

**Навасардян Екатерина Сергеевна**

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОЧИХ  
ПРОЦЕССОВ В МИКРОКРИОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ МАШИНАХ И  
СОЗДАНИЕ ВЫСОКОРЕСУРСНОГО КРИОГЕНЕРАТОРА ДЛЯ  
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и  
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**доктора технических наук**

Москва, 2018

Работа выполнена на кафедре «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

**Научный консультант:** Архаров Иван Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты:

**Борзенко Евгений Иванович** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Криогенная техника» Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

**Довгялло Александр Иванович** доктор технических наук, профессор, ФГАОУ высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева», профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели».

**Карагусов Владимир Иванович** доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ), профессор кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология».

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Орион» (АО «НПО «Орион»), Россия, г. Москва, ул. Косинская, д.9

Защита диссертации состоится **10.10.2018** на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, 5, стр.1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте университета [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим присылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, стр.1 ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н., доцент

Колосов М.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** До 1991 года Россия входила в пятерку стран мира, где было освоено серийное производство криогенных газовых машин Стирлинга (КГМ). С 1959 по 1991 гг. в СССР вопросами создания подобных машин занимались свыше 15 предприятий и научных организаций. Работы проводились в основном в рамках оборонных заказов от соответствующих ведомств и организаций и КГМ Стирлинга рассматривались в качестве автономного источника холода для различных изделий военного и двойного назначения. По этой причине достигнутые научные и практические результаты не имели широкого освещения в открытых источниках информации. В разные годы производителями холодильного оборудования с КГМ Стирлинга являлись ОАО «МЗ «Арсенал», НПО «Гелиймаш», ОАО «Сибкриотехника», ГУП «НПО «Орион» и др. На этих предприятиях было организовано не только производство непосредственно КГМ Стирлинга (машины с поршневыми уплотнениями без смазки, ромбическим приводом КГМ 1500/80 и КГМ 900/80 и др.), но и воздухоразделительных установок «ЗИФ-700», «ЗИФ-1002» и «ЗИФ-2002» на их основе. В СССР были созданы КГМ Стирлинга холодопроизводительностью от 0,2...1500 Вт на температурном уровне 80К.

Научные и исследовательские работы, опытно-конструкторские разработки, в том числе и микромашин КГМ Стирлинга ( $< 3$  Вт) проводились в МВТУ им. Баумана, ВНИИГТ, ОмПИ, в Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского и в ряде других технических институтах и университетах. Однако, в 1990-1995 гг. серийное производство криогенного оборудования данного типа в России было полностью прекращено, а исследования приостановлены. Тем не менее, развитие систем спутниковой навигации, связи, телеметрических и фотонных регистраторов для определенных приложений предполагает использование охлаждаемых чувствительных элементов, позволяющих повысить разрешающую способность и снизить время отклика. Для охлаждения подобных элементов серьезной альтернативы автономным микрокриогенным газовым машинам Стирлинга (МКГМ) по надежности, ресурсу, виброзащищенности и многим другим параметрам пока не существует. Современные спутниковые системы навигации и связи нуждаются в ресурсных (более 20000 часов) МКГМ (до 0,6 Вт) на температурном уровне 80 К.

В настоящее время основными производителями МКГМ различных модификаций на базе обратного цикла Стирлинга являются зарубежные компании: «Ricor», «LG Electronic Inc», «Stirling Technology Company», «Sunpower Inc.» и др., продукция которых ограничена в распространении и продажах во многих странах, в том числе и России.

При создании высокоэффективных машин Стирлинга с длительным ресурсом работы, применяемых в системах навигации, продолжают оставаться первостепенными вопросы расчета и проектирования, комплексного анализа специфики конструктивного исполнения для конкретных приложений, подбора материалов, состава рабочего вещества и оценка влияния целого комплекса внешних факторов и особенностей технологии производства на ресурс и КПД. Мировой опыт создания высокоэффективных МКГМ Стирлинга показывает, что без комплексного математического анализа и моделирования рабочих процессов оптимизация конструкционного исполнения МКГМ фактически невозможна. Задача

импортозамещения таких систем является стратегически актуальной, ее решение позволит обеспечить независимость отечественных систем связи от зарубежных комплектующих и геополитической обстановки.

**Цель работы:** Совершенствование рабочих процессов в микрокриогенных газовых машинах (МКГМ) на основе многофакторного термо-газодинамического анализа и создание высоко ресурсного криогенератора систем наблюдения, навигации и связи.

**Задачи исследования:**

1. Анализ видов и структуры энергетических потерь в современных типах микрокриогенных газовых машин.
2. Разработка аналитической концепции оценки энергетических потерь, ориентированной на снижение затрат энергии в составных узлах МКГМ.
3. Разработка комплексного метода моделирования рабочих процессов в МКГМ, с учетом особенностей конструктивного исполнения составных узлов МКГМ.
4. Численные исследования зависимости основных энергетических показателей (холодильного коэффициента, степени термодинамического совершенства, потребляемой мощности, холодопроизводительности) от конструктивного исполнения составных узлов, частоты вращения, давления заправки и температуры окружающей среды.
5. Разработка и создание действующего образца высокоресурсной МКГМ на основе селективного процесса сборки составных элементов и узлов для отработки методики прогнозирования ресурса.
6. Разработка многофакторного термо-газодинамического метода анализа рабочих процессов в элементах МКГМ, позволяющего на основе вероятностного анализа произвести оценку ресурса вновь разрабатываемой МКГМ на стадии проектирования.
7. Испытания созданного образца МКГМ в диапазоне давлений заправки от 2,5МПа до 3,2 МПа и частоты вращения от 20Гц до 50 Гц.
8. Экспериментальное исследование гидродинамики в пористых структурах регенератора МКГМ и определение корреляции для определения фактора трения.
9. Разработка рекомендаций для создания и совершенствования МКГМ, предназначенных для охлаждения датчиков фотоприемных устройств систем навигации и связи с тепловыделениями на уровне 0,15-0,25 Вт.

Работа выполнялась в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» при сотрудничестве с ОАО «Московский завод «Сапфир» в рамках Федеральной комплексной – целевой программы развития систем тепловидения и приборов ночного видения – 2000 - 2007 г.

**Методы исследования.** В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические и модельные исследования проведены на кафедре «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Экспериментальные исследования проведены на базе ОАО «Московский завод «Сапфир» г. Москва. Обработка экспериментальных данных проводилась прямым и косвенным способами анализа с применением методов математической статистики,

дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов. Достоверность полученных результатов определяется применением: апробированных методик и методов измерения, сертифицированного современного измерительного оборудования, многократной проверкой повторяемости экспериментальных данных, сходимостью результатов исследований с данными зарубежных и отечественных авторов.

#### **Научная новизна:**

1. Сформулирована концепция комплексного моделирования процессов в МКГМ с учетом особенностей конструктивного исполнения составных узлов.
2. Впервые разработан метод структурирования, описания и аналитического определения суммарных энергетических потерь в узлах МКГМ, позволяющий оценить связь конструктивного исполнения узлов МКГМ и значения энергетических потерь в этих узлах.
3. Разработан многофакторный метод анализа рабочих процессов в узлах МКГМ для оценки ресурса на стадии проектирования.
4. Разработана концепция формирования пористой структуры регенератора МКГМ на основе теории периодических минимальных поверхностей, обеспечивающая оптимальные теплообменные и гидродинамические характеристики. Получены новые регулярные структуры с пористостью от 0,2 до 0,9.
5. Экспериментально установлено, что в пористой структуре регенератора МКГМ фактор трения может быть описан корреляцией Эргуна с относительной погрешностью не более 15%.
6. Получены новые экспериментальные результаты о влиянии давления заправки, рабочей частоты, пористости регенератора на время наработки на отказ для МКГМ.

#### **Практическая значимость и реализация результатов работы:**

1. Создан экспериментальный образец МКГМ, реализующей обратный цикл Стирлинга и позволяющий проводить натурные ресурсные испытания с различными сборными конструкциями холодного блока в диапазоне давлений заправки от 2,5 до 3,6 МПа, температур окружающей среды от -400С до +800С и полной холодопроизводительности до 0,6 Вт при температурах 75...80 К.
2. Определены основные направления и разработаны рекомендации для создания и совершенствования МКГМ, предназначенных для охлаждения датчиков фотоприемных устройств с тепловыделениями на уровне 0,15...0,25Вт.
3. Разработана методика анализа рабочих процессов в узлах МКГМ для оценки ресурса на стадии проектирования.
4. Предложен новый подход к формированию пористых насадок регенераторов с заданными характеристиками (пористостью и проницаемостью) на основе современных технологий порошковой трехмерной печати. Изготовлены образцы новых перспективных пористых структур для регенераторов МКГМ.
5. Результаты работы внедрены на предприятиях НПО Орион и ОАО «Московский завод «Сапфир» г. Москва при разработке и мелко серийном производстве модельного ряда МКГМ для охлаждения и термостатирования датчиков фотоприемных устройств, а также в учебном процессе кафедры «Холодильной и

криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» Московского Государственного Технического Университета им. Н.Э. Баумана.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Концепция комплексного моделирования процессов в МКГМ с учетом особенностей конструктивного исполнения составных узлов.
2. Метод структурирования, описания и аналитического определения суммарных энергетических потерь в узлах МКГМ, позволяющий оценить связь конструктивного исполнения узлов МКГМ и значения энергетических потерь в этих узлах.
3. Многофакторный метод анализа рабочих процессов в узлах МКГМ для оценки ресурса МКГМ на стадии проектирования.
4. Результаты экспериментальных исследований МКГМ в диапазоне давлений заправки от 2,5 до 3,6 МПа, температур окружающей среды от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ , температурой термостатирования на уровне 77К и полной холодопроизводительностью от 0 до 0,6 Вт.
5. Концепция формирования пористой насадки микрокриогенных регенераторов с заданными характеристиками (пористостью и удельной поверхностью) на основе современных технологий порошковой трехмерной печати.

**Личный вклад автора:**

1. Формирование и реализация концепции комплексного моделирования процессов в МКГМ, с учетом особенностей конструктивного исполнения составных элементов МКГМ.
2. Структурирование, описание и аналитическое определение суммарных энергетических потерь в элементах МКГМ с конкретизацией и оценкой связи конструктивного исполнения элемента МКГМ и значения энергетических потерь в этом элементе.
3. Разработка многофакторного метода анализа рабочих процессов в узлах МКГМ.
4. Обоснование выбора оптимальных параметров и конструктивных решений при проектировании основных узлов МКГМ с использованием нового метода анализа.
5. Участие в разработке оборудования стендов для натурных исследований узлов МКГМ, их наладке и тестировании системы измерений.
6. Организация и проведение испытаний, обработка полученных результатов. Сопоставление с результатами аналитических расчетов и моделирования.
7. Участие в разработке и практическом создании МКГМ для охлаждения и термостатирования фотоприемных датчиков тепловизоров, работающей в диапазоне температур окружающей среды от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ , с температурой термостатирования на уровне 80К и полной холодопроизводительностью до 0,6 Вт при температурах 75...80 К.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на заседаниях и научных семинарах кафедры «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения».

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

Научно-практической конференции «Криоген-Экспо 2014» (Москва, 2014); Международной научно-практической конференции «Криоген-Экспо 2015» (Москва, 2015); Международной научно-практической конференции «Криоген-

Экспо 2016» (Москва, 2016); Международной конференции «CRYOGENICS 2017 Conference & Exhibition», проводимой Международным институтом холода в г. Дрезден (Германия); VIII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке». - СПб.: Университет ИТМО - 2017 г.

Основные результаты научных исследований, методологические положения, описание методик моделирования и концепций разработки МКГМ, выполненные в соавторстве или под руководством автора изложены в 14 научных работах, в том числе 9 - в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований, 5 в журналах, индексируемых базой данных «Scopus». Кроме того, по теме диссертации сделано 6 докладов на международных конференциях.

**Благодарности:** Автор глубоко признателен аспирантам, преподавателям, доцентам и профессорам кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» за помощь при проведении исследований, подготовки материалов докладов, подготовке и обсуждении работы, а также коллективу НПО «Орион» за содействие при подготовке материалов диссертации.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, шести глав и общих выводов. Работа содержит 288 страниц, в том числе 254 страницы основного текста, 130 рисунков, 22 таблицы и 226 наименований литературных источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В введении** определена область исследования, обоснована актуальность темы диссертации и обозначена цель настоящей работы.

**В главе 1** проведен обзор и анализ современных систем криостатирования, применяемых для систем спутникового наблюдения, связи и навигации. Рассмотрены типы криостатирующих устройств для ИК детекторов их преимущества и недостатки (баллонные системы, системы на термоэлементах и микрокриогенные газовые машины). Приведено сопоставление отечественных и зарубежных систем криостатирования фотоприемных устройств по основным техническим параметрам. В главе 1 также сформулированы технические требования к МКГМ для криостатирования фотоприемных устройств и выполнена сравнительная оценка термодинамического КПД МКГМ ведущих отечественных ОАО «Московский завод «Сапфир», НПО «Орион» (г. Москва); ОАО «Сибкриотехника» (г. Омск) и зарубежных производителей Ricor (Израиль), Letehnika (Словения), CryoTel Sunpower Inc., Thales Cryogenics и BAE Systems с рефрижераторами других типов. Рассмотрены различные варианты конструктивного исполнения современных МКГМ, реализующих обратный цикл Стирлинга и определены направления повышения эффективности и ресурса МКГМ.

**В главе 2** представлен анализ аналитических методик расчета, моделирования, оптимизации процессов и аппаратов МКГМ, оценки надежности и ресурса на стадии проектирования. Рассматриваются современные подходы к моделированию процессов в аппаратах МКГМ (работы авторов R. Ross, R. Radebaugh, J. Gary, X. Chen, D. Gedeon) на основе CFD анализа, определены границы их применимости.

Анализируются одномерный, двумерный и трехмерный методы анализа, приводятся рекомендации к применению математических моделей на разных стадиях анализа, в зависимости от глубины проработки схемы МКГМ. В главе приведена обзорная таблица с аналитическими выражениями, применяемыми при расчете регенераторов МКГМ, отражающая хронологию развития методик моделирования, а также описание особенностей различных программных комплексов, включая «SAGE» и «REGEN» ведущих производителей МКГМ. Отдельным разделом главы является раздел, посвященный поиску показателей надежности МКГМ, применительно к системам криостатирования спутниковых систем, рассматриваются методы оценки надежности, применяемые ведущими мировыми производителями МКГМ: BAE Systems, Ricor Ltd. и Thales Cryogenics. Формулируются цель и задачи работы.

