

УДК 542.455

МОДЕЛИРОВАНИЕ, МОДЕРНИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО КЛАПАНА ОДНОСТУПЕНЧАТОГО КРИООХЛАДИТЕЛЯ С ИМПУЛЬСНОЙ ТРУБКОЙ

Р. Г. Батулин¹, Н. А. Максимов¹, А. В. Кутергин²,
Д. С. Увин¹, А. А. Добрецов³

В работе представлено численное моделирование и анализ рабочих характеристик роторного клапана одноступенчатого криоохладителя Гиффорда–МакМагона с массовым потоком до 9.5 г/с. Исследование направлено на повышение эффективности теплообмена и надежности системы за счет модернизации геометрии и фазовых параметров клапана. Показано, что использование симметричной геометрии окон с углами фаз впуска 105° и выпуска 115° обеспечивает стабильную работу цикла при частоте 1.2 Гц. Предложенная конфигурация позволяет минимизировать износ трущихся поверхностей и увеличить ресурс работы механизма по сравнению с традиционными несимметричными решениями.

Ключевые слова: криоохладитель, роторный клапан, модернизация, импульсная трубка.

1. Введение. Современное развитие науки и техники предъявляет всё более высокие требования к системам охлаждения, особенно в области криогенных температур. Криоохладители находят широкое применение в передовых направлениях: квантовая электроника [1], оптические системы [2, 3], сверхпроводящие технологии [4, 5], материаловедении [6], медицинская диагностика [7], а также в космических [8, 9] и оборонных комплексах [10]. Среди различных типов криогенных установок особое место занимают

¹ Институт физики ФГАОУ ВО КФУ, 420008 Россия, Казань, ул. Кремлевская, 18; e-mail: tokamak@yandex.ru.

² Независимый исследователь.

³ ООО “Криотрейд инжиниринг”, 125367 Россия, Москва, ул. Габричевского, 5, к. 1.

одно- и двухступенчатые криоохладители Гиффорда–МакМагона (GM). Данные системы могут быть реализованы как с вытеснителем, так и с использованием пульсационной трубки (Pulse Tube Refrigerator, PTR). Второй тип отличается высокой надежностью, отсутствием движущихся частей в холодной зоне и низким уровнем вибраций, что делает его предпочтительным для чувствительного оборудования.

Ключевыми компонентами, определяющими производительность и коэффициент полезного действия (КПД) холодильной машины, являются регенеративный теплообменник и роторный клапан. Роторный клапан выполняет функцию преобразования постоянного потока рабочего газа (от компрессора) в переменный (пульсирующий) поток (рис. 1), необходимый для работы цикла.

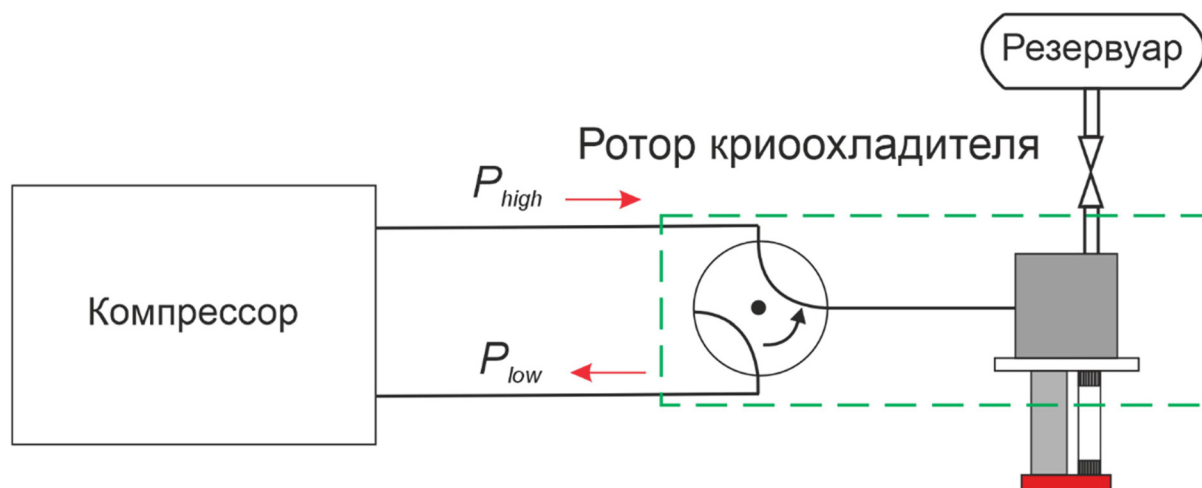


Рис. 1: Схематичное изображение устройства криоохладителя с импульсной трубкой.

