

На правах рукописи

УДК 621.59

Чехович Вячеслав Алексеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ В КРИОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ МАШИНАХ
С ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТРУБОЙ

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 имени 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.Королёва", профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей
Довгялло Александр Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры криогенных машин, установок и электрогазовой техники ФГКВОУ ВПО Военного Учебно-Научного Центра ВВС "ВВА"
Кокарев Александр Михайлович

Ведущая организация: Государственный Научный Центр РФ
Акционерное общество "Научно-производственное объединение "Орион" (ГНЦ АО "НПО "Орион")

Защита состоится « 16 » октября 2024 г. в 14:00 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 можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

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

Автореферат разослан « 31 » июля 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.331.22,
кандидат физико-математических наук

А.А.Протопопов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Криогенные газовые машины, работающие по циклу Стирлинга, являются уникальными и незаменимыми криогенными агрегатами во многих технических и машиностроительных отраслях. Они уникальны тем, что способны производить процесс криостатирования объектов на температурных уровнях от 4,2 до 120 К с холодопроизводительностью от 0,2 Вт до 1 кВт, используя постоянную массу криоагента.

Проблема изготовления и модернизации таких агрегатов актуальна по нескольким причинам. Во-первых, разработанное в настоящее время математическое описание термодинамических процессов в криогенных газовых машинах с пульсационной трубой недостаточно полно описывает реальную специфику их работы ввиду того, что геометрические конфигурации аппаратов, входящих в состав криогенных газовых машин с пульсационной трубой (регенератор, аппараты внешнего теплообмена и др.) взаимозависимы в плане полной эффективности, и, как следствие величины термодинамического коэффициента полезного действия. Иными словами, из созданных на сегодняшний день физических и математических моделей для описания термодинамических процессов, происходящих в газовом столбе криогенной газовой машины с пульсационной трубой, не существует модели, которая могла бы учесть особенности влияния тепловых и гидравлических характеристик на характер реализации термодинамического цикла, протекающего в регенераторах криогенных газовых машин с пульсационной трубой, которые можно считать пористыми структурами. Во-вторых, в пористых структурах также присутствует сложность анализа гидравлики и теплообмена – течение происходит при относительно низких значениях чисел Рейнольдса (от 1 до 250), при этом имеется риск образования ламинарно-турбулентного перехода с интенсивным перемешиванием масс. Кроме этого, технология изготовления регенераторов сложна и малейшее её нарушение может привести к значительному ухудшению эффективности пористой структуры и криогенной газовой машины с пульсационной трубой в целом. С учётом современных технических требований необходим поиск способов повышения надёжности и компактности, а также уменьшения массы криогенной газовой машины с пульсационной трубой.

Существует множество машиностроительных отраслей, где используются криогенные газовые машины: экология, медицина, транспорт, энергетика, биология и др. Многие объекты криостатирования требуют не только криогенного уровня температур в связи с законом смещения Вина, но и низкий уровень вибрации, который не производит негативного влияния на эксплуатацию изделия верхнего уровня. При этом ресурс систем обеспечения режима криостатирования должен быть

устремлён к максимально возможному значению. Техническим решением, которое бы позволило существенно увеличить ресурс криогенной газовой машины и снизить уровень вибраций на объекте криостатирования, является использование в качестве объёма расширения пульсационной трубы взамен классического физического вытеснителя. Однако проблемами, которые на сегодняшний день не дают возможности довести до совершенства процесс проектирования криогенной газовой машины с пульсационной трубой, являются: отсутствие универсальной методики расчета, которая могла бы применяться для широкого круга условий работы криогенной газовой машины с пульсационной трубой на стадии проектирования геометрических размеров её полостей и рассмотрении её внутреннего объёма как единого целого, недостаточная отработка технологии изготовления составных частей рассматриваемых изделий, недостаточно полное описание термодинамических процессов, происходящих в криогенной газовой машине с пульсационной трубой, а также необходимость поиска способов повышения надёжности, компактности и улучшения массогабаритных характеристик.

Следует упомянуть отсутствие исследований в области криогенных газовых машин в 90-е годы из-за недостатка финансирования, что повлияло на сроки проектирования таких агрегатов и их производство в РФ. Основные страны-разработчики криогенных газовых машин, а именно: США, Япония, Великобритания, Франция, Израиль, Нидерланды используют собственные расчётные программы, но позволяющие рассчитывать геометрию каждого узла, аппарата и элемента машины лишь по отдельности. К ним относятся: SAGE, REGEN, DeltaEC. Выше указанные государства организуют узкопрофильные международные конференции, а также разрабатывают собственные стандарты испытаний криогенных газовых машин и создают базы данных по наработке на отказ. В рамках же отечественных разработок криогенных газовых машин ведется их производство под узкопрофильные задачи на базе конструкции зарубежных аналогов.

Известно множество методик расчёта криогенных газовых машин, такие, как Г. Уокера, Е.И. Микулина, А.Д. Сулова, А.К. Грезина, В. И. Карагусова, однако в основе этих методик лежит модель Шмидта, и они позволяют вести расчет только для каждой полости машины в отдельности. Методики расчета криогенных газовых машин разработчиков в Китае и Японии основаны на программах типа ANSYS CFX и ANSYS Fluent – это сложные и «тяжелые» для расчета методики, в основе которых лежат исключительно эмпирические, статистически отобранные данные для применения в качестве начальных и граничных условий на всех этапах моделирования.

Единственная на сегодняшний день методика, которая включает попытку описания связей между объемами полостей криогенных газовых

машин с пульсационной трубой – это методика Рэдебоу, однако данная методика не учитывает потерь холодопроизводительности и прироста мощности потребления от реальных факторов: гидравлическое сопротивление, межэкранная (эффективная) теплопроводность пористой структуры, конвекция с обечайкой, тепловые мосты и диффузия. Программа DeltaEC производит расчёт методом акустических проб по теории Ротта, недостатком которого является высокая погрешность расчёта при частотах пульсаций ниже 10 Гц. Без методики оценочного расчета невозможно сформировать блок исходных данных для дальнейшей разработки и проектирования криогенных газовых машин с пульсационной трубой.

