

УДК 542.455

Проектирование и оптимизация регенератора криогенного пульсационного охладителя

Н. КЕДАМ¹, канд. техн. наук Д. В. САРМИН², А. Л. ЛОПАТИН³,
канд. техн. наук С. О. НЕКРАСОВА⁴, канд. техн. наук Е. В. БЛАГИН⁵

¹naresh.kedam@gmail.com, ²sarmin.d.v@mail.ru, ³aleksei-1119@mail.ru,
⁴yhoji@yandex.ru, ⁵evgenyblagin@gmail.com

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(Самарский университет)

Исследована возможность оптимизации криогенного пульсационного охладителя с температурой охлаждения 80 К. Проведена оценка параметров криоохладителя с учетом особенностей теплообмена и потерь давления при осциллирующем течении газа в регенераторе в программе Regen 3.3. Цель исследования — определение оптимальных конструктивных и рабочих параметров регенератора, при которых будет получена наибольшая эффективность охладителя. Исследовано влияние на рабочие параметры газа в регенераторе таких факторов, как частота колебаний рабочего тела, сдвиг фазы, обратный массовый расход, а также длина регенератора. В ходе моделирования с использованием REGEN 3.3 выявлено изменение каких базовых переменных приводят к значительному изменению характеристик ПКО. В результате оптимизации были получены значения рабочих параметров, при которых достигалось максимальное значение эффективности (COP), равное 0,132. Для заданного уровня холодопроизводительности и температуры охлаждения равной 80 К получены следующие параметры криоохладителя: длина регенератора 0,045 м, частота колебаний 40 Гц, сдвиг фазы -40° , обратный массовый расход $0,145 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$, соответственно. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании регенератора газовых криогенных машин, а также демонстрируют влияние параметров регенератора на холодопроизводительность и эффективность охладителя.

Ключевые слова: регенератор, криоохладитель, теплообмен, осциллирующий поток, CFD-моделирование.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 16.05.2023, одобрена после рецензирования 28.07.2023, принята к печати 15.08.2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-51-59

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Кедам Н., Сармин Д. В., Лопатин А. Л., Некрасова С. О., Благин Е. В. Проектирование и оптимизация регенератора криогенного пульсационного охладителя // Вестник Международной академии холода. 2023. № 4. С. 51–59.
DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-51-59

Design and optimizaion of regenerator for pulse cryocooler

N. KEDAM¹, Ph. D. D. V. SARMIN², A. L. LOPATIN³,

Ph. D. S. O. NEKRASOVA⁴, Ph. D. E. V. BLAGIN⁵

¹naresh.kedam@gmail.com, ²sarmin.d.v@mail.ru, ³aleksei-1119@mail.ru, ⁴yhoji@yandex.ru, ⁵evgenyblagin@gmail.com

Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (Samara University)

The possibility of optimization of a pulse cryocooler with a cooling temperature of 80 K is investigated. The parameters of the cryocooler were evaluated taking into account the peculiarities of heat exchange and pressure losses at oscillating gas flow in the regenerator in the Regen 3.3 package. The aim of the study is to determine the optimal design and operating parameters of the regenerator, at which the greatest efficiency of the cooler will be obtained. The influence of such factors as the frequency of oscillation of the working body, phase shift, reverse mass flow rate, and the length of the regenerator on the operating parameters of the gas in the regenerator was investigated. During modelling using REGEN 3.3 the changes of basic variables resulting in significant change of the pulse cryocooler characteristics were revealed. As a result of optimization the values of operating parameters were obtained, at which the maximum value of efficiency of 0.132 was achieved. For a given level of cooling capacity and cooling temperature of 80 K, the following parameters of the cryocooler were obtained: regenerator length 0.045 m, oscillation frequency 40 Hz, phase shift -40° , reverse mass flow rate $0.145 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$. The results of the study can be used in the design of a regenerator for gas cryogenic machines, and also demonstrate the influence of the regenerator parameters on the cooling capacity and efficiency of the cooler.

Keywords: regenerator, cryocooler, heat exchange, oscillating flow, CFD-mmodellling.

Article info:

Received 16/05/2023, approved after reviewing 28/07/2023, accepted 15/08/2023

DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-51-59

Article in Russian

For citation:Kedam N., Sarmin D. V., Lopatin A. L., Nekrasova S. O., Blagin E. V. Design and optimization of regenerator for pulse cryocooler. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2023. No 4. p. 51–59. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-4-51-59**Введение**

Пульсационный криоохладитель (ПКО) — это тип холодильной машины, в которой используется сжатый газ для создания разницы температур между двумя элементами, что позволяет охлаждать объекты или материалы до очень низких температур. Он работает на идее регенеративного охлаждения, при котором газ при прохождении через трубки и сетки периодически нагревается и охлаждается.

Одной из ключевых особенностей ПКО [1]–[3] является отсутствие движущихся частей конструкции в области криогенных температур, что делает данный тип газовых холодильных машин очень надежными и не требующими технического обслуживания. Они также имеют относительно простую и компактную конструкцию, что делает их пригодными для широкого спектра применений.

ПКО имеют широкий спектр применений, требующих надежного и эффективного охлаждения при низких температурах:

- охлаждение материалов и оборудования, используемых в научных исследованиях и промышленных устройствах: лазеров, сверхпроводящих магнитов и другого чувствительного оборудования;

- медицина и здравоохранение: охлаждение медицинских устройств, таких как аппараты МРТ и ПЭТ-сканеры, хранение и транспортировка медицинских образцов и биологических материалов;

- аэрокосмическая и оборонная промышленность, включая спутниковые системы и получение изображений ИК-приемниками;

- автомобильная промышленность: ПКО используются в некоторых гибридных и электрических транспортных средствах для охлаждения аккумуляторных батарей и другой электроники.