Основными факторами, снижающими КПД GM-криоохладителя [11–15], являются:

1. Гидравлические потери: трение газа о стенки каналов клапана, местные сопротивления при внезапном расширении/сужении потока и образование вихревых зон.

2. Утечки рабочего газа: просачивание газа из контура высокого давления в контур низкого давления через технологические зазоры между ротором и статором, а также через каналы утечки, образующиеся вследствие абразивного износа трущихся поверхностей [16].

3. Термодинамические потери: несоответствие моментов открытия/закрытия клапана оптимальным точкам термодинамического цикла, приводящее к дросселированию и неэффективному использованию энергии расширения.

Целью данной работы является численное моделирование рабочих характеристик в роторном клапане, модернизация его геометрических параметров и фазовых углов для достижения заданных термодинамических характеристик при массовом потоке до 9.5 г/с, оптимизированных в работе [17].

2. Методика исследования.

2.1. Физическая модель и геометрия клапана. Роторный клапан в криоохладителе ГМ заменяет сложный механизм с двумя поршнями, используемый в классических двигателях Стирлинга. Он управляет потоком газа, поочередно соединяя регенеративный теплообменник с линией высокого (НР) и низкого (LP) давления компрессора.

Конструкция клапана состоит из неподвижной пластины (статора) и вращающегося ротора [18–20]. В данной работе предлагается, исследуется и оптимизируется симметричная конструкция ротора с трапецеидальными вырезами, обеспечивающими фазы впуска, и вырезами секторного типа с объединяющей перемычкой, обеспечивающими фазы выпуска (рис. 2).

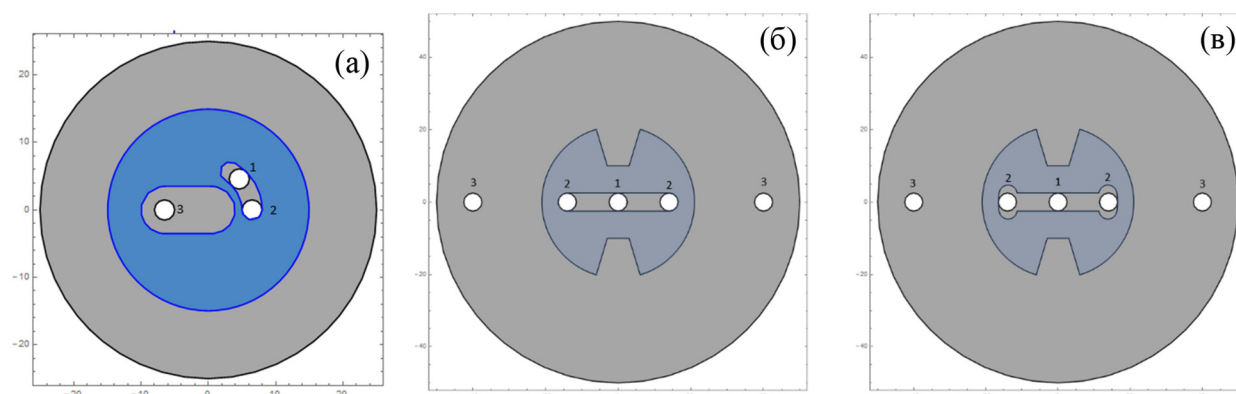


Рис. 2: Роторный клапан криоохладителя. Статор – клапанная пластина и ротор: 1 – центральное отверстие выпуска газа (LP), 2 – отверстия к регенеративному теплообменнику, 3 – напуск газа (НР). (а) асимметричная конструкция; (б) симметричная конструкция; (в) симметричная конструкция с увеличенными отверстиями напуска.