В главе 3 представлено описание разработанного многофакторного анализа эффективности МКГМ (МФТГА). Приведены назначение, структура и основные критерии анализа (Рисунок 1). В качестве основного комплексного критерия эффективности МКГМ, предназначенных для криостатирования ИК датчиков спутниковых систем обосновано применение времени безотказной работы при заданных температуре криостатирования и полной холодопроизводительности (77 К и 0,5 Вт). Сформулированы принцип отбора и перечень независимых и зависимых факторов, влияющих на критерий эффективности (Таблица 1).

$$\boxed{\text{Критерий эффективности МКГМ}} = f \left( \begin{array}{c} \text{Независимый фактор 1} \\ \vdots \\ \text{Независимый фактор } n \end{array} \right) \quad (1)$$

$n$  – общее число независимых (условно независимых факторов);

Целью МФТГА является качественное определение связи комплексного критерия эффективности МКГМ и независимого  $n$ -го фактора на стадии аналитического прогнозирования ресурсных характеристик разрабатываемой МКГМ.

В главе представлен структурный анализ МКГМ, на основе которого выявляются причины отказов в узлах микромашины (Рисунки 2, 3) и сопоставление причин отказов с независимыми факторами на основе вероятностно-статистического метода и многофакторного дисперсионного анализа. Многофакторный дисперсионный анализ позволяет по уровню значимости установить степень влияния каждого из принятых независимых факторов на один заданный зависимый (Рисунок 4). Например, для роторной моноблочной МКГМ, основными узлами, конструкция которых оказывает наибольшее влияние на эффективность (время безотказной работы) являются узлы, перечисленные на Рисунке 5.





Рисунок 1. Концепция построения МФТГ анализа

Таблица 1.

### Факторы МФТГА

Вид фактора	Наименование фактора	Пояснение
Независимые	1. Внешние факторы (параметры окружающей среды)	Температура О.С., °C
		Давление О.С., бар
	2. Структурные факторы	Конструктивное исполнение, вид кинематической схемы, тип привода (линейный; роторный), наличие и вид подшипников в узлах передачи движения от вала к поршневым группам.
		Изменение состава рабочего газа в объеме машины
		Гидравлический диаметр регенератора, м
		Гидравлическое сопротивление регенератора, Па
	3. Технические характеристики	Давление заправки, МПа
Зависимые		Частота вращения ротора, об/мин
	1. Холодильный коэффициент (COP)	---
	2. Потребляемая мощность, Вт	≤ 20 Вт
	3. Холодопроизводительность при температуре криостатирования 77 К, Вт	≤ 0,50 Вт
	4. Температура криостатирования, К	≤ 77 К
	5. Ресурс (время до первого отказа) не менее, час	2000 часов

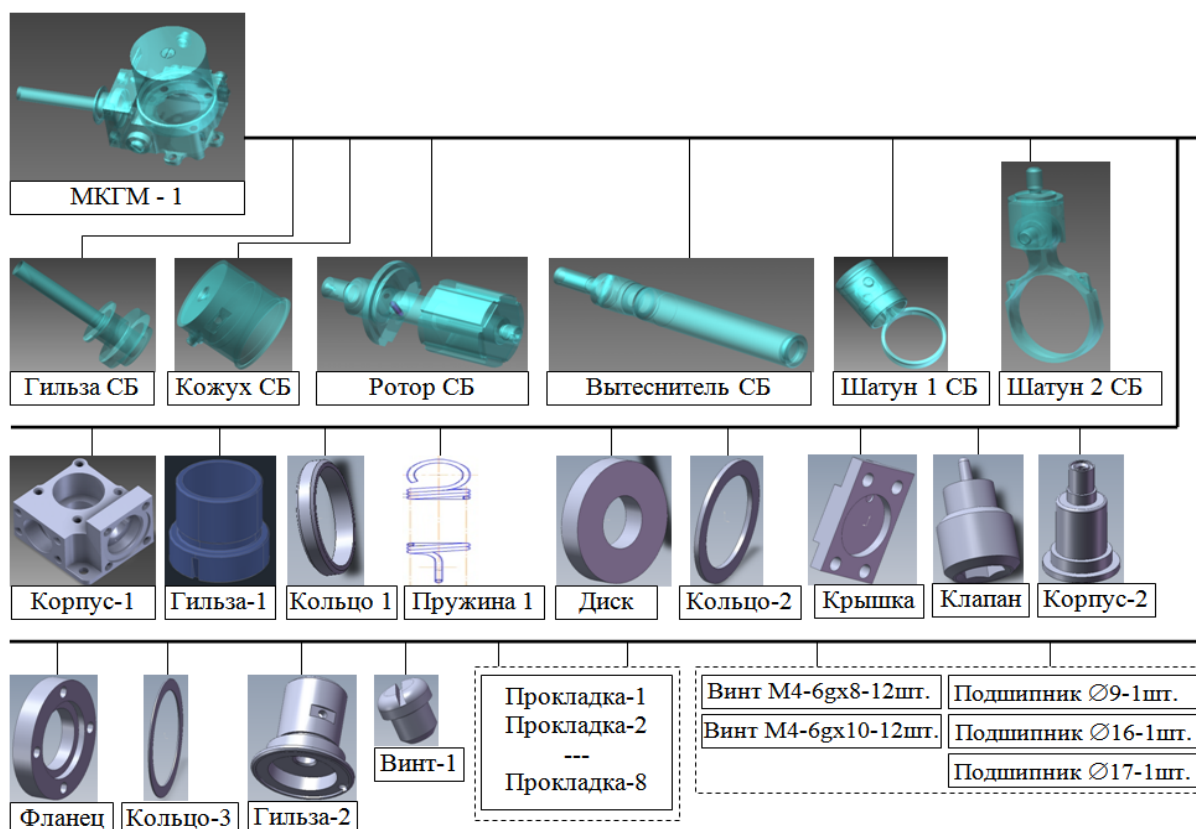


Рисунок 2. Узлы и компоненты МКГМ в структуре сборки

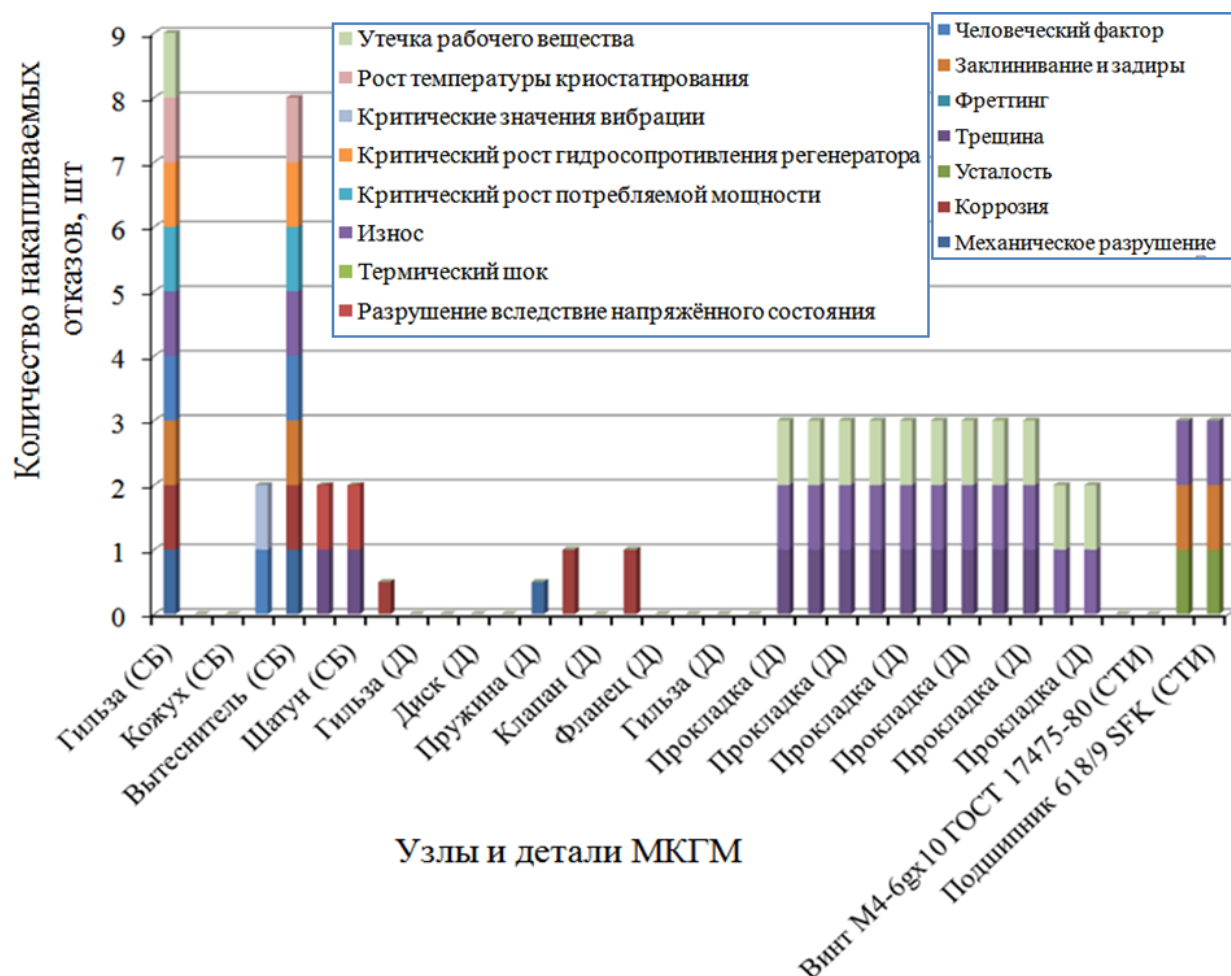


Рисунок 3. Накопительная диаграмма отказов по каждому компоненту МКГМ

## Относительная значимость фактора

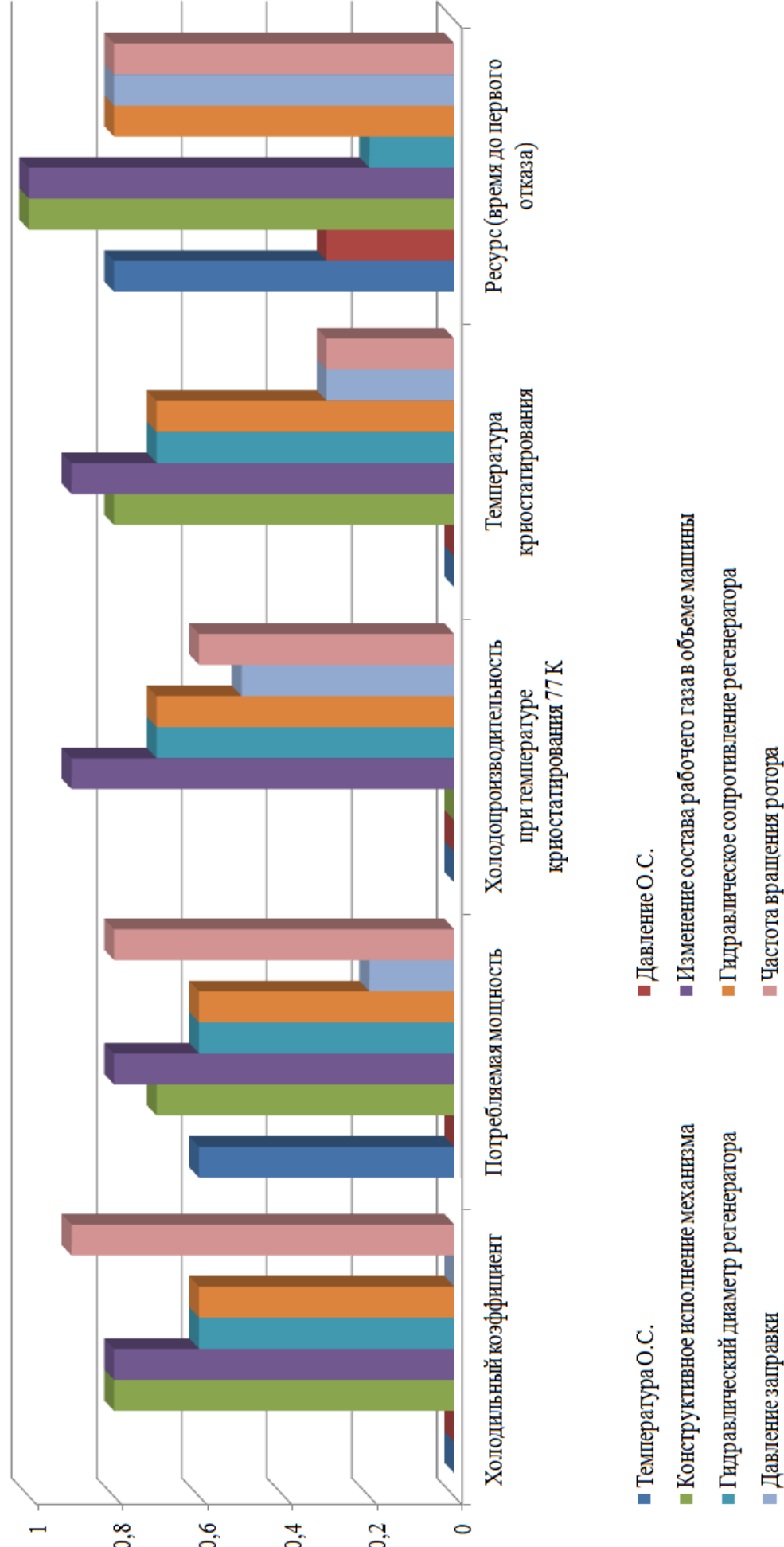


Рисунок 4. Относительная значимость воздействия независимых факторов на зависимость для сборок МКГМ с роторным и линейным приводом



Рисунок 5. Основные узлы роторной моноблочной МКГМ и оптимизируемые конструктивные параметры

**В главе 4** формулируется концепция минимума энергетических потерь в узлах МКГМ, проводится структурирование энергетических потерь по узлам (Рисунок 6) и предлагается методика численной оценки значений энергетических потерь с целью их совершенствования. В данной главе интегральные энергетические потери в МКГМ предлагается рассматривать как сумму энергетических потерь в составляющих микроаппаратуры узлах и компонентах. Поскольку комплексная систематизация видов энергетических потерь и связи энергетических потерь с конкретными конструктивными параметрами для МКГМ в научных публикациях отсутствует, то энергетический анализ и оптимизация сопряженных конструктивных параметров МКГМ аналитическими методами не описываются. В тоже время основные направления такой систематизации представляются вполне очевидными, и связь конструктивных параметров с энергетическими потерями поддается обобщению для различного типа МКГМ. Например, затраты энергии на компенсацию перетечек из-за наличия внутреннего байпаса в компрессорной полости (Рисунок 7) предлагается оценивать с помощью соотношения:

$$\Delta L_{сж}^{\Pi} = \frac{\pi \cdot D \cdot (\Delta p)^2 \cdot \psi_1^3}{96 \cdot \mu \cdot h} \quad (2)$$

где  $\psi_1$  - размер зазора между цилиндром и поршнем/поршневым кольцом, если уплотнение осуществляется с помощью поршневых колец (для МКГМ уплотнение щелевого зазора осуществляется посадкой поршня), м;

$D$  - диаметр поршня, м;  $h$  - высота уплотнения, равная высоте посадочной поверхности на поршне, м;  $\mu$  - динамическая вязкость гелия при средней температуре процесса сжатия, Па·с;  $\Delta p$  - разница давлений за поршнем и перед поршнем, Па.

