

Расчёт эксплуатационных параметров бытовой холодильной машины

*А. С. Луганский, А.А. Хмызенко, Н. А. Целигоров
Донской государственной технической университет*

Аннотация: Рассмотрена модель бытовой холодильной машины (БХМ). Определена холодопроизводительность, тепловая нагрузка, проведен расчет компрессора и эксплуатационных параметров, построен цикл холодильной машины в p - i координатах.

Ключевые слова: Бытовая холодильная машина, температура, холодильная камера, тепловая нагрузка, холодопроизводительность, компрессор, теплопритоки.

Введение

В процессе создания и эксплуатации холодильных комплексов важными этапами являются диагностика и исследование тепловых режимов холодильных установок [1-3], являющихся нелинейными системами управления с неопределенностями [4,5]. Исследование этих систем методами математического моделирования позволяет определить соответствующие параметры и элементы холодильных установок при изменяющихся в широких пределах возмущающих воздействиях и температурных значениях для их точного регулирования [6,7].

В системе жизнеобеспечения человека бытовая холодильная машина (БХМ) обеспечивает поддержание заданного температурного режима для хранения продуктов питания в холодильной камере [8]. Её основная функция заключается в передаче теплоты от продуктов питания (охлаждаемой среды) к воздуху в помещении (нагреваемой среде). В БХМ механической работа компрессора обеспечивает сжатие фреона, что в конечном случае приводит к охлаждению холодильной камеры, выбрасывая теплоту в окружающую среду, что подтверждается диаграммой холодильного цикла [9].

Постановка задачи

Требуется составить алгоритм и провести расчет эксплуатационных параметров бытовой холодильной машины. Объектом исследования параметров БХМ является стенд-тренажер «Холодильник – 1» (рис. 2).



Рис. 2. – Общий вид экспериментально-диагностического комплекса «Холодильник – 1»

Исходные данные

Общие параметры экспериментально-диагностического комплекса «Холодильник – 1» приведены в табл.1.

Таблица 1.

Показатель	Значение
Общий объем БХМ, л	37
Полезный объем МК, л	6
Полезный объем ХК, л	36
Температура в МК, °С не выше	-4
Температура в ХК, °С не ниже / не выше	2 / 5
Суточный расход электроэнергии при температуре окружающего воздуха 25 °С, Вт×ч	$0,308 \times 10^3$
Электрическая мощность, Вт	70
Габаритные размеры БХМ, мм	
Высота	510
Ширина / Глубина	435/470

Для данной установки имеются необходимые данные для проведения расчета (табл. 2).

Таблица 2.

Наименование характеристики	Величина
Геометрические размеры холодильника, (Ш×В×Г), см	43.5×51×47
Внутренний рабочий объем, л	42
Внутренний объем холодильной камеры, л	36
Внутренний объем низкотемпературной камеры, л	6
Температура окружающей среды $t_{\text{окр.ср.}}, ^\circ\text{C}$	18
Температура холодильной камеры $t_{\text{хк}}, ^\circ\text{C}$	2
Холодильный агент	R600a

Толщина стенок БХМ равна 40мм.

Материал наружной стенки БХМ – углеродистая сталь (Ст3), 0,5 мм.

Изоляционный материал – пенополиуритан, 37,5 мм.

Материал внутренней стенки шкафа холодильной установки – полистирол, 2мм.

Решение задачи

Проектирование и расчет бытовых холодильных машин основан на исходных данных температур, нагреваемой и охлаждаемой среды. За основу расчета возьмем определение теплопритоков из окружающей среды в холодильную камеру [10].

I. Расчет тепловой нагрузки

Теплопритоки \dot{Q}_1 Вт через стенку охлаждаемой камеры холодильника рассчитываются по формуле для расчета теплопередачи:

$$\dot{Q}_1 = k\sigma\Delta T,$$

где \dot{Q}_1 – теплопритоки, Вт;

k – коэффициент теплопередачи, Вт/м²×К;

σ – площадь наружной поверхности теплообмена, м²,

ΔT – разность температур воздуха по обе стороны стенки холодильной камеры, К;

Коэффициент k теплопередачи рассчитывается по формуле:

$$k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{вн}} \right),$$

где α_n – коэффициент теплоотдачи от наружного воздуха к внешней поверхности холодильной камеры Вт/м²×К;

$\alpha_{вн}$ – коэффициент теплоотдачи от воздуха в холодильной камере к её внутренней поверхности, Вт/м²×К;

δ – толщина i -го слоя многослойной конструкции холодильной камеры;

λ – коэффициент теплопроводности i -го слоя.

