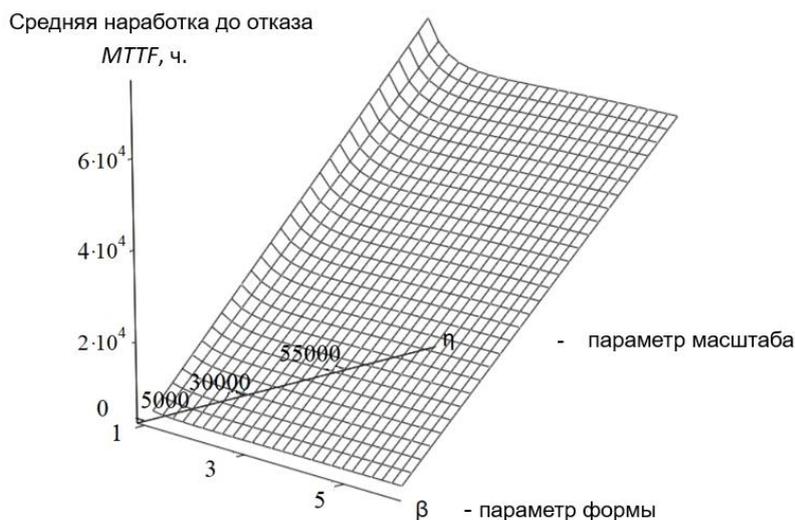
В результате проведенного исследования сформулированы цели и задачи работы.

**Во второй главе** представлена методика прогнозирования надежности на стадии проектирования МКГ. В основу методики прогнозирования ресурса положен закон распределения Вейбулла. Функция плотности вероятности для распределения Вейбулла  $f(t)$ , применительно к МКГ, иллюстрирует количество отказавших устройств в единицу времени, отнесенное к общему числу испытываемых образцов. Функция имеет два положительных параметра: параметр формы  $\beta$ ; параметр масштаба  $\eta$ .

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (1)$$

Предложено проанализировать узлы и детали различных кинематических схем приводных механизмов МКГ с целью определения параметра формы  $\beta$  и масштаба  $\eta$  как отдельных узлов и деталей, так сборки в целом. Данный подход позволяет в процессе конструирования (модернизации) МКГ под конкретное применение выявлять узлы и детали менее надежные и заменять на компоненты с большим ресурсом или оптимизировать их до требуемой надежности. В

результате исследования была построена трехмерная номограмма (Рисунок 1) для определения комбинации значений параметра  $\beta$  и  $\eta$  под конкретные, задаваемые заказчиком значения средней наработки до отказа (МТТФ) с учетом области применения.



С помощью построенной номограммы возможно решать и обратную задачу - нахождение величины МТТФ в результате анализа опытных данных испытаний и последующего расчета параметров  $\beta$  и  $\eta$ .

С помощью построенной номограммы возможно решать и обратную задачу - нахождение величины МТТФ в результате анализа опытных данных испытаний и последующего расчета параметров  $\beta$  и  $\eta$ .

Рисунок 1. Трехмерная номограмма средней наработки до отказа МКГ в зависимости от параметра формы  $\beta$  и масштаба  $\eta$  закона распределения Вейбулла

Обобщив иностранный опыт приняты экстремальные значения параметров формы  $1 \leq \beta < 6$  и масштаба  $0 < \eta < 70000$  закона распределения Вейбулла для деталей, узлов и сборки МКГ.

В результате проведенного анализа достоинств и недостатков принципиальных схем МКГ, работающих по обратному циклу Стирлинга, пульсационной трубы, циклов Гиффорда-МакМагона, Сольвея, Вюлемье и их модификаций, была систематизирована информация по регенеративным циклам и способам их реализации в конструктивных элементах. С целью оперативного определения термодинамического цикла и принципиальной схемы проектируемого МКГ под заданные технические требования и условия эксплуатации представлена круговая диаграмма на Рисунке 2.

Для дальнейшего проектирования основных узлов МКГ под заданные параметры предложен метод подбора рабочих параметров МКГ с позиции максимизации ресурсных характеристик на стадии проектирования. На примере роторной МКГ типа Стирлинг были получены расчетные (индикаторные) диаграммы циклов компрессорной и детандерной полостей в координатах P-V (давление-объем) и проанализированы термодинамические характеристики устройства в зависимости от угла между осями движения компрессорного и детандерного поршней (угла фазового сдвига  $\phi$ ), изображенные на Рисунке 3. При увеличении угла фазового сдвига наблюдаются «округление» и увеличение площади индикаторных диаграмм компрессорной и детандерной полостей МКГ, повышение холодопроизводительности цикла  $Q_x$ , увеличение потребляемой мощности  $N_{пр}$ . При увеличении значения угла фазового сдвига от  $20^\circ$  до  $150^\circ$  степень термодинамической эффективности МКГ возрастает на 1,3 %. С увеличением угла фазового сдвига теоретическая холодопроизводительность и



схемы расширительного и компрессорного узлов на стадии проектирования МКГ типа Стирлинг под заданный ресурс и условия эксплуатации (Таблица 1). Это позволяет сделать качественную оценку будущего ресурса выбранной компоновочной схемы проектируемого МКГ и сопоставить со значением заданными по техническому заданию.