Выше указанная проблема является на сегодняшний день актуальной и требует комплексного подхода к её решению, один из которых предлагается в рамках данной работы.

Цель работы

Создание методики расчёта термодинамических процессов в КГМ с пульсационной трубой.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Создание физической модели для расчёта и оптимизации криогенных газовых машин (КГМ) с пульсационной трубой, учитывающей классические базовые зависимости для: фактора трения, критерия Нуссельта и эффективной теплопроводность для пористых структур регенератора.
2. Анализ расчётных зависимостей для предложенной физической модели и выбор расчетных зависимостей для дальнейшего использования.
3. Создание математической модели и построение базы данных рабочих параметров и конфигураций полостей машины.
4. Создание экспериментального макета КГМ с пульсационной трубой и стенда для верификации разработанной методики.

Научная новизна

1. Впервые для криогенных газовых машин с пульсационной трубой создана модель газовой полости в виде многослойной структуры (модель расслоения газового столба), учитывающая влияние радиального направления течения рабочего вещества, структуру регенератора, диффузию внутри газового столба, концентрацию примесей в рабочем веществе и переменный фазовый сдвиг.
2. Предложена новая диаграмма распределения газовых фаз в качестве альтернативы диаграмме Шмидта.
3. На основании новой модели построена универсальная диаграмма для определения ресурсоёмкости криогенных газовых машин на стадии проектирования.

4. Получены соотношения для расчета области допустимых значений проектных параметров криогенных газовых машин, приведенные к единому параметру z , характеризующему типоразмер компрессорной полости криогенной газовой машины.

5. Разработана методика построения волнометрической схемы криогенной газовой машины, позволяющая помимо одноступенчатых криогенных газовых машин рассчитывать и двух- и трёхступенчатые.

Практическая значимость работы

1. Спроектирован и произведён экспериментальный образец криогенной газовой машины Стирлинга с пульсационной трубой, который испытывался при различных частотах пульсаций.

2. Разработан пакет рекомендаций для повышения эффективности криогенной газовой машины Стирлинга с пульсационной трубой, исходя из полученной в предлагаемой модели волнометрической схемы и результатов её испытаний.

3 – Модели, предлагаемые в работе, способны существенно сократить срок разработки криогенной газовой машины Стирлинга с пульсационной трубой.

Внедрение результатов работы

Разработанная методика расчёта термодинамических процессов в криогенных газовых машинах с пульсационной трубой используется в учебном процессе кафедры холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается путём использования поверенных СИ, проверенных методов измерения физических величин, а также путём сравнения результатов натурных экспериментов с результатами численных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту

1. Физическая модель «МРГС», авторство которой зарегистрировано во ФСИС (Роспатент).

2. Диаграмма эволюционирования фаз.

3. Диаграмма ресурсоёмкости КГМ.

Методы исследования

В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования проведены на кафедре «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э.Баумана. Исследования состояли в применении программного пакета ANSYS Fluent для анализа гидродинамики, а также программного пакета MATLAB для создания и валидации модели расслоения газового столба (далее – МРГС). Экспериментальные исследования проведены на базе АО «Московский завод «Сапфир», г. Москва. Обработка и сравнение полученных в

результате эксперимента и расчёта данных производилась с применением дисперсионных методов и методов математической статистики.

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:

1. XII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, 2019 г.
2. XVII международная конференция международного института холода (IIR), г. Дрезден (Германия), 2023 г.
3. «XIII научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов», ГНЦ АО НПО «Орион», г. Москва, 2024 г.

Личный вклад автора

1. Разработан метод анализа изменения фаз термодинамических процессов в криогенных газовых машинах с пульсационной трубой, а также показательно отражён в диаграмме эволюционирования фаз.
2. Разработан метод выбора фазосдвигающего механизма в целях увеличения ресурсоёмкости криогенных газовых машин, а также показательно отражён в диаграмме ресурсоёмкости.
3. Разработан метод расчёта нестационарных процессов в криогенных газовых машинах с помощью факторной вариации эмпирической плотностной характеристики газового столба.
4. Разработан метод отбора оптимальной волюметрической схемы криогенной газовой машины.
5. Найдены достоверные данные о корреляциях эффективной теплопроводности, критерия Нуссельта и фактора трения для пористых структур различного типа.

Благодарности

Автор выражает благодарность преподавателям, доцентам и профессорам кафедры «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» за консультирование и помощь в исследовательской работе, а также коллективу АО «Московский Завод «Сапфир» за оказание помощи при проведении экспериментальных исследований.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и заключения. В составе работы: 290 страниц, из которых 130 страниц основного текста, 77 рисунков, 33 таблицы, 140 литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена область исследования, обоснована актуальность темы диссертации и обозначена цель данной работы.

В главе 1 проведён обзор известных на сегодняшний день криокулеров с пульсационной трубой, пористых структур для регенераторов и корреляций для их характеристик, таких, как теплоёмкость, эффективная теплопроводность, критерий Нуссельта и фактор трения. Также рассмотрены наиболее значимые эксперименты, в рамках которых были испытаны регенераторы на их эффективность.

В главе 2 произведён CFD-анализ пористых структур методом накопления элементарных сегментов. Анализ показал результаты, приведённые в Таблице 1. Средняя погрешность по всем параметрам составила не более 20 %. В рамках анализа модели первого порядка расчётным путём скоррелированы эмпирические зависимости для основных параметров волуметрических схем КГМ. Результаты коррелирования приведены в Таблице 2. В рамках расчёта в модели первого порядка были получены параметры волуметрической схемы для КГМ Стирлинга с пульсационной трубой с типоразмером компрессора Z7,32 мм. Схема приведена на Рисунке 1.