Оптимизация рабочего процесса ПКО выполняется с целью получения максимальной холодопроизводительности при заданном уровне охлаждения T_{cold} . С этой целью проводятся исследования влияния длины и размера каналов регенератора и теплообменников ПКО [4], как правило, оценка и моделирование рабочих параметров криоохладителей с целью оптимизации проводится с помощью программных продуктов, например, с использованием пакета REGEN 3.3 [1, 3, 5, 6].

Использование в данной работе программы REGEN 3.3 обусловлено тем, что в большом ряде работ достоверность результатов численного моделирования в программе REGEN подтверждается экспериментальными данными испытаний ПКО [5, 7]. Программа позволяет проведение параметрических исследований [6, 8] с достаточной сходимостью, чтобы гарантировать точные результаты. Параметрические исследования на основе пакета REGEN позволяют оценить изменение холодо-

производительности, температуры на холодном теплообменнике в зависимости от параметров сжатия, размеров регенератора и теплообменников, объема пульсационной трубы [9]. Кроме того, проведение параметрического анализа с изменением холодных температур в широком диапазоне [6] в данном программном продукте позволяет избежать проблем со сходимостью решения из-за перехода на более высокие значения частоты рабочего процесса. Целью данной работы было определение рабочего диапазона параметров регенератора и характера влияния рабочих параметров на максимальный уровень холодопроизводительности при фиксированном значении температуры холодного конца ПКО на уровне 80 К.

Параметры конструкции и рабочего процесса криогенного пульсационного охладителя**1. Характеристики регенератора**

Регенератор является важной частью пульсационного криоохладителя, основной функцией которого является хранение и высвобождение энтальпии потока рабочего тела в полости пульсационной трубы при осуществлении термодинамического цикла охлаждения [10]. В результате процессов сжатия и расширения термодинамического цикла охлаждения регенератор накапливает и отдает тепло газу и стенкам пульсационной трубы, эффективно «запасая» тепловую мощность при прохождении газа между холодной и горячей областями ПКО. Способность регенератора накапливать и отдавать тепловую энергию позволяет криоохладителю поддерживать постоянную разницу температур между холодной и горячей областями (рис. 1), необходимую для эффективного теплообмена и осуществления цикла [10].

Таким образом, характеристики регенератора определяют эффективность и холодопроизводительность пульсационного криоохладителя.

В конструкции ПКО регенератор [5, 11] представляет собой набор сеток или матриц из материала с высокой теплоемкостью, часто из нержавеющей стали. Существует несколько параметров [4, 12], которые влияют на эффективность регенератора в пульсационном криоохладителе.

1. *Свойства материала регенератора: теплопроводность, теплоемкость.* Для создания заданного градиента температуры на регенераторе используются наборы сеток из металлов с различными характеристиками теплопроводности и теплоемкости для предотвращения нежелательных перетечек теплоты.

2. *Габаритные размеры и размеры ячейки регенератора.* Длина и диаметр регенератора также могут влиять на его эффективность. Большая длина регенератора позволяет подводить в цикле большую тепловую мощность, повышая холодопроизводительность ПКО. В то же время потери газа на трение и падение давления в регенерато-

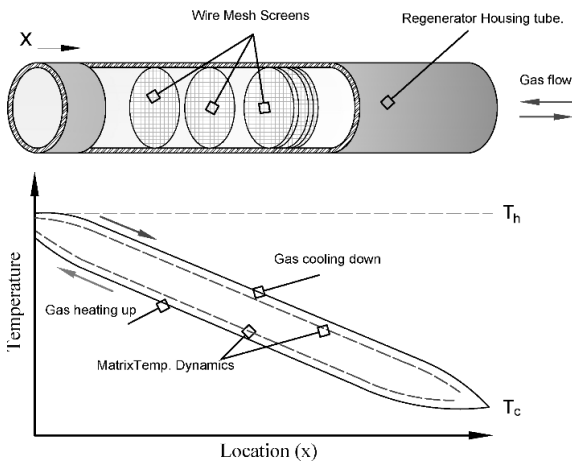


Рис. 1. Ожидаемое изменение температуры матрицы и газа для процессов нагрева и охлаждения регенератора
 Fig. 1. . Expected change in matrix and gas temperature for the regenerator heating and cooling processes

ре оказывают влияние на эффективность ПКО и на величину температуры на холодном конце ПКО. В данной работе рассматривается сетчатый стальной регенератор.

3. Расход рабочего тела: скорость осциллирующего движения или расход потока газа через регенератор также может влиять на его эффективность [13]. При проектировании требуется оптимизировать расход, потери давления и параметры теплообмена в регенераторе с учетом мощности и амплитудных характеристик компрессорной части, предотвращая режимы работы с повышенным энергопотреблением компрессора. При проектировании требуется найти оптимальный расход, который устанавливает компромиссное соотношение между теплопередачей и перепадом давления.

Параметры рабочего процесса ПКО

Параметры рабочего процесса ПКО, которые оказывают влияние на эффективность рабочего цикла и должны быть учтены в численном моделировании:

— Рабочая частота: определяет скорость процессов сжатия и расширения газа в цикле. Увеличение частоты может повысить эффективность охлаждения, но также увеличивает энергопотребление компрессора. Увеличение рабочей частоты приводит к снижению температуры холодного конца и уменьшению размеров ПКО.

— Фазовый сдвиг: это смещение между временными зависимостями амплитуды давления и расхода рабочего газа. Данный параметр при проектировании регулируется с помощью соотношения объема полостей ПКО, подбора характеристик пульсационной трубы и дросселя с целью оптимизации рабочего процесса криоохладителя. Большой фазовый сдвиг увеличивает холодопроизводительность, при этом требуется согласование рабочих параметров компрессорной и холодильной части.

