

УДК 621.57

## ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН СТИРЛИНГА ОТ ВНЕШНИХ И ВНУТРЕННИХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

© 2014 В.Н. Белозерцев

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Увеличение холодопроизводительности холодильной машины осуществляется посредством изменения давления заправки и частоты вращения привода. Для работы с минимальными суммарными потерями и максимальной холодопроизводительностью давление заправки и частота вращения не должны меняться произвольно. Связь между ними осуществляется через одинаковые минимальные суммарные потери в регенераторе. Внутренние параметрические величины холодильной машины (давление заправки, относительная температура, относительный мёртвый объём, соотношение максимальных описанных объёмов рабочих полостей) и внешние (частота вращения привода) оказывают влияние на энергетические характеристики машин. В статье представлена оценка влияния этих параметрических величин на действительные характеристики холодильной машины и определены возможности и способы их форсирования.

*Холодильная машина, холодопроизводительность, регенератор, гидравлические потери, тепловые мосты, давление заправки, частота вращения привода, относительный мёртвый объём, относительная температура, форсирование.*

Эффективность решения многих задач в авиационной и космической технике определяется достижениями в области бортовых систем охлаждения летательных аппаратов. Основой этих систем вплоть до 80К являются газовые холодильные машины (ГХМ), работающие по обратному циклу Стирлинга [1]. Уровень холодопроизводительности этих машин составляет значение от долей до десятков ватт. Работа этих установок на номинальном режиме подразумевает постоянство таких параметров, как температуры детандерной ( $T_x$ ) и компрессорной ( $T_r$ ) полости, энергетических характеристик: холодопроизводительности ( $Q_2$ ), теплоты отводимой от компрессорной полости ( $Q_1$ ) и работы цикла ( $L_{ц}$ ). Однако возможны ситуации, когда в результате действия внешних факторов значения этих величин могут отклоняться от своих номинальных значений. Это может происходить за счёт увеличения теплопритоков из окружающей среды в зону термостатирования холодильной машины. Поэтому актуальным является изучение вопроса о возможности форсирования их характеристик с целью обеспечения работоспособности бортовых

систем в таких условиях. Общеизвестны также и методы форсирования этих тепловых машин: по давлению заправки и частоте вращения привода [1,2]. Эти параметры непосредственно влияют на уровень подводимой и отводимой тепловой мощности теплообменных аппаратов, их массогабаритные размеры, а также на уровень возникающих в них потерь. Поэтому целью данной работы является выявление зависимости энергетических характеристик ГХМ, потерь, возникающих в теплообменных аппаратах при работе от частоты вращения привода и давления заправки, а также определение рабочих интервалов давлений и частоты. Характер зависимости энергетических характеристик холодильной машины от давления заправки и частоты привода может быть оценён по методике Шмидта [2] следующими выражениями:

$$Q_2 = \frac{\pi \cdot P_{cp} \cdot V_{OX} \cdot \delta \cdot \sin \theta}{1 + (1 - \delta^2)^{0.5}}, \quad (1)$$

$$Q_1 = Q_2 \cdot \tau, \quad (2)$$

$$L_{ц} = Q_1 - Q_2 \quad (3)$$

и представлен на рис.1.