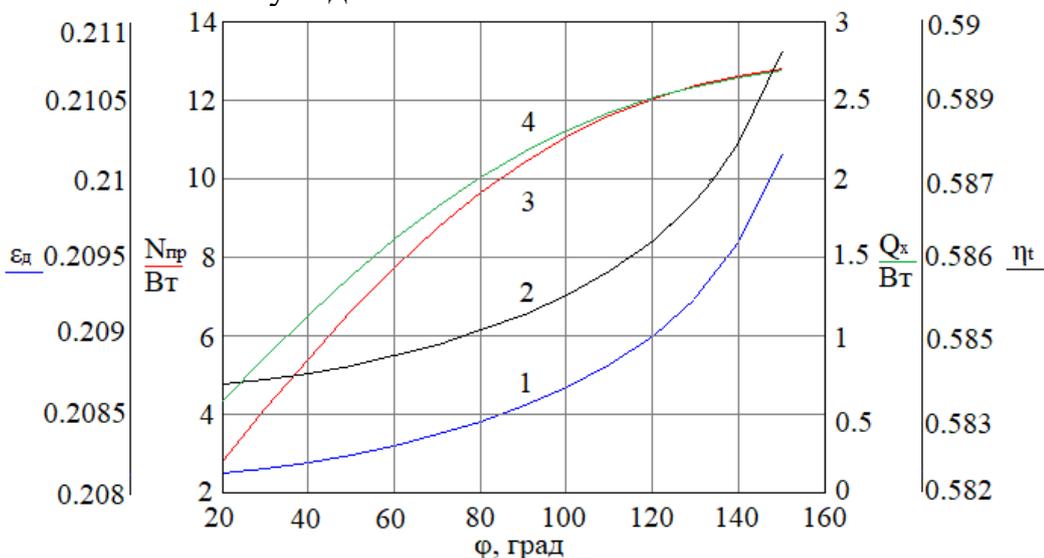


Рисунок 3. Зависимости 1 – холодильного коэффициента  $\varepsilon_d$ , 2 – степени термодинамического совершенства  $\eta_t$ , 3 – потребляемой мощности  $N_{np}$ , 4 – холодопроизводительности  $Q_x$  роторного МКГ типа Стирлинг от угла фазового сдвига  $\varphi$  при давлении заправки 3,2 МПа и частоте вращения ротора 1600 об/мин)

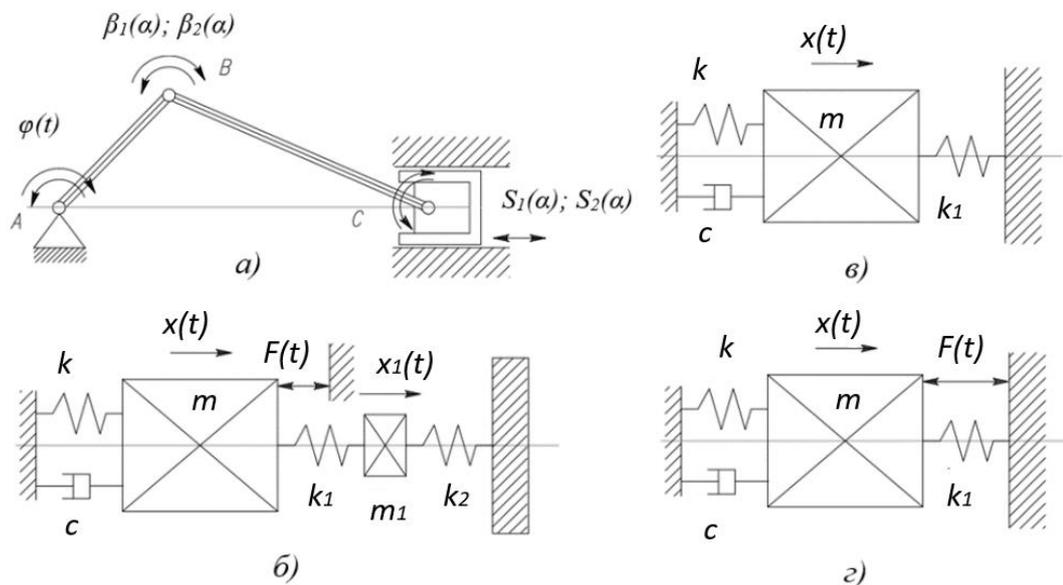


Рисунок 4. Кинематические схемы компрессорного и расширительного узлов МКГ типа Стирлинг: а – кривошипно-шатунный механизм; б – возвратно-поступательный механизм движения поршня / вытеснителя с балансиrom для снижения вибраций узла; в – возвратно-поступательный механизм пассивного вытеснителя; г – возвратно-поступательный механизм движения поршня компрессора или активного вытеснителя

Для расчета показателя надежности новой или совершенствуемой модели МКГ под заданные технические требования и условия эксплуатации предложено использовать метод многофакторного анализа. На Рисунке 5 представлена структура многофакторного анализа и его место в предложенной методике оценки и расчета итогового показателя надежности. Целью МФА является построения прогнозной зависимости итогового показателя надежности МКГ от влияющих независимых факторов. Выбранный итоговый показатель надежности (МТТФ) будет являться функцией ключевых факторов. При предъявлении к МКГ повышенных требований к надежности совместно с временным показателем надежности МТТФ предлагаем применять вероятность отказа  $R(t)$  или вероятность безотказной работы  $P(t)$  в пределах заданной наработки МКГ.

