

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.56

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-4-16-25

Оригинальная статья /Original Paper

Энтропийно-статистический анализ эффективности циклов холодильных агрегатов бытовых холодильников

Ю.В. Кудров

Российский государственный университет туризма и сервиса,
141221, Московская область, г.о. Пушкинский, дп. Черкизово, ул. Главная, 99, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является определение термодинамической эффективности модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника по сравнению с базовой моделью с помощью энтропийно-статистического метода. **Метод.** В ходе работы при проведении исследования применен научный метод системного анализа, а также энтропийно-статистический метод термодинамического анализа при определении эффективности холодильного цикла бытового холодильника. **Результат.** Проведен анализ распределения затрат энергии на компенсацию производства энтропии по узлам холодильного агрегата. Результаты анализа позволяют наглядно оценить энергетические потери в цикле бытового холодильника. Анализ проводился для наиболее популярных при использовании в бытовых холодильниках хладагентов R134a и R600a. На основе проведенных расчетов построены сравнительные диаграммы потерь энергии в процессах цикла. Энтропийно-статистический анализ показателей термодинамической эффективности цикла подтверждает преимущества модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника. **Вывод.** В ходе работы было подтверждено, что использование модернизированного холодильного агрегата позволит снизить общие затраты энергии, а выбранный метод исследования позволяет наглядно оценить потери энергии по элементам цикла холодильного агрегата.

Ключевые слова: энтропийно-статистический метод, цикл холодильного агрегата, энтропия, энергетические потери, термодинамическая эффективность цикла

Для цитирования: Ю.В. Кудров. Энтропийно-статистический анализ эффективности циклов холодильных агрегатов бытовых холодильников. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(4):16-25. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-4-16-25

Entropy-statistical analysis of the efficiency of cycles of refrigeration units of household refrigerators

Yu. V. Kudrov

Russian State University of Tourism and Service,
99 Glavnaya Str., Cherkizovo, Urban district Pushkinsky, Moscow region 141221, Russia

Abstract. Objective. The aim of the work is to determine the thermodynamic efficiency of the modernized refrigeration unit of a household refrigerator compared to the basic model using the entropy-statistical method. **Method.** В ходе работы при проведении исследований применен научный метод системного анализа, а также энтропийно-статистический метод термодинамического анализа при определении эффективности холодильного цикла бытового холодильника. **Result.** The analysis of the distribution of energy costs to compensate for the production of entropy by the nodes of the refrigeration unit is carried out. This analysis allows us to visually assess the energy losses in the cycle of a household refrigerator. The analysis was carried out for the most popular refrigerants R134a and R600a when used in household refrigerators. Based on the calculations carried out, comparative diagrams of energy losses in cycle processes are constructed. The entropy-statistical analysis of the thermodynamic efficiency indicators of the cycle confirms the advantages of the modernized refrigeration unit of the household refrigerator. **Conclusion.** In the course of the work, it was confirmed that the use of an upgraded

refrigeration unit will reduce the total energy costs, and the chosen research method will visually assess the energy losses for the elements of the refrigeration unit cycle.

For citation: Yu. V. Kudrov. Entropy-statistical analysis of the efficiency of cycles of refrigeration units of household refrigerators. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (4): 16-25. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-4-16-25

Введение. Проблема энергосбережения и энергоэффективности является одной из основных при проектировании и разработке новых технических устройств. Бытовые холодильные системы, в частности, бытовые холодильники, являются одним из основных потребителем электроэнергии в доме [1–6]. В настоящее время изготовлено огромное количество бытовых холодильно-морозильных камер, что в совокупности с индивидуальным и общественным кондиционированием резко повысило качество жизни [7]. Что бы быть конкурентоспособным требуется постоянное совершенствования холодильных систем. Одним из вариантов совершенствования является повышение энергоэффективности и снижения энергопотребления бытовых холодильных приборов [1 – 10].

Повышение энергоэффективности бытовой холодильной техники является актуальной задачей в настоящее время [11 – 16]. Для решения проблем энергосбережения холодильной техники требуются уточнение и развитие, в первую очередь, теоретических подходов для осмысления и нахождения путей их усовершенствования [1, 7, 13 – 19].