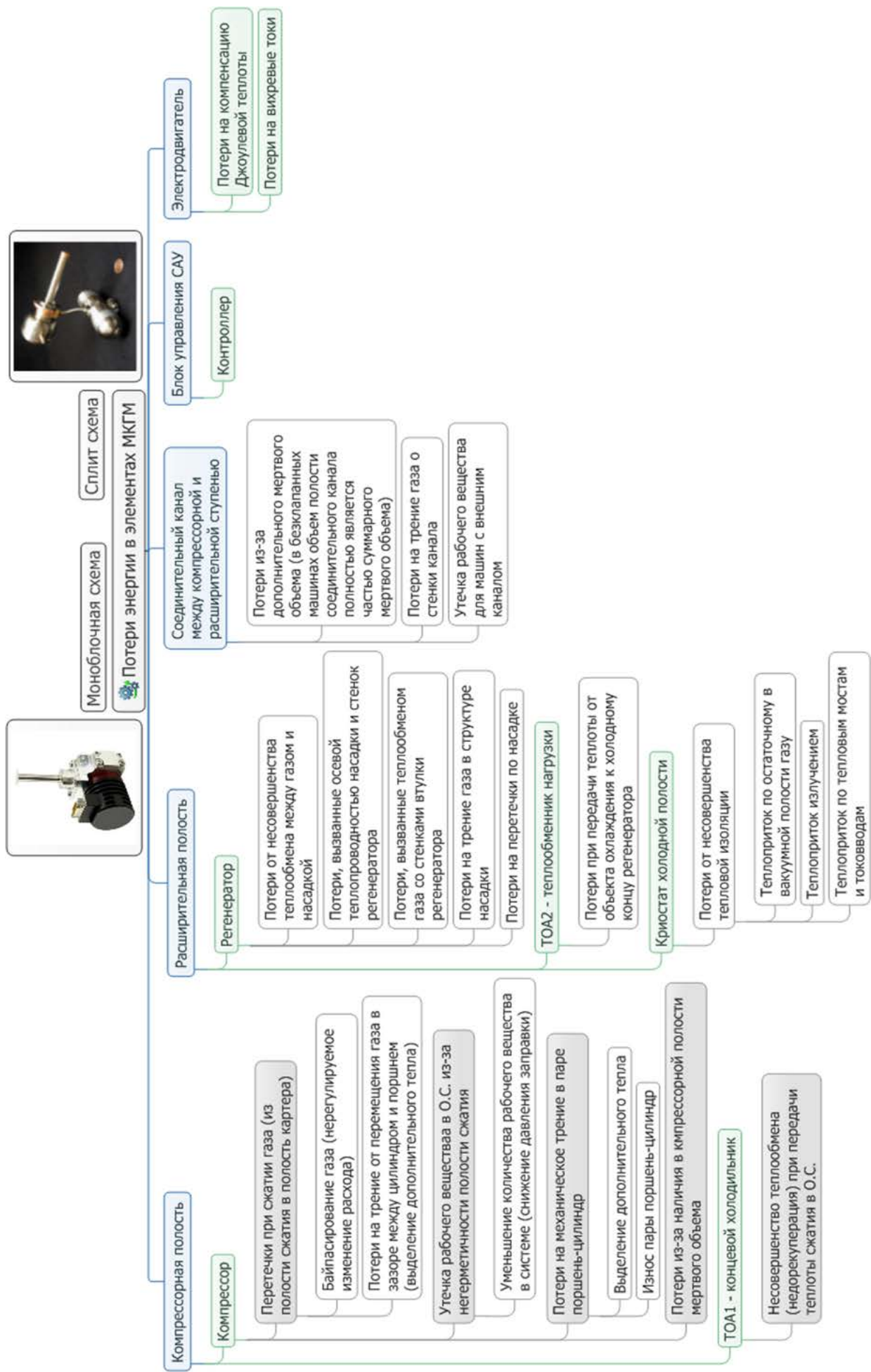


Рисунок 6. Структура и основные виды энергетических потерь в элементах МКГМ

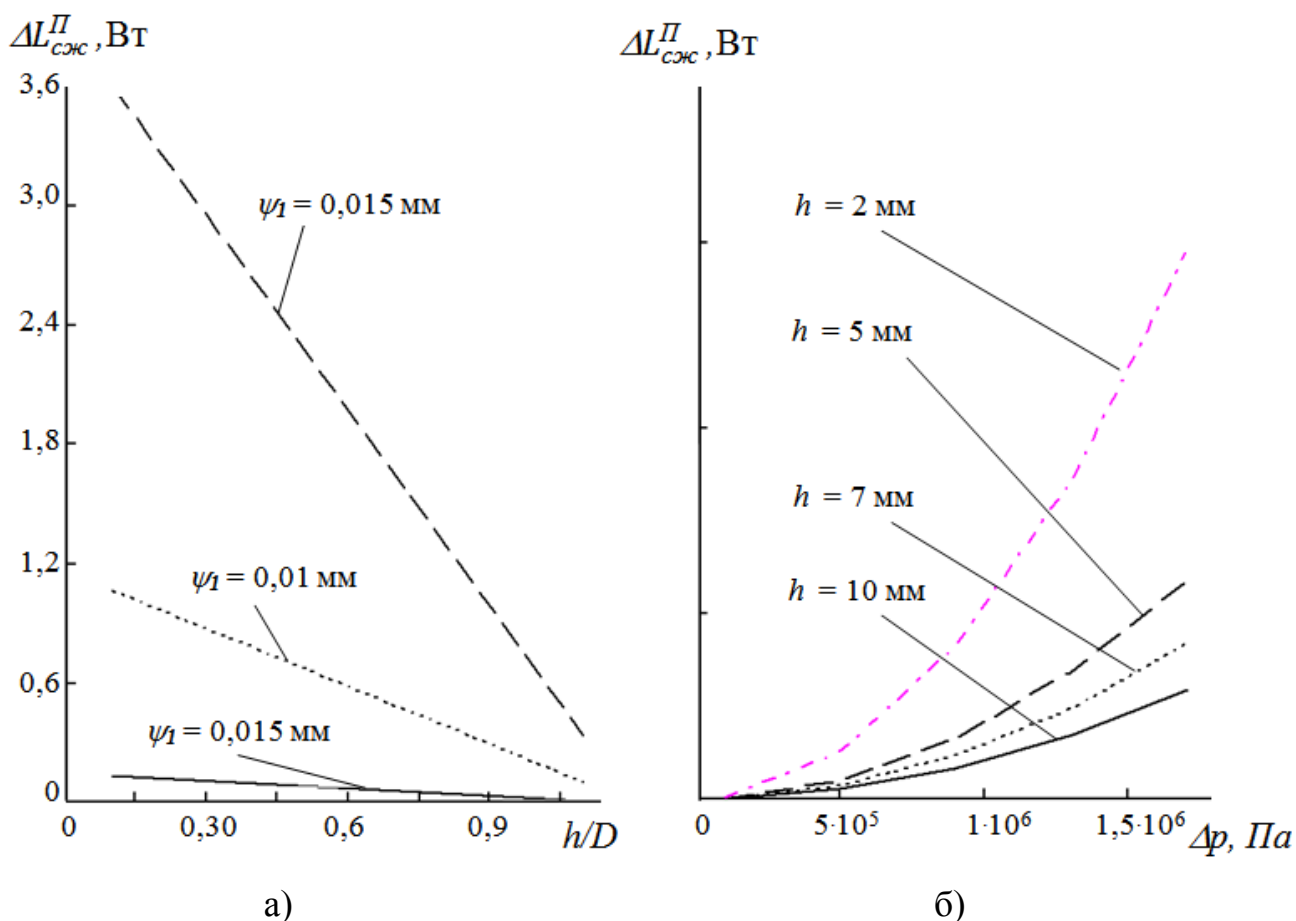


Рисунок 7. Зависимость затрат электрической энергии на компенсацию перетечек:  
а) от приведенной высоты уплотнения  $h/D$  при фиксированном значении  $\Delta p = 0,6$  МПа;  
б) от разницы давлений в компрессорной полости.

Затраты энергии при движении гелия через цилиндрический транспортный канал (Рисунок 8), соединяющий полости сжатия и расширения предложено оценивать как:

$$\Delta L^{TK} = \Delta p_{TK} \cdot W_{TK} \quad (3)$$

где  $W_{TK}$  - объемный расход перетекающего газа в транспортном канале, м<sup>3</sup>/с;

$\Delta p_{TK}$  - гидравлическое сопротивление транспортного канала, Па

$$\Delta p_{TK} = f \cdot \frac{\rho_{He}}{2} \cdot U_m^2 \cdot \frac{L}{D_r} \quad (4)$$

$f$  - фактор трения (определяется для движения гелия в транспортном канале), значение которого связано с режимом течения и для МКГМ с транспортным каналом внутри корпуса зависит от качества механической обработки поверхности.

Корреляция Чена и Гриффина для определения фактора трения при  $3 \leq Re \leq 2000$

$$f = 49,78/Re + 0,318 \quad (5)$$

$x_{TK}$  - приведенная длина транспортного канала,  $x_{TK} = X_{TK}/D_{TK}$ ;

$D_{TK}$  и  $X_{TK}$  - диаметр и длина транспортного канала, м.



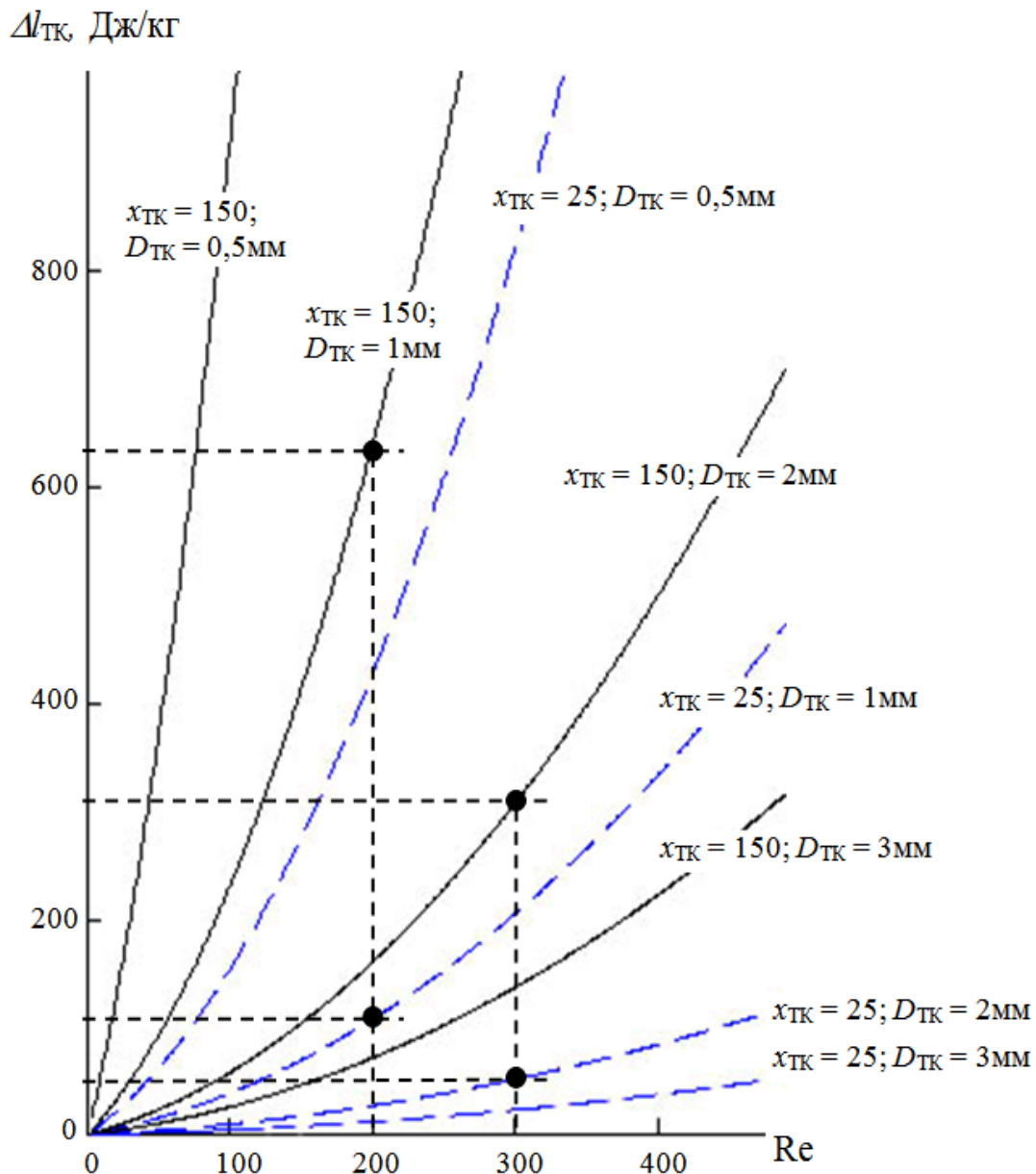


Рисунок 8. Зависимость удельных затрат энергии при движении гелия через цилиндрический транспортный канал при характерных значениях  $D_{TK}$  и  $x_{TK}$

Суммарные потери энергии в регенераторе можно оценить через величину суммарного производства энтропии в регенераторе (Рисунок 9):

$$\sum_n \Delta S = \Delta S_{газ} + \Delta S_{насадки} + \Delta S_{\Delta p} + \Delta S_{газ-насадка} \quad (5)$$

$\Delta S_{газ}$  - производство энтропии в следствие теплопроводности газа, Дж/(кг·К);

$\Delta S_{насадки}$  - производство энтропии в следствие теплопроводности структуры насадки, Дж/(кг·К);

$\Delta S_{\Delta p}$  - производство энтропии в следствие гидравлического сопротивления структуры насадки, Дж/(кг·К);

$\Delta S_{\text{газ-насадка}}$  - производство энтропии в следствие несовершенства теплообмена между насадкой и газом (наличие разницы мгновенных значений температур газа и насадки), Дж/(кг.К);