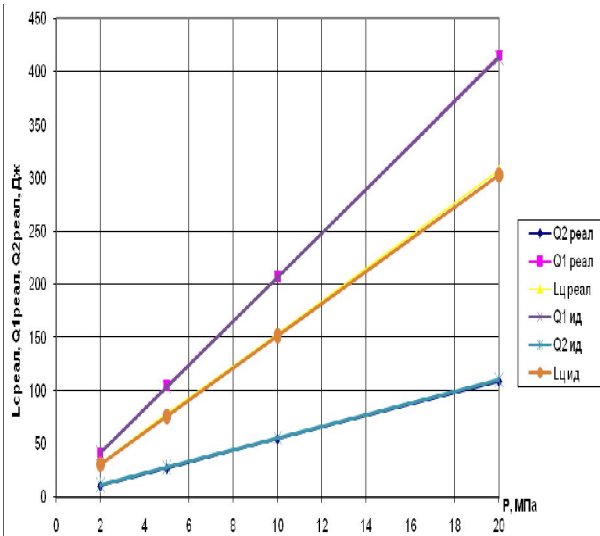


Рис.1. Зависимость параметров цикла холодильной машины от давления заправки

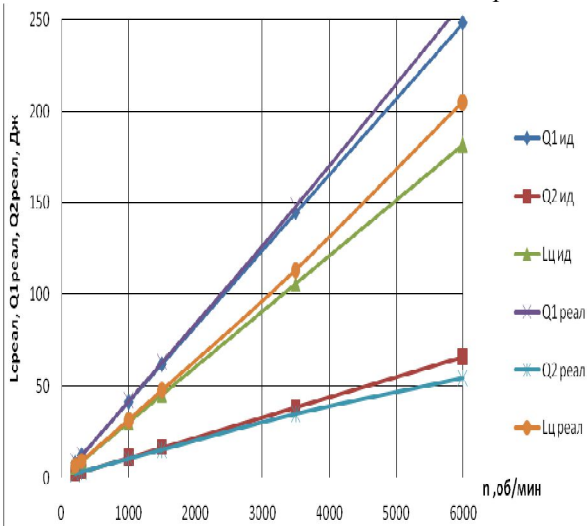


Рис.2. Зависимости реальных параметров холодильной машины от частоты привода

С увеличением частоты вращения энергетические характеристики цикла остаются без изменения, однако растут тепловые мощности рабочих полостей. При форсировании машин Стирлинга по этим параметрам меняются режимы работы теплообменных аппаратов.

Суммарные потери в регенераторе  $\Delta Q_{\Sigma} = \Delta Q_{H1} + Q_{\Delta P} + \Delta Q_{HP}$  (4)

включают потери:

- на недорекуперацию:

$$\Delta Q_{H1} = 0,5(1 - \eta_p) Q_p.$$

Величина тепловой нагрузки регенератора рассчитывается из выражения:

$$Q_p = G \cdot C_p \cdot (T_G - T_X) + 2 \cdot \varepsilon \cdot V_{PG} \cdot (P_{\max} - P_{\min}) \cdot \frac{1}{\tau_{ц}};$$

- на гидравлические сопротивления

$$Q_{\Delta P} = \Delta P \cdot \frac{G}{\rho};$$

- за счёт теплопроводности по корпусу и насадке регенератора

$$\Delta Q_{HP} = A_H \cdot \lambda_{\text{эф}} \cdot F_P (T_G - T_X) \cdot \frac{1}{l_P}.$$

Эти потери приводят к уменьшению действительной холодопроизводительности холодильной машины. Изменение давления заправки и частоты вращения привода по-разному сказываются на темпе изменения энергетических характеристик. Но общим является то, что суммарные тепловые потери в регенераторе при определенном соотношении между его длиной и диаметром ( $\Lambda_p = \frac{l_p}{d_p}$ ) при фиксированных  $p_3$  и  $n$  принимают минимальное значение (рис. 3,4).

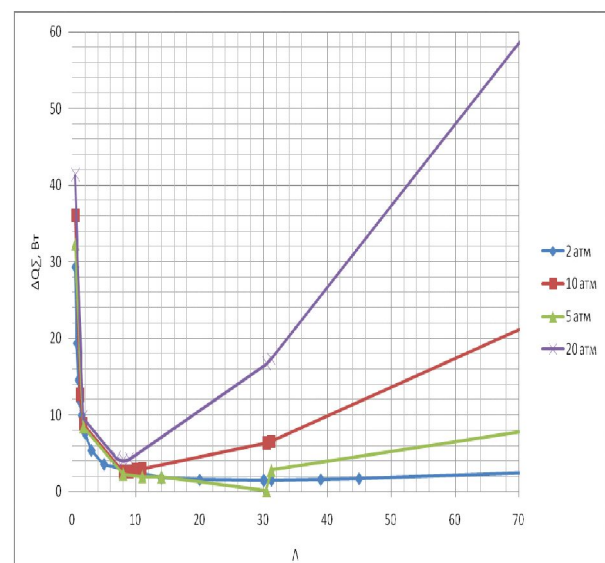


Рис. 3. Зависимость суммарных потерь в регенераторе от  $\Lambda_p$  при разных давлениях заправки

Найденные с учётом полученных потерь значения действительных энергетических характеристик:

$$|Q_{1д}| = |Q_1| + \frac{1}{2} \Delta Q_{\Sigma},$$

$$|Q_{2д}| = Q_2 - \frac{1}{2} \Delta Q_{\Sigma},$$

$$L_{цд} = Q_{1д} - Q_{2д}$$

представлены на рис.5,6.