Цикл работы асимметричного клапана (полный оборот 360°) делится на четыре фазы:

1. Впуск (НР): подача газа высокого давления в регенеративный теплообменник.
2. Перекрытие 1: изоляция регенеративного теплообменника от обеих линий.
3. Выпуск (LP): сброс газа в линию низкого давления.
4. Перекрытие 2: изоляция регенеративного теплообменника от обеих линий.

В отличие от него на один цикл работы симметричного клапана приходится два полных цикла давления (два впуска и два выпуска), это решение снижает путь трения на один цикл давления, что позволяет увеличить ресурс в два раза относительно асимметричной конструкции. Кроме того, симметрия геометрии позволяет упростить механическую конструкцию и снизить вибрационные нагрузки.

2.2. Математическое обоснование фазовых углов. Длительность фаз определяется необходимостью обеспечения заданного массового расхода и учета инерционности газодинамических процессов.

Угол впуска α_{in} должен обеспечивать поступление массы газа m , необходимой для создания требуемой амплитуды давления в рабочем объеме. Время заполнения Δt оценивается через уравнение баланса и пиковый массовый поток:

$$\Delta t = \frac{V_{\text{sys}} \cdot \rho_{\text{gas}}}{\dot{m}_{\text{peak}}}, \quad (1)$$

где V_{sys} – эффективный рабочий объем системы (объем регенеративного теплообменника и импульсной трубки), ρ_{gas} – плотность гелия при давлении нагнетания, $\dot{m}_{\text{peak}}$ – пиковый массовый поток. Оптимизации массового потока и термодинамических характеристик криоохладителя Гиффорда–МакМагона были проведены в работе [16].

Для обеспечения надежной изоляции линий высокого и низкого давления вводится угол перекрытия β . Минимальный угол перекрытия должен превышать ширину прорези клапана минимум на 5° , чтобы исключить “короткое замыкание” (прямое соединение линий НР и ЛР линий), которое привело бы к перегреву компрессора и потере холода.

2.3. Численное моделирование. Формирование геометрии ротора, моделирование вращения ротора, анализ рабочей характеристики проводилось с использованием программного обеспечения Mathematica 10 и написанного программного кода. Геометрическое моделирование было выполнено с использованием аналитических примитивов и конструктивной блочной геометрии (булевых операций). Дискретизация геометрии осуществлялась на адаптивной сетке с базовым разрешением до 150 узлов по осям (параметр PlotPoints) и максимальной глубиной рекурсивного адаптивного сглаживания контуров, равной 4 (параметр MaxRecursion). В качестве основной рабочей характеристики для клапана используется временная зависимость площади перекрытия входа регенератора и отверстий впуска и выпуска при вращении ротора. Площадь вычислялась с помощью численного интегрирования геометрического региона, полученного путем применения булевой операции “И” (логического пересечения) к изолированным областям проходных окон статора и повернутых на текущий угол окон ротора. Получен-

ная фигура представляет собой мгновенное живое сечение канала, площадь которого находится двумерным интегрированием.

Частота повторения циклов давления выбрана равной 1.2 Гц (период цикла $T = 833$ мс) – характерная частота для подобных систем [17]. При использовании симметричной конструкции данная частота соответствует частоте вращения ротора 0.6 Гц.

Длительность фаз Δt можно рассчитать, используя формулу:

$$\Delta t = \frac{833 \text{ мс}}{360^{(\circ)}} \times \alpha^{(\circ)}. \quad (2)$$

Начальное положение ротора выбрано так, чтобы фаза выпуска была полностью открыта.

3. Результаты.

3.1. Расчет фазовых углов и модернизация конструкции выпускных отверстий. На основе расчетов массового баланса был определен оптимальный набор угловых параметров. При массовом потоке до $\dot{m}_{\text{peak}} = 9.5$ г/с и эффективном объеме до $V_{\text{sys}} \approx 580$ см³ [17] длительность открытого состояния $\Delta t = 243$ мс (см. формулу (1)) является достаточной для прохождения через клапан гелия массой до $m \approx 2.3$ г. В табл. 1 приведены значения: угла фазы впуска α_{in} , угла фазы выпуска α_{out} , углов мертвых зон β .