- для случая равенства мгновенных значений температур газа и насадки (идеальный теплообмен при бесконечном значении коэффициента теплоотдачи):

$$\Delta S_{\text{газ-насадка}} = 0$$

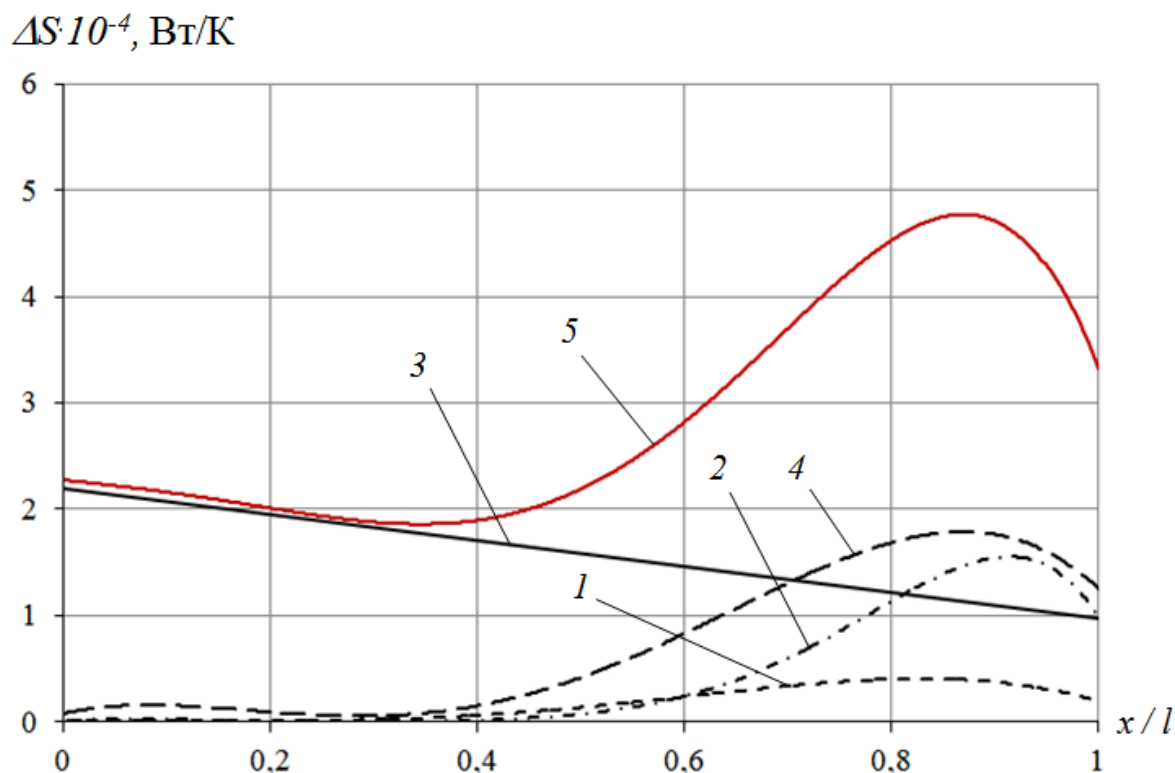


Рисунок 9. Зависимости составляющих суммарного производства энтропии в регенераторе от соотношения  $x/l$  для насадки №4 при диаметре регенератора 7,5 мм и частоте 1600 об/мин ( $x$ - текущая координата по длине регенератора, м;  $l$  - длина регенератора, м):

1) -  $\Delta S_{\text{газ}}$ ; 2) -  $\Delta S_{\text{газ-насадка}}$ ; 3) -  $\Delta S_{\Delta p}$ ; 4) -  $\Delta S_{\text{насадки}}$ ; 5) -  $\Delta S_{\Sigma}$

По результатам анализа распределения энергетических потерь по длине регенератора предлагается новый подход к формированию пористой структуры регенератора на основе минимальных поверхностей. Современные технологии проектирования позволяют создавать различные трехмерные модели пористых структур, определять геометрические характеристики и пористость. Однако, материалы, применяемые в настоящее время однотипны, и качество регенераторов во многом зависит от технологии набивки и «культуры» производства. Управлять значением пористости таких структур невозможно. Эти материалы в настоящее время не позволяют понизить габариты холодного блока МКГМ за счет увеличения эффективности самой насадки. Все дефекты сборки регенератора компенсируются увеличением потребляемой мощности, либо снижением полезной холодопроизводительности. Создание пористых структур с заданной или



прогнозируемой пористостью и проницаемостью - задача, решение которой до недавнего времени было сложнейшей математической задачей, часто не решаемой. Сегодня, несмотря на ряд технических сложностей, и особенностей задача прогнозирования пористости структуры представляется решаемой. В тоже время анализ характеристик МКГМ, проведенный в данной работе показывает, что формирование регенератора необходимо проводить на основе новых подходов, постепенно отказываясь от компоновки известных примитивов типа сеток, сфер, проволоки и сочетаний этих примитивов.

Оптимизация топологии - математический метод, позволяющий переупорядочивать материалы для достижения желаемых свойств при выполнении заданных ограничений.

В данной работе для формирования пористой структуры выбрана минимальная поверхность - гироид. Гироид интересен как геометрический структурный мотив, гарантирующий минимальную плотность для пористого материала заданной периодичности и в тоже время гироид трижды периодическая структура (периодичность вдоль трех осей), позволяющая получать проницаемые структуры по каждой из осей симметрии. В работе предлагается подход к формированию пористой структуры на основе построения «заглубленных» конечно-разностных кубических сеток по заданному объему объекта (Рисунок 10).

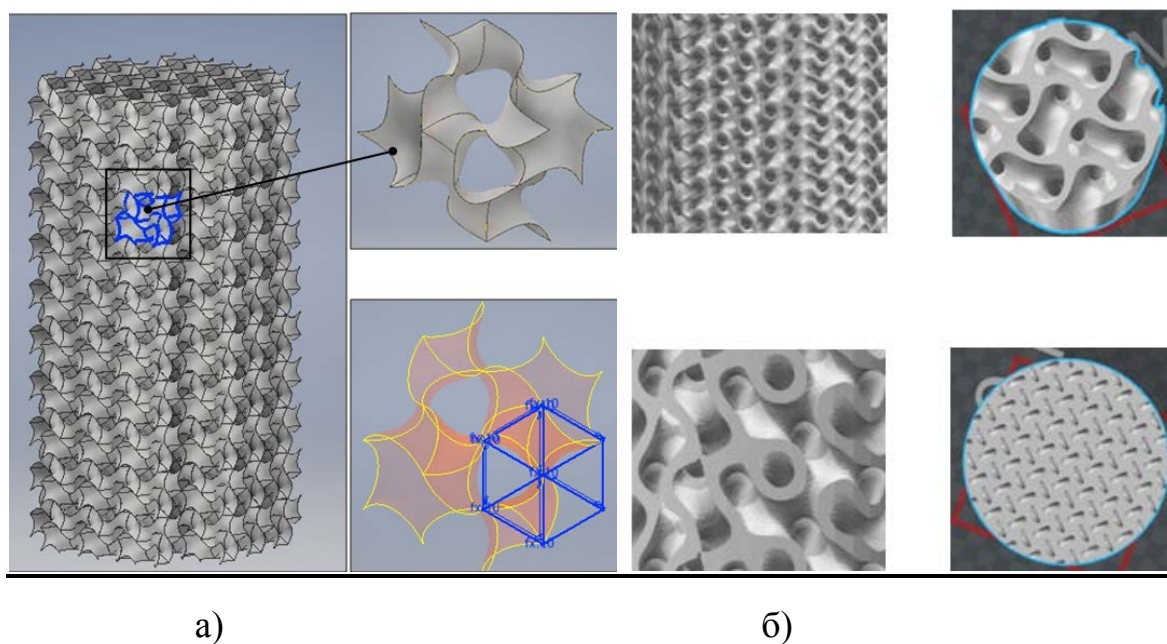
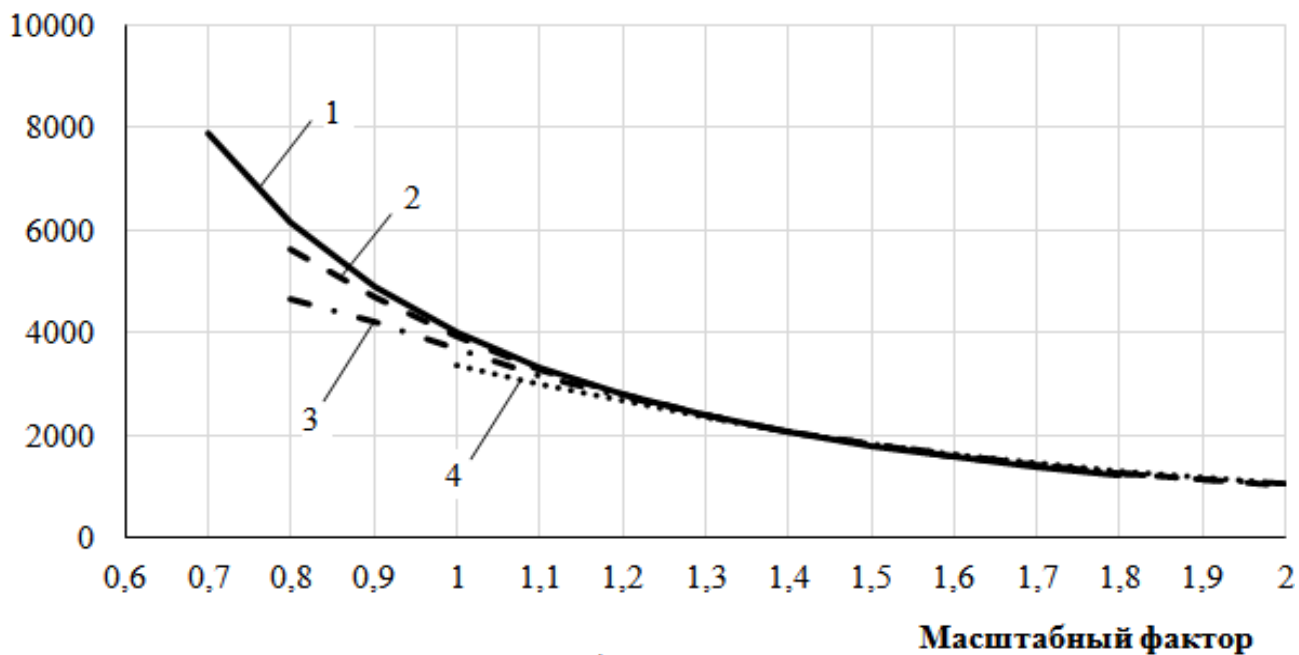


Рисунок 10. Структура гироида:

- а) пористая CAD структура на основе гироида;
- б) боковые и торцевые виды поверхностей.

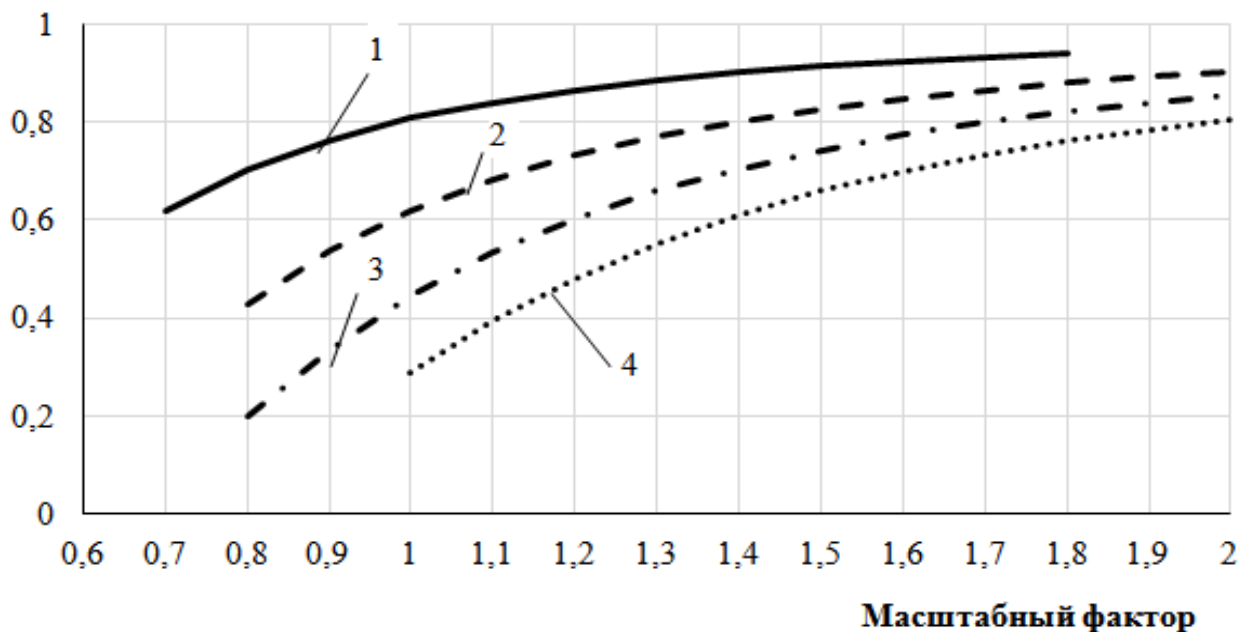
В ходе трехмерного моделирования поверхностей образцов диаметром 10 мм и высотой 50 мм были найдены значения пористости и компактности. Структуры на основе минимальных поверхностей позволяют подобрать любое значение пористости и компактности (Рисунок 11).

Компактность,  $\text{м}^2/\text{м}^3$



а)

Пористость,  $\epsilon$



б)

Рисунок 11. Расчетные зависимости компактности и пористости при различных значениях приведенной толщины стенки  $\delta$  для образцов со структурой гироида:

а) зависимость компактности от масштабного фактора;

б) зависимость пористости от масштабного фактора;

1)  $\delta = 0,1$ ; 2)  $\delta = 0,2$ ; 3)  $\delta = 0,3$ ; 4)  $\delta = 0,4$ ;

Значения пористости и компактности вычислялись в результате трехмерного САД моделирования и построения пористой структуры, а также с учетом отсутствия в регулярных структурах на основе минимальных поверхностей тупиковых пор. Поэтому, вычисленные значения компактности и пористости достоверны и при изготовлении зависят лишь от точности технологии печати.

Масштабным фактором в расчетах и проектировании принято соотношение длины диагонали элементарного куба и толщины материала в стенке гироида. Фотографии образцов насадочных структур, построенных на 3D принтере из светоотверждаемого полимера и нержавеющей сплава 316L (18Cr-14Ni-2.5Mo), представлены на Рисунке 12 (а), (б).

