

УДК 621.573
EDN: EEZTOI

PACS: 07.20.Mc

Проблемы и развитие современных интегральных роторных микрокриогенных систем Стирлинга (обзор)

Д. Д. Бабенко, М. В. Банников, Е. Д. Коротаев, Г. И. Некрасов

В статье рассматривается современное состояние и текущие разработки микрокриогенных систем Стирлинга. За последние десять лет новые исследования открыли потенциал для существенного улучшения и расширения областей применения микрокриогенных машин. Рассмотрены методы компьютерного моделирования криогенных систем. Представлены и обобщены проблемы современных интегральных роторных криогенных систем Стирлинга и улучшения, внесенные в конструкцию коммерческих криогенных машин. Также представлена общая тенденция развития новых микрокриогенных систем.

Ключевые слова: газовая криогенная машина, цикл Стирлинга, микрокриогенная система, температура криостатирования.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-4-343-360

1. Введение

Микрокриогенные системы (далее МКС) постоянно совершенствуются и становятся надежнее, поэтому всё чаще используются как в лабораторных исследованиях, так и в коммерческих целях. Область применения криогенных машин охватывает: охлаждение различных инфракрасных датчиков и матриц, как для гражданских, так и для военных целей, производство полупроводников, хранение

биологических образцов, использование в сверхпроводниках для базовых сотовых станций, МРТ, источниках питания и др. Наиболее распространённые типы систем – это газовые криогенные машины Джоуля-Томсона, Брайтона, Стирлинга, Гиффорда-МакМагона и криогенные машины на пульсационных трубках.

Большой интерес представляют системы охлаждения инфракрасных датчиков и матриц, для которых от криогенной системы требуются: стабильная температура на холодном конце (77–150 К), низкий уровень вибраций, низкий уровень энергопотребления и компактность. Каждый тип систем работает по-разному, но все они основаны на сжатии и расширении газа, что приводит к изменению температуры. Само по себе колебание давления в системе привело бы к колебаниям температуры по всей системе, но не привело бы к охлаждению. Для охлаждения в конструкции МКС Стирлинга используется регенератор, чтобы разделить эффекты нагрева и охлаждения, вызывая движение газа в нужном фазовом соотношении с колебаниями давления. Среди вышеперечисленных типов газовых

Бабенко Дмитрий Дмитриевич, гл. специалист, к.т.н.
E-mail: rainbowdm1802@gmail.com

Банников Максим Викторович, и.о. нач., зам. нач.
E-mail: maxnutnet@yandex.ru

Коротаев Евгений Дмитриевич, инженер 1 кат.
E-mail: korotaevrus@gmail.com

Некрасов Глеб Игоревич, гл. спец., к.т.н.
E-mail: gleb.nekrasov.18@mail.ru

АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 22.07.2024

После доработки 8.08.2024

Принята к публикации 12.08.2024

Шифр научной специальности: 2.2.6

© Бабенко Д. Д., Банников М. В., Коротаев Е. Д., Некрасов Г. И., 2024

криогенных машин криогенные машины Стирлинга не требуют резервуара с газом, что делает их приоритетным типом систем в сфере производства ИК-фотоприемников.

Рассмотрим идеальный обратный цикл Стирлинга (рис. 1).

1-2) Изотермическое сжатие. Газ в компрессоре сжимается изотермически под воздействием вверх движущегося поршня, который уменьшает доступный объем. В процессе сжатия, часть тепла выделяется в окружающую среду, а давление повышается до максимального значения в цикле. В то же время вытеснитель не движется.

2-3) Изохорный нагрев матрицы регенератора. Вытеснитель движется по направлению от горячего конца к холодному, при этом поршень в компрессоре тоже продолжает движение, уменьшая доступный объем в камере компрессора. В этом процессе общий объем системы остается неизменным, а газ

проходит через регенератор к холодному концу. Теплый газ охлаждается за счет передачи тепла матрице регенератора.

3-4) Изотермическое расширение. Вытеснитель движется в обратном направлении расширяя газ, поршень компрессора остается неподвижным. Изотермический процесс идет с поглощением тепла из окружающей среды на холодном конце, с уменьшением давления в системе до минимального в цикле и возвращением к изначальному значению объема.

4-1) Изохорное охлаждение матрицы регенератора. При неизменном давлении системы вытеснитель движется от холодного конца к горячему, а поршень движется вниз, увеличивая объем в камере компрессора. При этом газ прогоняется через регенератор от холодного конца к горячему, тем самым тепло передается от матрицы к газу обратно, охлаждая матрицу и возвращая систему в исходное состояние.

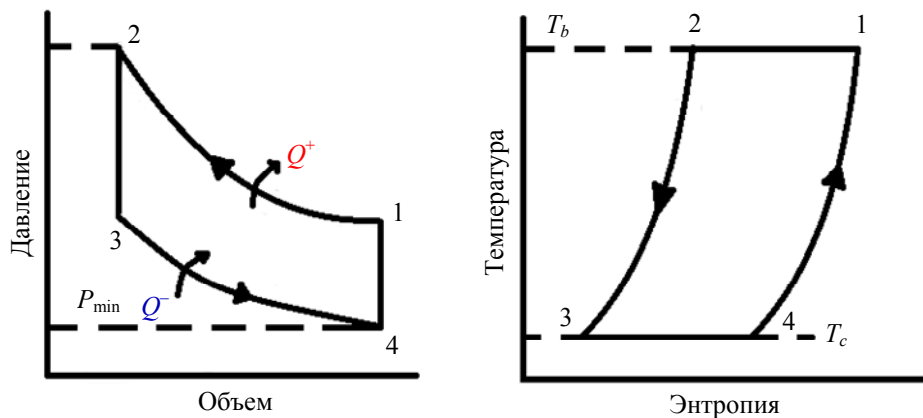


Рис. 1. PV и TS диаграммы обратного цикла Стирлинга

Правильное фазирование движений поршня и вытеснителя возникает, когда изменение объема в холодной части камеры расширения приводит к изменению объема в нагретой камере компрессора примерно на 90° , хотя теоретически реализуемы углы от 20° до 180° . По аналогии с электрическими системами переменного тока, реальная мощность поступает только тогда, когда ток и напряжение совпадают по фазе. Вне диапазона соотношения фаз $90^\circ \div 130^\circ$ суммарные потери холодопроизводительности будут превышать ее теоретическое значение. Движущийся вытеснитель обратимым образом извлекает энергию из газа на холодном конце и передает ее на

теплый конец, где она в некоторой степени участвует в сжатии. В идеальной системе с изотермическим сжатием и расширением и совершенным регенератором этот процесс обратим. Таким образом, коэффициент полезного действия для идеального холодильника Стирлинга совпадает с коэффициентом полезного действия Карно. Практически МКС Стирлинга имеют значения КПД при 80 К, которые варьируются примерно от 1 до 20 % от значения по Карно [1].

МКС Стирлинга можно разделить на три группы по типу конструкции (рис. 2):

- интегральные роторные (кинематические роторные);

- сплит роторные (пневматические роторные);
- сплит-линейные (пневматические линейные).

В интегральных роторных криогенных машинах поршень и вытеснитель находятся на одном коленчатом валу и крепятся к нему через шатуны. Такая компоновка является наиболее оптимальной по мощности в широком диапазоне нагрузок и температур окружающей среды по сравнению с аналогами, т. к. готовое устройство компактное, относительно простое и потребляет меньше энергии. Минусом является близкое расположение компрессора к охлаждаемому устройству и, как следствие, большой уровень вибраций и теплопритоков.

В сплит-линейных системах поршни приводятся в движение линейным электромотором, а вытеснитель пневматически. Таким образом раздельное расположение держателя и компрессора с мотором, позволяют понизить уровень вибраций на охлаждаемом устройстве, а также значительно снизить теплопритоки с области компрессора, т. к. единственный путь теплопередачи лежит через газовый канал. Минусом такой конструкции является отсутствие прямой механической связи компрессора и вытеснителя, а также дополнительный мертвый объем из-за более длинного газового канала, что, как следствие, отрицательно сказывается на КПД. Также стоит отметить большую по сравнению с интегральными роторными МКС массу.

В сплит роторных системах поршень приводится в движение коленчатым валом, а вытеснитель пневматически. Для того чтобы поршень и вытеснитель перемещались в правильных фазах относительно друг друга используется пружина на вытеснителе. Такие криогенные системы вытеснены МКС предыдущих двух типов и встречаются редко. На рынке представлены двумя моделями RICOR K549 и GST-iR RS046H (модификация

RS046), а также их копиями полученными обратным инжинирингом.