Таблица 1. Общая вероятность отказа  $R_I(t)$  компоновочных схем МКГ типа Стирлинг при  $t$  в диапазоне от 0 до 10000 ч ( $t$  – наработка МКГ)

| Тип расширительного узла / Тип компрессорного узла     | Пульсац. труба, $R(t)$ № компоновочной схемы, МТТФ | Пассивный Вытеснитель $R(t)$ №, МТТФ      | Активный Вытеснитель $R(t)$ №, МТТФ      | Активный вытеснитель с балансиром $R(t)$ №, МТТФ | Вытеснитель с роторным приводом $R(t)$ №, МТТФ |
|--|--|---|--|--|--|
| Линейный привод с 1 компрессорным поршнем              | $R_I(t)=6,6\%$ ;<br>$MTTF=33920$ ч.                | $R_{II}(t)=12,6\%$ ;<br>$MTTF=24150$ ч.   | $R_{III}(t)=11,6\%$ ;<br>$MTTF=25240$ ч. | $R_{IV}(t)=11,3\%$ ;<br>$MTTF=25590$ ч.          | –  |
| Линейный привод с 1 компрессорным поршнем и балансиром | $R_V(t)=6,3\%$ ;<br>$MTTF=34740$ ч.                | $R_{VI}(t)=12,3\%$ ;<br>$MTTF=24460$ ч.   | $R_{VII}(t)=11,3\%$ ;<br>$MTTF=25590$ ч. | $R_{VIII}(t)=11,0\%$ ;<br>$MTTF=25960$ ч.        | –  |
| Линейный привод с 2 оппозитными поршнями               | $R_{IX}(t)=9,5\%$ ;<br>$MTTF=28050$ ч.             | $R_X(t)=15,5\%$ ;<br>$MTTF=21590$ ч.      | $R_{XI}(t)=14,5\%$ ;<br>$MTTF=22390$ ч.  | $R_{XII}(t)=15,2\%$ ;<br>$MTTF=21830$ ч.         | –  |
| Роторный привод с 1 компрессором                       | –  | $R_{XIII}(t)=23,2\%$ ;<br>$MTTF=17250$ ч. | –  | –  | $R_{XIV}(t)=28,2\%$ ;<br>$MTTF=15400$ ч.       |

В результате анализа наиболее часто встречающихся причин отказа МКГ в работе предложены способы повышения надежности: конструкторско-механический, термодинамический, технологический, совершенствования режимов (условий) эксплуатации.