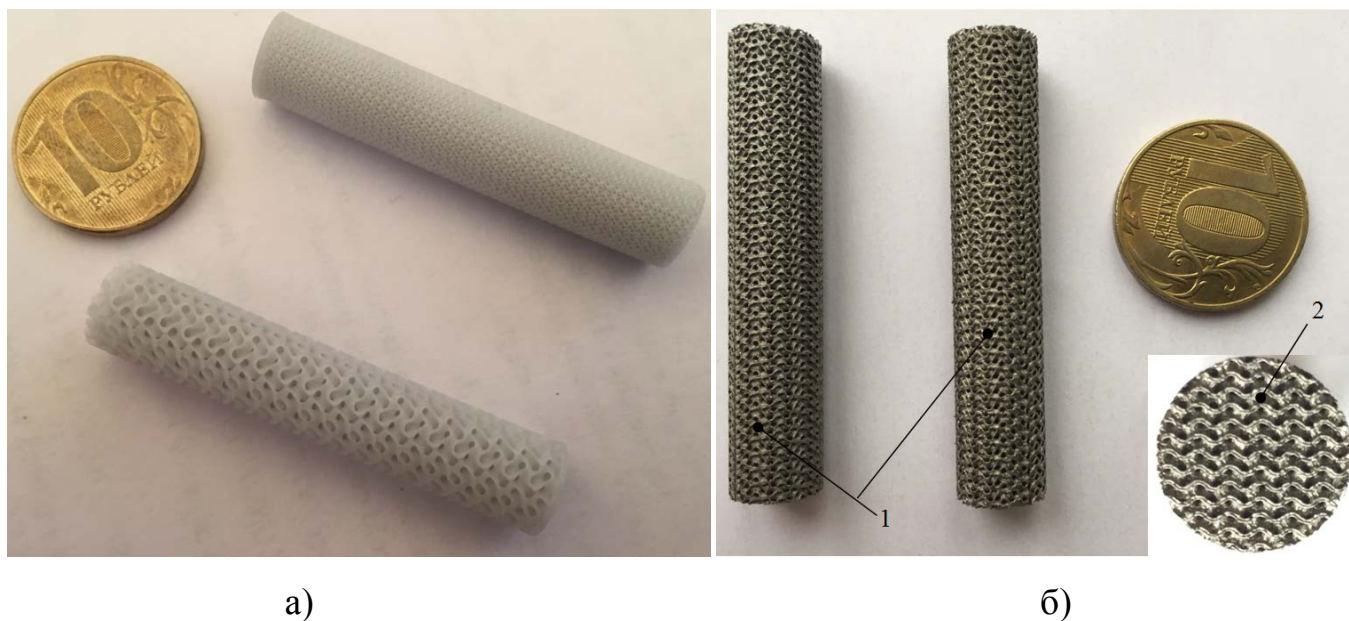


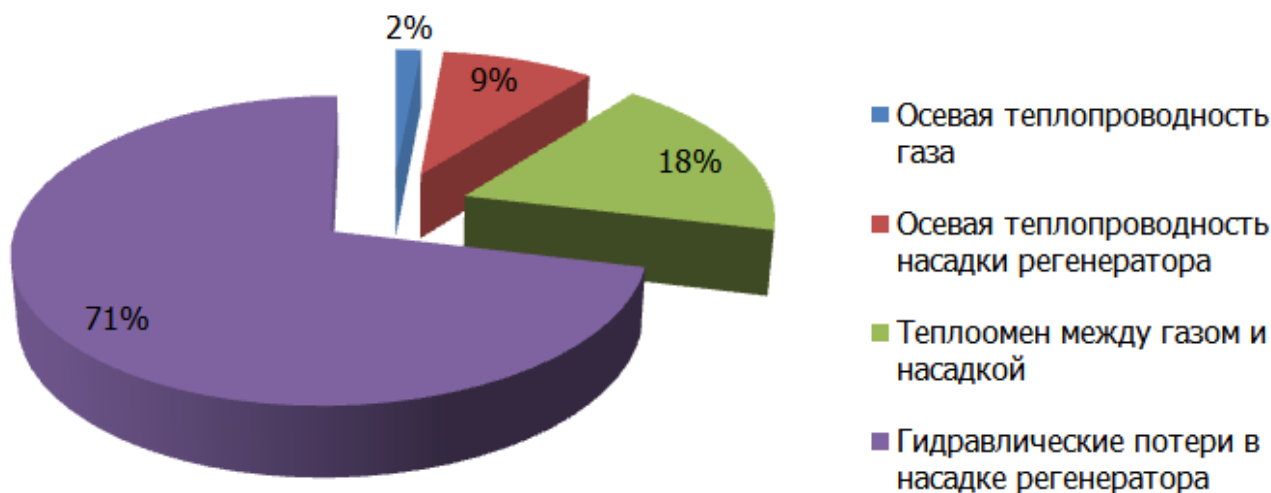
Рисунок 12. Образцы готового макета структуры регенератора диаметром 8мм и длиной 50мм:

- а) материал образцов полимер, пористость 0,875 и 0,545;
- б) нержавеющая сталь (SS - 316L) пористость 0,875.

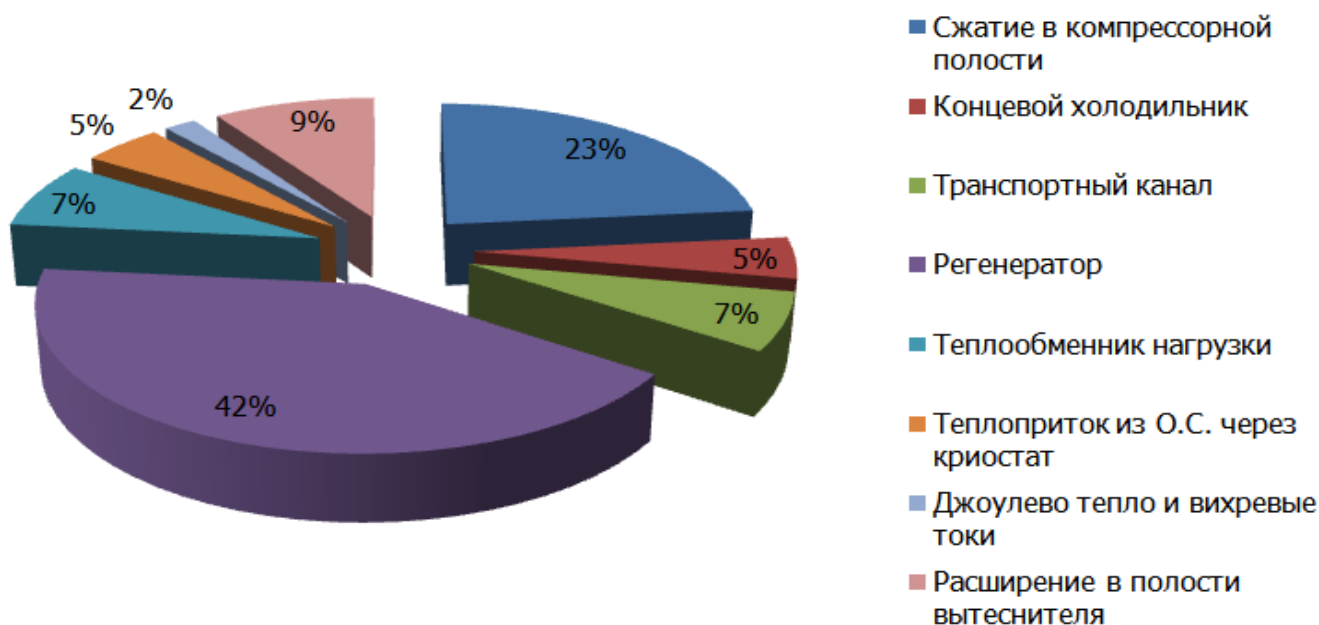
По результатам комплексного моделирования рабочих процессов в моноблочной МКГМ, работающей по обратному циклу Стирлинга были построены аналитические диаграммы распределения энергетических потерь по узлам МКГМ (Рисунок 13).

Аналитический анализ распределения энергетических потерь в структуре регенератора позволяет рассчитать не только значения отдельных составляющих энергетических потерь, но и оценить вклад каждого вида потерь.

Вывод о том, что основными энергетическими потерями МКГМ являются потери в насадке регенератора, а основными потерями в регенераторе являются гидравлические потери, вполне прогнозируем. Однако, сопоставление видов потерь позволяет определить процентное соотношение энергетических потерь в узлах с конкретной геометрией.



а)



б)

Рисунок 13. Структура потерь МКГМ:  
а) в насадке регенератора;  
б) для машины в целом

**В главе 5** представлена математическая модель и результаты численного моделирования процессов гидрогазодинамики и теплообмена для микрокриогенной моноблочной газовой машины, реализующей обратный цикл Стирлинга. В основе разрабатываемой математической модели - двухмерная осесимметричная модель (Рисунок 14).

Основные соотношения модели описываются уравнениями (6) - (13) и являются общими для целого класса задач гидродинамики и теплообмена. В данной работе предлагается адаптация универсальной модели к расчету процессов с учетом специфики микромашин. Особенностью модели является принципиальная

возможность расчета процессов теплообмена и гидродинамика не только при последовательном (одностороннем, как в модели «прямого/обратного дутья») прохождении газа по смежным объемам МКГМ, но и в условиях реалистичного нестационарного изменения объема полостей.

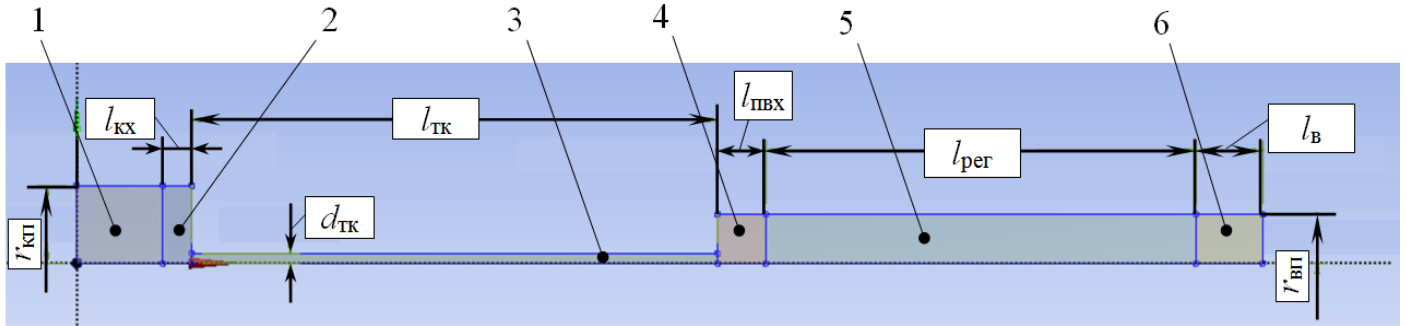


Рисунок 14. Основные элементы структурного аналога МКГМ:

- 1) компрессорная полость; 2) конечной холодильник;
- 3) транспортный канал; 4) полость на входе в регенератор;
- 5) теплообменник-регенератор; 6) полость расширения.

- Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial}{\partial t} [\xi \cdot \rho] + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} [\xi \cdot r \cdot \rho_y] + \frac{\partial}{\partial x} [\xi \cdot \rho_f \cdot v_x] = 0 \quad (6)$$

- Уравнения моментов

в осевом направлении

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\xi \cdot \rho \cdot v_x] + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial x} [\xi \cdot r \cdot v_x \cdot v_x] + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} [\xi \cdot y \cdot \rho_f \cdot v_x \cdot v_y] \\ &= - \frac{\partial \xi \cdot p}{\partial y} + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ y \cdot \mu \cdot \left( 2 \cdot \frac{\partial \xi \cdot v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \xi \cdot \vec{v}) \right) \right\} \\ &+ \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ y \cdot \mu \cdot \left[ \frac{\partial \xi \cdot v_x}{\partial y} + \frac{\partial \xi \cdot v_y}{\partial x} \right] \right\} S_x \end{aligned} \quad (7)$$

в радиальном направлении

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} [\xi \cdot \rho_f \cdot v_y] + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial x} [\xi \cdot r \cdot v_x \cdot v_y] + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} [\xi \cdot y \cdot \rho_f \cdot v_y \cdot v_y] \\ &= - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ 2 \cdot x \cdot \mu \cdot \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{1}{3} (\nabla \vec{v}) \right) \right\} \\ &+ \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left\{ 2 \cdot y \cdot \mu \cdot \left[ \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{1}{3} (\nabla \vec{v}) \right] \right\} + \frac{2 \cdot \mu}{y} \left[ \frac{(\nabla \vec{v})}{3} - \frac{v_y (\nabla \vec{v})}{y} \right] \\ &+ S_y \end{aligned} \quad (8)$$

$S_x$  и  $S_y$  - два коэффициента, учитывающие вязкостную и инерционную составляющую в осевом и радиальном направлении (коэффициенты Дарси и Форхгеймера), значения которых равны нулю для непористых зон микромашины.

- Значения этих коэффициентов для пористой зоны:

$$S_x = - \left( \frac{\mu}{\psi} \cdot v_x + \frac{1}{2} C \cdot \rho_f |v| \cdot v_x \right) \quad (9)$$

$$S_y = - \left( \frac{\mu}{\psi} \cdot v_y + \frac{1}{2} C \cdot \rho_f |v| \cdot v_y \right) \quad (10)$$

- Закон сохранения энергии

$$\frac{\partial}{\partial t} [\xi \cdot \rho \cdot E_f + (1 - \xi) \cdot \rho_s \cdot E_s] + \nabla \left( \vec{v} (\rho_f \cdot E_f + p) \right) = \nabla (k \nabla T_f + \tau \cdot \vec{v}) \quad (11)$$

где

$$k = \xi \cdot k_f + (1 - \xi) \cdot k_s \quad (12)$$

$$E_s = h - \frac{p}{\rho_f} + \frac{v^2}{2} \quad (13)$$

$k_f$  и  $k_s$  – теплопроводность гелия и материала насадки соответственно, Вт/м·К;

$v$  – скорость в направлении движения потока, м/с;

$\psi$  – проницаемость, м<sup>2</sup>;

$C$  – инерционный коэффициент Форхгеймера, 1/м;

$\mu$  – динамическая вязкость, кг/м·с;

Для упрощения расчетов при применении динамической расчетной сетки пористый регенератор считается неподвижным, а условно-изотермическая торцевая стенка холодного объема подвижной; пространственное (угловое) расположение рабочих полостей микромашины заменено осесимметричным расположением для упрощения расчетной сетки; для упрощения осесимметричной расчетной сетки теплота сжатия отводится в дополнительно введенном специальном объеме – изотермическом концевом холодильнике.

Расчетное нестационарное изменение температуры на холодном конце МКГМ представлено в виде графика зависимости температуры от времени симуляции (Рисунок 15).

Зависимость полной холодопроизводительности МКГМ от рабочей частоты цикла и зависимость холодильного коэффициента МКГМ от рабочей частоты цикла для разных значений давления заправки представлены на Рисунках 16, 17.