II. Расчет коэффициента к теплопередачи

Данные для расчета коэффициента теплопередачи приведены в табл.3

Таблица 3

Данные	Численное значение
$\alpha_{н,з}$, Вт/(м ² ×К)	23,8
$\alpha_{вн}$, Вт/(м ² ×К)	7
λ_1 , Вт/(м×К)	80
λ_2 , Вт/(м×К)	0,028
λ_3 , Вт/(м×К)	0,15
δ_1 , мм	0,6
δ_2 , мм	36,5
δ_3 , мм	3

Рассчитываем коэффициент теплопередачи k_1 стенки холодильной камеры:

$$k_1 = 1 / \left(\frac{1}{23,8} + \frac{0,6 \times 10^{-3}}{80} + \frac{36,5 \times 10^{-3}}{0,028} + \frac{3 \times 10^{-3}}{0,15} + \frac{1}{7} \right) = 1,50 \text{ Вт/(м}^2 \times \text{К)}$$

Теплопритоки через тепловую изоляцию холодильной камеры холодильной установки:

а) теплоприток $\dot{Q}_1^{хк}$, Вт, из внешней среды в холодильную камеру

$$\dot{Q}_1^{хк} = k_1 \sigma_{хк} \Delta T, \quad \dot{Q}_1^{хк} = 1,50 \times 0,58 \times (18-2) = 13,98, \text{ Вт.}$$

б) Тепловая нагрузка $\dot{Q}_2^{хк}$, Вт, от воздухообмена в ХК

$$\dot{Q}_2^{хк} = 0,5 \cdot \dot{Q}_1^{хк}, \quad \dot{Q}_2^{хк} = 0,5 \cdot 13,98 = 6,99, \text{ Вт.}$$

Определяем холодопроизводительность $\dot{Q}_{0х.а}$ холодильного агрегата для холодильника.

а) определяем холодопроизводительность $\dot{Q}_{0 х.а}$ холодильного агрегата для ХК:

$$\dot{Q}_{0.x.a}^{XK} = \dot{Q}_1^{XK} + \dot{Q}_2^{XK}, \quad \dot{Q}_{0.x.a}^{XK} = 13,98 + 6,99 = 20,97 \text{ Вт.}$$

Результаты расчета для надежности увеличиваются на 10%. Это зависит от достоверности данных, применяющихся при расчете тепловой нагрузки [10].

Учитывая, что холодильный агрегат бытового холодильника с некоторым коэффициентом рабочего времени ϵ , равным 0,34 холодопроизводительность холодильного агрегата определяется по формуле:

$$\dot{Q}_{0.x.a} = \frac{\dot{Q}_{0.x.a}^{XK} \cdot 1,1}{\epsilon}, \quad \dot{Q}_{0.x.a} = 20,97 \cdot 1,1 / 0,34 = 67,8 \text{ Вт.}$$

III. Термодинамический расчет компрессора

Выполним термодинамический расчёт компрессора.

Исходные данные:

$$\dot{Q}_{0.x.a} = 67,8 \text{ Вт, хладагент R600a, } T_0 = 2 \text{ }^\circ\text{C}; T_k = 18 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Строим холодильный цикл в p - i координатах (рис. 4).

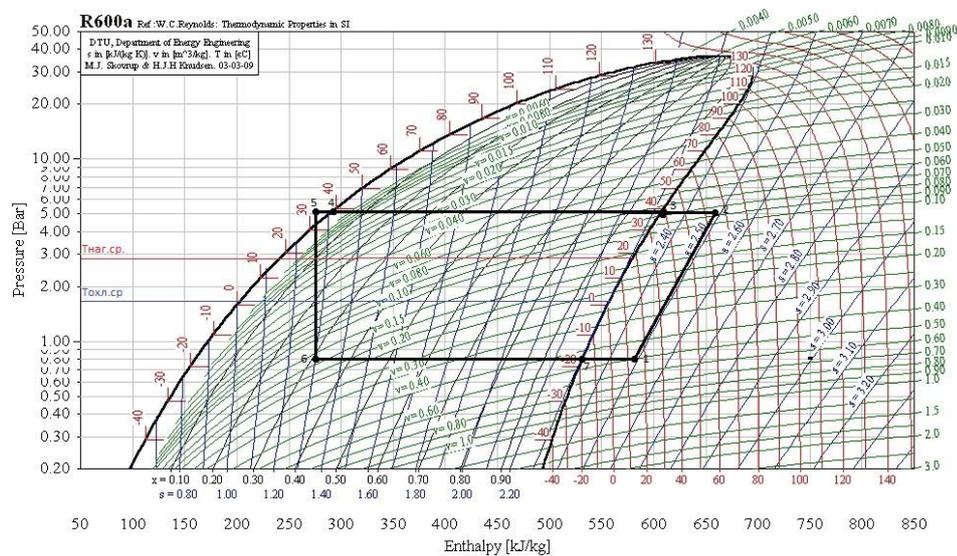


Рис. 4. - Цикл холодильной установки в p - i координатах

Параметры ХМ, измеренные в контрольных точках тренажёра при нормальном режиме работы приведены в табл.4.