На стадиях исследования, анализа и проектирования энергооборудования реальные величины затрачиваемой работы могут быть в первом приближении определены расчетными методами, базирующимися на принципах сохранения массы и энергии, а также на принципе возрастания энтропии в адиабатически изолированной системе вследствие необратимости рабочих процессов. [7, 13, 18, 19]. Проведенный энтропийно-статистический метод термодинамического анализа позволяет оценить потери в отдельных процессах и элементах холодильного цикла. Ценность данного метода состоит в возможности установления связи между отдельными потерями, а также влияния каждой локальной необратимости на эффективность установки в целом [7, 13, 18, 19].

Постановка задачи. В работах [1, 2, 8, 20] описывается устройство модернизированного холодильного агрегата бытового холодильника. Отличительной особенностью данной схемы является разделение потока хладагента в процессе дросселирования в пароотделителе, а также использование двух теплоизолированных теплообменников. Данные решения позволяют повысить термодинамическую эффективность холодильного цикла [1]. В работе [1] проведен сравнительный анализ термодинамической эффективности цикла модернизированного холодильного агрегата. Проведенные исследования показывают, что использование предлагаемого технического решения позволяют увеличить энергетическую эффективность холодильного агрегата, а также повысить его холодопроизводительность от 1,5 до 8,6% в зависимости от исходных параметров и применяемого хладагента. В данной работе предлагается оценить потери в отдельных процессах и элементах холодильного цикла, а также сравнить их с потерями в базовом холодильном цикле бытового холодильника при работе на хладагентах R134a и R600a.

Методы исследования. В работе применен теоретический метод исследования. Проведен энтропийно-статистический анализ циклов базового и модернизированного холодильных агрегатов при работе на озонобезопасных хладагентах R134a и R600a.

Данный метод позволяет получить распределение потерь по элементам холодильного агрегата и определить эффективность модернизированного холодильного агрегата.

Расчет показателей цикла осуществлялся по методике, представленной в работе [7]:

Удельная массовая холодопроизводительность:

$$q_0 = i_5 - i_2 \quad (1)$$

Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода q_0 при T_0 :

$$l_{\min.\text{исп.}} = q_0[(T_{0.\text{с.}} - T_0)/T_0] \quad (2)$$

Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода q_0 при $T_{\text{МК}}$:

$$l_{\min.\text{МК}} = q_0[(T_{0.\text{с.}} - T_{\text{МК}})/T_{\text{МК}}] \quad (3)$$

Удельная адиабатическая работа сжатия:

$$l_{\text{ад}} = i_7 - i_6 \quad (4)$$

Действительная затраченная удельная работа сжатия:

$$l_{\text{сж}} = l_{\text{ад}}/\eta_{\text{ад}} \quad (5)$$

Степень термодинамического совершенства цикла:

$$\eta_{\text{терм}} = l_{\min}/l_{\text{сж}} \quad (6)$$

Холодильный коэффициент при адиабатном процессе сжатия:

$$\varepsilon_{\text{ад}} = q_0/l_{\text{ад}} \quad (7)$$

Действительный холодильный коэффициент:

$$\varepsilon_{\text{д}} = q_0/l_{\text{сж}} \quad (8)$$

Максимальная работа, которая могла бы быть возвращена при охлаждении хладагента от температуры T_7 до T_8 с передачей теплоты $(i_7 - i_8)$ в окружающую среду обратимым путем:

$$\Delta l_{\text{ПК}} = (i_7 - i_8) - T_{0.\text{с.}}(S_7 - S_8) \quad (9)$$

Необходимые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при конденсации паров хладагента в конденсаторе:

$$\Delta l_{\text{к.к}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{к.к}} = T_{0.\text{с.}}q_{\text{к}}\left(\frac{1}{T_{0.\text{с.}}} - \frac{1}{T_{\text{к}}}\right) = T_{0.\text{с.}}(i_8 - i_9)\left(\frac{1}{T_{0.\text{с.}}} - \frac{1}{T_{\text{к}}}\right) \quad (10)$$

Необходимые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в конденсаторе:

$$\Delta l_{\text{к.д}} = \Delta l_{\text{ПК}} + \Delta l_{\text{к.к}} \quad (11)$$

Требуемые минимальные удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии при дросселировании:

$$\Delta l_{\text{др}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{др}} \quad (12)$$