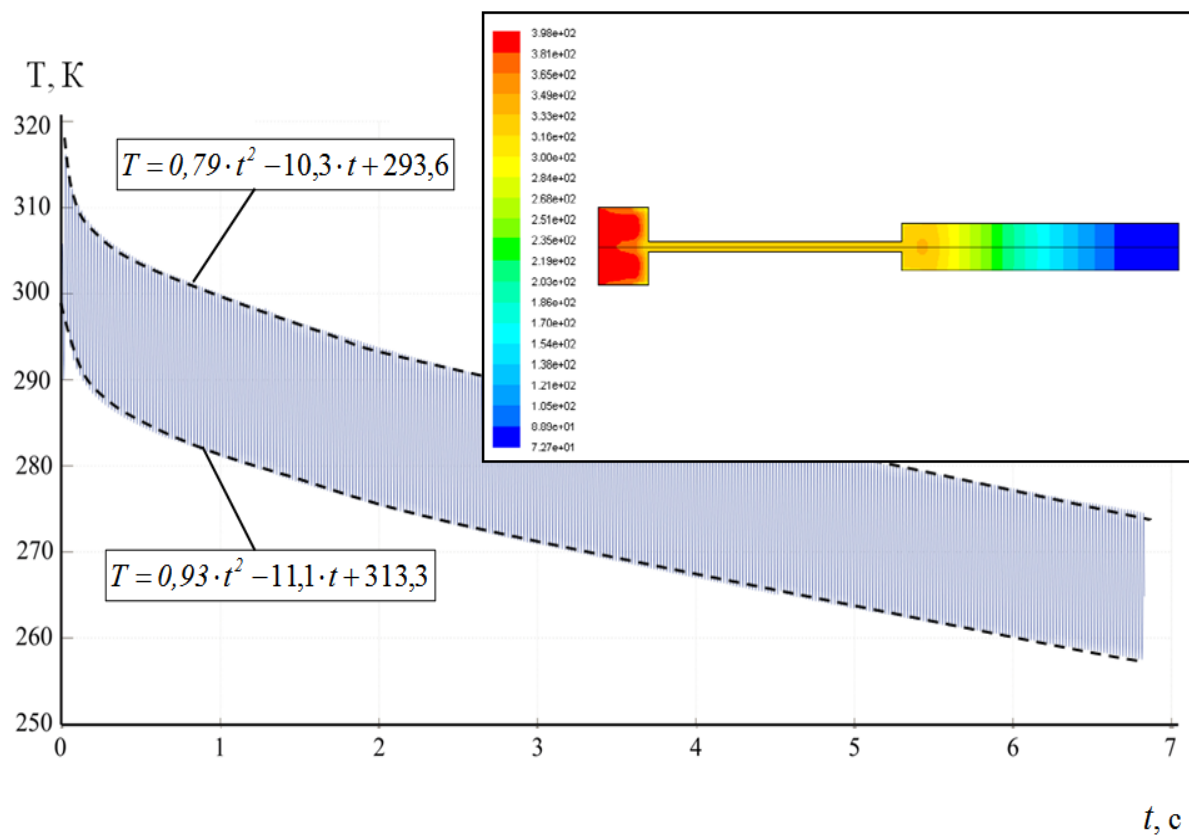


Рисунок 15. Зависимости температуры на холодном конце вытеснителя от времени симуляции

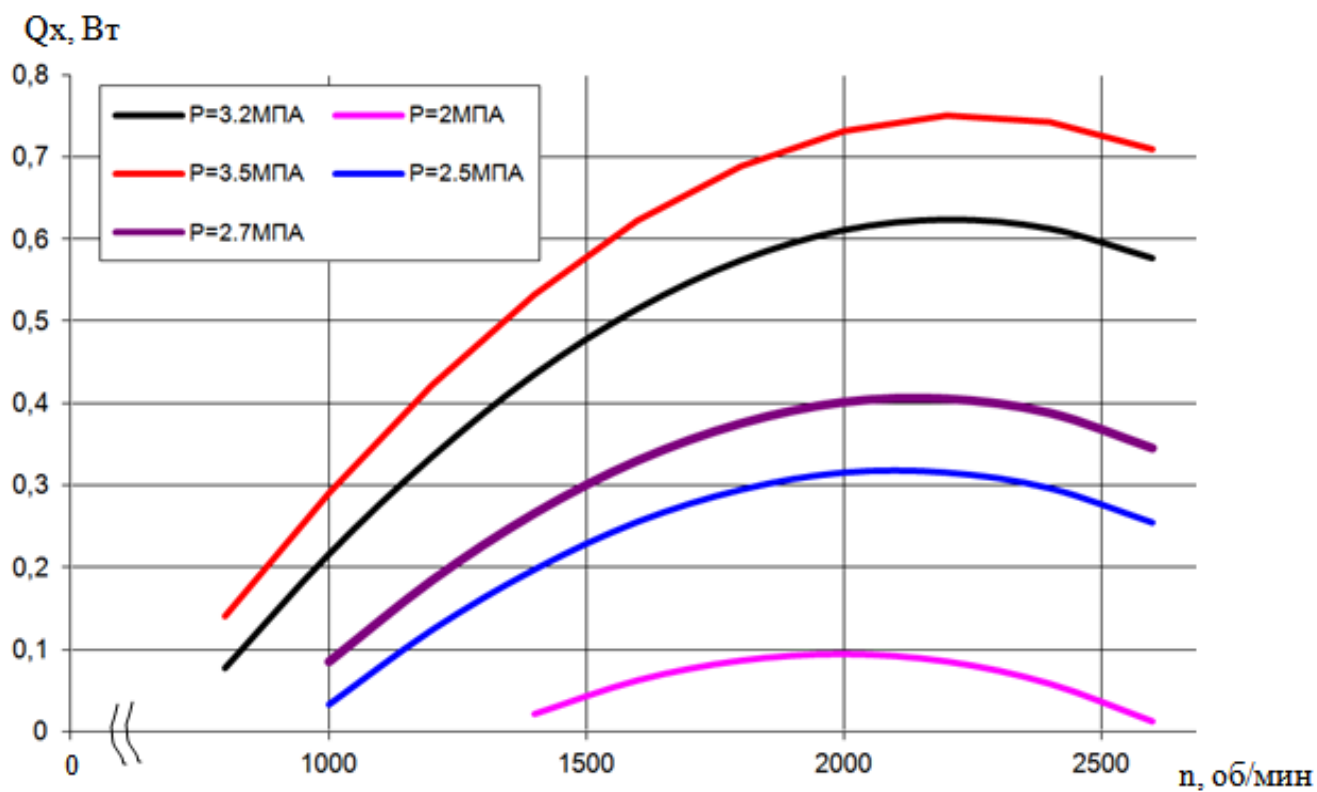


Рисунок 16. Зависимость полной холодопроизводительности МКГМ от рабочей частоты цикла

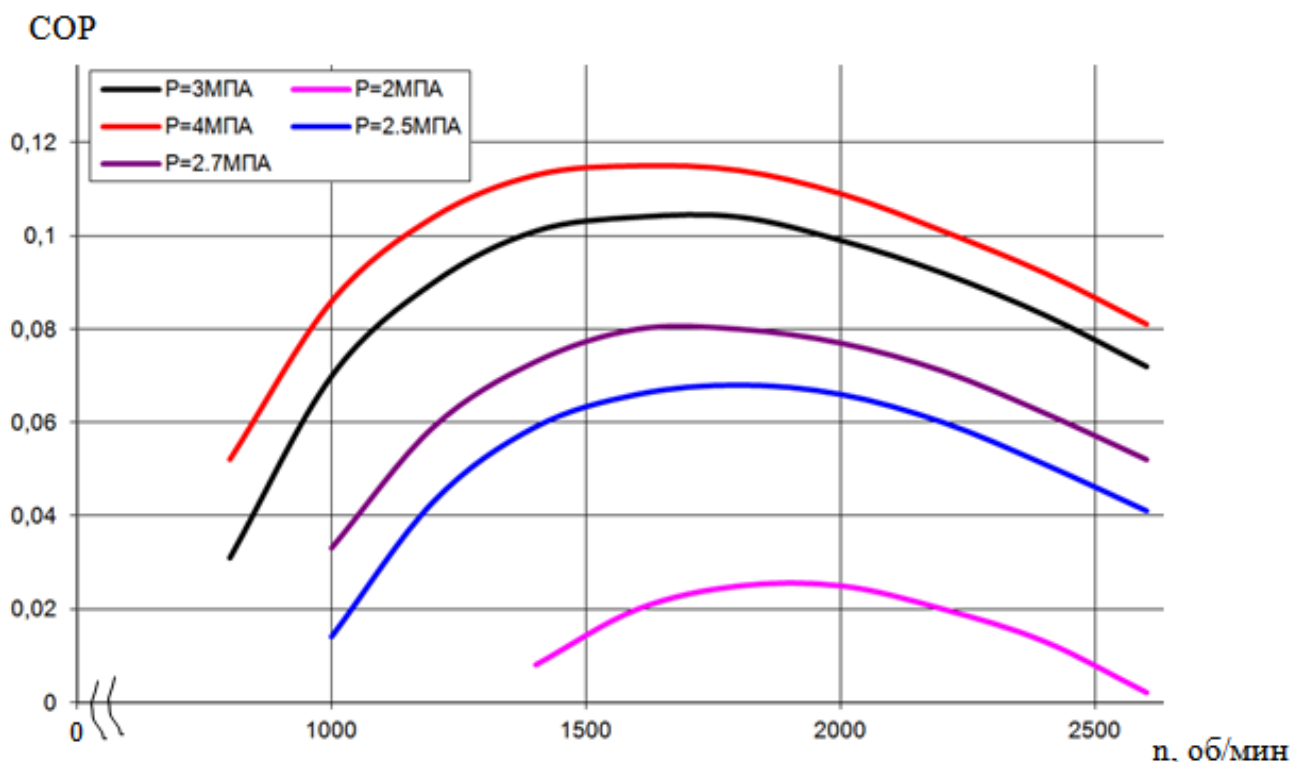


Рисунок 17. Зависимость холодильного коэффициента МКГМ от рабочей частоты цикла для разных значений давления заправки

Выводы по результатам численного эксперимента:

- Оптимальная частота вращения вала при давлении заправки 3.2МПа и полной холодопроизводительности 0,5Вт составляет 1600 об/мин с учетом понижения габаритов МКГМ при увеличении частоты вращения двигателя;
- Оптимальная высота регенератора по результатам численного исследования 42 мм. Данный выбор обеспечивает оптимальное соотношение между габаритами холодного пальца и потерями в регенераторе;
- Разработанная математическая модель позволяет получить связь между геометрическими размерами полостей МКГМ, значениями холодопроизводительности и потребляемой мощности. Основным достоинством данной модели является ее простота и доступность для разработчиков, поскольку базовая структура модели может быть построена в универсальном программном продукте Fluent решателя Ansys.
- Модель позволяет оценить соотношение расходов рабочего вещества между полостями в любой момент времени от начала расчета и в любой произвольно заданной точке узла микромашины.

**В главе 6** описываются основные этапы создания экспериментального образца МКГМ, приводятся схемы и эскизы основных узлов и методика исследования. Также в главе приводятся результаты экспериментальных исследований и ресурсных испытаний для пяти лучших образцов МКГМ и их сравнение с результатами численного эксперимента. Макет МКГМ (Рисунок 18) был спроектирован с учетом положений сформулированной концепции автора и



изготовлен при его непосредственном участии на лабораторно-производственной базе ОАО «МЗ «Сапфир».

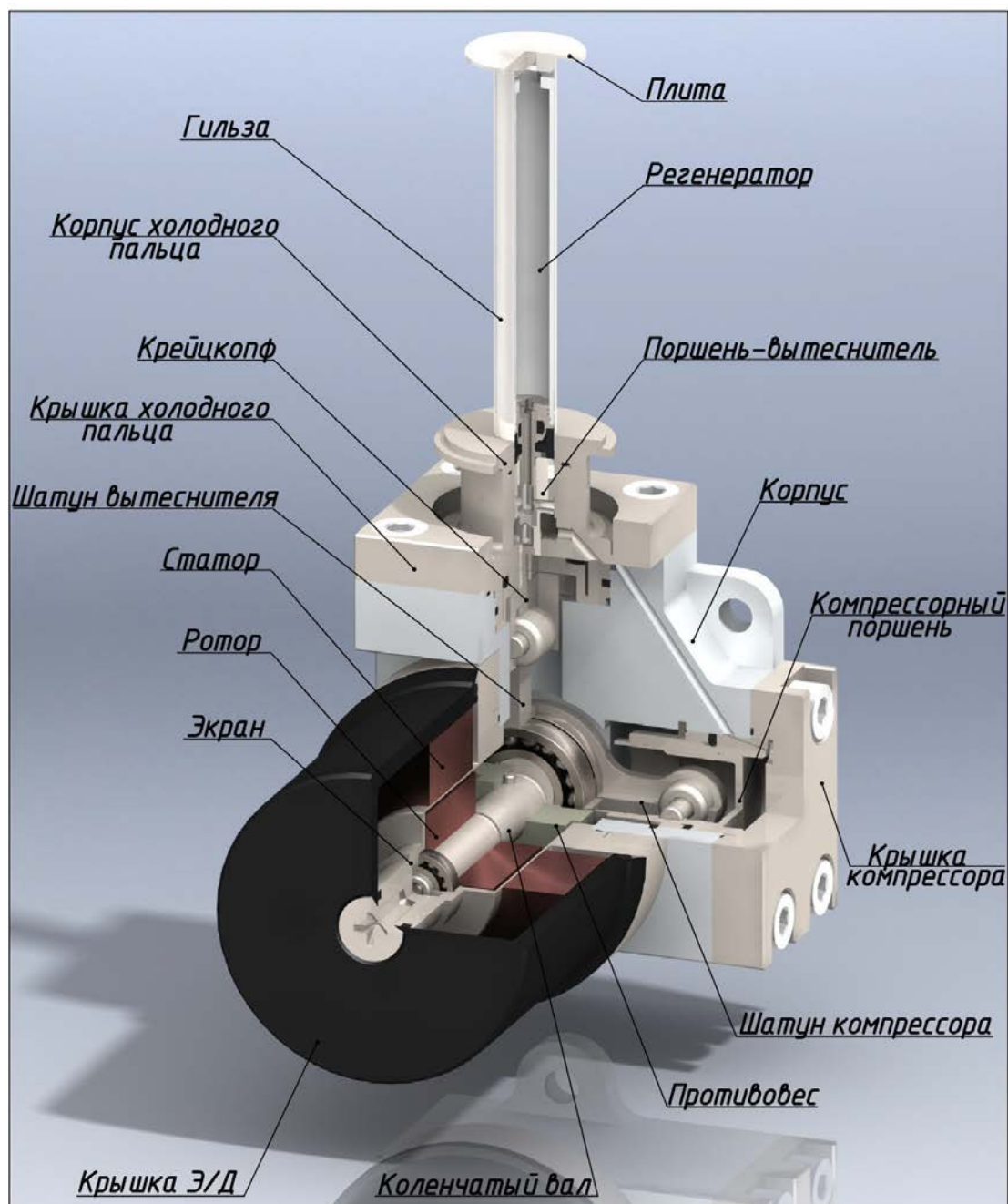


Рисунок 18. Общий вид макета МКГМ

Основные узлы и детали образца представлены на Рисунке 19. В качестве ближайшего аналога принята модель K508 МКГМ фирмы Ricor (Израиль).