Такая конфигурация (105°/115°) является асимметричной по длительности рабочих фаз, но симметричной по конструкции прорезей ротора, что упрощает изготовление и балансировку. На рис. 3 представлена визуализация вращения ротора, демонстрирующая последовательное открытие и закрытие окон, а также влияние изменения геометрии на длительность выпуска и мертвых зон. В программе, меняя геометрию выпускного и/или впускного клапана, можно подбирать требуемые значения длительности впуска, выпуска и мертвых зон двумя способами: вычисляя интеграл перекрытия или визуально с погрешностью в несколько миллисекунд (см. табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Фазы работы и соответствующие им длительности для различных конструкций

Фаза	Угол	Асимм. (расчётные), t (мс)	Симм. (изм.), t (мс)	Симм. мод. (изм.), t (мс)
Впуск (HP), α_{in}	105°	243	241±2	241±2
Мертвая зона 1, β_1	70°	162	200±2	161±2
Выпуск (LP), α_{out}	115°	266	190±2	268±2
Мертвая зона 2, β_2	70°	162	200±2	161±2
Итого	360°	833	831	831

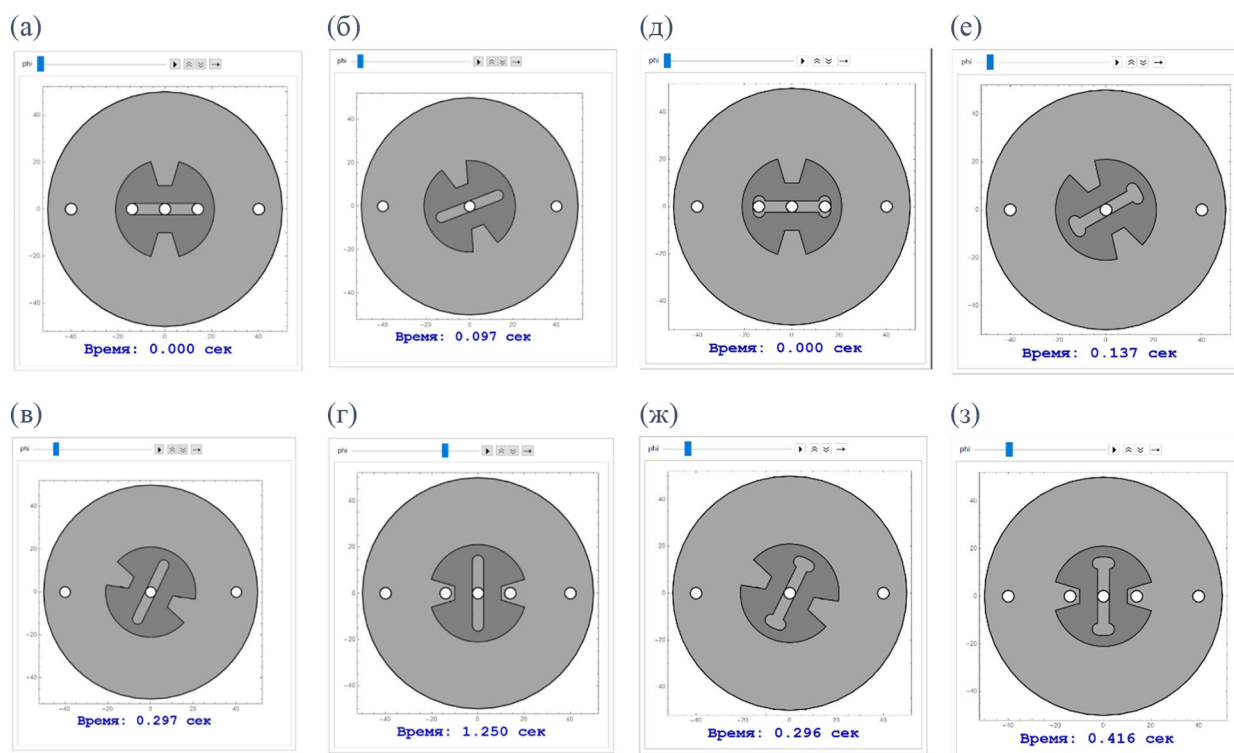


Рис. 3: Цикл вращения роторного клапана криоохладителя для двух конфигураций симметричного ротора: ((а), (д)) полностью открыт на выпуск; ((б), (е)) начало фазы мертвой зоны 1; ((в), (ж)) начало фазы высокого давления (впуск); ((г), (з)) полностью открыт на впуск.