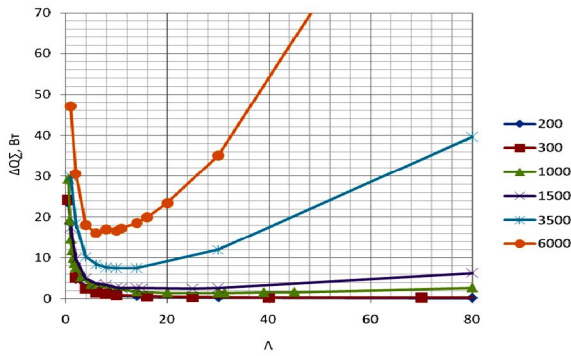


Рис. 4. Зависимость суммарных потерь от  $\Delta p_p$  при разных частотах

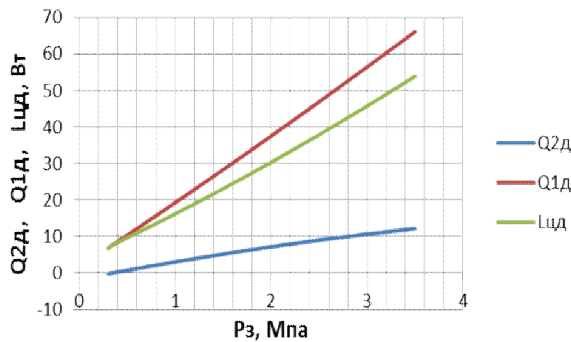


Рис. 5. Зависимость действительных характеристик ГХМ от давления заправки

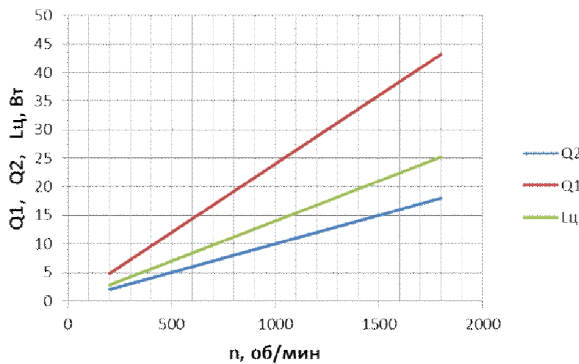


Рис. 6. Зависимость действительных характеристик ГХМ от частоты вращения привода

Из графиков видно, что холодильная машина начинает работать с давления заправки 0,25 МПа и частоты вращения привода 700 об /мин. Представленные зависимости позволяют установить связь между давлением заправки и частотой вращения привода  $p_3 = f(n)$  и параметры, соответствующие максимальным значениям действительной холодопроизводительности.

Поэтому при форсировании холодильных машин Стирлинга изменять необходимо одновременно оба параметра в

соответствии с определёнными выше условиями и рис. 7 (суммарный рабочий объём холодильной машины составил  $15 \text{ см}^3$ ). Вид корреляционной кривой  $p_3 = f(n)$  для ГХМ с базовыми проектировочными параметрами: холодопроизводительностью 10 Вт, температурами детандерной полости  $T_x = 150\text{К}$ , компрессорной полости  $T_z = 160\text{К}$ , давлением заправки  $p_3 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , частотой вращения привода 1000 об/мин представлен на рис.7. Следует выбирать переразмеренные по тепловой нагрузке (следовательно и по массе) регенераторы с  $\Delta p_p$  от 10 до 80, что и делается на практике [1].

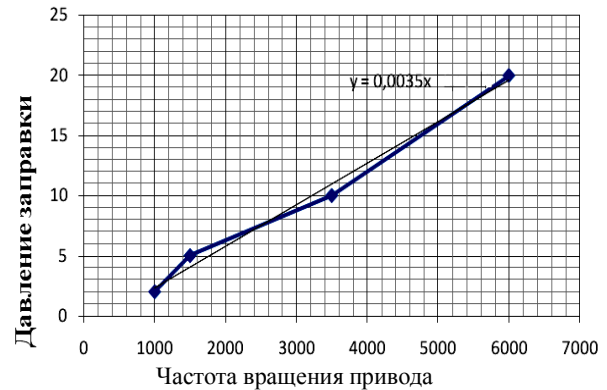


Рис. 7. Зависимость рабочих интервалов давлений заправки и частот вращения привода

Представленные на рис.7 рабочие характеристики справедливы для холодильной машины с конкретными относительными параметрами:

$$\tau = \frac{T_\Gamma}{T_X} - \text{относительной температурой;}$$

$$\delta = \frac{\sqrt{\tau^2 + K^2 + 2 \cdot \tau \cdot K \cdot \cos \alpha}}{\tau + K + 2 \cdot S} - \text{вспомогательным параметром,}$$

$$S = \frac{2 \cdot X \cdot \tau}{\tau + 1} - \text{приведённый мёртвый объём;}$$

$$X = \frac{V_p}{V_{Ox}} - \text{относительный «мёртвый» объём;}$$

$K = \frac{V_{OG}}{V_{OX}}$  - относительный описанный объём рабочих полостей.

При переменных  $\tau$ ;  $X$ ;  $K$  корреляционные зависимости  $p_3 = f(n)$  представлены на рис. 8.