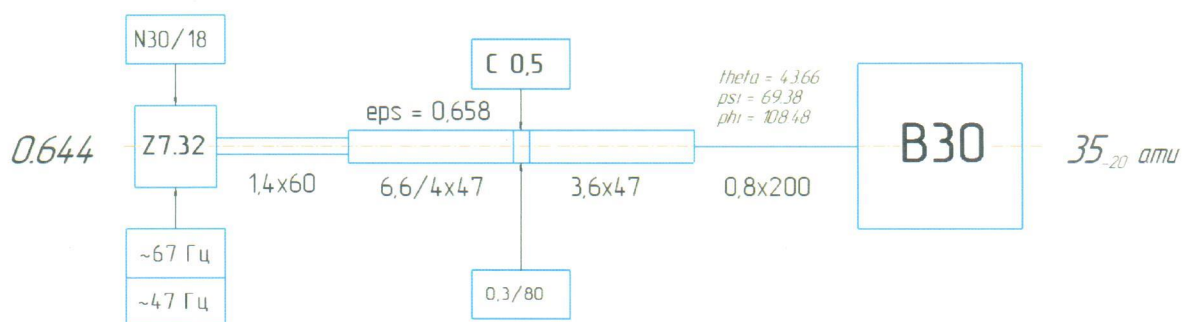


Рисунок 1 – Волуметрическая схема КГМ

Для данной схемы была получена диаграмма эволюционирования фаз, приведённая на Рисунке 2, её сечение для конкретного уровня температур показано на Рисунке 3. Также была получена диаграмма ресурсоёмкости, приведённая на Рисунке 4.

Диаграмма эволюционирования фаз – это альтернатива диаграмме Шмидта, которая выполняется с целью отобразить реальные фазы цикла Стирлинга и вычислить времена протекания процессов в нем с учётом изменения во времени температуры криостатирования.

Таблица 1 – Погрешности для корреляций

Пористые структуры и критерии	Корреляции - найденные и полученные в результате анализа	Средняя погрешность
Сетки		
$\xi(Re)$	$\xi(Re) = \frac{102}{Re} + 0.543 \text{ (Юан)}$ $\xi(Re) = \frac{110}{Re} + 0.65 \text{ (результат)}$	5 %
$Nu(Re, Pr)$	$[1 + 1.16(RePr)^{0.66}] \varepsilon^{2.61} \text{ (Ибрагим)}$ $0.6(RePr)^{0.58} \text{ (результат)}$	5 %
λ_{eff}	$\lambda_{eff} = \lambda_s \left(\frac{0.81d_1^2}{d_1 + 2d_2 \sin(2\vartheta)} \right) \left(\frac{1}{d_1 + 2d_2 \cos(2\vartheta)} + \frac{d_1 + 2d_2 \cos(2\vartheta)}{2d_1(d_1 + d_2)} \right) \text{ (Ожеховский)}$ $A_{h0} = (0.7 \dots 1)(1 - \varepsilon) \text{ (результат)}$	10 %
Сферы		
$\xi(Re)$	$\frac{360}{Re} \text{ (Козени)}$ $\frac{315.5}{Re} + 1.75 \text{ (результат)}$	20 %
$Nu(Re, Pr)$	$2 + 0.4Re^{0.5}Pr^{0.4}(1 + 0.15Re^{0.17}) \text{ (Витакер)}$ $0.4(RePr)^{0.66} \text{ (результат)}$	10 %
λ_{eff}	$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_f}$ $= \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_f} \right)^{0.28 - 0.757 \lg(\varepsilon) - 0.057 \lg(\frac{\lambda_s}{\lambda_f})} \text{ (Крупичка)}$ $A_{h0} = 0.1307 - 0.2326\varepsilon \text{ (результат)}$	20 %
Путанка		
$\xi(Re)$	$\frac{150}{Re} + 1.75(1 - \varepsilon) \text{ (Эргун)}$ $\frac{131}{Re} + 1 \text{ (результат для рядных сфер)}$	15 %
$Nu(Re, Pr)$	$2 + 0.4Re^{0.5}Pr^{0.4}(1 + 0.15Re^{0.17}) \text{ (Витакер)}$ $0.5(RePr)^{0.62} \text{ (осреднённый результат)}$	15 %
λ_{eff}	$A_{h0} = \left(\frac{1}{50} + \frac{T_f}{1000} \right) \text{ (Гамильтон – Кросс)}$	15 %

Таблица 2 – Аппроксимации для проектных параметров КГМ

Параметр	Формула
Главное объёмное отношение (ГОО)	$\beta_z = 0,33z^{0,33}$
Максимальная частота пульсаций (Гц)	$n_{max} = 250z^{-0,8}$
Минимальная частота пульсаций (Гц)	$n_{min} = 150z^{-0,8}$
Максимальная потребляемая мощность (Вт)	$N_{max} = \frac{1}{4}z^{\pi-1}$
Мощность, потребляемая при криостатировании (Вт)	$N_{min} = \frac{3}{20}z^{\pi-1}$
Отношение хода поршня компрессора к диаметру	$\Psi_z = \frac{1}{2} \arctg\left(\frac{z}{25}\right)$
Относительный объём ГАВТ	$\beta_{eh} = \frac{1}{3}z^{-1/6}$
Гидравлический диаметр ГАВТ	$d_{eh} = \frac{z}{5}$
Относительный объём пористой части регенератора	$\beta_r = 1.5$
Отношение длины к диаметру для пульсационной трубы	$\Psi_{pt} = \frac{35}{\sqrt{z}}$
Относительный объём ХАВТ	$\beta_{ec} = \frac{1}{6}z^{-1/3}$
Холодопроизводительность на 80 К (Вт)	$Q_c = \frac{1}{2500}z^3$
Диаметр инерционной трубы (мм)	$L_{it} = 0,12z$
Длина инерционной трубы (мм)	$d_{it} = 3,4z^2$
Угол сдвига «давление-объём» (град) (показатель длительности изохорного процесса)	$\theta = 30 + \frac{100}{z}$
Угол сдвига между суммарным объёмом и минимальным объёмом детандерной полости	$\psi = 30 + 50z^{-0,12}$
Угол сдвига между максимальными объёмами полостей	$\varphi = 100 + \frac{14}{3}z^{0,3}$
Типоразмер ресивера	$B = \pi(z + 2)$
Минимальное давление заправки (атм)	$P_{f0min} = 20 - (z - 7)e^{(1-0,1z)}$
Максимальное давление заправки (атм)	$P_{f0max} = 30 - (z - 10)e^{(1-0,125z)}$