Также в отдельную группу стоит выделить криогенные машины CryoTel® [2], т. к. их тяжело отнести к одной из существующих групп МКС Стирлинга. Они также, как и сплит линейные криогенные машины состоят из поршня, который приводится в действие электромотором и вытеснителя, который приводится в движении пневматически, но имеют ряд значительных технических особенностей. Во-первых, в конструкции отсутствуют шариковые подшипники, используются газовые подшипники, что позволяет значительно увеличить ресурс МКС. При этом в отличие от сплит систем криогенная машина собрана в едином корпусе. Проблемы теплопритоков решаются производителем путем использования в конструкции большого радиатора охлаждения в зоне камеры сжатия, а вибрации подавляются с помощью активной системы подавления, состоящей из активного стабилизатора, акселерометра и контроллера. По сравнению с вышеописанными типами МКС, криогенные машины CryoTel больше и тяжелее (от 1,8 до 6,4 кг), но при этом их холодопроизводительность составляет от 1,8 до 32 Вт при температуре криостатирования 77 К.

В настоящее время ведутся работы по увеличению срока службы МКС Стирлинга, поскольку они являются наименее надежным компонентом инфракрасных систем. Время выхода на режим криогенных машин Стирлинга составляет несколько минут, мощность охлаждения этих МКС варьируется от 0,15 до 1,75 Вт. МКС Стирлинга подходят для многих применений в сверхпроводящей электронике, поскольку важными факторами являются надежность и устойчивость к электромагнитному полю. Для проектирования МКС на ранних стадиях и прогнозирования технических параметров используются методы компьютерного моделирования.

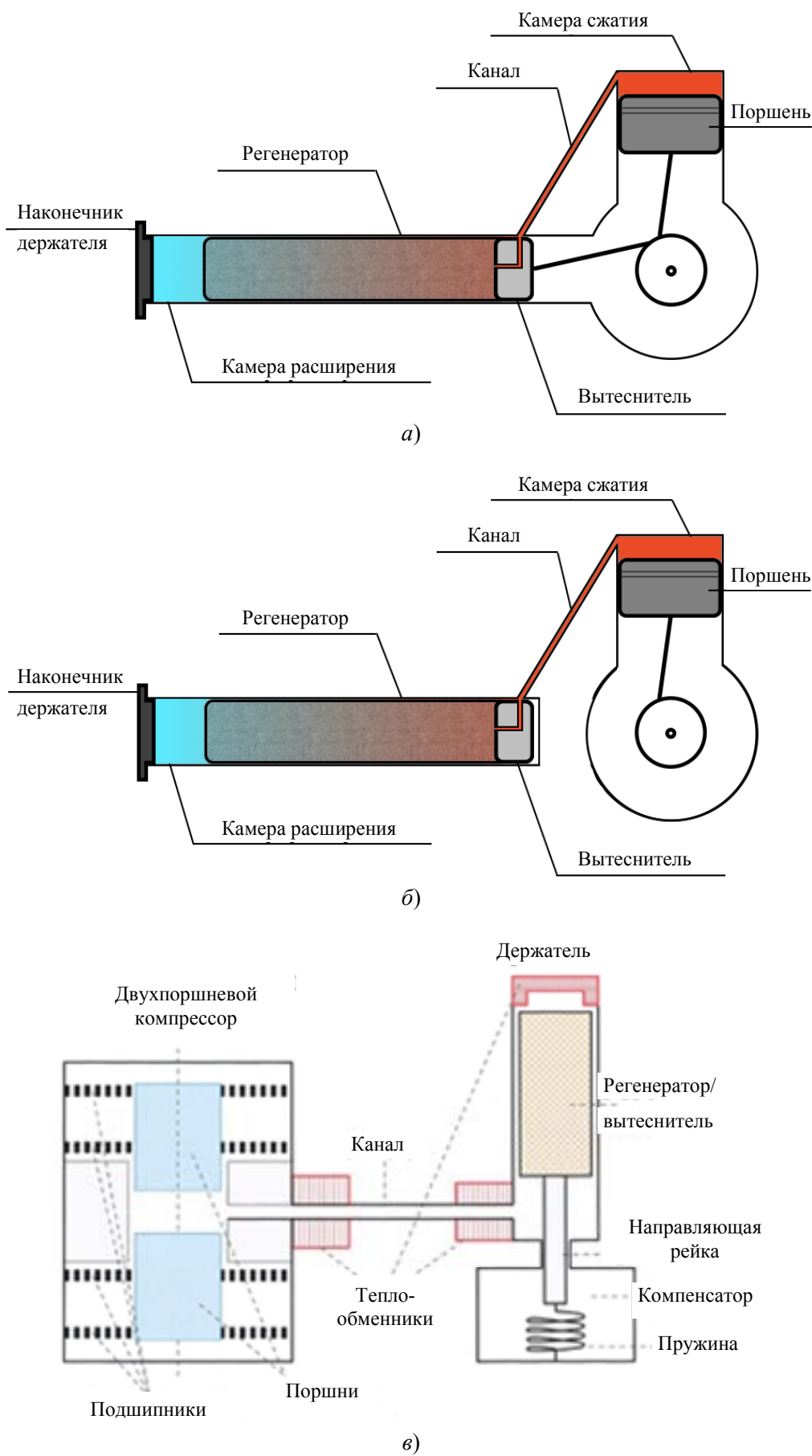


Рис. 2. Схемы конструкций МКС Стирлинга: а) – интегральные роторные; б) – сплит роторные; в) – сплит-линейные

2. Компьютерное моделирование микрокриогенных систем Стирлинга

Сложность ранних математических моделей была ограниченной для сокращения времени обработки и используемого объема оперативной памяти, чтобы модели могли работать на компьютерах. Как и следовало ожидать, со временем, сложность математических моделей для симуляции процессов возросла по мере того, как компьютеры становились все более мощными. В настоящее время некоторые ученые моделируют потоки газа внутри криогенных машин Стирлинга, используя доступные в продаже пакеты трехмерной вычислительной гидродинамики (от англ. computational fluid dynamics, далее сокращенно – CFD).

На данный момент можно определить следующую классификацию используемых в проектировании моделей:

- модели первого порядка (решения аналитическими методами без учета паразитных потерь);
- модели второго порядка (решения аналитическими методами с учетом паразитных потерь);
- модели третьего порядка (любая форма одномерной дискретизации основных уравнений для потока жидкости);
 - 2D CFD;
 - 3D CFD.

2.1. Программы моделирования второго порядка

Martini-Weiss – программа моделирования двигателей Стирлинга, разработанная в Университете Калгари Мартини и позже дополненная Вайссом [3]. Программа основана на работах Мартини [4] и является моделью второго порядка. Также существует версия для криогенных машин CryoWeiss. Программное обеспечение было доступно для покупки в 80-х и 90-х гг., но на данный момент считается устаревшим.

SNAPro (Stirling Numerical Analysis Program) – доступная ранее в продаже программа, разработанная Альтманом [5]. Программа также базируется на работе Мартини и

создана в Excel, обладает возможностями для моделирования пользовательских схем Стирлинга, проведения исследований параметров и оптимизации с использованием генетического алгоритма. На основании этой программы в открытом доступе есть код для моделирования МКС Стирлинга в MATLAB.

PROSA software (Program for second order analysis) – доступная ранее в продаже программа, разработанная Томасом [6]. Ране использовалась модель второго порядка, но с выхода версии 3.0 третьего порядка, имитирующее использование дискретизации по времени вместо использования решений аналитическими методами. PROSA был успешно протестирован, как с калибровкой, так и без нее, на основе экспериментальных данных для ряда двигателей Стирлинга.

2.2. Программы моделирования третьего порядка

Код MS*2 это модель третьего порядка [7], которая основывается на дискретизации конечных разностей в одномерном пространстве. В модели использовалась эйлерова сетка (сетка с неподвижными узлами). Периодические стационарные решения были найдены путем решения вперед во времени от заданного набора начальных значений до тех пор, пока решение не стало периодическим.

Kpsim – программа моделирования, которая может выполнять анализ машин методами как второго, так и третьего порядка с регенеративными циклическими газовыми процессами. Компоненты были дискретизированы в одномерном пространстве на эйлеровых сетках. При выполнении моделирования программа выполняла пошаговую обработку моделей по времени. Метод, основанный на понимании физики регенераторов в периодическом стационарном режиме, был использован для ускорения сближения осевых распределений температуры матрицы с периодическим стационарным режимом. Эффективность программы успешно подтверждена в работе [8].