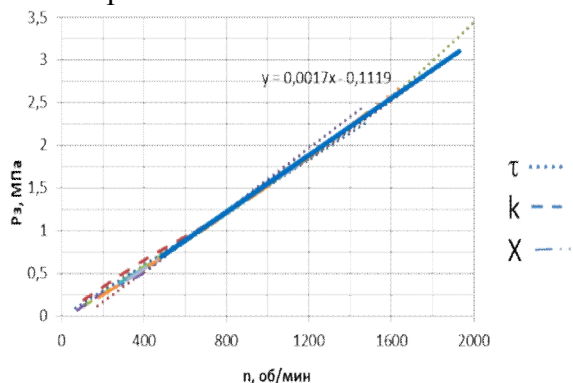


Рис.8. Объединённая характеристика рабочих режимов ГХМ по давлению заправки и частоте

Значения величин варьировались в интервалах:  $\tau = 1,2 \dots 3,6$ ;  $X = 0,2 \dots 2,5$ ;  $K = 0,1 \dots 4$ . Выбранные границы изменения величин взяты не случайно: меньшие значения  $\tau$ ,  $K$  и большие  $X$  соответствуют условиям, когда действительная холодопроизводительность машины превращается в ноль.

Из представленной на рис.8 зависимости видно, что область совпадения графиков находится в диапазоне значений давления заправки от 0,9 до 1,7 МПа и частоты вращения привода от 700 до 1100 об/мин. Это означает, что в данной облас-

ти влияние  $\tau$ ,  $X$  и  $K$  на  $P_3$  и  $n$  пренебрежимо мало. Следовательно, данный диапазон является областью с устойчивыми энергетическими характеристиками ГХМ. Он может быть рекомендован, как область предпочтительных рабочих режимов с точки зрения максимальной действительной холодопроизводительности.

При  $n > 1900$  об/мин,  $P_3 > 3,12$  МПа и  $n < 200$  об/мин,  $P_3 < 0,5$  МПа наблюдается наибольший разброс значений соотношения температур, относительного мёртвого объёма и соотношения объёмов рабочих полостей. Представленные на рис. 8 характеристики позволили обобщить полученные результаты в виде аппроксимирующей зависимости:

$$p = 1700 \cdot n - 0,1119 \cdot 10^6.$$

#### Выводы

1. Для форсирования холодильных машин Стирлинга по давлению заправки и частоте вращения привода и достижения при этом минимальных потерь в регенераторе и максимальной холодопроизводительности должны одновременно меняться оба параметра давление заправки и частота вращения привода в соответствии с рабочей характеристикой

$$p = 1700 \cdot n - 0,1119 \cdot 10^6.$$

2. Диапазон с устойчивыми характеристиками ГХМ соответствует диапазону значений давления заправки от 0,9 до 1,7 МПа.

#### Библиографический список

1. Новотельнов В.Н., Суслов А.Д., Полтараус В.Б. Криогенные машины. СПб.: Политехника, 1991. 332 с.
2. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга. М.: Энергия, 1978. 145 с.
3. Грезин А.К., Зиновьев В.С. Микрокриогенная техника. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.

#### Сведения об авторе

**Белозерцев Виктор Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный

исследовательский университет). E-mail: vick.belozertzew@yandex.ru. Область научных интересов: исследование рабочих процессов тепловых двигателей и холодильных машин.

**DEPENDENCE OF ENERGY CHARACTERISTICS  
OF STIRLING GAS REFRIGERATING MACHINES  
ON EXTERNAL AND INTERNAL PARAMETRIC VALUES**

© 2014 V.N. Belozertsev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

The question of forcing the heat engines Stirling is important. The increase of cold-productivity of the refrigeration machine is carried out by means of change of pressure filling and Internal parametric values of refrigerating machines: filling pressure, relative temperature, relative dead volume, the ratio of the maximum described volumes working cavities and external: frequency of rotation effects on the energy characteristics of machines. The article presents the assessment of the impact of these parametric values on the real characteristics of refrigerating machines and identify opportunities and ways of forcing speed of the drive. To work with minimum total power losses and maximum cooling capacity of the filling pressure and speed must not be changed arbitrarily. The relationship between them via the same minimum total losses in the regenerator.

*The refrigerator, capacity, thermal capacity at the minimum temperature in cycle, a regenerator, hydraulic, thermal bridges, the minimum total losses, pressure of refueling, frequency of the rotation.*

**References**

1. Novotel'nov V.N., Suslov A.D., Poltaraus V.B. Kriogennyye mashiny [Cryogenic units]. Saint-Petersburg: Politehnika Publ., 1991. 332 p.
2. Walker G. Mashiny, rabotajushhie po ciklu Stirlinga [The units working on a Stirling cycle]. Moscow: Energia Publ, 1978. 145 p.
3. Grezin A.K., Zinovev V.S. Mikrokrigennaja tehnika [The microcryogenic techniques]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977. 232 p.

**About the author**

**Belozertsev Victor Nikolaevich**, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of heating engineering and thermal engines department, Samara State Aerospace

University. E-mail: vick.belozertzew@yandex.ru. Area of Research: working processes of thermal engines and refrigerators.