При наличии в математической модели учёта всех возможных факторов в криогенной газовой машине с пульсационной трубой, влияющих на холодопроизводительность и потребляемую мощность, имеется возможность сравнительной оценки различных вариантов

изменения волюметрической схемы, которая получена на предыдущем этапе в модели первого порядка. Это позволяет существенно сократить время проектирования КГМ.

Диаграмма представляет собой трёхмерную зависимость в цилиндрической системе координат положения точки максимального расхода в газовом столбе от фазы цикла (угловая координата), номера дискрета столба (радиальная ось и температуры криостатирования (ось аппликата).

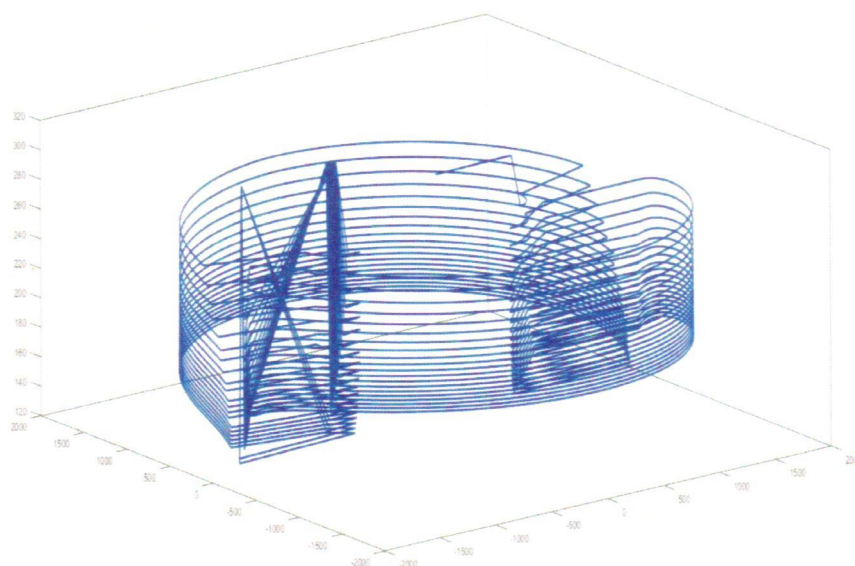


Рисунок 2 – Диаграмма эволюционирования фаз

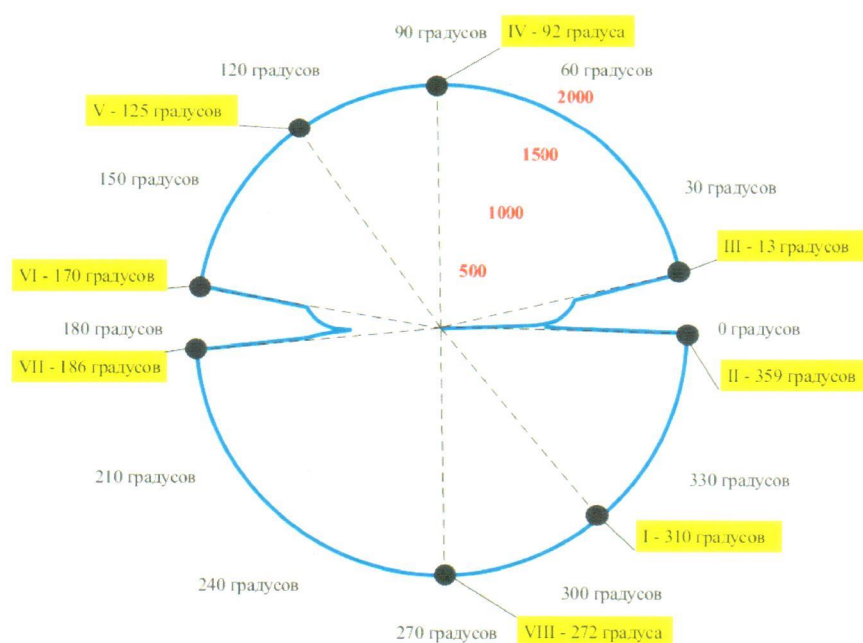


Рисунок 3 – Сечение диаграммы эволюционирования фаз

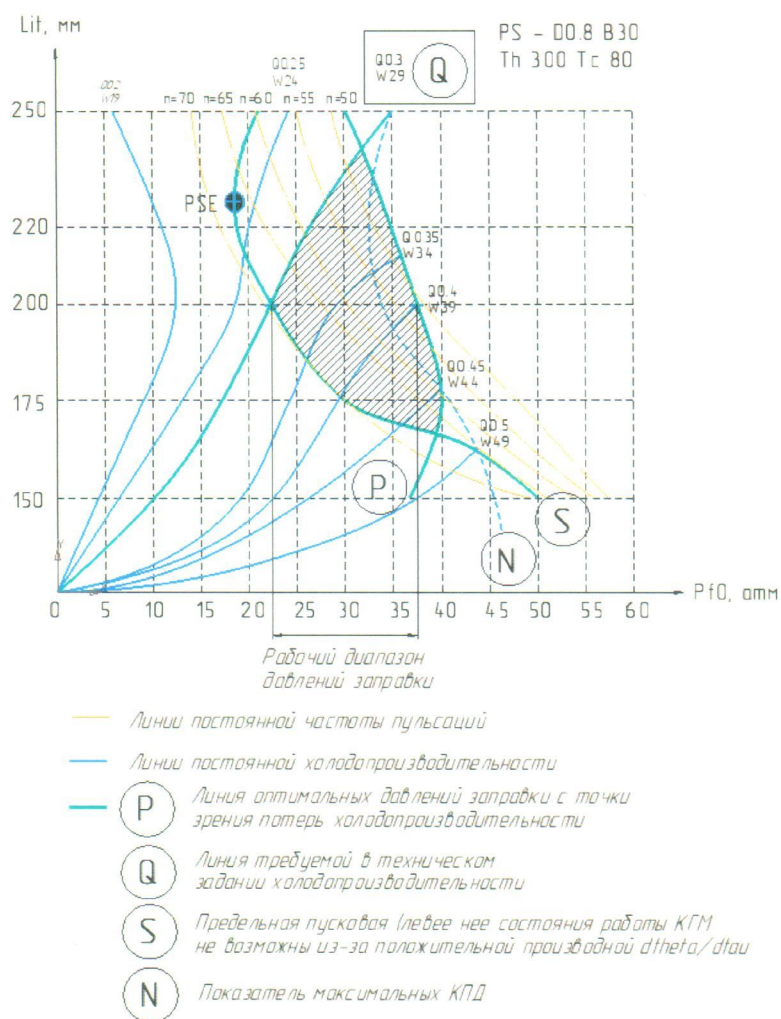


Рисунок 4 – Диаграмма ресурсоёмкости КГМ

Диаграмма ресурсоёмкости КГМ – это диаграмма, которая способна показать влияние термодинамического фактора на ресурс. Здесь играют главную роль минимальное и максимальное значения давления заправки рабочего тела. Ресурс КГМ в целом зависит от пяти времен достижения следующих состояний:

- время до падения давления заправки ниже нижнего предела, которое зависит исходно от количества частиц износа механических частей, изменяющегося во времени. Данное время можно определить, зная результаты механических испытаний поршней ИП и подставив данную зависимость в формулы 2.150-2.158;
- время до полного износа механической части;
- время исчерпания работоспособности пусковой электроники, определяемое циклограммой работы КГМ в составе изделий верхнего уровня и, в частности, количеством включений;
- время исчерпания работоспособности рабочей электроники, определяемое согласно расчёту надёжности по γ -коэффициенту отказа;

– время выхода из строя вследствие воздействия спецфакторов (внешняя вибрация, химическая активность окружающей среды, ионизирующее излучение и т.п.)

Минимальное время из выше приведённых является ресурсоёмкостью КГМ. В работе предложена методика построения диаграммы ресурсоёмкости.