HFAST был потомком кода анализа гармонического цикла Стирлинга (HSCAC). Разработана HSCAC была в МТИ (1978). В дальнейшем NASA полностью выкупили права на

этот софт. Метод решения включал следующие четыре этапа:

1. Решение уравнения неразрывности для волны давления и массового потока. Здесь предполагалось, что температура газа в регенераторе и теплообменниках постоянна, а сжатие и расширение в полостях цилиндров адиабатичны.

2. Решение уравнения движения для перепада давления. Затем перепад давления был использован для корректировки давлений в объемах модели.

3. Решение уравнения энергии для температур газа. Здесь предполагалось, что рабочий газ проходил через теплообменники назад и вперед двумя равномерными потоками.

4. Решение дополнительных энергетических уравнений для температур стенок.

HFAST пережил множество обновлений и согласно работе [9] в версии HFAST, выпущенной в 1992 году, был использован весь потенциал метода гармонического анализа для моделирования цикла Стирлинга, и прогнозирование производительности кода улучшилось.

GLIMPS (Globally Implicit Stirling Cycle Simulation) – программа, основанная на одномерной конечно-разностной сетке в пространстве для основных уравнений сохранения массы, энергии и импульса в газе и для энергии в твердых частях машины Стирлинга. Права на код были выкуплены NASA. Основные уравнения также были дискретизированы по времени, так что в результате полной дискретизации была получена двумерная конечно-разностная сетка. Для каждого момента времени в двумерной конечно-разностной сетке были узлы, соответствующие всем узлам в одномерной пространственной дискретизации. Следовательно, каждый узел в двумерной конечно-разностной сетке имел как временную, так и пространственную координату. В каждом узле двумерной сетки было соответствующее решение для каждого из основных уравнений сохранения массы, энергии и импульса. В GLIMPS были соединены две противоположные стороны двумерной конечно-разностной сетки и добавлено дополнительное условие для среднего давления. В результате была получена глобально неявная система уравнений, которая может быть решена сразу для периодического стационарного решения.

Возможность использования небольшого числа узлов позволила GLIMPS работать быстро, но не способствовало точности решений [10].

Sage был разработан Гедеоном из GLIMPS [11]. В Sage использовалось вычислительное ядро математической модели цикла Стирлинга то же что и в коде GLIMPS, но с небольшими изменениями. В основу нового ПО легло графическое представление системы. Sage обладает удобным и наглядным интерфейсом и на данный момент является одним из основных инструментов для проектирования микрокриогенных систем на цикле Стирлинга, Джоуля-Томпсона и с использованием импульсных трубок. Программа дорогостоящая, а также требует больших вычислительных ресурсов. Исходя из публикаций последних лет [12–14] Sage зарекомендовал себя как ведущее программное обеспечение для лабораторий, занимающихся разработкой микрокриогенных систем. Распространяется через официальный сайт производителя по подписке.

2.3. 2D и 3D CFD-моделирование

CFD-моделирование машин Стирлинга началось в 80-е года с работ Гедеона над 2D симуляциями компонентов машин Стирлинга. В 1989 г. использовался код под названием MANIFEST.

Ибрагим, Тью и Дуденхофер (1989) в 1990 году сообщили об использовании своего кода для моделирования компонентов исследовательского двигателя космической энергетики (SPRE) NASA. Мунир Ибрагим и соавторы описали эволюцию с 1989 по 2001 год 2D CFD-кода CAST для моделирования компонентов в машинах Стирлинга и упомянули моделирование компонентов машин Стирлинга с использованием коммерческого пакета CFD-ACE+. В работе [15] они сравнили результаты для потерь на гистерезис газовой пружины в свободнопоршневой машине с экспериментальными результатами, а также с результатами для теплопередачи на единицу площади в различных местах теплообменника в условиях колеблющегося потока. Также авторы описали, как код CAST использовался для содействия в разработке эмпирического метода прогнозирования перехода между ламинар-

ным и турбулентным потоком в машинах Стирлинга [15]. Этот эмпирический метод прогнозирования перехода в настоящее время используется в Sage.

Тью и др. сообщили о нескольких проблемах, связанных с использованием CFD-модели Стирлинга [16]. Проблемы включали необходимость моделирования множества циклов для достижения периодического стационарного решения для температурного профиля регенератора. В 2004 году НАСА использовало кластер из 32 процессоров для выполнения CFD-моделирования машин Стирлинга.

2.4. CFD-моделирование в Ansys Fluent и CFX

CFD-моделирование активно применяется в проектировании микрокриогенных систем чтобы понять основные механизмы гидродинамики и теплопередачи с целью повышения производительности. Одним из направлений исследования является количественная оценка тепловых потерь в интересующем диапазоне размеров и частот в зависимости от соответствующей геометрии и материалов поршня, а также оценка их чувствительности к различным конструктивным параметрам. Параметрические расчеты показывают, что среди различных конструктивных параметров общая теплопроводность вытеснителя оказывает наиболее существенное влияние на потери при перемещении. Важным моментом при CFD-моделировании является проверка правильности применения сетки модели, свойств и граничных условий.

Зачастую CFD-моделирование применяют на стадии проектирования системы, чтобы предсказать тепловые характеристики системы и внести в неё изменения [17]. Программный пакет Ansys дает широкие возможности для моделирования различных систем, в том числе и гидродинамических. Широкое распространение, доступность опубликованных начальных данных для решения конкретных задач, а также большой спектр охватываемых областей моделирования вывело пакет Ansys на лидирующие позиции в области численного моделирования МКС. В частности, с его помощью рассчитываются тепловые потери на

шаттл-эффект [18]. Также важной задачей считается моделирование регенератора, для повышения эффективности криогенной машины [19]. В Fluent есть скользящая граница раздела для двумерных осесимметричных потоков, которые можно использовать для моделирования разрывов приложений на параллельных компьютерах. Этот метод также основан на конечных объемах и может использоваться как структурированные, так и неструктурированные сетки.

3. Основные механизмы выхода из строя

Методами моделирования третьего порядка, CFD, а также методом конечных элементов можно получить оценки изменения выходных параметров МКС, оптимизировать конструкции с механической и теплофизической точки зрения. Однако, для оценки износа и срока службы МКС зачастую проводятся испытания или опытные наработки. По результатам этих испытаний и опытных наработок можно выделить, что основными причинами отказа МКС Стирлинга являются:

- внутренние загрязнения;
- нарушение герметичности;
- поломка подшипника;
- пробой изоляции обмоток статора;
- нарушение центрирования поршня;
- отказ радиоэлектронной аппаратуры;
- утечка из-за износа герметичных соединений [20].

Основным механизмом является утечка в расширителе из-за износа подшипника вытеснителя. Утечка снижает эффективность охладителя до тех пор, пока производительность не упадет ниже указанного в спецификации значения. Это механизм, связанный с износом. Все остальные известные неисправности возникают случайным образом, и их вероятность минимизируется конструкцией, производственными процедурами или инструкциями по обращению с ними. Вероятность возникновения такой случайной неисправности минимальна при условии, что охладитель спроектирован с достаточными запасами прочности и при использовании или интеграции не возникает никаких аномалий.

Течь вдоль вытеснителя из-за износа представляет собой явление, зависящее от

времени. Износ подшипника приводит к увеличению зазоров и увеличению утечки. В первом приближении этот эффект описывается законом Арчарда, $Q = \frac{K \cdot F_N \cdot L}{H}$, где Q – объем износа, K – безразмерный коэффициент износа, F_N – нормальная сила, H – твердость самого мягкого контактирующего материала, а L – пройденное расстояние. Это уравнение гласит, что величина износа зависит от свойств изнашиваемых материалов, нагрузки, действующей на подшипник, и времени его использования.

Таким образом, можно оптимизировать такие параметры, как свойства материала, пройденное расстояние и нагрузку на подшипник. Материалы, используемые для изготовления этих подшипников, уже выбраны изготовителем с учетом современных стандартов. Пройденное расстояние, определяемое рабочей частотой и амплитудой движения, определяется термодинамической конструкцией охладителя. Таким образом, снижение нагрузки на подшипник является основной переменной, требующей оптимизации.

В рамках анализа нагрузки на подшипник в работе [21] было установлено, что на него оказывают влияние две основные силы: сила тяжести и неосевые реактивные силы подвески вытеснителя. При измерении реактивных сил было установлено, что они могут составлять до 5 % от основного осевого усилия пружины.