3.2. Преимущества симметричной конструкции. Предложенная симметричная конструкция роторного клапана (одинаковая геометрия прорезей для впуска и выпуска) позволяет реализовать цикл напуска и выпуска за половину оборота ротора при сохранении необходимых фазовых сдвигов за счет асимметрии расположения окон на статоре или специфической формы прорезей.

Ключевые преимущества данной конструкции:

1. Снижение износа: симметрия распределения нагрузок на подшипники и трущиеся поверхности снижает неравномерность износа.

2. Увеличение ресурса: применение симметричных профилей позволяет снизить частоту вращения и удельную работу ротора на единицу производимого криоохладителем холода. Это упрощает конструкцию механизмов привода и балансировки, что потенциально увеличивает ресурс узла до двух раз по сравнению с несимметричными аналогами.

3. Стабильность работы: оптимизированные углы 105° и 115° обеспечивают стабильную амплитуду давления и минимизируют пульсации, что критично для достижения целевой температуры.

Рис. 4 иллюстрирует рабочую характеристику клапана криоохладителя, определяемую площадью перекрытия входа регенератора и отверстий впуска и выпуска при вращении ротора. Полученная зависимость имеет определяющее значение для дальнейших исследований, поскольку служит фундаментальной основой для точного расчета проводимости клапана, а также прецизионного моделирования газодинамических и термодинамических процессов в регенераторе.

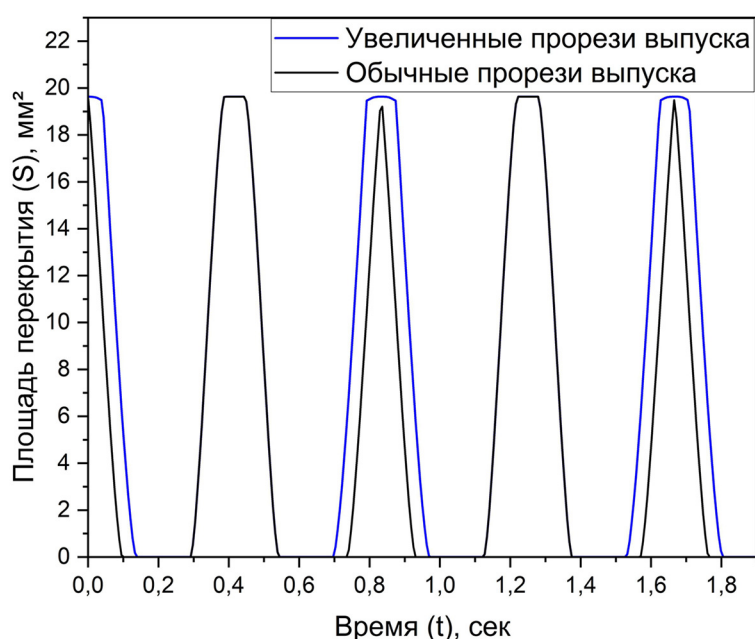


Рис. 4: Рабочая характеристика роторного клапана криоохладителя: изменение площади перекрытия (S) впускных и выпускных отверстий во времени (t) для двух геометрических модификаций профиля.

Угол выпуска 115° обеспечивает большую длительность фазы сброса давления. Избыток времени выпуска (по сравнению с впуском) компенсирует инерционность потока газа в регенераторе и импульсной трубке, предотвращая возврат горячего газа в холодную зону при закрытии клапана.

Симметричная конструкция ротора упрощает технологический процесс изготовления и сборки. Кроме того, равномерное распределение сил трения способствует более стабильной работе на высоких частотах.

4. Заключение. В настоящей работе предложен подход для оптимизации конструктивных параметров роторного клапана одноступенчатого криоохладителя.

Предложена симметричная конфигурация клапана, обеспечивающая надежную газодинамическую изоляцию контуров высокого и низкого давления. Предложенная конструкция позволит повысить эксплуатационную надежность механизма за счет равномерного распределения механических нагрузок на трущиеся компоненты роторного клапана. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и разработке новых поколений компактных криогенных систем.