В главе 3 приведена последовательность экспериментальной отработки КГМ с пульсационной трубой, которая проводилась на АО «МЗ Сапфир». Эксперимент проводился согласно схеме на Рисунке 5. Внешний вид испытуемого криокулера приведён на Рисунке 6. Перед началом эксперимента был проведён замер параметров окружающей среды – температура 295,3 К, относительная влажность воздуха – 43 %. Целевые параметры эксперимента: холодопроизводительность – 0,25 Вт/80 К, максимальная потребляемая мощность – 20 Вт, давление заправки – 35 атм, частота пульсаций – 54 Гц, ГОО – 0,644. Криокулер был заправлен гелием газообразным марки «А» согласно ТУ 0271-135-31323949-2005 давлением 35 атм на заправочной станции RICOR. Начальная температура в начале пуска составляла 312 К. Было произведено подключение системы управления КГМ к источнику питания и мультиметру, на котором снимались показания напряжения ($U = 20 \text{ В}, 24 \text{ В}, 28 \text{ В}$), переводимые в дальнейшем в температуру криостатирования. Техническая возможность системы управления КГМ позволила осуществить три пуска при следующих частотах пульсаций рабочего вещества: 12 Гц, 18 Гц и 23 Гц. Пуски производились без дополнительной нагрузки на ХАВТ, то есть только при наличии собственного теплопритока имитатора нагрузки.

В результате были получены графики зависимости температуры криостатирования от времени, а также значения стационарных температур криостатирования. Была установлена зависимость температуры криостатирования испытанной КГМ от частоты пульсаций и, как следствие, потребляемой мощности. Было получено, что для достижения уровня температуры криостатирования в 80 К без нагрузки необходимо достичь потребляемой мощности 18 Вт, что соответствует частоте пульсаций 54 Гц.

В главе 4 проведено сравнение результатов эксперимента с результатами расчёта и оценка погрешности эксперимента. Погрешности приборов, использующихся в данном эксперименте, приведены в Таблице 3. Графическая интерпретация эксперимента приведена на Рисунках 7-9. Как видно из результатов, погрешность по определению времени достижения температуры криостатирования и по определению значения этой температуры тем ниже, чем ниже температура криостатирования.