Необходимая минимальная работа сжатия для компенсации производства энтропии в испарителе при передаче теплоты q_0 из камеры холодильника:

$$\Delta l_{\text{и}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_0 = T_{0.\text{с.}}q_0\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{\text{и}}}\right) \quad (13)$$

Требуемая минимальная работа сжатия для компенсации производства энтропии в рекуперативном теплообменнике 1:

$$\Delta l_{\text{Т01}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{рек.}} = T_{0.\text{с.}} \cdot (S_{12} - S_{12}) - (S_9 - S_{10}) \quad (14)$$

Требуемая минимальная работа сжатия для компенсации производства энтропии в рекуперативном теплообменнике 2:

– для базового холодильного агрегата (ХА):

$$\Delta l_{\text{Т02.Б}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{рек.}} = T_{0.\text{с.}} \cdot (S_6 - S_5) - (S_3 - S_4) \quad (15)$$

– для модернизированного ХА:

$$\Delta l_{\text{Т02.М}} = T_{0.\text{с.}}\Delta S_{\text{рек.}} = T_{0.\text{с.}} \cdot (S_{14} - S_{13}) - (S_{3*} - S_{4*}) \quad (16)$$

Сумма минимальных работ для компенсации производства энтропии в холодильном цикле во всех элементах ХА:

$$l_{\text{ад.расч}} = l_{\min} + \sum \Delta l \quad (17)$$

Энергетические потери в компрессоре:

$$\Delta l_{\text{км}} = l_{\text{сж}} - l_{\text{ад}} = l_{\text{ад.расч}}(1/\varepsilon_{\text{ад}} - 1) \quad (18)$$

Расчетная работа сжатия:

$$l_{\text{сж.расч}} = l_{\text{ад.расч}} + \Delta l_{\text{км}} \quad (19)$$

Исходные данные для расчета и анализа базового и модернизированного цикла холодильного агрегата:

Температура окружающей среды, °C (K) +32 (305)
Температура кипения хладагента, °C (K) –30 (243)
Температура конденсации хладагента, °C (K) +40 (313)
Температура перегрева хладагента, °C (K) +32 (305)
Температура переохлаждения хладагента, °C (K) +38 (311)
Адиабатический коэффициент компрессора, $\eta_{ад}$ 0,8

Обсуждение результатов. Проведем анализ базового цикла холодильного агрегата (рис. 1.). Основные реперные точки цикла холодильного агрегата, работающего на хладагенте R134a представлены в табл. 1.

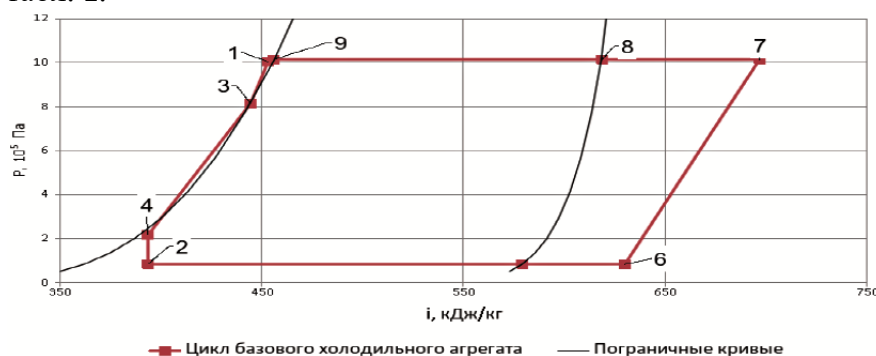


Рис. 1. Теоретический цикл базового холодильного агрегата в P-I диаграмме. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_k = 40^\circ\text{C}$

Fig. 1. Theoretical cycle of the basic refrigeration unit in the P-I diagram. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_c = 40^\circ\text{C}$

Таблица 1. Реперные точки базового цикла холодильного агрегата. Хладагент R134a
Table 1. Fixed points of the basic cycle of the refrigeration unit. Refrigerant R134a

№ точки	t, °C	P, 10^5 Па	i, кДж/кг	S, кДж/кгK
6	32	0.848	630.13	4.9332
7	114	10.158	696.89	4.9332
8	40	10.158	618.74	4.7089
9	40	10.158	456.10	4.1895
1	38	10.058	453.16	4.1802
3	32	8.148	444.46	4.1524
4	-8.0	2.173	393.63	3.9769
2	-30	0.848	393.63	3.9838
5	-30	0.848	579.30	4.7474
6	32	0.848	630.13	4.9332

Результаты расчетов приведены в табл. 3. Энергетические потери по элементам базового холодильного агрегата представлены на рис. 2. Анализ цикла базового холодильного агрегата (рис.2) показал, что максимальные значения потерь приходятся на компрессор, конденсатор и испаритель. Снижение затрат энергии в данных элементах требует внесения изменений в саму конструкцию данных устройств.