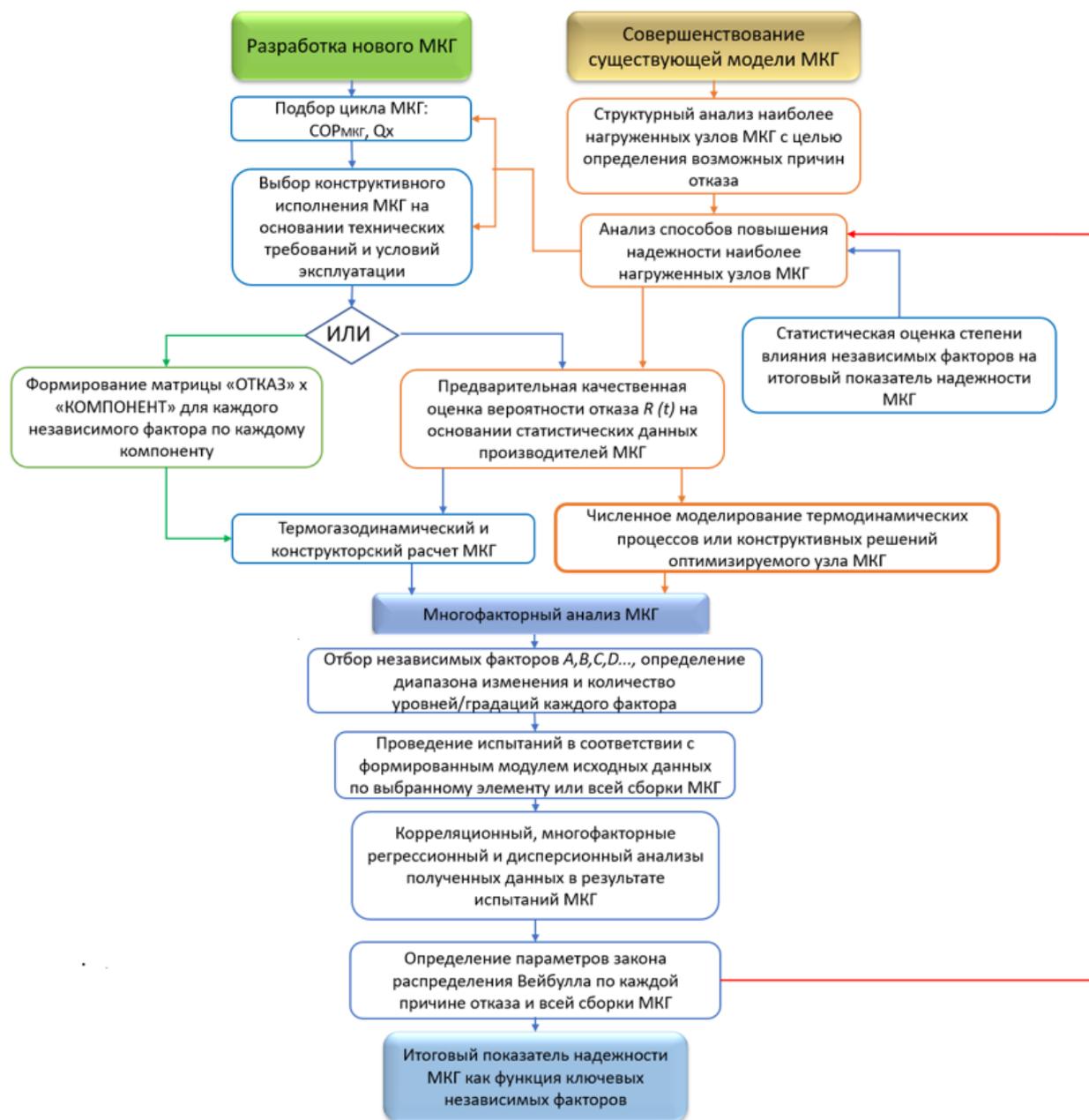


Рисунок 5. Блок-схема методики оценки и расчета ресурса (итогового показателя надежности) МКГ

**В третьей главе** представлено применение методики оценки и расчета показателя надежности для совершенствования наиболее нагруженного узла роторного МКГ типа Стирлинг. Для увеличения ресурса МКГ в компрессорной паре необходимо обеспечить газостатический подвес поршня компрессора за счет газовой смазки пары. Для обеспечения работы газостатического подвеса в рамках исследования поставлены и решены две задачи: определение оптимальной величины зазора компрессорной пары при сохранении ламинарного режима течения в канале; минимизация энергетических потерь вследствие перетечки рабочего вещества из компрессорной полости. Таким образом, определена взаимосвязь между перетечками рабочего вещества из компрессорной полости в картер и холодильным коэффициентом для величины

зазора от 2 до 12 мкм при давлении заправки от 2,5 до 4,0 МПа и скорости вращения ротора от 1600 до 3000 об/мин при условии, что газовая опора поршня остается стабильной. Распределение давления газа в газостатическом слое и его несущая способность рассчитывается с помощью уравнения Рейнольдса - совместное решение уравнения динамики вязких ламинарных потоков сжимаемого газа (уравнения Навье–Стокса) и уравнения неразрывности. Учитывая неподвижность стенки цилиндра и допущения о изотермическом течении газа ввиду хорошей теплоотдачи, данная зависимость принимает вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( p \delta^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( p \delta^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \frac{\partial(p\delta U)}{\partial x} + 12\mu \frac{\partial(p\delta)}{\partial \tau} \quad (2)$$

В результате принятых допущений, перечисленных в работе, при расчете стационарного режима течения газа в зазоре  $\frac{\partial p}{\partial \tau} = 0$  и  $U = const$  уравнение Рейнольдса принимает следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( p \delta^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( p \delta^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

Для решения поставленных задач была создана расчетная модель перетечки рабочего вещества в зазоре между поршнем и цилиндром полости нагнетания МКГ в системе ANSYS Fluent, подробно представленная в работе. Течение гелия через зазор было рассчитано для всего диапазона параметров и по всей площади расчетной сетки. В процессе численного моделирования процесса перетекания при задании различных комбинаций независимых факторов (давление заправки, частота вращения ротора, толщина зазора) были получены зависимости величины массового расхода перетечек рабочего вещества от давления заправки, изображенные на Рисунке 6.

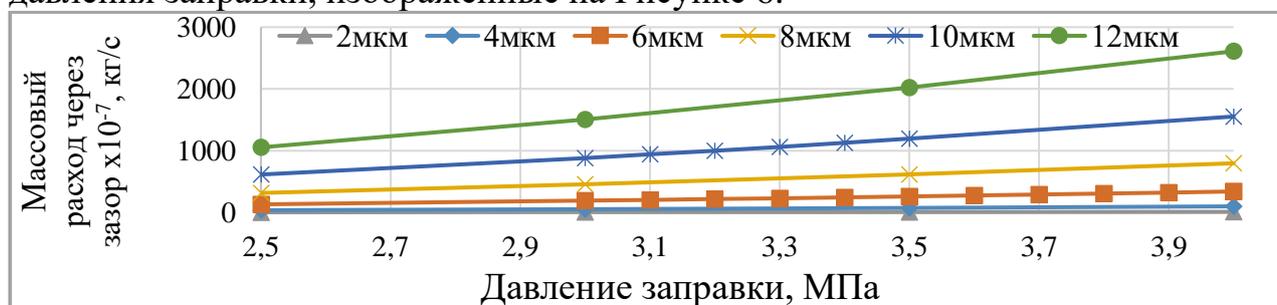


Рисунок 6. Зависимость массового расхода гелия (перетечки) от давления заправки для размера зазора от 2 до 12 мкм при  $n=1600$  об/мин

Существенное влияние давление заправки на число Рейнольдса оказывает при размере зазора более 6 мкм (Рисунок 7).