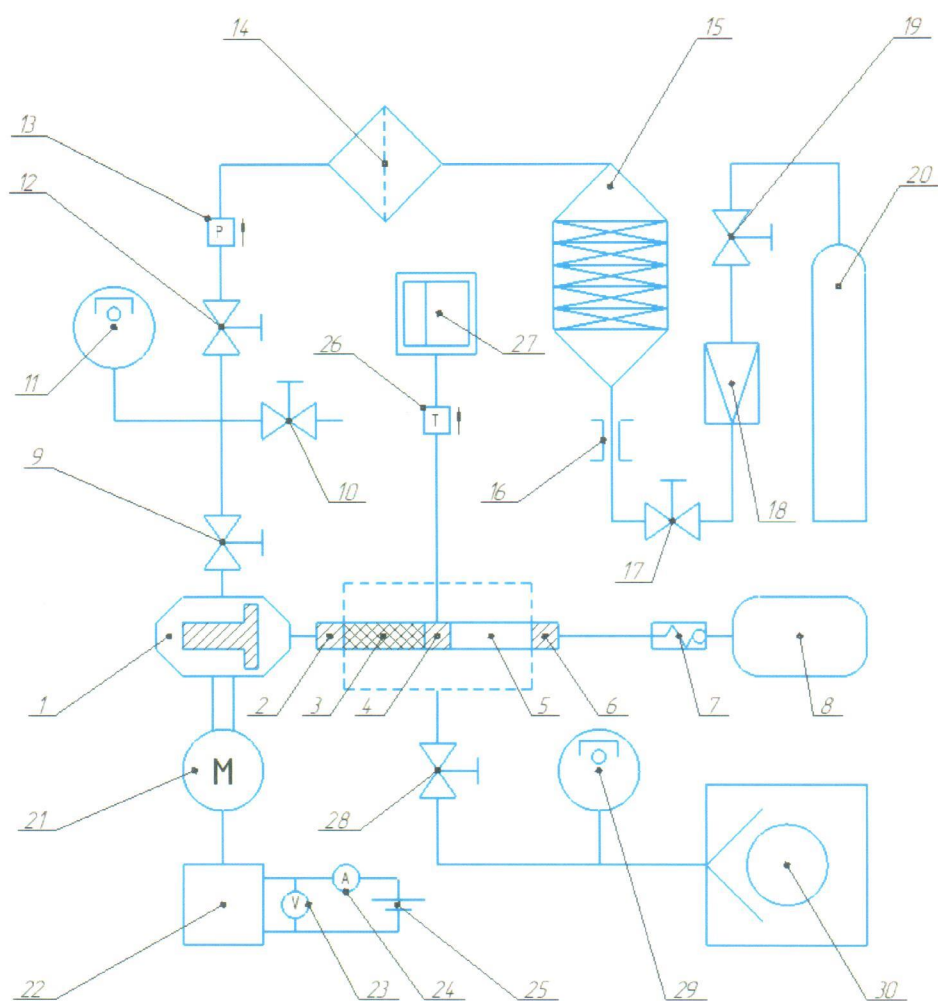


Рисунок 5 – Схема испытаний

Таблица 3 – Погрешности использованных приборов

Прибор	Особенности	Погрешность
Альтернатор	Используется зависимость частоты от напряжения	$\pm 3 \%$ по синусоиде альтернации
Источник питания	Напряжение 18-28 В	$\pm 0,5 \%$ по напряжению и $\pm 0,1 \%$ по току
Датчик температуры	По вольт-характеристике	0,05-0,25 К
Датчик давления заправки	Используется в заправочной системе RICOR	$\pm 0,3-0,5 \%$
Измеритель теплопотоков	По методике РТМ-3-1033-77	5-10 %

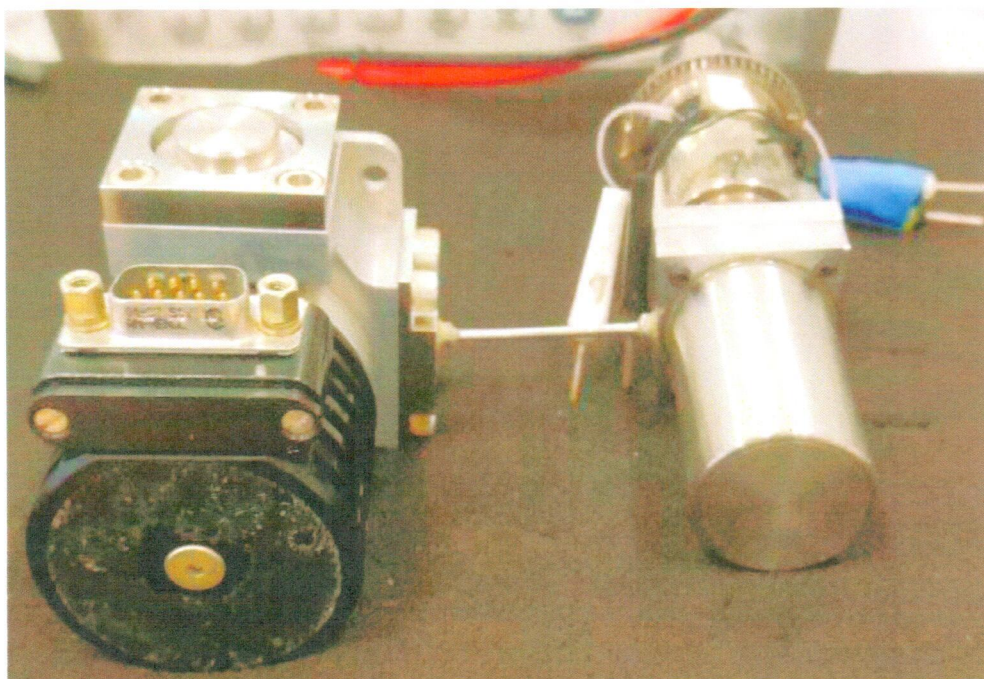


Рисунок 6 – Криокулер с имитатором тепловой нагрузки.