В задачи экспериментальных исследований вошли:

- 1) Оценка работоспособности созданного макета МКГМ, поиск деталей и узлов, требующих доработки;
- 2) Сбор экспериментальных данных и составление таблиц с перечнем рисков на стадиях создания эффективной МКГМ;

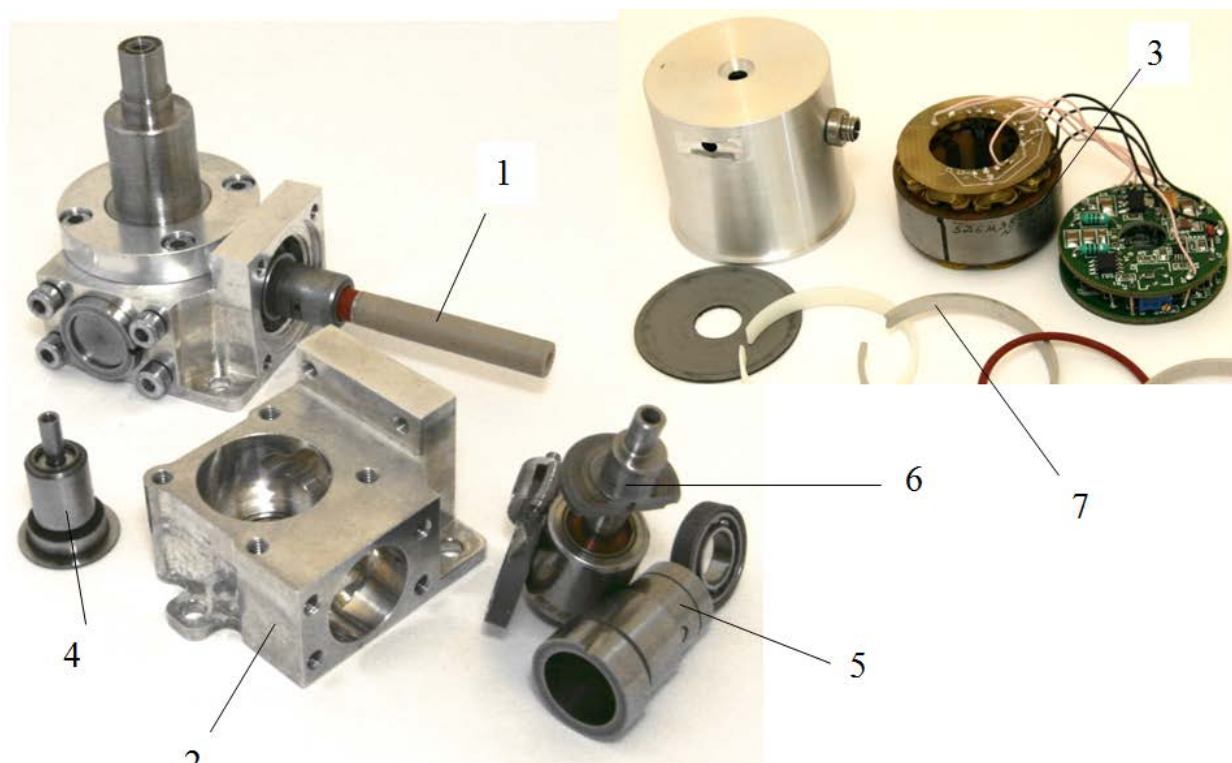
- 3) Сопоставление экспериментальных результатов и результатов, полученных в ходе МФТГА, на предмет выявления узлов сборки, накапливающих риски;
- 4) Создание универсальных стендов и методик тестовых исследований МКГМ, в лабораторных условиях при единичном и серийном производстве (до 100 шт. в год);
- 5) Получение экспериментальной информации о термодинамических и механических характеристиках МКГМ в диапазоне температур О.С. от  $-40$  до  $+80$  °С.
- 6) Поиск оптимальных режимов работы регенератора МКГМ для исключения быстрого (до 15000 часов) забивания примесями;
- 7) Совершенствование созданного макета МКГМ для увеличения ресурса работы при заданных условиях теплосъема;
- 8) Отработка конструктивных решений для узлов подвижных уплотнений, внешних уплотнений, узлов передачи движения от вала к поршню-вытеснителю;
- 9) Поиск экстремальных сочетаний значений сопряженных параметров: температуры О.С., рабочего давления, давления заправки и технических характеристик для разработки методики ускоренных испытаний МКГМ при наработке на отказ.

Разработанная МКГМ это моноблочный агрегат, включающий компрессорную и вытеснительную ступени, расположенные на одном валу, а также три конструктивно различных теплообменных аппарата (теплообменник нагрузки, теплообменник отвода теплоты сжатия, внутренний подвижный теплообменник-регенератор выполняющий функции проницаемого поршня-вытеснителя).

Основные номинальные характеристики базового образца:

- Вес МКГМ: 450 г (без криостата холодного пальца и элементов полезной нагрузки);
- Входное напряжение: от 12 до 16 В или от 18 до 28 В на постоянном токе;
- Потребляемая мощность в стационарном режиме (холодопроизводительность 220 мВт при  $T_x = 77$  К,  $T_{O.C.} = 23$  °С): 7 Вт;
- Максимальная потребляемая мощность: 17 Вт;
- Диапазон исследуемых температур окружающей среды: от  $-40$  до  $+80$  °С;
- Габаритные размеры: ( $\sim 120$ мм) x ( $\sim 58$ мм) x ( $\sim 71$ мм).

На Рисунках 20, 21 и 22 представлены результаты экспериментов (длительность экспериментов 2000 часов) для отобранных по результатам исследований лучших пяти образцов.



а)



б)

Рисунок 19. Фотографии образца МКГМ (ОАО «Московский завод «Сапфир»):  
а) основные узлы и компоненты; б) МКГМ в сборе;  
1 - поршень вытеснитель (регенератор); 2 - корпус;  
3 - электродвигатель и плата модуля управления; 4 - гильза теплой полости вытеснителя; 5 - гильза полости сжатия и компрессорный поршень в сборе; 6 - вал в сборе с маховиком и ротором электродвигателя; 7 - уплотнительные прокладки.

Потребляемая мощность, Вт

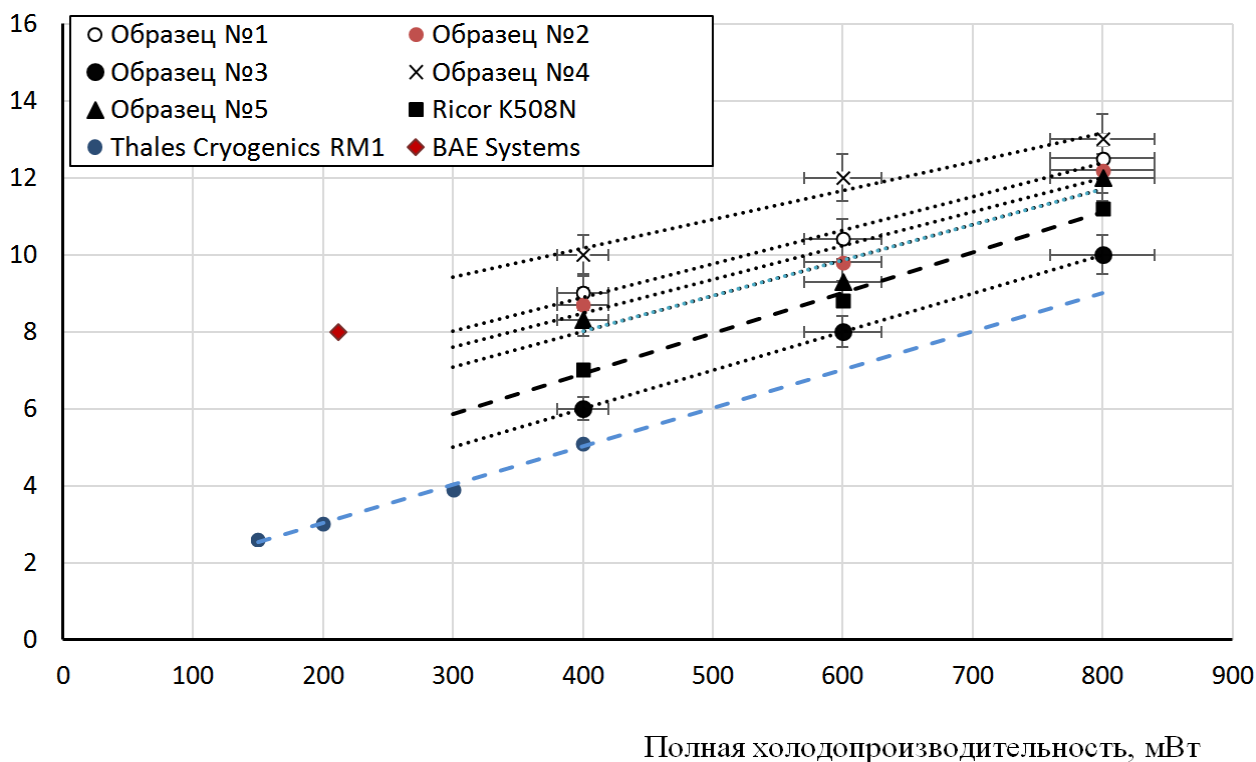


Рисунок 20. Зависимость потребляемой мощности в номинальном режиме от полной холодопроизводительности ( $T_X = 80$  К,  $n = 30$  Гц,  $T_{O.C.} = +23$  °C)

Потребляемая мощность, Вт

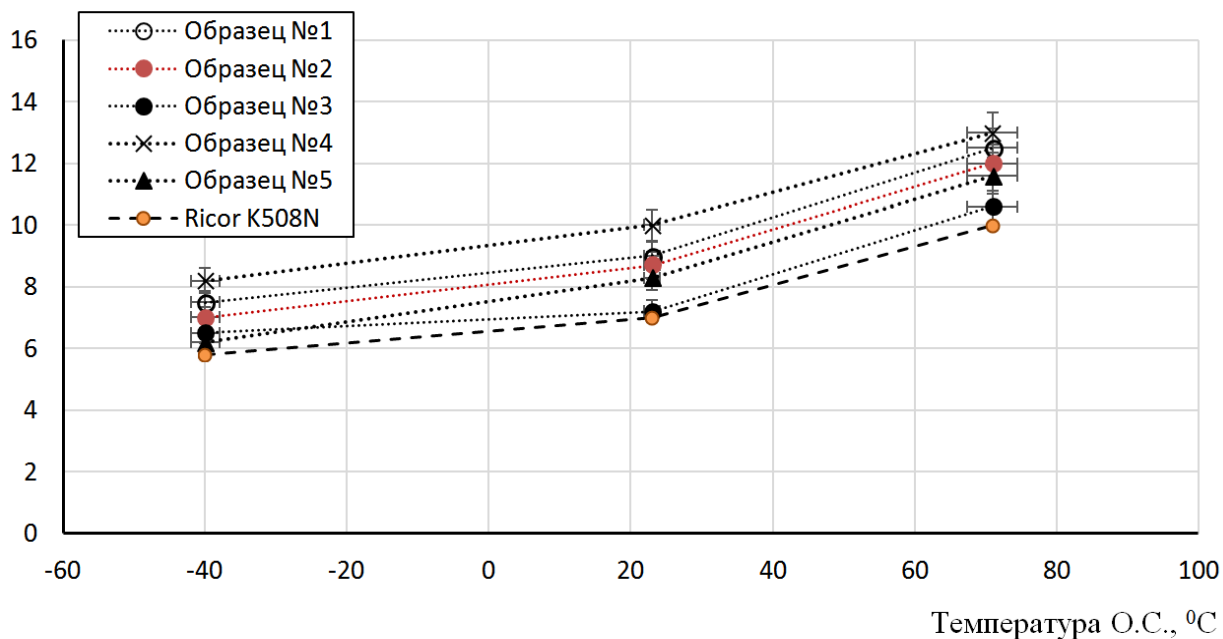


Рисунок 21. Экспериментальная зависимость потребляемой мощности образцов МКГМ в номинальном режиме при постоянной тепловой нагрузке 400 мВт на  $T_X = 80$  К и частоте вращения  $n = 30$  Гц

Лучший образец (Образец №5) по потребляемой мощности за время проведения эксперимента показал результаты практически идентичные паспортным характеристикам ближайшего зарубежного аналога. Однако, общая тенденция по данным экспериментальных исследований для одинаковых образцов разброс значений потребляемой мощности с отклонением от среднего значения 7,5 Вт ~ 25%. Связано это только с несовершенством технологий изготовления, сборки и заправки гелием. Такая же тенденция и проявляется и для зависимости потребляемой мощности от температуры О.С. (Рисунок 21). Для образца №4 лучшее время выхода на режим 200 секунд, остальные образцы не менее 300 секунд. Результаты полученные по математической модели (Рисунок 22) в области температур ниже 100 К практически совпадают с данными эксперимента.