Согласно открытой информации о криогенных системах RICOR [23] основной причиной отказа роторных машин является подшипник нижней шейки шатуна поршня или крейцкопфа. Первоочередной задачей RICOR ставят определение самого низкого давления гелия, при котором может быть получена достаточная холодопроизводительность. Возможное давление заправки до 40 бар, но для некоторых решений 30 бар обеспечивают достаточный запас мощности охлаждения для выполнения поставленных задач. Кроме того, скорость утечки гелия должна соответствовать продолжительности эксплуатации. Для криогенных машин RICOR, используемых в космических целях (приведенные в статье модели K508 и K562 также используются и в

оборонной промышленности), допустимая потеря гелия установлена не более чем 5 % в течение 10-летнего периода после изготовления.

В ходе испытаний, описанных в [21], было установлено, что следующим фактором, ограничивающим срок службы системы (или среднее время между техническими обслуживаниями), является качество вакуума внутри емкости Дьюара, в которой находится охлаждаемое устройство. В приведенном производителем конкретном примере вакуумная емкость Дьюара была закрыта металлическими уплотнителями [23].

В современном западном инфракрасном оборудовании двойного назначения, вероятность возникновения неисправностей, связанных с утечкой вакуума, значительно снижается, поскольку в современных устройствах герметичные соединения как правило осуществляют при помощи сварки. Различные производители этих устройств применяют тщательно разработанные технологии очистки, спекания и откачки, чтобы гарантировать, что сосуд Дьюара, содержащий инфракрасный детектор, сохраняет целостность вакуума в течение всего срока службы. Стоит отметить, что сварные конструкции получили большое распространение в сплит-Стирлинг системах, а в интегральных роторных применяются лишь в отдельных соединениях. Исключение составляет малогабаритная, высокотемпературная (150 К) криогенная машина Thales RMs1, в которой все соединения, кроме держателя с корпусом выполнены с помощью сварки.

В RICOR для предотвращения потери холодопроизводительности со временем из-за загрязнений внутри криогенной машины, проводится предварительная очистка чистым гелием (не менее 99,9999 %, исходя из поисков возможно и 99,999999 %) [22], перед первичной сдачей МКС. Для МКС эксплуатируемых в космической отрасли проводится минимум 40 циклов заправки/выпуска гелия, при чем после первых 10 циклов, между следующими 20 циклами коленчатый вал вращается так, чтобы подвергнуть очистке новые потенциально загрязненные поверхности. Для очистки гелия и предотвращения возвращения загрязнений в систему может использоваться азотная ловушка.

4. Особенности современных микрокриогенных систем

Относительно обозначенных выше проблем производителями предпринимаются различные меры по оптимизации МКС с целью увеличения срока службы, улучшения производительности, уменьшения размеров и массы. Выделим основные направления оптимизации микрокриогенных систем:

- оптимизация конструкции и методологии сборки подшипников;
- подбор смазки подшипника;
- герметизация МКС с помощью сварки и уплотнительных колец;
- оптимизация параметров и процесса сборки регенератора;
- уменьшение теплопритоков;
- уменьшение влияния внешних вибраций.

Далее рассмотрим подробнее решения некоторых проблем, опубликованные в современной литературе.

4.1. Компоновка подшипников

Как указывалось ранее, одним из основных механизмов выхода из строя связан с износом и поломкой подшипников. Увеличение производительности подшипника обычно достигается за счет увеличения его размера, в то время как в некоторых случаях достаточно увеличить количество шариков в подшипнике. Однако не всегда возможно сохранить размер подшипника и увеличить только количество шариков. Поэтому в таких случаях требуется разработать оптимальную конструкцию, учитывающую имеющийся запасной объем, и распределить его между всеми остальными частями механизма. Таким образом, для подшипника с максимальной нагрузкой выделяется наибольший объем, а для подшипника с наименьшей нагрузкой выделяется наименьший объем. Задача и желаемый результат такой конструкции заключается в поддержании соотношения между несущей способностью и требуемой нагрузкой (коэффициентом запаса прочности) как можно более одинаковым для всех подшипников.

Надежность подшипников в криогенных машинах Стирлинга

Механизм, приводящий к разрушению подшипника, описывается как усталостное разрушение поверхности, которая соприкасается, например, с вращающимися элементами. В результате этого процесса подшипник теряет свои основные характеристики, такие как размеры, и относительно быстро выходит из строя. Для того, чтобы рассчитать ожидаемый срок службы подшипника, необходимо знать ряд параметров. Список параметров включает нагрузку, приложенную к подшипнику, динамическую нагрузку выбранного подшипника, коэффициент загрязнения, коэффициент учета смазки и коэффициент перепада давлений. Температура окружающей среды непосредственно влияет на коэффициент учета смазки, и с повышением температуры коэффициент учета смазки снижается, что отрицательно сказывается на надежности подшипника. Очевидно, что мы должны убедиться в том, что температура в подшипнике не поднимается выше или не опускается ниже критических температур, определенных для консистентной смазки. При таких температурах срок службы смазки резко уменьшается, что приводит к преждевременному выходу подшипника из строя.

Условия чистоты

Чистота подшипников имеет очень большое значение с точки зрения ожидаемого срока службы, поэтому условия работы, в которых устанавливается охладитель, имеют жизненно важное значение. Это может существенно повлиять на срок службы подшипников и других компонентов. Методология сборки подшипников и всего механизма охлаждения также имеет большое значение с точки зрения надежности и срока службы.

Условия смазывания

Для обеспечения работоспособности подшипника между движущимися частями (кольцами и шариками) всегда должен быть слой смазки. Выбор типа загустителя и масла

очень важен для соблюдения вышеуказанных требований. Назначение загустителя – удерживать масло на месте до тех пор, пока оно не выйдет из него. Скорость отделения масла от загустителя зависит от температуры консистентной смазки. В большинстве случаев, чем выше температура, тем быстрее происходит отделение. Поскольку количество масла ограничено, срок службы подшипника во многом зависит от его температуры, то есть от температуры окружающей среды и условий работы подшипника, то есть от скорости вращения и давления охладителя. Избыток смазки в подшипнике затрудняет отвод тепла, поэтому требуется эмпирическая информация об оптимальном количестве смазки.

Различные компании разрабатывают алгоритмы расчета ожидаемого срока службы конкретной смазки, а также и других эксплуатационных характеристик, основываясь на стандарте ISO 281:2007 (аналог ГОСТ 18855-2013). Часть этих расчетов, предложенных компанией Ricog приведена в работе [24]. Сложность подбора смазки для криогенных машин Стирлинга состоит в компромиссе между низкой вязкостью и рабочим диапазоном температур. Для многих смазок ограничивающим фактором является диапазон рабочих температур в области низких температур.

Консистентная смазка состоит из двух основных компонентов – загустителя и базового масла и выполняет ряд функций:

- 1) обеспечивает разделение тел качения и дорожек качения и предотвращает сухой контакт между ними;
- 2) уменьшает тепловую нагрузку, выделяющуюся в процессе вращения;
- 3) предотвращает попадание частиц на пути контакта;
- 4) минимизирует акустический шум;
- 5) защищает поверхность от коррозии;

Кроме того, можно улучшить свойства консистентной смазки с помощью специальных присадок. При выборе правильной консистентной смазки, прежде всего, необходимо определить следующие параметры:

- а) интенсивность нагрузки;
- б) тип нагрузки;
- в) максимальная и минимальная температуры консистентной смазки;
- г) допустимое давление паров консистентной смазки.

4.2. Герметичность конструкции

Как правило, в МКС используется гелий, термодинамические свойства которого достаточно близки к свойствам идеального газа во всем диапазоне требуемых температур и давлений. Хорошее сочетание теплопроводности и теплоемкости делает гелий, вероятно, лучшим рабочим газом для криогенных машин. Однако из-за малого размера молекул гелий подвержен быстрой утечке из герметичных сосудов высокого давления через змеевидные каналы, образованные наноразмерными дефектами. Таким образом, долгосрочная герметизация гелия под давлением является сложной задачей и требует использования специальных сплавов с низкой проницаемостью, герметичных соединений, а также металлических уплотнений (таких как С-образные кольца или индиевые уплотнительные кольца). Другая проблема может быть связана с высокой степенью диффузии водяного пара (основного загрязнителя) в гелий [25]. Как было отмечено ранее, потеря рабочего вещества и внутренние загрязнения являются одним из основных механизмов отказа, ограничивающими срок службы криогенных машин [20, 26].

Чтобы обеспечить герметичное соединение между криогенной машиной и системой, работающей в суровых условиях окружающей среды, необходимо правильно спроектировать оба устройства. Это связано с тем, что конструкция криогенной машины может влиять на конструкцию всей системы, и наоборот.