— Эффективность теплообменных аппаратов ПКО: эффективность теплообменников пульсационного криоохладителя определяется объемом рабочего газа в нем, пористостью теплообменников [14], а также характеристиками теплообмена между газом и материалом стенки в условиях колебательного движения газа.

— Параметры рабочего тела ПКО: заправка контура ПКО рабочим телом под давлением обеспечивает увеличение массы рабочего тела, участвующего в термодинамическом цикле. Использование рабочих тел с высокой удельной теплоемкостью, теплопроводностью и малой вязкостью улучшает охлаждающую способность криоохладителя.

Для оптимизации работы пульсационного криоохладителя обычно необходимо проведение параметрических расчетов, численного моделирования течений с учетом теплообмена с верификацией на основе экспериментальных исследований с различными комбинациями рабочих параметров. Также важно учитывать конкретные технические требования объекта, для которого разрабатывается криоохладитель, поскольку они будут определять компромисс между производительностью и другими факторами, такими как размер, вес и энергопотребление ПКО. Поскольку регенератор играет основную роль в реализации рабочего процесса пульсационного криоохладителя, в данной работе предложен алгоритм расчета регенератора и проведены его параметрическое исследование и оптимизация с целью получения максимальной холодопроизводительности.

2. Методология параметрического моделирования регенеративного теплообменника при помощи Regen 3.3

Регенеративный теплообменник был смоделирован в программе Regen 3.3, которая является стандартным продуктом для моделирования газодинамики и теплообмена в условиях осциллирующего движения газа внутри регенератора. В условиях численного моделирования решаются следующие уравнения:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0. \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial x} - f(p, T, v) = 0. \tag{2}$$

$$\frac{\partial \phi A E}{\partial t} + \frac{\partial(\phi A(E + p)v)}{\partial x} - \frac{\partial \left(\frac{\phi A k_g \partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} - \phi A q(p, T, T_m, v) = 0. \tag{3}$$

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \phi A q(p, T, T_m, v) - \frac{(1 - \phi) A k_m \frac{\partial T_m}{\partial x}}{\partial x} = 0. \tag{4}$$

Здесь параметр $D(x, T)$ — величина теплосодержания матрицы, определяемый как

$$D(x, T) = \int_{T_{min}}^T (1 - \phi) A C_{p_m}(x, T) dT. \tag{5}$$

Величина теплоты, подводимой в матрицу регенератора в течение половины цикла $q(p, T, T_m, v)$ определяется через энтальпию газа:

$$q(p, T, T_m, v) = \frac{4H(p, T, v)(T_m - T)}{D_h}. \tag{6}$$

В расчете принято, что массовый расход на концах регенератора имеет гармонический закон изменения. При параметрическом исследовании параметры регенератора разделены на две группы: фиксированные параметры и исследуемые параметры (табл. 1, 2). В ходе чис-

ленного моделирования получены диапазоны исследуемых параметров для значений фиксированных параметров, подобранных на основе имеющихся в научной литературе сведений о рабочих режимах пульсационных криоохладителей с температурой холодного конца порядка 80 К.

Численное моделирование основано на изменении в заданном диапазоне исследуемых параметров и оценке холодопроизводительности и температуры холодного конца ПКО. Изменение длины регенератора, фазового угла и массового расхода газа взаимосвязаны. Площадь живого сечения для газового потока A_g , равная произведению общей площади поперечного сечения на пористость, определяет величину массового расхода m_c на конце регенератора. Поэтому, несмотря на гармоническое изменение массового расхода в течение периода колебаний, переменной, определяющей холодопроизводительность ПКО является удельная площадь поперечного сечения регенератора или обратный массовый поток (A_g/m_c). Коэффициент холодопроизводительности зависит от соотношения A_g/m_c . При расчете изменялся массовый расход газа в регенераторе, потери энтальпии потока за счет теплопроводности матрицы и стенок корпуса регенератора не учитывались.

Для оценки рабочих режимов ПКО при проведении численного моделирования были использованы следующие параметры, которые приведены для удобства в обозначениях, используемых в программе Regen.

Таблица 1

Фиксированные параметры

Fixed parameters

Фиксированный параметр	Тип/значение
Материал регенератора	нержавеющая сталь
Тип регенератора	сетка (400)
Среднее давление (P_{avg})	2 (МПа)
Отношение давлений (P_r)	1,2
Температура на горячем конце (T_{hot})	300 (К)
Температура на холодной конце (T_{cold})	80 (К)
Внутренний диаметр регенератора (D)	15 (мм)
Площадь поперечного сечения регенератора (A)	1,767E-5 (м ²)
Гидравлический диаметр регенератора (D_h)	4,14E-5 (м)
Пористость (ϕ)	0,686
Рабочее тело	гелий

Таблица 2

Исследуемые параметры

Parameters under investigation

Исследуемые параметры	Значение
Частота f	30 to 120 Гц
Сдвиг фаз θ_c	-30 to -60°
Обратный массовый расход A_g/m_c	0,15 to 0,35 м ² /(кг/с)
Длина регенератора L	20 to 60 мм

Коэффициент холодопроизводительности криоохладителя:

$$COP = \frac{NTCADJ}{PVWK0T}, \tag{7}$$

где NTCADJ — суммарная холодопроизводительность ПКО; PVWK0T — работа сжатия на теплом конце регенератора.