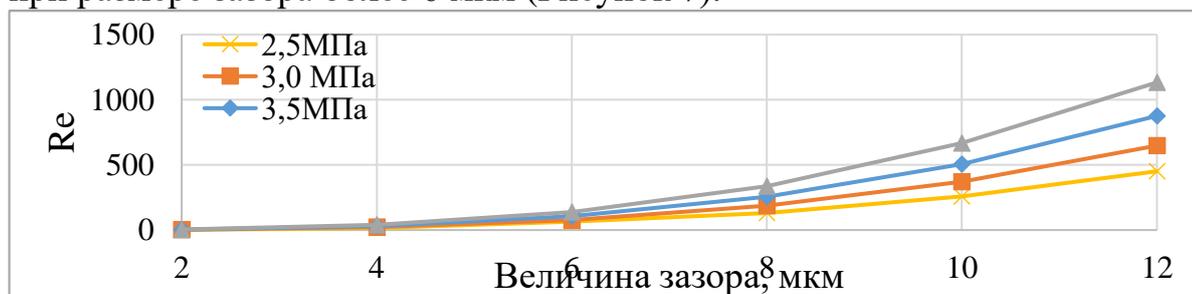


Рисунок 7. Режим течения в канале зазора в зависимости от давления заправки и размера зазора при  $n=1600$  об/мин

Для оценки степени влияния величины перетечек на холодопроизводительность, степень термодинамического совершенства  $\eta_t$  и холодильный коэффициент  $\varepsilon$  проведен расчет для диапазона величины зазора от 1 до 10 мкм для двух давлений заправки 3,0 МПа и 4,0 МПа при одинаковой частоте вращения коленчатого вала 3000 об/мин, представленные на Рисунке 8 и тексте работы. Градиент изменения степени термодинамического совершенства резко снижается с 30,36 % до 4,63 % при увеличении зазора от 6 до 10 мкм при давлении заправки 3,0 МПа, аналогично те же корреляции наблюдаются для давления в 4,0 МПа. Анализ полученных результатов показывает, что оптимальный зазор составляет около 6 мкм.

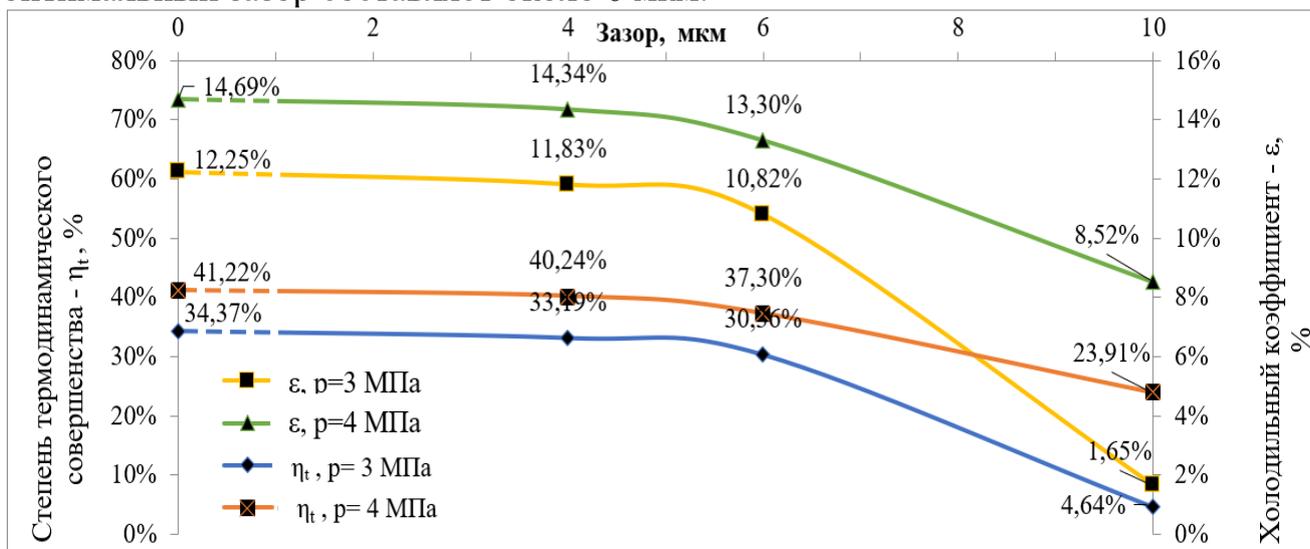


Рисунок 8. Зависимости  $\eta_t$  и  $\varepsilon$  от размера зазора поршневой пары при давлении заправки 3,0 МПа и 4,0 МПа,  $n = 3000$  об/мин

Стенд для верификации модели является прототипом испытательного стенда для контроля диаметра вытеснителя криогенного охладителя, предложенный впервые в работе Самвеловым А.В. [Самвелов А.В., 2016]. Погрешность значений объемного расхода перетечек рабочего газа, полученная в результате эксперимента и численного моделирования, находится в диапазоне от минус 9 % до плюс 20 % (Таблица 2).