Например, интегральная роторная МКС Стирлинга представляет собой единое целое, состоящее из компрессора, держателя и контроллера. В большинстве случаев роторные криогенные машины могут использоваться на любых платформах повышенной прочности благодаря присущей им жесткости, компактному размеру и небольшому весу.

Другим преимуществом является то, что обычно тепловые, механические и оптические интерфейсы расположены на общей поверхности. Однако иногда может потребоваться дополнительное управление нагревом контроллера и двигателя. Для таких случаев рассмотрим три конфигурации.

При использовании внешнего расположения контроллера, управление тепловой нагрузкой может быть значительно улучшено.

Из-за применения более сложных алгоритмов управления, которые требуют использования более мощных процессоров, которые по габаритным характеристикам не помещаются внутри МКС или выделяют много тепла, перенос контроллера наружу является очевидным решением для снижения тепловой нагрузки на двигатель.

Управление тепловыми потоками двигателя на системном уровне – решением может быть механический гибкий элемент, такой как медная оплетка или тепловая трубка, чтобы механически не перегружать МКС. В большинстве случаев дополнительная теплота, выделяемая с поверхности двигателя, составляет примерно 10–20 % от общей тепловой нагрузки всей системы.

Оптимизация тепловых потоков двигателя на уровне МКС – иногда является оптимальным решением с точки зрения термоменеджмента. Например, в работе [27] увеличение количество точек крепления статора к корпусу решило сразу ряд задач, помимо улучшения вибрационной стойкости и механического контакта, было уменьшено тепловое сопротивление между статором и корпусом МКС, а также увеличение поверхности корпуса статора улучшило его охлаждение. В этом случае необходимо учитывать дополнительное пространство для криогенной машины. В концепте сплит-Стирлинг, когда компрессор и держатель разделены на отдельные узлы, управлять тепловой нагрузкой проще от компрессора проще, а значит теплопритоков с него будет меньше. Линейные системы обеспечивают длительный срок службы, т. к. вытеснитель приводится в движение пневматически и используется меньше шарикоподшипников.

Линейная двухцилиндровая микрокриогенная система с противоположно движущимися поршнями также имеет раздельную конструкцию, обеспечивающую подавление собственных вибраций в отличие от однопоршневой МКС. В двухпоршневом исполнении компрессора вибрация подавляется двумя одинаковыми подкомпрессорами с противоположным расположением приводов, которые имеют общее пространство для сжатия и ток возбуждения. Для систем, в которых вибрации создаваемые МКС играют критическую роль, такая компоновка предпочтительнее. Очевидными недостатками такой конструкции явля-

ются дополнительная механическая сложность, объем и стоимость. Сборка таких компрессоров также включает в себя трудоемкие и дорогостоящие процедуры подбора подкомпрессорных узлов, которые должны быть идентичными с точки зрения веса движущихся узлов, зазоров между поршнем и цилиндром, характеристик электромагнитных приводов и т. д.

Для герметизации корпусов линейных компрессоров зачастую используют цельносварную конструкцию. Такая конструкция всегда предпочтительна в тех случаях, когда возникают проблемы с утечкой и размерами. С инженерной точки зрения, утечка гелия из сварных соединений практически незначительна. Такие соединения также обладают незначительной чувствительностью к тепловым расширениям и механическим нагрузкам при перепадах температур благодаря использованию однородных материалов.

В случае, когда сварка не применяется, наиболее распространенным типом гелиевого уплотнения, используемым в МКС является металлический уплотнитель. Этот тип уплотнения также хорошо зарекомендовал себя при использовании на платформах повышенной прочности. Зачастую используется С-образное уплотнение, которое, однако, иногда может оказаться недостаточным для работы в суровых условиях окружающей среды. Чтобы уплотнение удовлетворяло военным стандартам, компанией RICOR была использована упрочненная конструкция С-образное уплотнения [27].

4.3. Регенератор

Регенератор – это ключевой компонент, оказывающий существенное влияние на общую производительность МКС. Регенератор используется в криогенных системах на основе циклов Стирлинга, Гиффорда-МакМагона, Вуиллемайера и охладителях на импульсных трубках. К материалам регенератора предъявляются требования быстро переносить и хранить тепло передаваемое газом, проходящим через регенератор. Также регенератор должен быть устойчив к теплу, протекающему в его продольном направлении. Обычно для регенераторов МКС применяются такие материа-

лы как сталь, фосфорная бронза, свинец, сульфид европия, латунь, никель. Для двухступенчатых МКС Гиффорда-МакМагона могут использоваться сплавы редкоземельных металлов лантаноидов, в частности сплавы эрбия, из-за большей теплоемкости в области низких температур [28]. Регенератор обычно изготавливается в виде уложенных в отверстие трубчатого вытеснителя, тысяч дисков, изготовленных из металлических тканых сеток или в виде плотно упакованных в трубчатый вытеснитель микросфер.

Регенераторы могут быть относительно маленькими, их эффективность довольно высокая, используемый в них материал доступен, их конструкция проста и, как следствие, стоимость сравнительно невысокая. При нормальных режимах работы регенераторы нечувствительны к закупорке примесями в потоке газа.

Функция регенератора состоит в том, чтобы убрать температурные осцилляции в проходящем через него газе. Для этого нужно обеспечить большую площадь поверхности для обмена тепла газа с твердым материалом высокой теплоемкости. В тоже время матрица не должна излишне препятствовать потоку газа.

Несмотря на высокое отношение поверхности к объему и отличный тепловой контакт, такой регенератор обладает высокой паразитным гидродинамическим сопротивлением и осевой теплопроводностью. В первую очередь это может быть связано с характером ограниченного зигзагообразного течения рабочего

газа в извилистых каналах и наличием множества хаотично расположенных точек контакта, образующих пути теплопроводности внутри матрицы регенератора. Другим недостатком является низкая осевая изотропия матрицы регенератора, что в первую очередь объясняется технологией изготовления. Изготовление регенератора с высокой пористостью может привести к осевому смещению дисков регенератора под действием высоких ускоряющих сил, что в конечном итоге приведет к локальному уплотнению/наклону дисков и образованию пустот, как показано на рентгеновских снимках на рисунке 3 [29].

В частности, вытеснители из одной и той же партии могут быть совершенно разными с точки зрения эффективности теплообмена. Кроме того, материал (проволочная сетка из нержавеющей стали) довольно дорогой, количество отходов высокое, а весь производственный процесс довольно трудоемкий и требует специального оборудования и навыков. Также, согласно результатам моделирования, высокотемпературные и высокочастотные МКС лучше всего работают с высокопористыми регенеративными теплообменниками, имеющими пористость более 85 % и диаметр проволоки менее 10 мкм [29]. К сожалению, самые мелкочаеистые сетки из нержавеющей стали, имеющиеся в продаже (например, #500, #635), имеют минимальный диаметр проволоки 20 мкм. Кроме того, технологические ограничения не позволяют достичь пористости более 70 %.

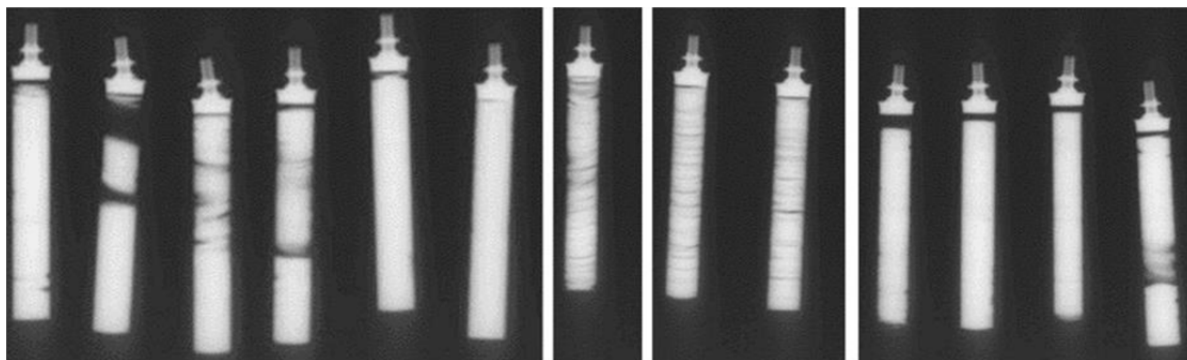


Рис. 3. Рентгеновские снимки регенераторов с пустотами и наклоненными дисками из проволочной сетки

Для оптимизации параметров и моделирования потоков гелия в регенераторе на уровне проектирования как правило используют либо программное обеспечение REGEN, либо методы CFD. В частности, в работе [30] оцениваются различные потери, связанные с регенератором с помощью REGEN 3.3, а также производится сравнение с результатами, полученными в ПО Sage и 2D CFD модели в ANSYS Fluent.