Суммарная холодопроизводительность NTCADJ рассчитывается по величине начальной работы сжатия на холодном конце регенератора (PVWK1), значение которой можно получить как:

$$PVWK1 = \int_{t-\tau}^t \frac{\phi A v(L, t) p(t) \rho(L, t)}{\rho_c \tau} dt, \tag{8}$$

где $v(L, t)$ и $\rho(L, t)$ представляют собой значения мгновенной скорости и плотности газа на холодном конце регенератора при температуре T_c , а $p(t)$ представляет собой мгновенное значение амплитуды давления.

Суммарная холодопроизводительность (NTCADJ) определяется как:

$$NTCADJ = GRCADJ - RGLOSS - HTFLUX - TUBECD. \tag{9}$$

Общая холодопроизводительность с поправкой на потери в расширительном пространстве (GRCADJ) определяется по уравнению:

$$GRCADJ = (PVWK1 - PRLOSS) \cdot COOLING_MULT. \tag{10}$$

Влияние повышения давления на энтальпию газового потока оценивается корректировочными коэффициентом PRLOSS, а учет неизотермичности расширения на мощность охладителя оценивается слагаемым COOLING MULT.

Неидеальность работы регенератора проявляется в потерях, величина которых определяется уравнением (11):

$$RGLOSS = ENTFLX - PRLOSS, \tag{11}$$

где HTFLUX относится к тепловым потокам, вызванным теплопроводностью через холодную сторону матрицы, а ENTFLX — среднеинтегральное значение энтальпии потока, который протекает на холодном конце регенератора в течение всего цикла. Поскольку площадь контакта между различными слоями материала матрицы мала, эффективная теплопроводность матрицы ниже, чем объемная теплопроводность материала матрицы [7]. Используя поправочный коэффициент для теплопроводности, расчет в программе REGEN можно модифицировать, чтобы учесть влияние пористости на способность материала передавать тепло.

Слагаемое TUBECD относится к утечкам теплоты за счет теплопроводности через корпус матрицы регенератора. Считается, что корпус матрицы выполнен из нержавеющей стали, имеющий постоянный во времени температурный профиль:

$$TUBECD = -\frac{\sqrt{4\pi Ah}}{L} \int_{T_c}^{T_H} \sigma(T) dT, \tag{12}$$

где $\sigma(T)$ — теплопроводность материала корпуса.

Суммарную мощность криоохладителя можно рассчитать с использованием уравнений (9), (10) и (11) по формуле:

$$NTCADJ = PVWK1 - ENTFLX - HTFLUX - TUBECD. \quad (13)$$

Расчет работы сжатия на горячем конце трубы аналогичен расчету на холодном конце. Однако в данном случае скорость и плотность рассчитываются по параметрам горячего конца, давление в котором рассчитывается путем добавления рассчитанного перепада давления к давлению на холодном конце регенератора.

При небольших значениях отношения амплитуды давления к давлению заправки приблизительное значение работы сжатия на холодном конце, обозначенное как PVWK1, может быть рассчитано следующим образом:

$$W_c = \frac{1}{2} R \cdot T_c \cdot \dot{m}_c \frac{P_d}{P_0} \cos \theta, \quad (14)$$

где R — газовая постоянная рабочего тела ПКО, m_c — массовый расход на холодном конце для заданной амплитуды колебаний, и, следовательно, потерь в регенераторе, которые зависят от сдвига фазы между расходом и давлением. Очевидно, что наименьшие затраты на сжатие будут в случае, когда расход газа находится в одной фазе с давлением; однако это может происходить только в одной области регенератора и должно быть близко к середине регенератора. Для определения фазы в средней точке сначала необходимо определить сдвиг фазы на холодном конце. Массовый расход на холодном конце, обозначенный m_c и сдвиг фазы на холодном конце рассчитываются на основе посчитанной ранее работы сжатия на холодном конце. Эти переменные используются в качестве исходных данных для расчета.

Алгоритм расчета

Следующий алгоритм расчета был предложен с учетом значений фиксированных параметров в табл. 1.

1. Определить значения для длины регенератора (L), обратного массового расхода (A_g/m_c) и сдвига фазы (θ) с использованием подготовленных значений полей данных (см. рис. 2, 3) на основе следующих уравнений (15)–(17):

$$L = 0,0028 + \frac{0,246}{f^{0,44767}}; \quad (15)$$

$$\frac{A_g}{m_c} = 0,0035 + \frac{0,957}{f^{0,50594}}; \quad (16)$$

$$\theta_c = 0,00028f^2 - 0,1513f - 36,738, \quad (17)$$

где f — частота.

2. Задать рабочий режим в REGEN 3.3, а именно: рабочую частоту, отношение давлений и сдвиг фазы между давлением и массовым расходом на холодном конце регенератора, температуры холодного и горячего конца регенератора. Значения, используемые в работе приведены в табл. 3.

3. Провести расчет в программе REGEN 3.3 с фиксированными параметрами и оценочными значениями конструктивных параметров, полученными в п. 1, для рас-

Таблица 3

Значения режима работы для REGEN 3.3

Table 3

The values of operating mode for REGEN 3.3

Name	Value
final_cycle	30000
num_points_x	81
num_steps_cyc	300
mat_cond_factor	0,13
cooling_mult	0,8
mid_temp_ratio	0,46