Затраты работы на дросселирование и рекуперативный теплообменник в сумме составляют порядка 11,5 % от общих затрат на основные элементы холодильного цикла, что тоже имеет интерес по снижению их энергетических затрат. Уменьшить затраты энергии на дросселирование и теплообменник можно путем изменения конструкции холодильного агрегата и, соответственно, его цикла.

Проведем анализ модернизированного цикла холодильного агрегата (рис.3) [1, 2, 8]. Основные реперные точки цикла холодильного агрегата, работающего на хладагенте R134a представлены в табл. 2.



Рис.2. Энергетические потери по элементам базового холодильного агрегата
Fig.2. Energy losses by elements of the basic refrigeration unit



Рис.3. Теоретический цикл модернизированного холодильного агрегата в P-I диаграмме.
 $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_k = 40^\circ\text{C}$

Fig.3. Theoretical cycle of the modernized refrigeration unit in the P-I diagram. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_c = 40^\circ\text{C}$

Таблица 2. Реперные точки модернизированного цикла холодильного агрегата. Хладагент R134a
Table 2. Fixed points of the modernized cycle of the refrigeration unit. Refrigerant 134a

№ точки	t, °C	P, $\times 10^5$ Па	i, кДж/кг	S, кДж/кг $\times$ K
6	32.0	0.848	630.130	4.9332
7	114.0	10.158	696.892	4.9332
8	40.0	10.158	618.740	4.7089
9	40.0	10.158	456.100	4.1895
10	36.7	10.158	451.216	4.1742
1*	35.7	10.058	448.790	4.1663
3	-5.0	2.437	431.790	4.1190
3*	-4.0	2.437	394.630	3.9804
4*	-16.1	1.570	380.357	3.9265
2	-30.0	0.848	380.357	3.9292
5	-30.0	0.848	579.300	4.7474
13	-25.5	0.848	582.792	4.7616
14	-7.5	0.848	597.065	4.8172
11	-5.5	0.848	598.677	4.8233
12	0.5	0.848	603.561	4.8413

Результаты расчетов приведены в табл.3. Энергетические потери по элементам модернизированного холодильного агрегата представлены на рис. 4.

Сравнительная диаграмма двух циклов холодильных агрегатов, работающих на хладагенте R134a, представлена на рис. 5.

**Таблица 3. Результаты энтропийно-статистического метода термодинамического анализа.
Хладагент R134a**

Table 3. Results of the entropy-statistical method of thermodynamic analysis. Refrigerant R134a

Параметр/ Parameter	Значение/ Meaning	
	Цикл/ Cycle 1 (базовый/ base)	Цикл/ Cycle 2 (модерн./ modernized)
Удельная массовая холодопроизводительность q_0 , кДж/кг Specific mass cooling capacity	185.7	198.9
Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода $l_{min.мк.}$, кДж/кг Minimum required specific work (electricity) for cold generation $l_{(min.mk.)}$,	36.41	39.01
Затраченная удельная работа сжатия, кДж/кг Spent specific compression work	83.45	
Удельная адиабатная работа сжатия, кДж/кг Specific adiabatic work of compression	66.76	
Энергетические потери в компрессоре $\Delta l_{км}$, кДж/кг Energy losses in the compressor	16,71	16,78
Холодильный коэффициент адиабатный $\varepsilon_{ад}$ Adiabatic coefficient of performance	2.78	2.98
Действительный холодильный коэффициент ε_d Actual coefficient of performance	2.22	2.38
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в конденсаторе $\Delta l_{к.д}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the capacitor	13,9	
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при дросселировании $\Delta l_{др}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy during throttling	2.32	0.82
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в испарителе $\Delta l_{и}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy in the evaporator	10.97	11.75
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 1 $\Delta l_{Т01}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	-	0.82
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 2 $\Delta l_{Т02}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	3.14	0.52
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в других процессах, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in other processes, kJ/kg	0.1	0.29