4.4. Держатель

Держатель (в английской литературе cold-finger) является элементом к которому крепится охлаждаемое фотоэлектронное устройство. В их производстве внешняя стенка держателя также является внутренней стенкой Дьюара. В литературе эта концепция называется IDCA [31], и она обеспечивает большую энергоэффективность и меньший уровень вибраций чем в случае с раздельными стенками. В системах типа сплит-Стирлинг, требуется использование высокоточных и достаточно дорогих держателей. В частности, отверстия трубки и основания должны быть точно выровнены и расположены концентрически с допуском 30 мкм. Такая точность обычно достигается изготовлением держателя из цельного куска материала с низкой теплопроводностью, такого как титановый сплав Ti6Al4V ELI (grade 23). Стоит отметить, что относительно низкий модуль упругости порядка 100 ГПа и ограничения, накладываемые на динамический отклик матрицы в ИК-фокальной плоскости при неблагоприятных условиях окружающей среды, как правило, не позволяют сделать толщину стенок ниже определенного предела в 100 мкм. В некоторых случаях возникает необходимость в упорах с низкой теплопроводностью, что приводит к механической сложности и дополнительному паразитному теплопроводному притоку тепла [29, 32].

Низкая теплопроводность основания холодного пальца, изготовленного из титанового сплава затрудняет отвод тепла и влияет на производительность МКС. Кроме того, поскольку титановые сплавы не могут быть непосредственно приварены/припаяны к другим металлам, требуется по меньшей мере два

гибридных кольца для пайки. Такие гибридные кольца обычно изготавливаются сваркой взрывом и, следовательно, являются чрезвычайно дорогими. Кроме того, высокотемпературная пайка титановых сплавов может привести к неблагоприятным термическим деформациям, фазовым переходам, охрупчиванию и микротрещинам, приводящим к утечке рабочего вещества и потере вакуума.

Поскольку миниатюризация охладителя оказывает определенное влияние на холодопроизводительность, баланс тепловой нагрузки Дьюара становится все более критичным и каждый компонент в Дьюаре должен быть оптимизирован для работы МКС при температуре окружающей среды до максимально допустимой рабочей температуры с разумным запасом. Баланс тепловой нагрузки включает в себя: излучение окружающей среды на компоненты Дьюара, теплопередачу внутри Дьюара через держатель из-за температурного градиента и рассеивание мощности электронными компонентами, а также теплопередачу через них. Держатель должен изготавливаться из материала, сочетающего в себе гелиевую герметичность, механическую прочность и низкую теплопроводность.

Компромисс между жесткостью держателя, низкой теплопроводностью и прочной механической конструкцией, способной выдерживать механические условия окружающей среды, приводит к исследованию конструкции держателя и оптимизации толщины его стенок. В работе [33] для компактной МКС Ricor K562S с холодопроизводительностью 400 мВт при температуре криостатирования 150 К, а окружающей среды 71 °С оптимальная толщина холодного пальца в итоге составила 80 мкм. Также отметим, что в ходе изготовления держателя была реализована новая технология, основанная на лазерной сварке. В ближайшем будущем RICOR планирует заменить старую технологию, основанную на пайке, на лазерную сварку и для других моделей.

Для моделей Ricor, K588 и K580 было проведено исследование влияния материала и толщины трубки на тепловую нагрузку от самонагрева держателя. В качестве материала исследован инконель, титановый сплав и сплав L605 (сплав на основе кобальта с высоким содержанием хрома и вольфрама)

(см. рис. 4) [34]. С целью минимизировать нагрузку от самонагрева при сохранении необходимой жесткости холодного пальца для этих сплавов производителем были исследованы конструкции при различной толщине

стенок холодного пальца [34]. В свою очередь компания Thales производит держатели из нержавеющей стали (марка не уточняется), по крайней мере для коротких версий, а корпус Дьюара делается из сплава TA6V [35].

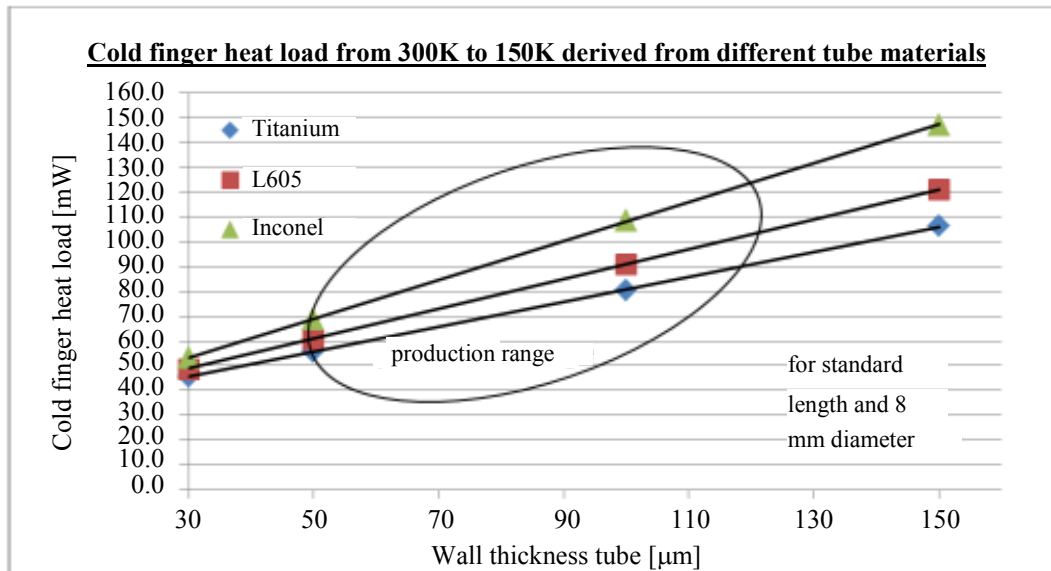


Рис. 4. Зависимость тепловой нагрузки самонагрева держателя от толщины стенки и материала [34]

4.5. Оптимизация теплопотерь

В фотоэлектронных устройствах с концепцией IDCA, потери тепла на уровне фокальной плоскости обусловлены двумя основными факторами:

- тепло, рассеиваемое рабочим компонентом;
- паразитные теплопотери с холодной стороны в окружающую среду.

Потери тепла возникают в результате теплопроводности, конвекции и излучения и сильно зависят от конфигурации Дьюара, температуры фокальной плоскости и температуры окружающей среды вокруг Дьюара. Вклад от теплопроводности и конвекции газа мал т.к. Дьюар вакуумируется. Значительная часть потерь тепла происходит из-за теплопроводности держателя, поскольку он выступает в качестве теплового моста между холодной и горячей сторонами. Для МКС, работающей при температуре окружающей среды $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температурой криостатирования 77 K , потери на теплопроводность в стенке холодного пальца составляют порядка 100 мВт .

Таким образом теплопроводность держателя вносит основной вклад в тепловые потери и составляет значительную часть общей тепловой нагрузки [36]. Исходя из информации, приведенной в работе [37] величина суммарной тепловой нагрузки 160 мВт . При этом, 50 мВт отводится на теплоту, выделяемую ФЧЭ, а 110 мВт нагрузка, создаваемая паразитическими потерями на стенках держателя, тепловой нагрузкой излучением со стенок Дьюара и теплопроводностью проводов соединений.

Термоменеджмент системы имеет решающее значение для энергопотребления и охлаждающей способности криосистемы. Основным параметром, который необходимо принимать во внимание и который иногда следует контролировать, является температура корпуса МКС. В большинстве случаев монтажная поверхность компрессора криогенной машины полезна для отвода тепла, а иногда это единственное место, где тепло может быть отведено из-за ограничений системы. Таким образом, конструкция МКС должна иметь как можно более низкое тепловое сопротивление

между всеми его компонентами. Например, в конструкции RICOR K544 обеспечивается эффективный теплоотвод за счет:

- достаточного теплообмена и между двигателем и корпусом компрессора;
- внешнего расположения контроллера МКС;
- достаточного теплообмена между фланцем холодного пальца и монтажной поверхностью МКС.

4.6. Подавление вибраций

Фотоэлектронные устройства, требующие криостатирования на низких температурах, зачастую могут работать в суровых внешних условиях. Поэтому как к самим фотоэлектронным элементам и управляющей электронике, так и к МКС предъявляются высокие требования в том числе и по виброустойчивости. Для этого проверяются все компоненты и под сборки МКС, чтобы оценить факторы безопасности конструкции. Рассмотрим изменения, внесенные в конструкции МКС Ricor K508, K549, K572 и др. [27].