чета оптимального режима работы, соответствующего максимальному КПД (COP) согласно уравнению (18):

$$\begin{aligned} COP = & 2,851040620 \cdot 10^{-7} \theta^3 + \\ & + (0,0000201229437 + 0,000908427256L - \\ & - 1,266586890 \cdot 10^{-7} f - 0,00564844604L^2 + \\ & + 0,000517846603 \frac{A_g^2}{m_c} + 3,20184 \cdot 10^{-10} f^2 - \\ & - 0,000264856313 \frac{A_g}{m_c}) \theta^2 + (0,002352031266 - \\ & - 0,0231567586 \frac{A_g}{m_c} + 5,4700914 \cdot 10^{-8} f^2 + \\ & + 0,0302790756L + 0,054133515 \frac{A_g^2}{m_c} - \\ & - 0,0000250070461f - 0,264856825L^2) \theta + \\ & + 12,4580658 \frac{A_g^3}{m_c} + (-13,46406995 + \\ & + 201,020159L + 0,0411551993f - 1444,85083L^2 - \\ & - 0,000452071888f^2) \frac{A_g^2}{m_c} + (3,678720596 + \\ & + 0,0000540676338f^2 - 80,7379688L - \\ & - 0,0108986468f + 628,249985L^2) \frac{A_g}{m_c} + \\ & + 1167,81491L^3 + (-280,1002637 + \\ & + 0,547629162f - 0,000300641109f^2)L^2 + \\ & + (21,215865 + 0,000132503493f^2 - \\ & - 0,0888911092f)L - 0,4205162 + \\ & + 0,003344663467f + 1,4570782 \cdot 10^{-8} f^3 - \\ & - 0,00001234932318f^2. \end{aligned} \quad (18)$$

4. Рассчитать фактическую величину холодопроизводительности на единицу площади охлаждаемой поверхности:

$$\frac{q}{A_g} = -0,108f^2 + 61,975f + 13780,894. \quad (19)$$

В оценке значения принимают тот факт, что холодопроизводительность зависит от площади поперечного сечения регенератора, что необходимо учитывать в оценке потребной мощности компрессора при проектировании или масштабировании ПКО.

Настройка итеративного расчета оптимальной конструкции регенератора для криоохладителя с пульсационной трубой. Данная процедура касается настройки значения угла фазового сдвига на холодном конце регенератора путем согласования характеристик ПКО

из табл. 1 и параметров компрессорной части. При этом контролируемым параметром служит расчетная величина обратного массового расхода рабочего газа на холодном конце.

Критерии сходимости численного моделирования в REGEN 3.3

В программном продукте REGEN 3.3 используется одномерный метод конечных разностей на основе решения уравнений сохранения массы, количества движения и энергии для потока газа через регенератор, а также уравнения сохранения энергии для матрицы регенератора. Для каждого временного шага и координаты по длине регенератора решение вычисляет температуру, давление, плотность и скорость газа по длине регенератора для каждого временного шага и координаты. Из-за синусоидального характера зависимостей параметров газа в процессе численного моделирования решающим фактором в определении сходимости является цикличность установившегося режима.

В связи с этим важную роль при проведении численного моделирования играет предварительная оценка и задание корректных значений начальных параметров, временного шага и наличие верного распределения пространственной дискретизации рабочего контура ПКО, т. е. достаточного количества точек сетки. Кроме того, существует минимальное количество циклов, ниже которого циклическое устойчивое состояние не может достигаться для каждого временного шага и координаты по длине. Для сходимости циклического устойчивого состояния требуется минимальное необходимое количество циклов. Это количество определяется формирующимся в результате расчета профилем температуры. Если на конце регенератора он является нелинейным, то в этом случае подбирается значение подходящей температуры в середине регенератора, что значительно ускоряет процесс расчета, поскольку уменьшает количество циклов, за которое достигается сходимость результатов расчета. Исследование показывает, что 30 000 циклов достаточно для установления циклически стационарного режима при частоте циклов 100 Гц [2, 6, 7].

В данной работе начальное значение отношения температур холодного и горячего конца в середине регенератора было определено как 0,46. В ходе численного

моделирования процессов в регенераторе рассчитан и проанализирован рабочий процесс ПКО с использованием 81 сеточной точки, 300 временных шагов для каждого цикла и 30 000 циклов для того, чтобы получить оптимальное решение для температуры в средней точке. Тем не менее, существует несколько ограничений, которые стоит контролировать при отыскании параметра отношения температур в регенераторе этим методом. Он будет работать правильно только в том случае, если входные граничные условия воспроизведены идентично, а параметры сетки остаются неизменными.

Результаты расчета и их анализ

Для проведения моделирования в программе REGEN 3.3, в качестве исходных данных предварительно произведена оценка набора характеристик пульсационного криоохладителя. По результатам анализа были получены аналитические зависимости, которые могут быть использованы для проектирования и оптимизации регенеративных теплообменников в пульсационных охладителях. Эти зависимости представляют собой уравнения (15)–(19) и приведены выше.

С использованием данных обобщенных зависимостей получены следующие значения охладителя: длина регенератора — 0,045 м, частота — 40 Гц, сдвиг фазы -40° , обратный массовый расход $0,145 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$. Для заданного набора значений параметров значение эффективности ПКО (COP) при предварительной оценке равно 0,132.

На рис. 4 и 5 представлены результаты численного моделирования в виде диапазонов значений характеристик для фиксированных параметров (табл. 1): обратный массовый расход меняется в диапазоне между 0,14 и $0,16 \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с})$, а сдвиг фазы в диапазоне между $-43 \dots -39^\circ$. Значения фиксированных параметров выбирались на основе полей величин, представленных на рис. 2 и 3, соответственно, т. е. для длин регенератора L из диапазона $0,045 \dots 0,05$ м, рабочая частота f в диапазоне 40...45 Гц. Было показано, что эффективность будет уменьшаться линейно с увеличением частоты и будет расти с увеличением длины регенератора. Кроме того, эффективность увеличивается вместе с увеличением обратного массового расхода и сдвига фазы до момента, когда он достигает своего максимального значения, после чего начинает уменьшаться. Удельная холодопроизводительность на единицу площади поперечного сечения