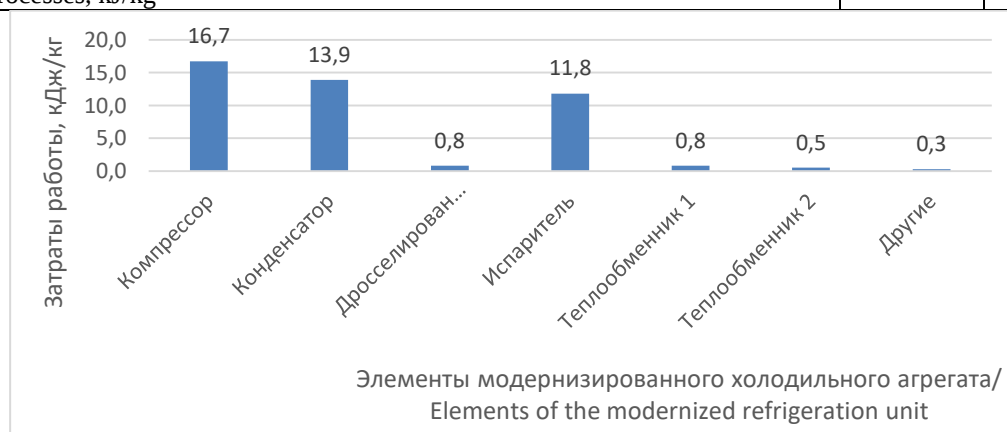


Рис.4. Энергетические потери по элементам модернизированного холодильного агрегата
Fig.4. Energy losses by elements of the modernized refrigeration unit

Из анализа видно, что при небольшом увеличении затрачиваемой работы на процесс кипения в испарителе с 11,0 до 11,8 кДж/кг, а также дополнительных затрат на компенсацию производства энтропии в теплообменнике 1 (+0,8 кДж/кг), выигрыш на потерях в процессе дросселирования и теплообменнике 2 составляет 34,7% и 16,1% соответственно. Общие потери рабо-

ты на элементах холодильного агрегата снизятся при этом примерно на 5%. Холодопроизводительность модернизированного холодильного агрегата при работе на хладагенте R134a возрастает, примерно, на 7%.

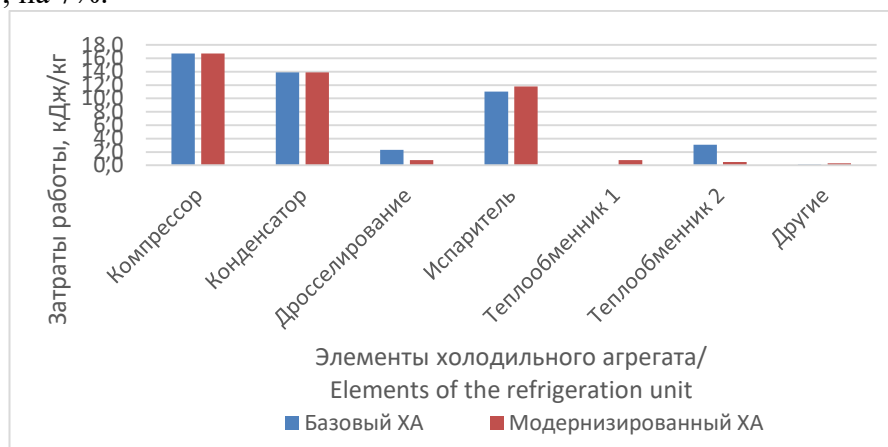


Рис.5. Энергетические потери по элементам холодильного агрегата. Хладагент R134a

Fig.5. Energy losses by the elements of the refrigeration unit. Refrigerant R134a

Для анализа эффективности модернизированного холодильного агрегата по сравнению с базовым при работе на хладагенте R600a проведем аналогичное сравнение циклов холодильных агрегатов (рис. 6).