Крепление компрессора к системе

В большинстве случаев компрессор является компонентом с наибольшей массой, поэтому для обеспечения максимально высоких собственных частот конструкции требуется надежное крепление. В новых моделях криогенных машин RICOR толщина ушек для крепления компрессора была увеличена с 2,5–3 мм до 5 мм. В одном конкретном случае инженерами RICOR было замечено, что первая собственная частота увеличилась на 300 Гц [27].

Крепление мотора к компрессору

Вторым элементом, имеющим большую массу в МКС, является электродвигатель. Статор интегральной роторной криогенной машины Стирлинга, установлен вне зоны действия рабочего газа и крепится одним болтом непосредственно к тонкостенной крышке газового ротора. Для повышения жесткости конструкции были изменены две характеристики:

- статор закреплен на 4 болта вместо одного;
- статор был закреплен на корпусе компрессора вместо тонкостенной крышки.

Фронтальная установка монтажной поверхности (в плоскость холодного пальца)

Фронтальная установка монтажной поверхности в интегральной роторной МКС Стирлинга предпочтительна в тех случаях, когда система с усиленной платформой требует хорошего термоменеджмента, усиления жесткости системы за счет конструкции криогенной машины и высокоточного позиционирования между детектором и системой, обеспечивающего точность оптической оси. На рисунке 5 приведен пример такой конструкции, которая была реализована в криогенной машине RICOR K544. [27] Такой подход позволяет уменьшить общий объем и массу системы. Для оценки жесткости конструкции, подверженной воздействию высокого уровня вибрации, был проведен расчет методом конечных элементов.

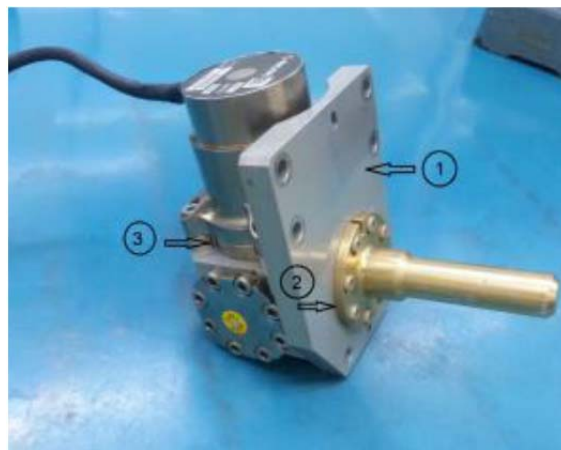


Рис. 5. Термоинтерфейсы криоохладителя K544: 1) – монтажная поверхность крепления системы; 2) – поверхность крепления холодного пальца; 3) – поверхность крепления двигателя

Крепление двигателя в случае фронтальной монтажной поверхности

Крепление статора в радиальном направлении компрессора является вспомогательной функцией, обеспечивающей дополнительную жесткость конструкции компрессора. При этом

компрессор уже прикреплен к системе с помощью переднего крепления. В этом случае необходима дополнительная мера предосторожности из-за возможной перегрузки компрессора, который жестко закреплен на двух разных поверхностях. В качестве решения используется полужесткое радиальное крепление двигателя.

Другие улучшения, внесенные в конструкцию RICOR K508N:

- увеличена производительность подшипников при сохранении прилагаемых усилий на прежнем уровне. Таким образом, срок службы каждого подшипника был значительно увеличен;
- плоское металлическое уплотнение было заменено на усиленное уплотнение типа "С".

Выводы

Несмотря на активное развитие таких криогенных систем как сплит-Стирлинг и охладителей на импульсных трубках, интегральные роторные микрокриогенные системы Стирлинга широко применяются в оборонной и космической промышленности. Эти МКС компактные и легкие, поэтому имеют преимущество по сравнению с другими криогенными машинами. Основной проблемой интегральных роторных микрокриогенных систем Стирлинга был ограниченный срок службы. Криогенные системы сплит-Стирлинг имели время наработки на отказ в среднем в 3–4 раза больший чем интегральные роторные системы, а отдельные криогенные машины, н-р Sunpower CryoTel DS 30 [2] работают до 200 тысяч часов, согласно информации от производителей. В последние десятки лет развитие интегральных роторных микрокриогенных систем Стирлинга позволило увеличить их срок службы в 3 раза.

Также отметим, что развитие интегральных роторных МКС Стирлинга непрерывно связано с развитием фотоэлектронных устройств на которых они применяются. Так увеличение требуемой температуры криостатирования с 77 К до 110–150 К позволило снизить энергопотребление криогенных машин, а также их массу и габаритные размеры.

Некоторые улучшения, внесенные в конструкции современных криогенных систем

рассмотрены в рамках этой статьи, но, несмотря на достигнутые успехи в области проектирования роторных МКС Стирлинга, остается еще большое поле для исследований, т. к. развитие новых ИК-детекторов для оборонной промышленности и космической отрасли требуют разработки новых или модификации существующих криогенных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Radebaugh R.* / Proceedings of the IEEE. 2004. Vol. 92. № 10.
2. <https://www.sunpowerinc.com/products/stirling-cryocoolers/cryotel-cryocoolers> (дата обращения: 28.05.2024).
3. *Walker G., Weiss M., Fauvel R., Reader Graham, Bingham E.* / Cryocoolers. 1992. Vol. 7. P. 759–766. doi: 10.4271/929036
4. *Martini W.* / "A Four Expansion Space Cryocooler Design Program", manuscript of a report prepared for U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Contract No. 40-RANP 5-B4748, Dr. R. Radebaugh, Project Officer, 1986.
5. *Altman A.* / 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). 2004. P. 497–502. doi: 10.1109/IECEC.2002.1392093
6. *Thomas B.* / ISEC. 2001. Vol. 10. P. 67–74.
7. *Mitchell M. P.* / Proc. Seventh International Cryocooler Conference. 1992. Vol. 1. P. 290.
8. *Bauwens L., Mitchell M. P.* / Proc. XVIIIth International Congress of Refrigeration. 1991. P. 930.
9. *Huang S. C.* / SAE Technical Paper Series. 1992. doi: 10.4271/929028
10. *Geng Steven M., Tew Roy C.* / SAE Technical Paper. 1992. P. 929029. doi: 10.4271/929029
11. *Gedeon D.* / Cryocoolers. 1995. Vol. 8. P. 281–292. doi: 10.1007/978-1-4757-9888-3_28
12. *Oron Ben D., Carmiel M., Segal V., Vainshtein I., Riabzev S., Filis A.* / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLV. 2019. Vol. 11002. P. 110022M. doi: 10.1117/12.2517715
13. *Veprik A., Tavori A., Raviv Z., Zehetzer S., Refaeli R., Wise A.* / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLV. 2019. Vol. 11002. P. 1100203. doi: 10.1117/12.2520314
14. *Krishnan M. A., Kuzhiveli B. T.* / Proc. International Cryocooler Conference. 2022. Vol. 22. P. 495–502.
15. *Mounir I., Zhang Zhi-Guo, Tew R., Roy C., Gedeon D., Simon T.* / 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 2001. NASA/TM—2001-211132.
16. *Wilson S., Dyson R., Tew R., Ibrahim M.* / 2nd International Energy Conversion Engineering Conference. 2004. AIAA 2004-5673. doi: 10.2514/6.2004-5673
17. *Ahmed L., Masud J., Toor Z.* / 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology. 2019. P. 767–771. doi: 10.1109/IBCAST.2019.8667153