Таблица 4.

Параметры	Контрольные точки						
	1	2	3	4	5	6	7
T, K	286	338	311	311	305	255	255
$i, кДж/кг$	585	655	605	295	275	275	535

1. Удельная массовая холодопроизводительность q_0 1 кг агента, Дж/кг:

$$q_0 = (i_7 - i_6), q_0 = 535 \times 10^3 - 275 \times 10^3 = 260 \times 10^3, \text{ Дж/кг.}$$

2. Массовый расход \dot{m} (подача) газа на входе в компрессор, кг/с:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{ох.а.}}{q_0}, \dot{m} = \frac{67,8}{260 \times 10^3} = 0,0003, \text{ кг/с.}$$

3. Объемный расход газа \dot{V}_D (объемная подача газа) на входе в компрессор, м³/с:

$$\dot{V}_D = \dot{m} \cdot \nu_1, \dot{V}_D = 0,0003 \times 0,500 = 0,015 \times 10^{-2}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

4. Тепло, отводимое от рабочего тела в конденсаторе (поступающее в помещение):

$$\dot{Q}_{конд} = (i_2 - i_4) \cdot \dot{m}, \text{ Вт.}, \dot{Q}_{конд} = (655 - 295) \cdot 10^3 \cdot 0,0003 = 0,108, \text{ Вт.}$$

5. Удельная работа компрессора l_s (техническая работа хладагента со знаком минус):

$$l_s = i_2 - i_1, l_s = (655 - 585) \cdot 10^3 = 70 \cdot 10^3, \text{ Дж/кг.}$$

6. Теоретический холодильный коэффициент ε_T :

$$\varepsilon_T = q_0 / l_s, \varepsilon_T = 260 \cdot 10^3 / 70 \cdot 10^3 = 3,71$$

7. Степень π повышения давления газа в компрессоре:

$$\pi = \frac{p_K}{p_H}, \pi = \frac{5,2}{0,8} = 6,50$$

8. Объем \dot{V} , описываемый поршнем компрессора, м³/с:

Коэффициент λ подачи компрессора принимаем $\lambda = 0,440$.

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_D}{\lambda}, \dot{V} = \frac{0,015 \cdot 10^{-2}}{0,440} = 34 \times 10^{-5}, \text{ м}^3/\text{с.}$$

9. Теоретическая мощность N_T компрессора, Вт:

$$N_T = \dot{m} \times (i_2 - i_1), N_T = 0,0003 \times (655 - 585) \times 10^3 = 21, \text{ Вт.}$$

10. Действительная мощность N_i компрессора, Вт:

$$N_i = \frac{N_T}{\eta_i}, \quad N_i = \frac{21,0}{0,700} = 30, \text{ Вт.}$$

Индикаторный к.п.д. η_i принят по среднему значению [11].

11. Мощность $N_{\text{ПРИВ}}$ привода, Вт:

$$N_{\text{ПРИВ}} = \frac{N_i}{\eta_{\text{МЕХ}}}, \quad N_{\text{ПРИВ}} = \frac{30}{0,850} = 35,3, \text{ Вт.}$$

12. Теоретическая работа компрессора:

$$l_k = \frac{n}{n-1} \cdot P_1 V_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right],$$

Для адиабатного процесса $n=1,4$.

$$l_k = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 0,8 \cdot 10^5 \cdot 0,500 \left[6,5^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 99,123 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг.}$$

I. Подбор компрессора для данной холодильной установки

Исходя из полученных данных холодопроизводительности $\dot{Q}_{0.x.a} = 67,8 \text{ Вт}$ и термодинамического расчёта подбираем компрессор для данной холодильной установки. Одним из наиболее соответствующих и доступных вариантов является компрессор ACC R-600a HVY44AA



Рис. 5. Холодильный компрессор HVY44AA

Производитель: ACC (Австрия) Цена: 2 900 р

Характеристики:

Модель: HVY44AA
Мощность: 71 Вт
Температура: $-23,3^\circ\text{C}$
Тип: низкотемпературный
Хладагент: R600a