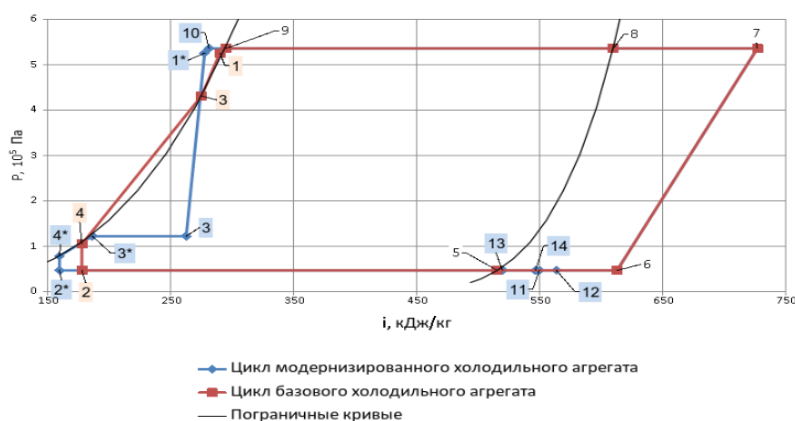


Рис.6. Сравнение циклов холодильных агрегатов, работающих на хладагенте R600a. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_k = 40^\circ\text{C}$

Fig.6. Comparison of cycles of refrigeration units operating on R600a refrigerant. $T_0 = -30^\circ\text{C}$, $T_{oc} = 32^\circ\text{C}$, $T_c = 40^\circ\text{C}$

Основные реперные точки базового и модернизированного циклов холодильного агрегата, работающих на хладагенте R600a представлены в табл. 3 и 4. Результаты расчетов представлены в табл.5.

Таблица 3. Реперные точки базового цикла холодильного агрегата. Хладагент R600a

Table 3. Fixed points of the basic cycle of the refrigeration unit. Refrigerant R600a

№ точки	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \times 10^5 \text{ Па}$	$i, \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кг} \times \text{K}$
6	32	0.468	612.9638	2.6697
7	99	5.359	727.0269	2.6697
8	40	5.359	609.8300	2.3272
9	40	5.359	295.1800	1.3225
1	38	5.259	290.1600	1.3065
3	32	4.314	275.2800	1.2587
4	-11	1.048	177.9062	0.9180
2	-30	0.468	177.9062	0.9255
5	-30	0.468	515.5900	2.3143
6	32	0.468	612.9638	2.6697

Таблица 4. Реперные точки модернизированного цикла холодильного агрегата. Хладагент R600a
Table 4. Fixed points of the modernized cycle of the refrigeration unit. Refrigerant R600a

№ точки	t, °C	P, ×10 ⁵ Па	i, кДж/кг	S, кДж/кг×К
6	32.0	0.468	612.9638	2.6697
7	99.0	5.359	727.0269	2.6697
8	40.0	5.359	609.8300	2.3272
9	40.0	5.359	295.1800	1.3225
10	34.2	5.359	281.1991	1.2763
1*	33.2	5.259	277.7400	1.2667
3	-7.0	1.222	262.7400	1.2368
3*	-6.0	1.222	186.5000	0.9502
4*	-18.2	0.7846	159.7670	0.8481
2*	-30.0	0.468	159.7670	0.8509
5	-30.0	0.468	515.5900	2.3143
13	-27.0	0.468	519.9186	2.3318
14	-9.0	0.468	546.6516	2.4367
11	-7.0	0.468	549.7138	2.4482
12	2.0	0.468	563.6947	2.4998

Таблица 5. Результаты энтропийно-статистического метода термодинамического анализа. Хладагент R600a
Table 5. Results of the entropy-statistical method of thermodynamic analysis. Refrigerant R600a