18. Kirkconnell C. S., Ghavami A., Ghiaasiaan S. M. / Proc. SPIE 10626, Tri-Technology Device Refrigeration (TTDR) III. 2018. P. 1062604. doi: 10.1117/12.2307862
19. Dyson R., Wilson S., Tew R., Demko R. / Collection of Technical Papers – 3rd International Energy Conversion Engineering Conference. 2005. P. 1. doi: 10.2514/6.2005-5558
20. Ross R. G. / Cryocoolers. 2001. Vol. 11. P. 353–362.
21. Willems D., Benschop T., Arts R., De Veer B., Bollens P. / Cryocoolers. 2020. Vol. 21. P. 201–208.
22. Riabzev S., Filis A., Livni D., Regev I., Segal V., Gover D. / Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9821. P. 98210. doi: 10.1117/12.2224443
23. Arts R., Willems D., Benschop T., de Jonge G. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVII. 2021. Vol. 11741. P. 117410H. doi: 10.1117/12.2589838
24. Regev I., Nachman I., Livni D., Riabzev S., Filis A., Segal V. / Proc. of SPIE. 2016. Vol. 9821. P. 982108. doi: 10.1117/12.2224457
25. Schwertz F. A. / Journal of chemical physics. 1951. Vol. 19 (5). P. 640–646.
26. Marquardt E. D. / Cryogenics. 2002. Vol. 41. P. 845–849.
27. Nachman I., Riabzev S., Filis A., Gover D., Perach A., Regev I., Segal V. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLI. 2015. Vol. 9451. P. 945124. doi: 10.1117/12.2176019
28. Kuriyama T., Hakamada R., Nakagome H., Tokai Y., Sahashi M., Li R., Yoshida O., Matsumoto K., Hashimoto T. / Adv. Cryogenic Eng. 1990. Vol. 35. P. 1261–1269.
29. Veprik A., Refaeli R., Wise A., Kurucz S. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII. 2022. Vol. 12107. P. 121070I. doi: 10.1117/12.2618257
30. Archana B. S., Kuzhiveli B. T. / Proc. International Cryocooler Conference. 2022. Vol. 22. P. 189–196.
31. Owen Andrew P. / SPIE. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays. 1990. Vol. 1308. P. 303–311.
32. Ross R. / Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering. 2023. P. 5052. doi: 10.1117/12.497162
33. Filis A., Bar Haim Z., Pundak N., Broyde R. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXXV. 2009. Vol. 7298. P. 729818. doi: 10.1117/12.818427
34. Katz A., Segal V., Filis A., Haim Z., Nachman I., Krimnuz E., Gover D. / Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XL. 2014. Vol. 9070. P. 90702N. doi: 10.1117/12.2050317
35. Arts R., Martin J.-Y., Willems D., Segueineau C., Acker S., Mullié J., Göbel A., Tops M., Bordays J., Etchan-chu T., Benschop A. / Proc. of SPIE. 2015. Vol. 9451. P. 94511Z. doi: 10.1117/12.2176323
36. Vasse C., Griot R., Abousleiman V., Benschop T. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII. 2022. Vol. 12107. P. 121070J. doi: 10.1117/12.2618790
37. Vasse C., Abousleiman V., Benschop T. / Cryocoolers. 2022. Vol. 22. P. 143–150.

PACS: 07.20.Mc

Problems and development of modern integral rotary Stirling cryocoolers (a review)

D. D. Babenko, M. V. Bannikov, E. D. Korotaev and G. I. Nekrasov

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 22.07.2024; revised 8.08.2024; accepted 12.08.2024

The article reviews the current state and current developments of Stirling cryocoolers. Over the past ten years, new researches have opened up the potential for significant improvements and expansion of microcryogenic machines' applications. Methods for computational modeling of cryocoolers are considered. The problems of modern integral rotary Stirling cryocoolers and the improvements made in the design of commercial devices are presented and summarized in this article. Also the general trend in the development of new cryocoolers is presented.

Keywords: gas cryogenic machine, cryocooler, Stirling's cycle, microcryogenic machine, cold tip temperature.

REFERENCES

1. Radebaugh R., Proceedings of the IEEE **92** (10), (2004).
2. <https://www.sunpowerinc.com/products/stirling-cryocoolers/cryotel-cryocoolers> (data obrashcheniya: 28.05.2024).
3. Walker G., Weiss M., Fauvel R., Reader Graham and Bingham E., Cryocoolers **7**, 759–766 (1992). doi: 10.4271/929036
4. Martini W. "A Four Expansion Space Cryocooler Design Program", manuscript of a report prepared for U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Contract No. 40-RANP 5-B4748, Dr. R. Radebaugh, Project Officer, 1986.
5. Altman A. 37th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (IECEC). 2004, pp. 497–502. doi: 10.1109/IECEC.2002.1392093
6. Thomas B., ISEC **10**, 67–74 (2001).
7. Mitchell M. P. Proc. Seventh International Cryocooler Conference. 1992. Vol. 1, pp. 290.
8. Bauwens L. and Mitchell M. P. Proc. XVIIIth International Congress of Refrigeration. 1991, pp. 930.
9. Huang S. C., SAE Technical Paper Series. 1992. doi: 10.4271/929028
10. Geng Steven M. and Tew Roy C. SAE Technical Paper. 1992. P. 929029. doi: 10.4271/929029
11. Gedeon D., Cryocoolers **8**, 281–292 (1995). doi: 10.1007/978-1-4757-9888-3_28
12. Oron Ben D., Carmiel M., Segal V., Vainshtein I., Riabzev S. and Filis A., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLV **11002**, 110022M (2019). doi: 10.1117/12.2517715
13. Veprik A., Tavori A., Raviv Z., Zehetzer S., Refaeli R. and Wise A., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLV **11002**, 1100203 (2019). doi: 10.1117/12.2520314
14. Krishnan M. A. and Kuzhiveli B. T., Proc. International Cryocooler Conference **22**, 495–502 (2022).
15. Mounir I., Zhang Zhi-Guo, Tew R., Roy C., Gedeon D. and Simon T. 36th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. 2001. NASA/TM—2001-211132.
16. Wilson S., Dyson R., Tew R. and Ibrahim M. 2nd International Energy Conversion Engineering Conference. 2004. AIAA 2004-5673. doi: 10.2514/6.2004-5673
17. Ahmed L., Masud J. and Toor Z. 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology. 2019, pp. 767–771. doi: 10.1109/IBCAST.2019.8667153
18. Kirkconnell C. S., Ghavami A., and Ghiaasi-aan S. M. Proc. SPIE 10626, Tri-Technology Device Refrigeration (TTDR) III. 2018, pp. 1062604. doi: 10.1117/12.2307862
19. Dyson R., Wilson S., Tew R. and Demko R. Collection of Technical Papers – 3rd International Energy Conversion Engineering Conference. 2005, pp. 1. doi: 10.2514/6.2005-5558
20. Ross R. G., Cryocoolers **11**, 353–362 (2001).
21. Willems D., Benschop T., Arts R., De Veer B. and Bollens P., Cryocoolers **21**, 201–208 (2020).
22. Riabzev S., Filis A., Livni D., Regev I., Segal V. and Gover D., Proc. of SPIE **9821**, 98210 (2016). doi: 10.1117/12.2224443
23. Arts R., Willems D., Benschop T. and de Jonge G., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVII, **11741**, 117410H (2021). doi: 10.1117/12.2589838
24. Regev I., Nachman I., Livni D., Riabzev S., Filis A. and Segal V., Proc. of SPIE **9821**, 982108 (2016). doi: 10.1117/12.2224457
25. Schwertz F. A., Journal of chemical physics **19** (5), 640–646 (1951).
26. Marquardt E. D., Cryogenics **41**, 845–849 (2002).
27. Nachman I., Riabzev S., Filis A., Gover D., Perach A., Regev I. and Segal V., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLI **9451**, 945124 (2015). doi: org/10.1117/12.2176019
28. Kuriyama T., Hakamada R., Nakagome H., Tokai Y., Sahashi M., Li R., Yoshida O., Matsumoto K. and Hashimoto T., Adv. Cryogenic Eng. **35**, 1261–1269 (1990).
29. Veprik A., Refaeli R., Wise A. and Kurucz S., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII **12107**, 121070I (2022). doi: 10.1117/12.2618257
30. Archana B. S. and Kuzhiveli B. T., Proc. International Cryocooler Conference **22m** 189–196 (2022).
31. Owen Andrew P., SPIE. Infrared Detectors and Focal Plane Arrays **1308**, 303–311 (1990).
32. Ross R., Proc. SPIE. The International Society for Optical Engineering **5052** (2023). doi: 10.1117/12.497162
33. Filis A., Bar Haim Z., Pundak N. and Broyde R., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXXV **7298**, 729818 (2009). doi: 10.1117/12.818427
34. Katz A., Segal V., Filis A., Haim Z., Nachman I., Krimnuz E. and Gover D., Proc. of SPIE. Infrared Technology and Applications XL **9070**, 90702N (2014). doi: 10.1117/12.2050317
35. Arts R., Martin J.-Y., Willems D., Segueineau C., Acker S., Mullié J., Göbel A., Tops M., Bordays J., Etchan-chu T. and Benschop A., Proc. of SPIE **9451**, 94511Z (2015). doi: 10.1117/12.2176323
36. Vasse C., Griot R., Abousleiman V. and Benschop T., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XLVIII **12107**, 121070J (2022). doi: 10.1117/12.2618790
37. Vasse C., Abousleiman V. and Benschop T., Cryocoolers **22**, 143–150 (2022).