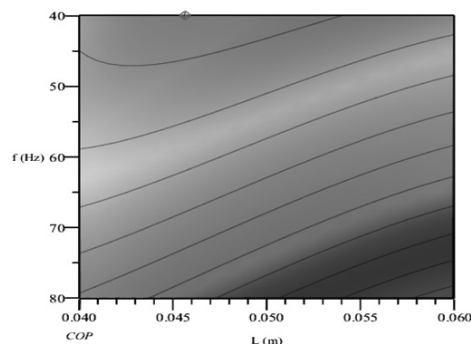
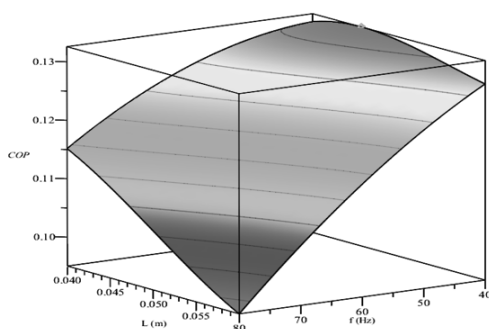


Рис. 2. Зависимость эффективности COP от частоты f и длины L
Fig. 2. Dependency of maximum efficiency on frequency f and length L

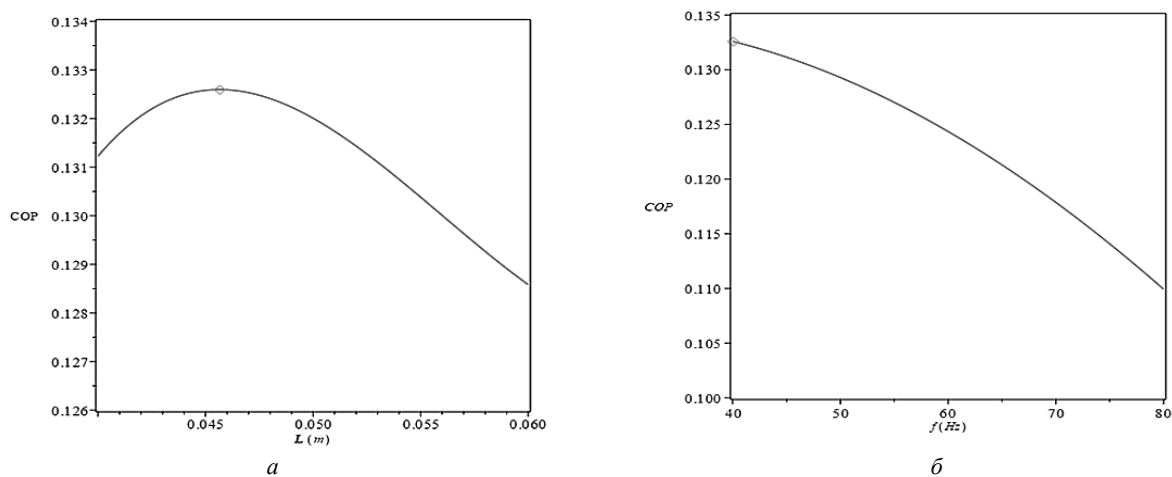


Рис. 3. Зависимость эффективности от длины L (а) и частоты f (б)
 Fig. 3. Dependency of efficiency on length L (a) and frequency (б)

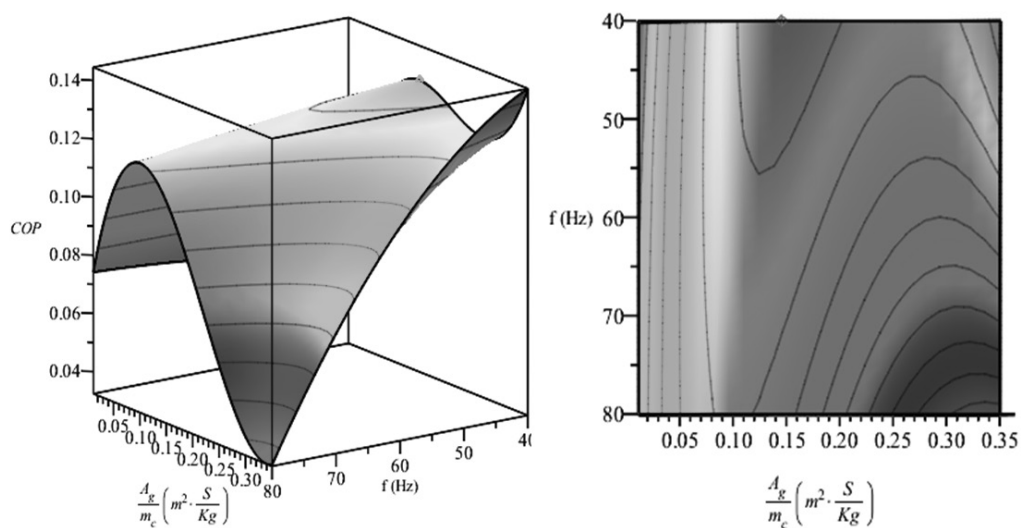


Рис. 4. Зависимость эффективности от частоты и обратного массового расхода
 Fig. 4. Dependency of efficiency on frequency and reverse mass flow rate