Таблица 2. Экспериментальные данные расхода перетечки

| Опытный образец компрессора                          | образец поршня | Образец №1 | Образец №2 | Образец №3 | Образец №4 | Образец №5 |
|--|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Объемный расход, $G \times 10^6$ , м <sup>3</sup> /с |                | 3,762      | 4,216      | 3,215      | 4,051      | 3,411      |
| Отличие от численных данных, %                       |                | +6,9       | +19,8      | - 8,7      | +15,1      | - 3,1      |

В главе определены степень воздействия независимых факторов на совершенствуемую модель нагруженного узла роторного МКГ типа Стирлинг и определено наиболее оптимальное покрытие поршня полости нагнетания. На поршни пары трения наносились износостойкие ионно-плазменные покрытия слоем от 2 до 3 мкм: TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Лейкосапфир), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Аморфная структура), AlTiN/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Металлокерамика). Основа поршня и цилиндра компрессорной полости МКГ - сталь 50ХМФ. Для оценки степени значимости независимых факторов на ресурс МКГ для каждого вида покрытия были выбраны следующие факторы: температура окружающей среды (минус 60 °С, плюс 20 °С и плюс 60

°С); давление заправки (3,0 МПа, 3,5МПа и 4,0МПа); частота вращения ротора (1600 об/мин и 3000 об/мин). Данные факторы имитируют работу устройства в экстремальных условиях эксплуатации. В результате испытаний наилучшие характеристики по износостойкости покрытия поршня полости сжатия при различных условиях эксплуатации показал TiN. Выполнен корреляционный анализ и установлена связь между опытными данными по наработке поршневой пары и независимыми факторами (давлением заправки, температурой окружающей среды, частотой вращения ротора). Коэффициенты корреляции Пирсона для каждого вышеперечисленного фактора отличны от нуля, что свидетельствует о наличии связи между независимыми переменными и наработкой. На основе статистических данных по испытаниям предложена модель линейной функции регрессии, которая описывает зависимость условного среднего значения зависимой переменной МТТФ от заданных независимых переменных:

$$MTTF = f(P_{зап}; T_{о.с.}; n) + \varepsilon(P_{зап}; T_{о.с.}; n) \quad (4)$$

где  $P_{зап}$  - давление заправки;  $T_{о.с.}$  - температура окружающей среды;  $n$  - частота вращения ротора;  $f(P_{зап}; T_{о.с.}; n)$  - линейная функция регрессии, у которой каждая независимая переменная связана с коэффициентом регрессии  $\beta$ :  $\varepsilon(P_{зап}; T_{о.с.}; n)$  - случайная ошибка, порожденная действием случайных факторов, не включенных в исследуемые независимые параметры.

Допущение:  $\varepsilon(P_{зап}; T_{о.с.}; n) = 0$  - отсутствует систематическая погрешность математической модели регрессии.

$$MTTF(P_{зап}; T_{о.с.}; n) = \beta_0 + \beta_1 \cdot P_{зап} + \beta_2 \cdot T_{о.с.} + \beta_3 \cdot n \quad (5)$$

где  $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_3$  - коэффициенты регрессии.

$$MTTF = 466,888 + 0,644 \cdot T_{о.с.} - 58,833 \cdot P_{зап} - 0,039 \cdot n \quad (6)$$

Математическая модель линейной многофакторной регрессии - аппроксимирующая функция средней наработки до отказа опытных данных с погрешностью 63,3 %. Построены прогностические поверхности наработки до отказа для частоты вращения ротора МКГ 1600 об/мин и 3000 об/мин при сочетании двух независимых параметров: температуры окружающей среды и давлении заправки (Рисунок 9).

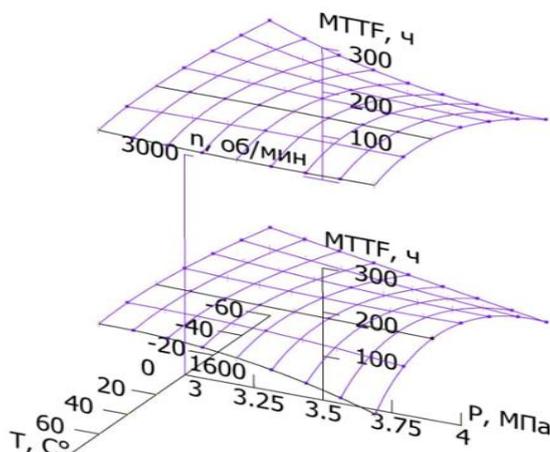


Рисунок 9. Трехмерные поверхности значений ресурса  $Q_x=0,5$  Вт ( $T_x=77$  К), частоте вращения ротора 1600 об/мин и 3000 об/мин