Исходя из концепции импортозамещения, так же можно рассмотреть и другой вариант компрессора - производства России. Производитель: ОАО «КЗХ Бирюса» (Россия). Цена: 1200 р

Характеристики:

Модель: КВО-70
Мощность: 70 Вт
Температура: -18°C
Тип: низкотемпературный
Хладагент: R134a



Рис. 6. Холодильный компрессор КВО-70

Заключение

На основе имеющихся технических характеристик был проведен расчет эксплуатационных параметров бытовой холодильной машины, на примере стенда тренажера «Холодильник - 1». Проведенные расчеты теплопритоков, коэффициента теплопередачи, холодопроизводительности и термодинамического расчета компрессора позволили осуществить подбор модели компрессора, как зарубежного, так и отечественного производства.

Литература

1. Лемешко М.А. Способ определения технического состояния компрессионного холодильника по режиму работы компрессора // В сборнике: Инновации в технологиях возделывания сельскохозяйственных



- культур. Материалы международной научно-практической конференции. 2015. С. 339-344.
2. Кожемяченко А.В., Лемешко М.А., Петросов С.П. Способ локального определения технического состояния компрессионного бытового холодильного прибора // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2013/1644.
3. Тихонова О.Б., Русяков Д.В. Интерактивные средства обеспечения эксплуатационной эффективности бытовых холодильных приборов // Инженерный вестник Дона. 2012. № 4-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4p2y2012/1429.
4. Целигоров Н.А., Мафура Г.М., Целигорова Е.Н. Математические модели неопределенностей систем управления и методы, используемые для их исследования // Инженерный вестник Дона, 2012, №4-2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4t2y2012/1340
5. Tseligorov N., Tseligorova E., Mafura G. Robust absolute stability analysis of a temperature control system for an enclosed space// Conference: 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). pp. 356-359.
6. Seki M., Osajima A., Nakane A., Sato H., Watanabe K. Performance of Refrigeration Cycle with R32-R34a and R32- R125 Based on the Reliable Thermodynamic Property Data // Proc. 1994 Int. Refrig. Conf. – Purdue Univ., US. – 1996.07.19 – 22. – pp. 67-72.
7. Иванов Р.А., Целигоров Н.А. Использование программы EEV Selection для измерения параметров кондиционера легкового автомобиля // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 47-6. с. 50-52.
8. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособие для вузов // 3-е изд., испр. и доп. — М.: Высш. школа, 1980.— 459 с.
-

9. Розенфельд Л.М., Ткачев А.Г. Холодильные машины и аппараты. — М.: Государственное издательство торговой литературы, 1960. — 649с.
10. Кругляк И.Н. Бытовые холодильники (устройство и ремонт): учеб. пособие. — М.: Легкая индустрия, 1974. — 205с.
11. Бабакин Б.С., Выгодин В.А. Бытовые холодильники и морозильники: справочник. — М.: Колос, 1998. — 631 с.

References

1. Lemeshko M.A. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya “Innovatsii v tekhnologiyakh vozdeystviya sel'skokhozyaystvennykh kul'tur”: (trudy). Moscow. 2015. pp. 339-344.
2. Kozhemyachenko A.V., Lemeshko M.A., Petrosov S.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, №2. URL: ivdon.ru/rmagazine/archive/N2y2013/1644.
3. Tikhonova O.B., Ruslyakov D.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 4-2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/N4p2y2012/1429.
4. Tseligorov N.A., Mafura G.M., Tseligorova E.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, №4-2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/N4t2y2012/1340.
5. Tseligorov N., Tseligorova E., Mafura G. Conference: 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). pp. 356-359.
6. Seki M., Osajima A., Nakane Y., Sato H., Watanabe K. Proc. Int. Refrig. Conf. Purdue Univ., US. 1994. pp. 67-72.
7. Ivanov R.A., Tseligorov N.A. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2019. № 47-6. pp.50-52.
8. Nashchokin V.V. Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha: ucheb. posobiye dlya vuzov [Technical thermodynamics and heat transfer: studies. manual for universities]. Moskva. HS. 1980. 459 p.



9. Rozenfel'd L.M., Tkachev A.G. Kholodil'nyye mashiny i apparaty [Refrigerators and devices]. Moskva. GITL. 1960. 649 p.
10. Kruglyak I.N. Bytovyye kholodil'niki (ustroystvo i remont) [Household refrigerators (device and repair)]. Moskva. LI. 1974. 205 p.
11. Babakin B.S., Vygodin V.A. Bytovyye kholodil'niki i morozil'niki: spravochnik [Household Refrigerators and Freezers: A Guide]. Moskva. Kolos, 1998. 631 p.