

Р.М. АБРАМЯН

**ДОСТИЖЕНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА РАБОТЫ
ПРОСТЕЙШЕЙ ГАЗОВОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Исследована работа простейшей газовой холодильной машины в зависимости от характеристик компрессора, детандера и водяного или воздушного охлаждения. Изучена возможность достижения машиной установившегося режима работы после пуска. Получена зависимость температуры хладагента от количества повторенных циклов. Приведены значения минимальной температуры для воздуха и гелия в принятых условиях.

Ключевые слова: простейшая газовая холодильная машина, установившийся режим, компрессор, детандер, водяное или воздушное охлаждение.

Введение. Развитие науки и техники предопределяет все возрастающее использование холодильных установок. В связи с природными катаклизмами и техногенными авариями стал актуальным вопрос усовершенствования работы охлаждающих систем в теплоэнергетике. Велико также достижение низких температур в развитии физики, приборостроения, биологии и медицины. Для нужд пищевой промышленности и сельского хозяйства необходимо иметь холодильные машины большой мощности. Ожижение газов и хранение жидких газов также является важной научно-технической задачей. Отметим, что температура называется низкой, если она меньше температуры окружающей среды. По международному соглашению, температуры ниже 120 K (или $153,16^\circ\text{C}$) считаются криогенными. Особенно важна роль криогенной техники в развитии новых направлений науки и техники, причем одним из наиболее перспективных направлений считается применение холодильной техники в энергетике.

Целью настоящей работы является анализ возможностей повышения термодинамической эффективности работы поршневых воздушных газовых холодильных машин. В качестве расширительных устройств в воздушных холодильных машинах применяют поршневые детандеры [1-3]. В работе [4] был исследован метод расчёта пусковых режимов криогенных газовых машин с помощью численного решения системы дифференциальных уравнений. В работе невысокая точность объясняется тем, что невозможно исчерпывающе описать все процессы, происходящие в криогенной газовой машине в период выхода на режим. Рассмотрим теперь подробнее работу простейшей воздушной холодильной машины, где рабочее тело в начальной стадии совершает разомкнутый термодинамический цикл, неизменно оставаясь в паровой или газовой фазе. Следует заметить, что в данной работе не определено время достижения холодильной

машиной установившегося режима работы, хотя количество повторенных шагов можно полагать пропорциональным времени. Вероятно, таким путем можно оценить предельные возможности рассматриваемой термодинамической системы [5].

Аналитическая часть. Будем считать, что хладагент, являющийся идеальным газом, имеет массу m_0 , удельную теплоемкость при постоянном объеме c_V , совершает круговой переход в замкнутом пространстве от компрессора до детандера, при этом охлаждаясь потоком воды или воздуха, которые имеют температуру окружающей среды T_0 . Принципиальная схема холодильной установки показана на рисунке.

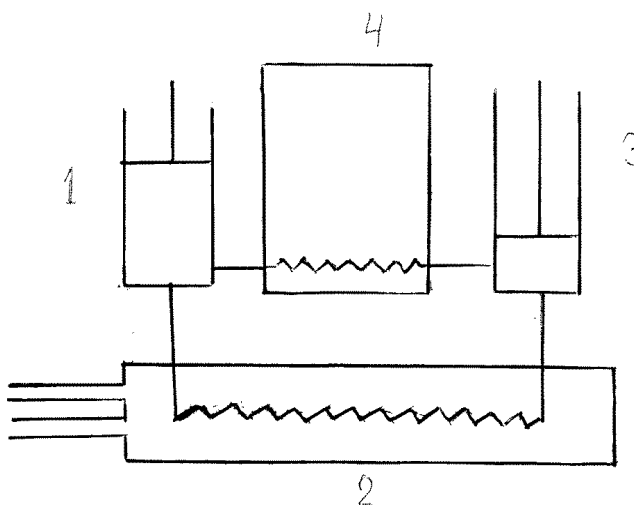


Рис. Схема простейшей газовой холодильной машины: 1 - компрессор, 2 – воздушное или водяное охлаждение, 3 - детандер, 4 - охлаждаемое тело или объём