В результате совершенствования нагруженного узла поршневой пары полости нагнетания МКГ значения параметра формы и масштаба закона распределения Вейбулла составили:  $\beta=3,38$  – параметр формы;  $\eta=2148,5$  – параметр масштаба. МТТФ=1930 ч. – средняя наработка на отказ компрессорной пары после доработки при частоте вращения ротора 1600 об/мин в стационарном режиме. Установлено, что не верно рассматривать параметр формы  $\beta$  в отдельности от параметра масштаба  $\eta$ , поскольку при увеличении количественных значений параметра масштаба растет и ресурс разрабатываемого или совершенствуемого устройства. И даже при невысоких значениях параметра формы  $\beta$  равным 2, ресурс устройства может быть увеличен при увеличении параметра масштаба  $\eta$ . На Рисунке 10 изображены трехмерные номограммы ресурса в зависимости от вероятности отказа  $R(t)$ , параметра формы  $\beta$  и параметра масштаба  $\eta$ . С помощью представленных номограмм возможно определить теоретические значения параметров формы  $\beta$  и масштаба  $\eta$ , к которым необходимо стремиться в процессе доработки МКГ. Применение номограмм позволяет определить сочетания параметров ( $\beta$ ;  $\eta$ ) для повышения надежности узла или снижения вероятности влияния процесса (например, разгерметизации или перетечки) на усовершенствованный узел МКГ.

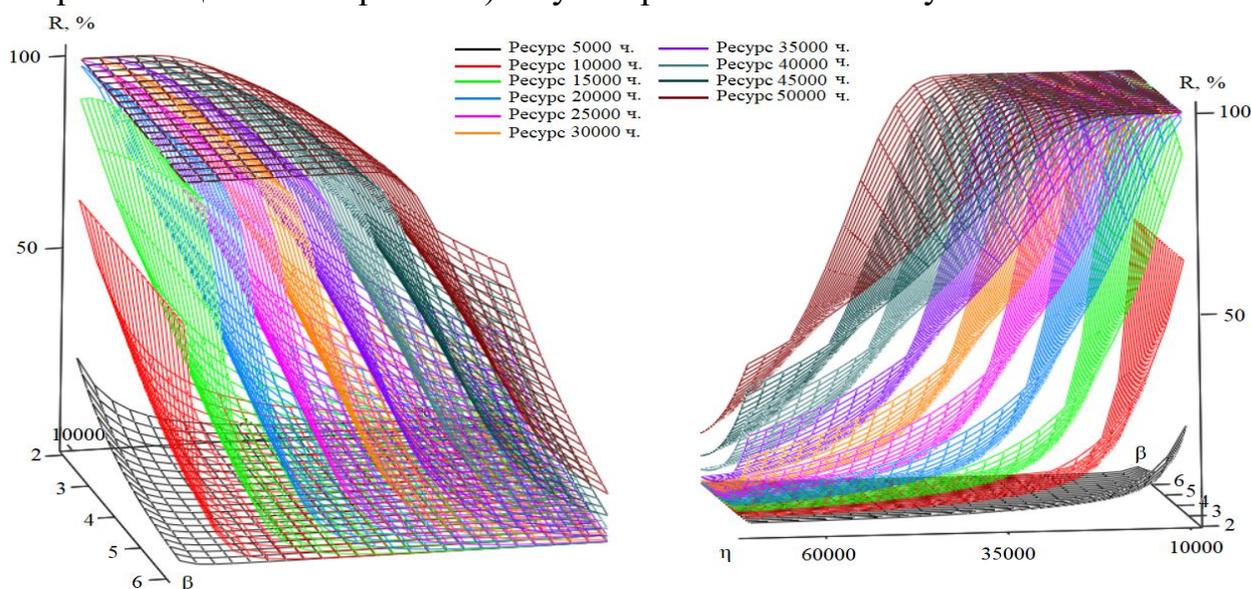


Рисунок 10. Трехмерная номограмма ресурса МКГ

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате диссертационных исследований:

1. Разработана круговая диаграмма, которая позволяет быстро выбрать наиболее подходящий термодинамический цикл и принципиальную схему на этапе проектирования МКГ.
2. Разработана методика оценки и расчета ресурса МКГ на основе закона распределения Вейбулла с оценкой влияния различных независимых факторов методом многофакторного анализа. Данная методика заключается в комплексном подходе к проектированию МКГ под заданные технические параметры и условия эксплуатации.