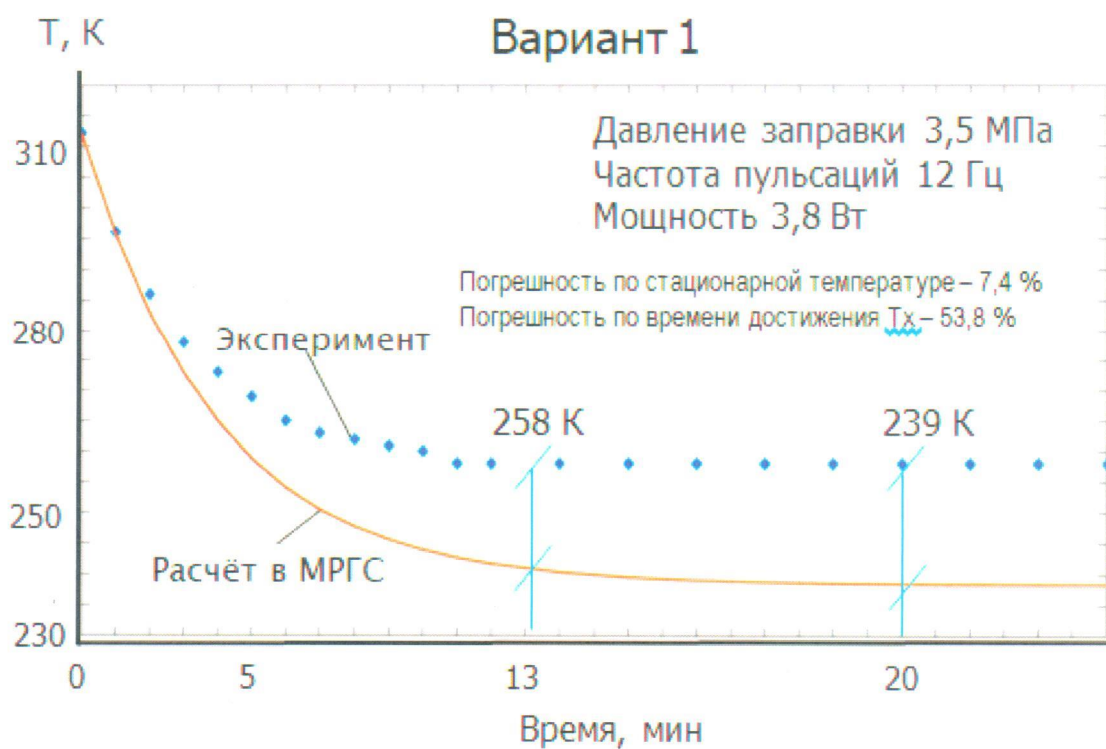


Рисунок 7 – График зависимости температуры криостатирования от времени при частоте 12 Гц

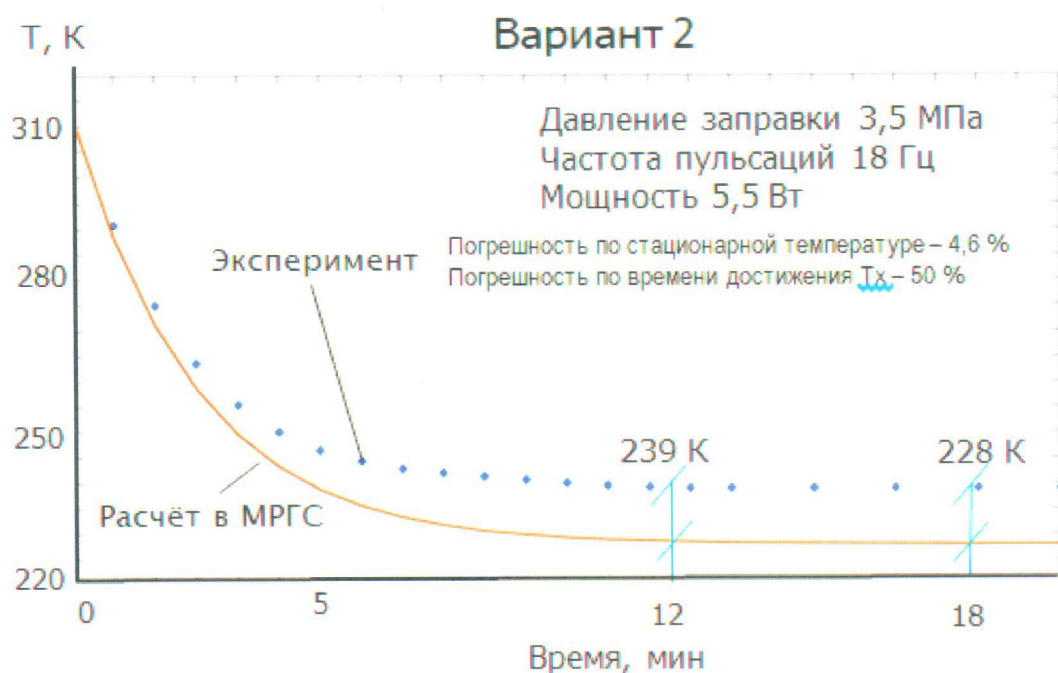


Рисунок 8 – График зависимости температуры криостатирования от времени при частоте 18 Гц