Начальную температуру хладагента обозначим T_0 . Для простоты будем считать процессы сжатия в компрессоре и расширения в детандере адиабатическими, при этом в компрессоре газ сжимается от объема V_2 до V_1 , а в детандере расширяется от V_1 до V_2 . Также примем, что теплообмен между хладагентом и водой происходит без потерь энергии. Холодильная машина начинает работу сжатием в компрессоре хладагента, вследствие чего последнее нагревается от начальной температуры T_0 до температуры T_1 . Затем хладагент поступает в змеевик, где при постоянном объеме V_1 охлаждается водой (или воздухом), имеющей массу m_1 , удельную теплоемкость c_1 и температуру T_0 , вследствие чего температура газа понижается до T_2 . Дальнейшее охлаждение хладагента до T_3 происходит в детандере. Используя термодинамические соотношения и учитывая сохранение энергии при теплопередаче, можем написать

$$T_1 = T_0 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = T_0 b. \quad (1)$$

Здесь обозначено $\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = b$ (γ - показатель адиабаты идеального газа).

Охлаждая газ при постоянном объёме водой, имеем

$$m_0 c_V (T_2 - T_1) + m_1 c_1 (T_2 - T_0) = 0.$$

Обозначив через $\alpha = \frac{m_1 c_1}{m_0 c_V}$ так называемую характеристику теплообмена,

получим

$$T_2 = \frac{T_1 + \alpha T_0}{1 + \alpha} = \frac{T_0 b + T_0 \alpha}{1 + \alpha}. \quad (2)$$

В детандере газ охлаждается от T_2 до T_3 . Проведя те же вычисления, как и при получении формулы (1), будем иметь $T_3 = \frac{T_2}{b}$. В завершении первого цикла хладагент при постоянном объёме охлаждает замкнутый резервуар, в котором вещество массой m_2 и удельной теплоемкостью c_2 имеет начальную температуру T_0 . Конечная температура хладагента и резервуара будет T_4 . Найдём значение T_4 , зависящее только от T_0 и характеристик установки:

$$T_4 = \frac{T_3}{\alpha + 1} + \frac{\alpha}{\alpha + 1} T_0. \quad (3)$$

Для простоты предположим, что $\alpha = \frac{m_2 c_2}{m_0 c_V}$, т. е. $m_2 c_2 = m_1 c_1$.

Подставляя (2) в (3), получим

$$T_4 = T_0 \frac{1 + \alpha + \alpha^2}{(1 + \alpha)^2} + T_0 \frac{\alpha}{b} \frac{1}{(1 + \alpha)^2}. \quad (4)$$

Обозначив $q = \frac{1 + \alpha + \alpha^2}{(1 + \alpha)^2}$, получим

$$T_4 = T_0 q + T_0 \frac{\alpha}{b} \frac{1}{(1 + \alpha)^2}. \quad (5)$$

После многократных повторений будем иметь некоторую последовательность значений температур хладагента и охлаждаемого резервуара $T_0, T_4, T_8, T_{12}, \dots, T_{4n}$, где n - число повторяемых циклов. Отметим, что n фактически играет роль квантованного времени.

После n -кратного повторения получим

$$T_{4n} = T_0 q^n + T_0 \frac{\alpha}{b} \frac{1}{(1 + \alpha)^2} \sum_{i=0}^{n-1} q^i. \quad (6)$$

Подставляя сумму геометрической прогрессии $\sum_{i=0}^{n-1} q^i = \frac{1-q^n}{1-q}$ и учитывая, что $\alpha > 0$, $q < 1$, а также $\frac{1}{1-q} = \frac{(1+\alpha)^2}{\alpha}$, получим

$$T_{4n} = T_0 q^n + T_0 \frac{1-q^n}{b}. \quad (7)$$

Обсуждение результатов. При бесконечном увеличении n температура T_{4n} будет стремиться к пределу $T_\infty = \frac{T_0}{b}$, которая соответствует минимальной температуре охлаждаемого резервуара. Таким образом, наступит установившийся режим, и хладагент, т.е. идеальный газ, далее будет совершать замкнутый термодинамический цикл, известный как обратный цикл Отто. В работе [6] установившийся режим найден для идеального цикла Стирлинга.