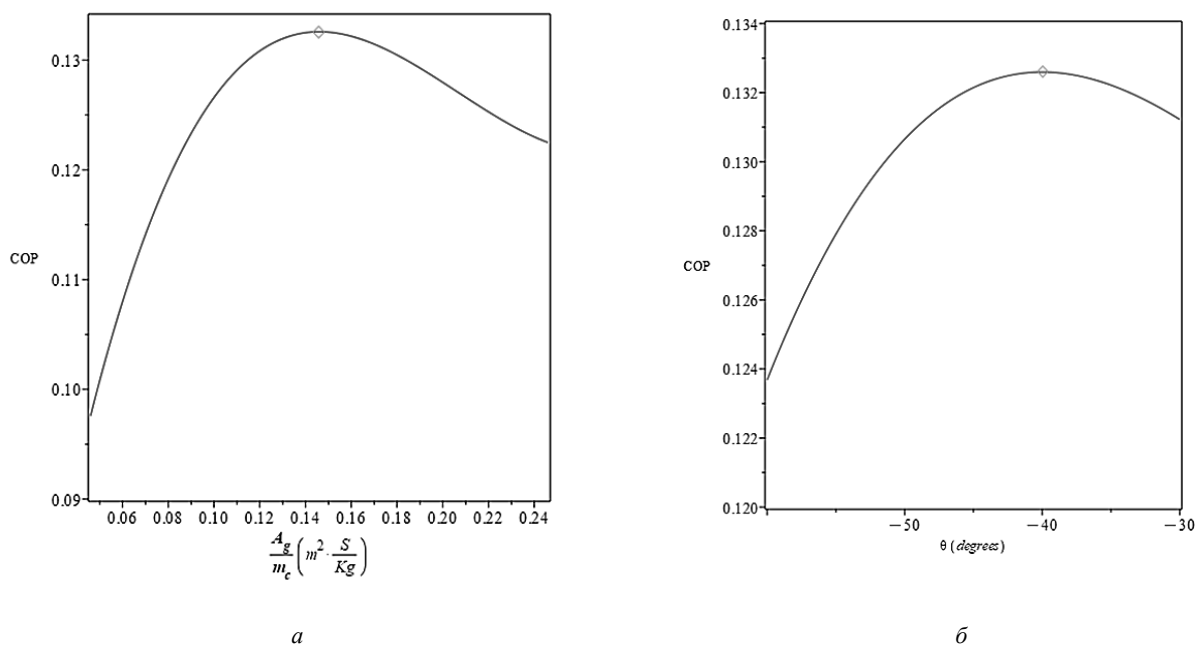


Рис. 5. Зависимость эффективности от обратного массового расхода (а) и сдвига фазы (б)
 Fig. 5. Dependency of efficiency on reverse mass flow rate (a) and phase shift (б)

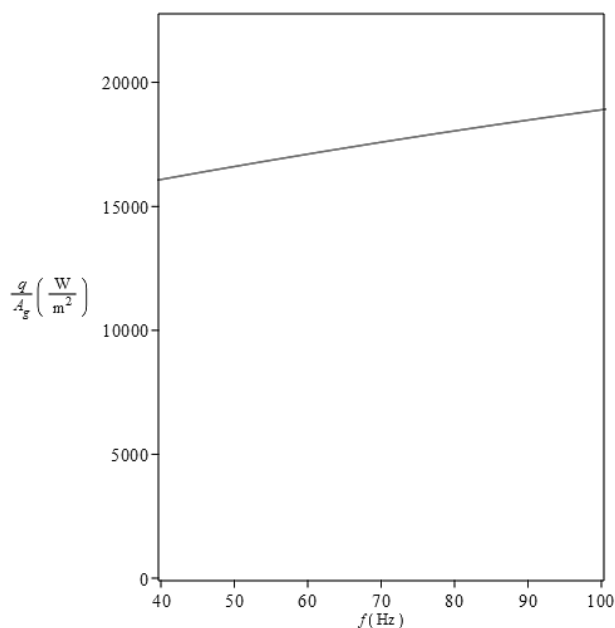


Рис. 6. Зависимость удельной холодопроизводительности по площади от частоты

Fig. 6. Dependency of specific refrigerating capacity (in terms of the surface area) on frequency

равна $1.6 \cdot 10^4$ Вт/м², и ее зависимость от частоты является линейной (рис. 6). Холодопроизводительность криогенного пульсационного охладителя повышается за счет увеличения площади свободного течения газа, зависящей от диаметра и пористости регенератора.

Заключение

Целью данной работы являлась разработка процедуры оптимизации регенеративного теплообменника в криогенном пульсационном охладителе с температурой 80 К на холодном конце. В результате исследования разработана модель регенератора при помощи программного пакета REGEN 3.3, предназначенного для моделирования процессов теплообмена и газовой динамики в пористых структурах в условиях осциллирующего движения газа. Также был получен апробированный подход моделирования регенератора пульсационного криоохладителя для получения оптимальных значений холодопроизводительности и эффективности ПКО.

Исследовано влияние на рабочие параметры газа в регенераторе таких факторов, как частота колебаний рабочего тела f , сдвиг фазы θ , обратный массовый расход A_g/m_c , а также длина регенератора L .

В ходе моделирования с использованием REGEN 3.3 выявлено изменение каких базовых переменных приводят к значительному изменению характеристик ПКО. В результате оптимизации были получены значения рабочих параметров, при которых достигалось максимальное значение эффективности (COP), равное 0,132.

Для заданного уровня холодопроизводительности и температуры охлаждения равной 80 К получены следующие параметры криоохладителя: длина регенератора 0,045 м, частота колебаний 40 Гц, сдвиг фазы -40° , обратный массовый расход 0,145 м²/ (кг/с), соответственно.

По сравнению с моделированием в программе REGEN 3.3 погрешность определения КПД (COP) составила не более 10 %. Полученные результаты демонстрируют важность учета в ходе проектирования и оптимизации на заданные критерии целого диапазона конструктивных, газодинамических и режимных параметров криогенного пульсационного охладителя, что значительно облегчает использование специальных программных средств.