$T_x, K$

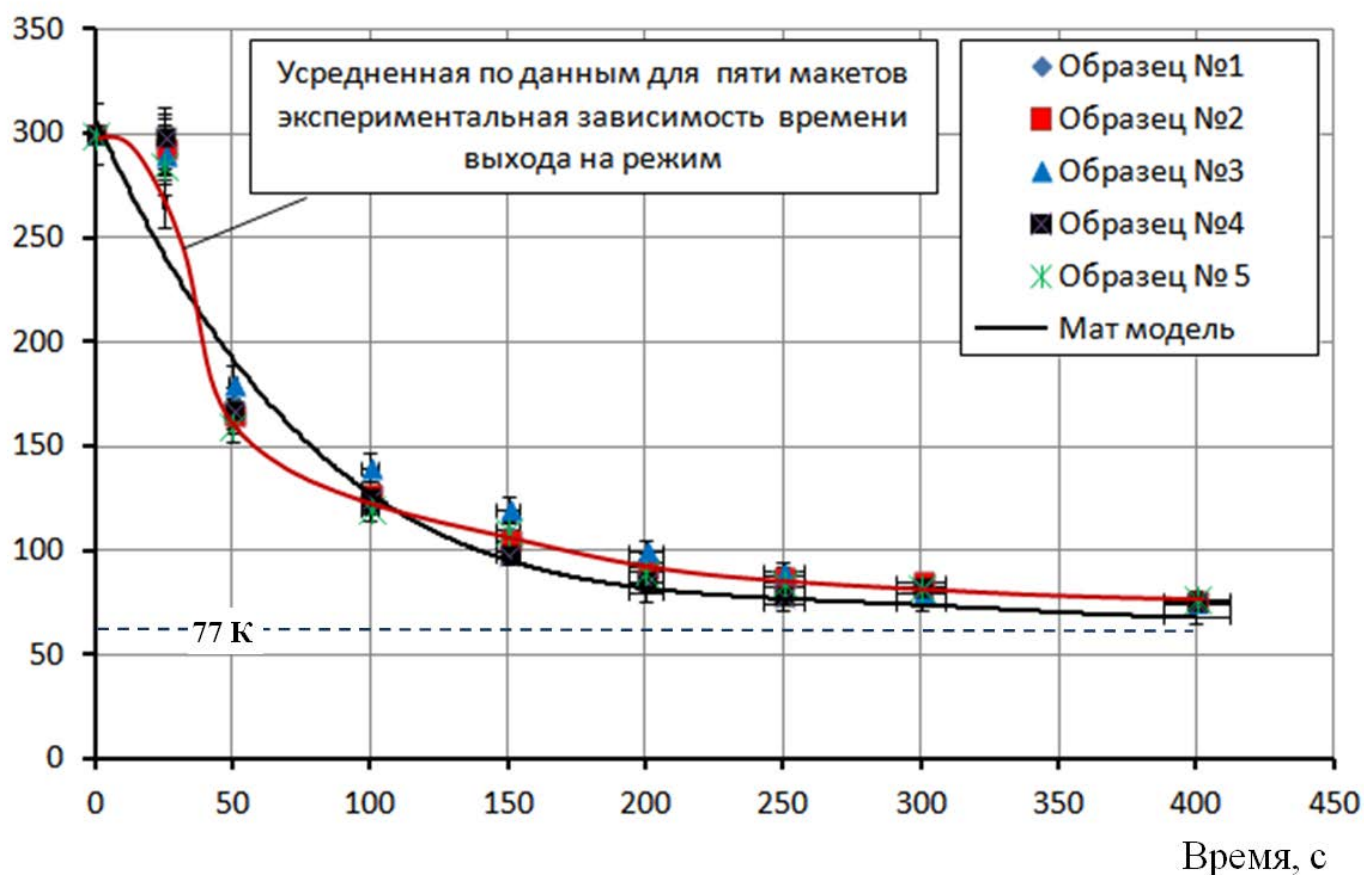


Рисунок 22. Зависимость времени выхода на режим (достижения температуры 80K) образцовых макетов от времени при частоте 30 Гц, давлении заправки 2,8 МПа,  $T_{O.C.} = +23^{\circ}C$ ,  $Q_x = 0$  Вт.

Отклонение расчетного времени выхода на режим от экспериментального от 3 до 8%. В области температур выше 120 К отклонение составляет от 7 до 10 %. В области температур от 220 К до 300 К характер расчетной зависимости температуры на холодном конце от времени работы существенно отличается от экспериментальных результатов. Возможно это связано с инерционностью датчиков температуры, которая особенно существенно проявляется в начальный момент работы микромашины, в течении первых 30 секунд. По результатам ресурсных



испытаний наиболее удачных макетов МКГМ (тестовые исследования для 5 макетов) была проведена сравнительная оценка вероятности безотказной работы макетов МКГМ от времени работы.

Оценка проводилась методом МФТГА, описанным в третьей главе. Результаты расчетов, полученные в ходе численных экспериментов и результаты статистической обработки тестовых экспериментов на образцах МКГМ представлены на Рисунке 23. Экспериментальные данные для времени работы больше 2000 часов получены в ходе ускоренных испытаний с пересчетом значений на нормальные условия. В качестве базовой зависимости для построения вероятностных зависимостей применен закон Вейбулла. Коэффициенты, определяющие вид вероятностных расчетных зависимостей определялись вариационным подбором под результаты расчета.

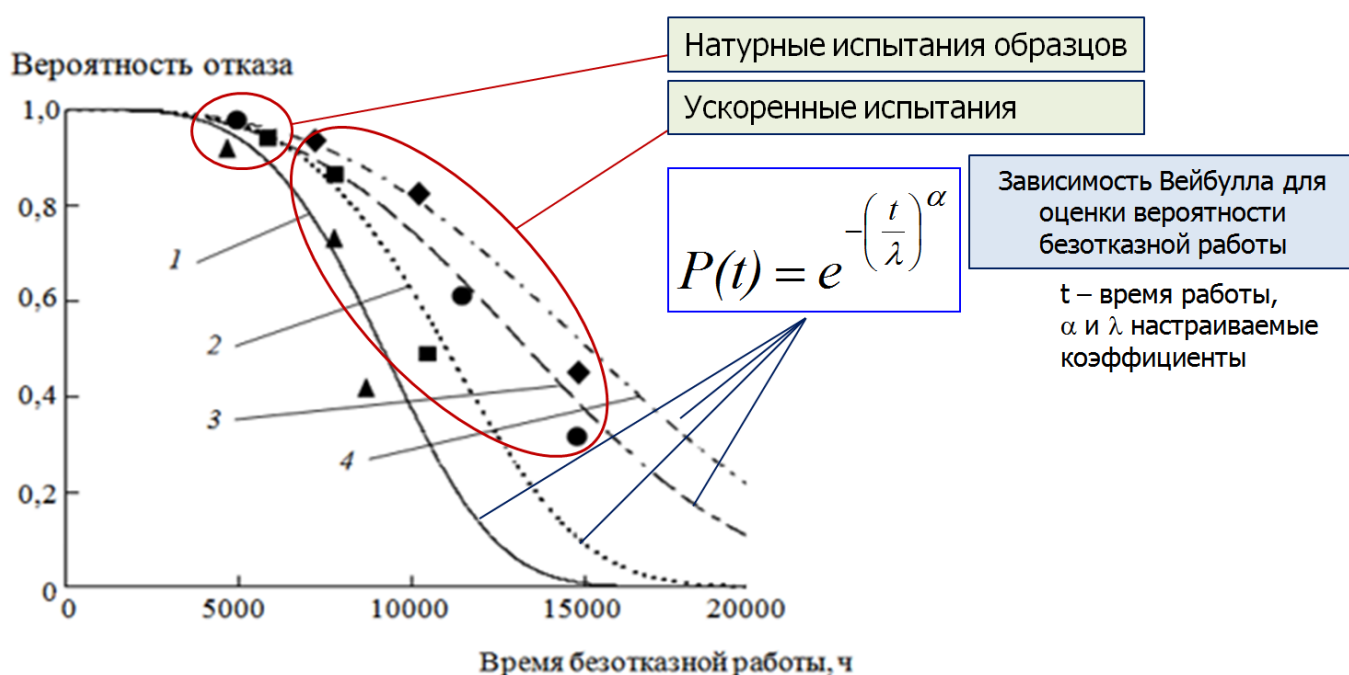


Рисунок 23. Сопоставление расчетной вероятности отказа (сглаженные кривые) с результатами тестовых экспериментов (▲; ■; ●; ◆) при давлении заправки 3МПа): 1)  $n = 50$ Гц; 2)  $n = 40$ Гц; 3)  $n = 30$ Гц; 4)  $n = 20$ Гц

Оценка вероятности отказа для значений времени безотказной работы выше 10000 часов методом МФТГА позволяет прогнозировать вероятность выхода из строя образца МКГМ, однако относительная погрешность между расчетным и экспериментальным значениями времени безотказной работы увеличивается с 8% до 15%. Это объясняется отсутствием статистики по натурным экспериментальным исследованиям на действующих свыше 5000 часов макетах МКГМ. Эта погрешность может быть снижена за счет накопления статистических данных по рискам и отказам деталей и узлов сборки МКГМ.

## **Выводы**

1. Сформулирована концепция комплексного моделирования процессов в МКГМ с учетом особенностей конструктивного исполнения составных узлов. Впервые проведен поузловой анализ энергетических потерь в МКГМ и создана модель численной оценки влияния геометрических параметров МКГМ на затраты энергии;
2. Впервые разработан метод структурирования, описания и аналитического определения суммарных энергетических потерь в узлах МКГМ, позволяющий оценить связь конструктивного исполнения узлов МКГМ и значения энергетических потерь в этих узлах. Проанализированы известные и созданы новые методы расчета и оптимизации МКГМ, применительно к решению задач криостатирования в системах навигации;
3. Предложен и реализован метод многофакторного анализа для поиска рациональных вариантов конструктивного исполнения узлов МКГМ и минимизации энергетических затрат;
4. Впервые выполнено комплексное моделирование работы МКГМ, с учетом современных цифровых технологий, на основе динамических расчетных сеток, позволяющее определить влияние геометрии и материала регенератора на ресурсные и энергетические характеристики МКГМ;
5. Разработана концепция формирования пористой структуры регенератора МКГМ с заданными разработчиком параметрами (пористостью, проницаемостью) для обеспечения оптимальных теплообменных и гидродинамических характеристик.
6. Экспериментально установлено, что в пористой структуре регенератора МКГМ фактор трения может быть описан корреляцией Эргуна с относительной погрешностью не более 15%.
7. Создан экспериментальный образец МКГМ, реализующий обратный цикл Стирлинга и позволяющий проводить натурные ресурсные испытания с различными сборными конструкциями холодного блока в диапазоне давлений заправки от 1,5 до 3,6 МПа, температур окружающей среды от -400С до +800С и полной холодопроизводительности до 0,6 Вт на температурном уровне 77К.
8. Получены новые экспериментальные результаты о влиянии давления заправки, рабочей частоты, пористости и высоты регенератора на время наработки на отказ для МКГМ.
9. Определены основные направления и разработаны рекомендации для создания и совершенствования МКГМ, предназначенных для охлаждения датчиков фотоприемных устройств систем навигации и связи с тепловыделениями на уровне 0,15-0,25 Вт.

### **Основные работы по теме диссертации:**

1. Навасардян Е.С., Архаров И.А. Математическая модель процесса конденсации на наружной поверхности трубы с продольными ребрами // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. №11. С.9-13 (0,25п.л./0,15п.л.)
2. Навасардян Е.С., Архаров И.А. Моделирование Процесгов тепло-массопередачи на регулярных насадках колонн дистилляционных установок // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2006. № 9. С. 22-25 (0,19п.л. /0,15п.л.)
3. Архаров И.А., Пуртов С.Н., Навасардян Е.С. Физические свойства смеси неон – гелий // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. № спецвыпуск. С. 57-60 (0,18п.л. /0,1 п.л.)
4. Навасардян Е.С., Архаров И.А., Антонов Е.А. Моделирование работы микрокриогенной машины, работающей по обратному циклу Стирлинга // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 6. С.107-115 (0,5п.л. /0,25 п.л.)
5. Cryogenic engineering, production and use of industrial gases, vacuum engineering: cost optimization in designing, modern cryogenic complexes of large superconductor systems / E.S. Navasardyan [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. T.51. №1. С.26-32 (0,38п.л. /0,27 п.л.)
6. Моделирование процессов в микрокриогенной газовой машине /Е.С. Навасардян [и др.] // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. №10. С. 3-6 (0,25п.л./0,15п.л.)
7. Navasardyan E.S., Arkharov I.A., Simakov M.V. Microcryogenic Gas Machines in Strategic Satellite Navigation, Surveillance, and Communications Systems // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 51. С.765-770 (0,5п.л. /0,3п.л.)
8. Навасардян Е.С., Паркин А.Н., Кулик В.В. Обработка методики численного моделирования элементов микрокриогенных газовых машин с применением программного комплекса Ansys Fluent на примере вязкого течения в канале малого диаметра с теплоотдачей // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. №8. С. 14-19 (0,5п.л. /0,25п.л.)
9. Modeling of Processes in Microcryogenic Gas Cooler / E.S. Navasardyan [et al.] // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 51. С. 649 – 655 (0,38п.л./0,25п.л.)
10. Навасардян Е.С., Архаров И.А., Нагимов Р.Р. Задачи и развитие методов динамического моделирования криогенных систем // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2016. № 7. С. 24-27 (0,19п.л./0,08п.л.)
11. Navasardyan E.S., Arkharov I.A., Nagimov R.R. Problems and Development of Methods of Dynamic Simulation of Cryogenic Systems // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 52 , Issue 7. С. 476 – 480. (0,25п.л. /0,15п.л.)
12. Navasardyan E.S., Parkin A.N., Kulik V.V. Numerical Modeling Procedure for Micromachined Cryogenic Cooler Elements Using Ansys Fluent Software and Viscous Flow in a Small-Diameter Channel with Heat Transfer as an Example // Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Vol. 52 , Issue 7. С. 531 – 538 (0,43п.л. /0,3п.л.)
13. Навасардян Е.С., Паркин А.Н., Кулик В.В. Численное моделирование пористой насадки регенератора микрокриогенных газовых машин [Электронный ресурс] //



Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. №8. Режим доступа: <http://engjournal.ru/cata.../pmce/mdpr/1646.htm> (0,93п.л./0,65п.л.)

14. Навасардян Е.С., Архаров И.А., Глухарев А.С. Интенсификация теплообмена в аппаратах холодильных и криогенных установок [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. 2017. №5. Режим доступа: <http://engjournal.ru/cata.../pmce/mdpr/1618.html> (0,93п.л./0,65п.л.)

15. Navasardyan E.S., Arkharov I.A., Parkin A.N. Modeling and investigation of heat exchange of high temperature superconductive conductors in liquid nitrogen medium [Электронный ресурс] // Proceedings of the 23rd IIR International Congress of Refrigeration. Prague. 2011. Режим доступа: <http://www.iifiir.org/medias/medias.aspx?instance=EXPLOITATION&SETLANGUAGE=EN> (0,25п.л./0,15п.л.)

16. Навасардян Е.С., Архаров И.А., Паркин А.Н. Опыт применения современных систем инженерного анализа для прогнозирования характеристик основных рабочих элементов микрокриогенных газовых холодильных машин в процессе их проектирования: Тезисы докладов Двенадцатой Международной научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития». Москва - ЦВК «Экспоцентр» 27–28 октября 2015 года. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана С. 7-9. 2016 г. (0,25п.л./0,15п.л.)

17. Navasardyan E.S., Arkharov I.A., Parkin A.N. et al. Numerical modeling of porous nozzles for regenerator of Stirling cryocooler [Электронный ресурс] // Proceedings of the 14th IIR International Conference: Dresden, Germany. - 2017. - Режим доступа: <http://www.iifiir.org/medias/medias.aspx?instance=EXPLOITATION&SETLANGUAGE=EN> (0,19п.л./0,08п.л.)