Работа выполнена за счет предоставленного в 2025 году Фондом науки и технологий Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Park, B. Kim, S. Jeong, Progress in Superconductivity and Cryogenics **24**(2), 1 (2022).
- [2] R. Radebaugh, Pulse Tube Cryocoolers for Cooling Infrared Sensors. In: Proceedings of SPIE: Infrared Technology and Applications XXVI, San Diego, 30 July – 3 August 2000, Vol. 4130, pp. 363–378.
- [3] K. Stankiewicz, M. Makowski, M. Slowinski, et al., Cavity-enhanced spectroscopy in the deep cryogenic regime – new hydrogen technologies for quantum sensing. arXiv preprint arXiv:2502.12703. (2025), pp. 1–3. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.12703> (дата обращения: 19.04.2025).
- [4] H. Hirai, Y. Suzuki, M. Hirokawa, et al., Physica C: Superconductivity and its Applications **469**, 1857 (2009).
- [5] H. Dang, D. Wu, H. Tan, et al., IEEE Transactions on Applied Superconductivity **34**(3), 1 (2024).
- [6] D. S. Uvin, A. V. Kutergin, M. A. Cherosov, et al., Russ. J. Nondestruct. Test **61**, 1100 (2025). <https://doi.org/10.1134/S1061830925700287>.
- [7] W. Stautner, Cryocoolers for Healthcare. In: Cryocoolers / M. D. Atrey, W. Stautner, H. M. Skye, J. M. Pfothner, S. Jeong, J. Lee [et al.]; ed. by M. D. Atrey, J. G. Weisend II, S. Jeong. Cham: Springer, International Cryogenics Monograph Series, Gewerbestrasse, 2020, pp. 191–204.
- [8] J. Zhou, X. Zhi, Z. Ni, et al., Thermal Science and Engineering Progress **46**, 2 (2023).
- [9] J. Quan, Y. Liu, D. Liu, et al., Chinese Science Bulletin **59**, 3490 (2014).

- [10] T. Davis, B. J. Tomlinson, J. Ledbetter, Military Space Cryogenic Cooling Requirements for the 21st Century. In: Cryocoolers 11 / ed. by R. G. Ross, Jr. (New York, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2001), pp. 1–9.
- [11] Tian Gao, Chongtian Wu, Xin Chen, et al., Cryogenics **150**, № 104145 (2025).
- [12] Zhao Qinyu, Wang Bo, Chao Wei, et al., Heliyon **9**(7), (2023). DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e18479.
- [13] Panda Debashisa, Behera Suraj K., Satapathy Ashok K., Sarangi Sunil K. Journal of Thermal Science and Engineering Applications **14**(9), 091018 (2022). DOI: 10.1115/1.4054284.
- [14] Panda Debashisa, Behera Suraj K., Satapathy Ashok K., et al., Vacuum **199**, № 110938 (2022). DOI: 10.1016/j.vacuum.2022.110938.
- [15] Lei Tian, Zuev Yuri L., Bao Qian, Xu Mingyao, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering **755**(1), 012048 (2020). DOI: 10.1088/1757-899X/755/1/012048.
- [16] Р. Г. Батулин, А. В. Кутергин, Д. С. Увин и др., Дефектоскопия / Russian Journal of Nondestructive Testing № 6, 66 (2026).
- [17] N. A. Maksimov, R. G. Batulin, A. V. Kutergin, Superconductivity, issue **4**(1), 49 (2026). DOI: 10.62539/2949-5644-2026-4-1-49-59.
- [18] D. Panda, A. K. Satapathy, S. K. Sarangi, Engineering Reports **1**(3), e12044 (2019).
- [19] D. Liu, M. Dietrich, G. Thummes, G. Gan, Cryogenics **81**, 100 (2017).
- [20] M. E. Will, I. A. Tanaeva, R. Li, A. Waele De, Cryogenics **44**(11), 793 (2004).

Поступила в редакцию 15 мая 2026 г.

После доработки 16 июня 2026 г.

Принята к публикации 16 июня 2026 г.