Тем самым выясняется, что минимальная достижимая температура охлаждаемого тела при данных допущениях мало зависит от свойств охлаждающих тел и определяется только начальной температурой (или температурой окружающей среды), а также степенью сжатия при работе компрессора (детандера) и свойствами хладагента, а именно, показателем адиабаты рабочего газа. Приведем несколько численных оценок. Если в качестве хладагента взять воздух, т.е. показатель адиабаты газа – $\gamma = 1,4$, то при степени сжатия $\frac{V_2}{V_1} = 3$ получим $T_\infty = 193,3 \text{ K}$, а при степени сжатия $\frac{V_2}{V_1} = 5$ – $T_\infty = 157,6 \text{ K}$. Если в качестве хладагента взять одноатомный газ, например гелий или аргон, то при трехкратном изменении объема получим $T_\infty = 144,2 \text{ K}$, а при пятикратном – $102,6 \text{ K}$.

Можно оценить также степень приближения к установившемуся режиму температуры хладагента. Для этого найдём зависимость величины $k = \frac{T_0 - T_{4n}}{T_0 - T_\infty}$ от n . С помощью формулы (7) находим $k = 1 - q^n$, т.е. k не зависит от T_0 . Для значения $\alpha = 1$ после пятикратного повторения получим $k = 76,3\%$, а при $n = 10$ – $k = 94,4\%$. Можно показать, что установившийся режим является устойчивым, и учет малых случайных изменений параметров системы не нарушит эту устойчивость.

В заключение выражаю благодарность проф. Н.Б. Енгибаряну за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Архаров А.М.** Низкотемпературные газовые машины. - М.: Машиностроение, 1969.-223 с.
2. **Архаров А.М., Буткевич К.С., Буткевич И.К., Миркин А.З.** Криогенные поршневые детандеры. -М.: Машиностроение, 1974.- 240 с.

3. **Суслов А.Д., Гороховский Г.А., Полтераус В.Б., Горшков А.М.** Криогенные газовые машины. - М.: Машиностроение, 1982.- 213 с.
4. **Белянов В. В.** Изв. Вузов. Машиностроение.- 1986.- N5.- С. 47.
5. **Цирлин А.М.** Необратимые оценки предельных возможностей термодинамических и микроэкономических систем.- М.: Наука, 2003.- 348 с.
6. **Абрамян Р.М.** Установление стационарного режима работы идеального двигателя Стирлинга с регенератором // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. Техн. наук.- 2010.- Т. 63, N3.- С. 341-346.

ГИУА (ПОЛИТЕХНИК). Материал поступил в редакцию 10.04.2014.

Ռ.Մ. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ

ԳԱԶԱՑԻՆ ՊԱՐԶԱԳՈՒՅՆ ՍԱՌԵՑՆՈՂ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՌԵԺԻՄԻ ՀԱՍՏԱՏՈՒՄԸ

Հետազոտված է գազային պարզագազային սառեցնող մեքենայի աշխատանքը՝ կախված կոմպրեսորի, դետանդերի և ջրային (օդային) հովացուցիչի հատկություններից: Ուսումնասիրված է այդ մեքենայի միացումից հետո կայունացված ռեժիմին հասնելու հնարավորությունը: Ստացված է բանող գազի սառեցուցիչի ջերմաստիճանի կախումը կրկնված քայլերի թվից: Բերված են ընդունված պայմանների դեպքում նվազագույն ջերմաստիճանի արժեքները օդի և հելիումի համար:

Առանցքային բառեր. գազային պարզագազային սառեցնող մեքենա, կայունացված ռեժիմ, կոմպրեսոր, դետանդեր, ջրային կամ օդային սառեցում:

R.M. ABRAHAMIAN

ACHIEVING THE ESTABLISHED OPERATION MODE OF A SIMPLEST GAS REFRIGERATING MACHINE

The operation of a simplest gas refrigerating machine depending on the characteristics of the compressor unit of the gas expansion machine and the water or air cooling is investigated. The possibility of achieving the established operation mode by the machine after the start is studied. The dependence of the refrigerant temperature on the number of repeated cycles is obtained. The values of the minimum temperature for air and helium under the given conditions are introduced.

Keywords: simplest gas refrigerating machine, established mode, compressor unit, gas – expansion machine, water or air cooling.