Обозначения, применяемые в статье

- A — площадь поперечного сечения регенератора, м²;
 $C_m(T)$ — объемная теплоемкость матрицы регенератора, Дж/(м³·К);
 D_h — гидравлический диаметр, м;
 d_w — диаметр проволоки, м;
 E — полная энергия газа, Дж/м³;
 $H(p, T, v)$ — коэффициент теплопередачи между газом и матрицей, Вт/(м²·К);
 h — толщина трубы, содержащей матрицу регенератора, м;
 L — длина регенератора, м;
 $k_g(p, T)$ — теплопроводность газа, Вт/(м·К);
 $k_m(T)$ — теплопроводность матрицы, Вт/(м·К);
 m_c — массовый расход на холодном конце, кг/с;
 $P(t)$ — давление газа, Па;
 P_r — отношение давлений;
 T_c — температура газа, поступающего из холодного конца, К;
 T_h — температура газа, поступающего из горячего конца, К;
 T_m — температура матрицы, К;
 t — время, с;
 x — осевая координата, $0 \leq x \leq L$, м;
 v — скорость движения газа, м/с;
 θ — сдвиг фазы между массовым расходом и давлением на холодном конце регенератора, град.;
 $\rho(p, T)$ — плотность газа, кг/м³;
 τ — период колебаний, с;
 ϕ — пористость матрицы.

Благодарности

Результаты работы получены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Межкафедральный учебно-производственный научный центр САМ-технологий» при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2020–0019).

Литература / References

- Garaway I. Development of a 150 Hz pulse tube cryocooler. / I. Garaway, Z. Gan, P. Bradley, A. Veprik, R. Radebaugh. *Cryocoolers. International Cryocooler Conference*. 2009. V. 15. p. 105–13.
- Zhao Y., Dang H. CFD simulation of a miniature coaxial Stirling-type pulse tube cryocooler operating at 128Hz. *Cryogenics*. 2016. V. 73.
- Cao Q. Theoretical and experimental study on a pulse tube cryocooler driven by a linear compressor. / Q. Cao, Z. H. Gan, G. J. Liu, Z. P. Li, Y. Z. Wu, L. M. Qiu, J. M. Pfotenhauer. *Cryocoolers. International Cryocooler Conference*. 2009. V. 15. p. 149–156.
- Radebaugh R., Louie B. A simple first step to the optimisation of regenerator geometry. *Proceedings of the 3rd cryocooler conference*. 1985. pp. 177–198.

5. Radebaugh, R., Lewis, M., Luo, E., Pfothenauer, J. M., Nellis, G. F., and Schunk, L. A. Inertance Tube Optimization for Pulse Tube Refrigerators. *Adv. in Cryogenic Engineering*, Amer. Institute of Physics, Melville, NY. 2006. Vol. 51. pp. 59–67.
6. Pfothenauer J. M. Regenerator design optimization: Results from REGEN 3.3. / J. M. Pfothenauer, R. Z. Wang, F. K. Millera. *Cryogenics*. 2019. V. 97. pp. 77–84.
7. Gary J. REGEN 3.3 User Manual / J. Gary, A. O’Gallagher, R. Radebaugh, Y. Huang, Marquardt, E. 2008.
8. Shi J., Nellis G. F., Pfothenauer J. M. Dimensionless study and optimized design of the regenerator. *Cryocoolers*. 2007. V. 14. p. 419.
9. Wang L. Y. Optimization design on single stage regenerators for various working conditions. / L. Y. Wang, M. Wu, S. Zhang, Z. H. Gan, J. M. Pfothenauer. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2014. V. 34 (11). pp. 2134–2139.
10. Almtireen N., Brandner J. J., Korvink J. G. Numerical Thermal Analysis and 2-D CFD Evaluation Model for An Ideal Cryogenic Regenerator. *Micromachines*. 2020. V. 11, p. 361.
11. Will M. E., A. T. A. M. de Waele. Heat exchanger versus regenerator: A fundamental comparison. *Cryogenics*. 2005. V. 45 (7). pp. 473–480.
12. Pfothenauer J. M. Parametric optimisation of a single stage regenerator using REGEN 3.2. / J. M. Pfothenauer, J. L. Shi, G. F. Nellis. *Cryocoolers*. 2004. V. 13. pp. 463–470.
13. Cha J. S. Oscillatory flow in microporous media applied in pulse — tube and Stirling — cycle cryocooler regenerators. / J. S. Cha, S. M. Ghiaasiaan, C. S. Kirkconnell. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2008. V. 32 (6). pp. 1264–78.
14. Duan Y. Design and optimization of heat exchanger in coaxial pulse tube cryocooler working above 100 K. / Y. Duan, C. Pan, W. Wang, L. Li, Y. Zhou. *Cryogenics*. 2023. V. 129. P. 103607

Сведения об авторах

Кедам Нареш

Ассистент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, naresh.kedam@gmail.com

Сармин Дмитрий Викторович

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, sarmin.d.v@mail.ru

Лопатин Алексей Леонидович

Аспирант кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, aleksei-1119@mail.ru

Некрасова Светлана Олеговна

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, nekrasova.so@ssau.ru

Благин Евгений Валерьевич

К. т. н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского национального исследовательского университета им. академика С. П. Королева, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34, evgenyblagin@gmail.com

Information about authors

Kedam Naresh

Assistant of Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse 34, naresh.kedam@gmail.com

Sarmin Dmitriy V.

Ph. D., Associate Professor, Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34, sarmin.d.v@mail.ru

Lopatin Alexey L.

Postgraduate student of Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34, aleksei-1119@mail.ru

Nekrasova Svetlana O.

Ph. D., Associate Professor of Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Koroleva, 443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34, nekrasova.so@ssau.ru

Blagin Evgeny V.

Ph. D., Associate Professor of Department of Heat Engineering and Heat Engines, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev, 443086, Russia, Samara, Moskovskoe shosse, 34, evgenyblagin@gmail.com



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»