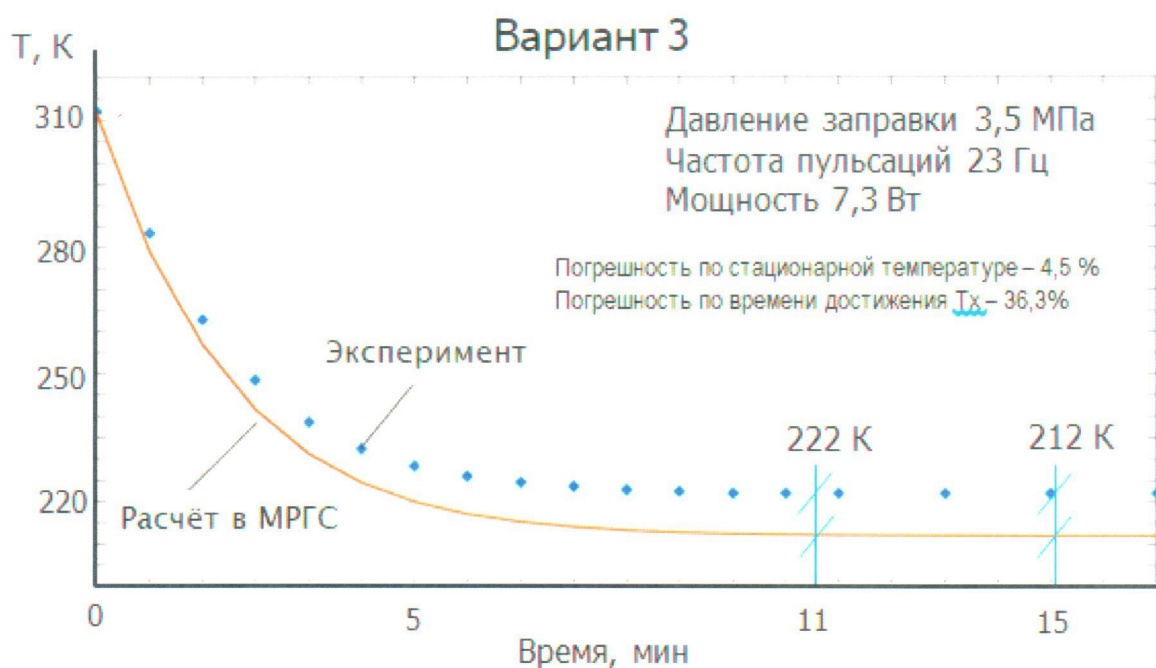


Рисунок 9 – График зависимости температуры криостатирования от времени при частоте 23 Гц

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1 Настоящий обзор показывает, что полученные наработки за весь период исследований КГМ с пульсационной трубой до сих пор требуют экспериментальных исследований и подтверждений параметров в большом объеме ввиду отсутствия эффективной математической модели для исключения заведомо неверных вариантов волуметрических схем.

2.1 Предлагаемая физическая модель расслоения газового столба в полной мере позволяет совершенствовать способ расчёта КГМ с пульсационной трубой, а также существенно сократить сроки проектирования данных устройств, поскольку:

- вместо отдельно взятого регенератора моделируется весь замкнутый газовый объём и учитывается взаимное влияние параметров соседних слоев; модель позволяет регулировать фазы открытия/закрытия ОУ в цикле Эриксона; модель позволяет на усмотрение пользователя задавать факторы, влияющие на процессы внутри регенератора и учитывать перемешивание слоёв рабочего вещества; позволяет рассчитывать КГМ с регенераторами из полиэлементных пористых структур;

- модель интегрируется в двухмерную цилиндрическую модель;

- расчёт КГМ замкнутого цикла можно произвести в 20-25 раз быстрее, чем в волуметрической схеме, построенной в ANSYS Fluent.

2.2 Установлено, что наиболее достоверными корреляциями по фактору трения являются: для сеток – корреляция Юана (5 %), для сфер – корреляция Козени (20 %). По критерию Нуссельта наименьшая погрешность наблюдается у корреляции Ибрагима для сеток (5 %) и у корреляции Витакера для сфер (10 %). Эффективную теплопроводность можно считать по формуле Ожеховского для сеток и Крупички для сфер.

Получены соотношения для комплексного фактора трения для сеток саржевого плетения и структур шахматного и рядной засыпки сферическими элементами полости регенератора от коэффициента вероятностного размещения $C(n)$ и функции свободного объема $F(u)$.

2.3 Получены эмпирические зависимости, связывающие тип и размер полости сжатия КГМ (z) с параметрами слоев в модели МРГС 1-го порядка.

2.4 Построена диаграмма ресурсоемкости, позволяющая определять для заданной волуметрической схемы КГМ термодинамическую эффективность и ресурс в единицах рабочего объёма компрессора КГМ.

3. Для испытанной КГМ с пульсационной трубой требуется система управления с возможностью реализации частоты пульсаций не менее 54 Гц, вне зависимости от возможности реализации изменения ходов поршней по датчику Холла. Как показал проведённый эксперимент, для достижения требуемого уровня криостатирования необходима мощность 18 Вт при минимальном значении частоты пульсаций 54 Гц (см. рисунок 3.7).

4. В волюметрической схеме КГМ моделью МРГС были предсказаны с определённой погрешностью следующие параметры:

- диаметр инерционной трубы $0,8 \pm 0,1$ мм;
- объём ресивера (погрешность – 3-4 %);
- длина узла охлаждения (погрешность – 1 %);
- пусковая частота пульсаций (погрешность – 12 %)

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Modeling of hydrodynamics in a porous structure of low temperature regenerator friction factor at low reynolds numbers. Chekhovich V.A. et al. // Journal of Enhanced Heat Transfer. 2018, Vol. 25, Issue 2, P. 169–180. (0,75 п.л./0,5 п.л.)

2. Чехович В.А., Навасардян Е.С. Применение модели расслоения газового столба для расчёта криогенных машин замкнутого цикла. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2022 г., № 12, С. 8-13. (0,4 п.л./0,2 п.л.)

3. Программа для расчёта термодинамических процессов в криогенных газовых машинах замкнутого цикла с пульсационной трубой. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023615109 от 10.03.23.

4. Analytical review of studies on assessing the layout impact and kinematic design of microcryocooler on its lifetime and MTTF. Chekhovich V.A. et al. // The 17th Cryogenics 2023, IIR Conference. Dresden, Germany. 2023, P. 91-97. (1,2 п.л./0,2 п.л.)

5. Чехович В.А., Навасардян Е.С. Экспериментальное исследование нестационарных процессов в разработанной КГМ Стирлинга с пульсационной трубой для верификации физической модели. // Фотосенсорика: новые материалы, технологии, приборы, производство. Труды XIII научно-практической конференции молодых учёных и специалистов. Москва, 2024. С. 78-80. (0,2 п.л./0,1 п.л.)