В рамках данной методики:

- 2.1. Предложен и апробирован метод подбора рабочих циклов будущего МКГ под заданные параметры с позиции максимизации ресурсных характеристик. Из анализа термодинамических характеристик проектируемого роторного МКГ типа Стирлинг ( $Q_x=0,5$  Вт и температуре криостатирования 77 К) от угла фазового сдвига  $\varphi$  установлено, что при увеличении значения угла фазового сдвига от  $20^\circ$  до  $150^\circ$  степень термодинамической совершенства МКГ возрастает на 1,3 %, а теоретическая холодопроизводительность  $Q_x$  и потребляемая мощность увеличиваются более, чем в 4 раза.
- 2.2. Предложен метод качественной оценки вероятности отказа типовых кинематических схем компрессорного/расширительного узлов и компоновочных схем МКГ типа Стирлинг на стадии проектирования. В рамках данного метода определены причины отказа различных кинематических схем и рассчитана вероятность отказа по каждому механизму отказа.
- 2.3. Представлены способы повышения надежности: конструкторско-механический, термодинамический, технологический и совершенствование режимов (условий) эксплуатации. Перечисленные способы являются основой для проработки конструкции с позиции максимизации термодинамических и ресурсных характеристик.
3. В результате численного моделирования течения рабочего вещества через зазор поршневой пары полости нагнетания определена зависимость величины перетечки и числа Рейнольдса в канале зазора при различных комбинациях давления заправки (от 3,0 до 4,0 МПа) и скорости вращения ротора (от 1600 до 3000 об/мин). Решена задача оптимизации зазора за счет минимизации перетечек при сохранении несущей способности газостатического слоя и энергоэффективности МКГ. Установлен оптимальный размер зазора - 6 мкм для диапазона рассматриваемых параметров и условий эксплуатации.
4. На основании анализа опытных данных по испытаниям поршневой пары с зазором в 6 мкм в соответствии с разработанной методикой оценки и расчета ресурса МКГ определены степень влияния независимых факторов (частоты вращения ротора, давления заправки, температуры окружающей среды, покрытия поршня) на наработку данного узла. В ходе испытаний было определено наиболее износостойкое покрытие – нитрид титана TiN. Установлено существенное влияние температуры окружающей среды, частоты вращения ротора и давления заправки на наработку поршневой пары МКГ. С помощью многофакторного регрессионного анализа была определена аналитическая зависимость между вышеперечисленными факторами и наработкой на отказ, а также количественно определено влияние каждого фактора на ресурс совершенствуемого узла МКГ.
5. С помощью аппроксимации и интерполяции опытных данных по наработке

исследуемой поршневой пары полости нагнетания МКГ были построены прогнозные поверхности для определения ресурса при любых сочетаниях независимых факторов (температура окружающей среды от минус 60 °С до плюс 60 °С; давление заправки от 3,0 до 4,0 МПа) в заданных пределах для частоты вращения ротора 1600 об/мин и 3000 об/мин.

6. Соблюдение технологии изготовления и контроля допусков размеров, формы и расположения поршня и цилиндра позволило повысить среднюю наработку до отказа (МТТФ) данного узла практически в 8 раз (с 250 ч. до 1930 ч.).
7. Определены параметры формы  $\beta=3,38$  и масштаба  $\eta=2148,5$  закона распределения Вейбулла совершенствуемого узла исследуемого роторного МКГ при следующих условиях испытаний: давление заправки 3,0 МПа, частота вращения ротора 1600 об/мин, нормальные условия эксплуатации. Рассчитана средняя наработка до отказа поршневой пары МТТФ=1930 ч с вероятностью 99,8 % при доверительном интервале в 95 %.
8. Представлены пошаговые рекомендации по совершенствованию новых и существующих моделей МКГ.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. I.A. Arkharov, E.S. Navasardyan, N.E. Shishova. Prediction of MTTF of Rotary Microcryogenic Gas Machines (Microcryocoolers) based on the Weibull Distribution Law // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series mechanical engineering, 2020, #5(134)2020, P.96-105. (0,7 п.л./0,4 п.л.)

2. I.A. Arkharov, E.S. Navasardyan, N.E. Shishova. Multivariate analysis of variance in the reliability estimation of microcoolers // Chemical and petroleum engineering. Vol. 56(7-8). USA.2020. P. 638–645 (1,0 п.л./0,6 п.л.)

3. Numerical estimation of piston's overleaks impact on microcryocooler efficiency / N.E. Shishova [et al.]. Proceeding of the 16th Cryogenics 2021, October 5-7, 2021. IIR International Conference. Refrigeration Science and Technology. Praha. 2021. P.81-90. (1,1 п.л./0,7 п.л.)

4. Analysis of operating cycles of microcryogenic gas machines with respect of lifetime maximization / N. E. Shishova [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 58, Nos. 11-12, 2023, P.925-935. (1,2 п.л./0,7 п.л.)

DOI 10.1007/s10556-023-01184-7

5. Analytical review of studies on assessing the layout impact and kinematic design of microcryocooler on its lifetime and MTTF / N.E. Shishova [et al.]. The 17th Cryogenics 2023, IIR Conference. Dresden, Germany. 2023. P.91-97 (1,2 п.л./0,8 п.л.)  
URL.[https://www.cryogenics-conference.eu/gallery/7201/cryogenics2023\\_conference\\_proceedings.pdf](https://www.cryogenics-conference.eu/gallery/7201/cryogenics2023_conference_proceedings.pdf)