Параметр/ Parameter	Значение/ Meaning	
	Цикл/ Cycle 1 (базовый/ base)	Цикл/ Cycle 2 (модерн./ modernized)
Удельная массовая холодопроизводительность q_0 , кДж/кг Specific mass cooling capacity	337.70	355.82
Минимально необходимая удельная работа (электроэнергия) для генерации холода $l_{min,мк}$, кДж/кг Minimum required specific work (electricity) for cold generation	66.22	69.77
Затраченная удельная работа сжатия, кДж/кг Spent specific compression work	142.58	
Удельная адиабатная работа сжатия, кДж/кг Specific adiabatic work of compression	114,06	
Энергетические потери в компрессоре $\Delta l_{км}$, кДж/кг Energy losses in the compressor	28,5	28,8
Холодильный коэффициент адиабатный $\varepsilon_{ад}$ Adiabatic coefficient of performance	2.96	3.12
Действительный холодильный коэффициент ε_d Actual coefficient of performance	2.37	2.50
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в конденсаторе $\Delta l_{к,д}$, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the capacitor	20,78	
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии при дросселировании $\Delta l_{др}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy during throttling	2.59	0,85
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в испарителе $\Delta l_{и}$, кДж/кг Specific work costs to compensate for the production of entropy in the evaporator	19.95	21.02
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 1 Δl_{T01} , кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	-	1.65
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в теплообменнике 2 Δl_{T02} , кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in the heat exchanger	4.48	0.85
Удельные затраты работы для компенсации производства энтропии в других процессах, кДж/кг Specific costs of work to compensate for the production of entropy in other processes, kJ/kg	0.14	0,24

Представим результаты расчетов в графическом виде (рис. 7). Анализ энергетических потерь при работе на хладагенте R600a показывает, что их увеличение наблюдается в компрессоре примерно на 1% и в процессе кипения хладагента в испарителе на 5,5%. При этом сокращаются потери при дросселировании на 34% и в теплообменнике 42%.

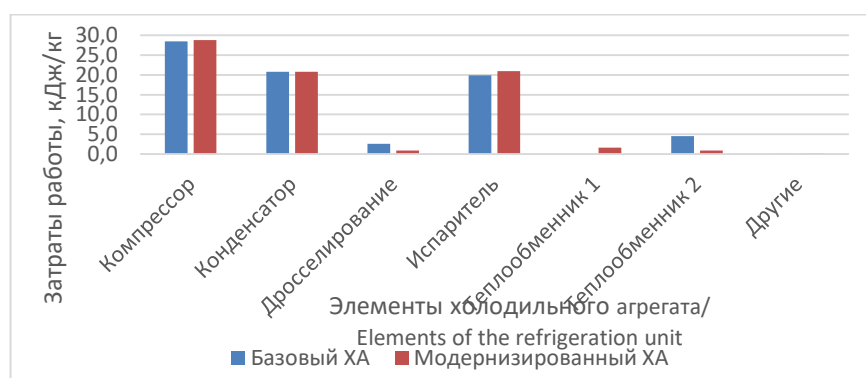


Рис.7. Энергетические потери по элементам холодильного агрегата. Хладагент R600a

Fig.7. Energy losses by the elements of the refrigeration unit. Refrigerant R600a

Общие энергетические потери на элементах холодильного агрегата снизятся при этом примерно на 3%. Холодопроизводительность модернизированного холодильного агрегата при работе на хладагенте R600a возрастает на 5%.

Вывод. Использование энтропийно-статистического метода термодинамического анализа при определении эффективности модернизированного цикла холодильного агрегата позволяет наглядно оценить его преимущества по сравнению с циклом базового холодильного агрегата. Использование модернизированного холодильного агрегата позволяет значительно снизить энергетические затраты при дросселировании и в рекуперативном теплообменнике, что приводит к снижению общих затрат энергии при работе холодильного агрегата. Расхождение, полученное при данном анализе, значений адиабатической работы сжатия с ее значениями, определенными по циклу холодильного агрегата, не превышает 1%. Результаты энтропийно-статистического метода термодинамического анализа в целом коррелируются с результатами работы [1], что в совокупности говорит о достоверности результатов о реальном распределении затрат энергии по основным элементам исследуемых холодильных циклов.

Библиографический список:

1. Comparative analysis of thermodynamic efficiency of cycles for various flowcharts of refrigerating unit. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. 2020; 8(8):
2. Ю.В. Кудров, Л.В. Сумзина, А.В. Максимов, С.Л. Филимонов. Калориметрический стенд для исследования процессов в холодильном агрегате. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Том 49 (2), 2022. С.18-23.
3. Оценка эффективности термодинамических циклов парокомпрессионных холодильных машин и тепловых насосов. Калнинь И.М., Фадеков К.Н. Холодильная техника. 2006. №3. С. 16-25.
4. Анализ методов увеличения энергоэффективности компрессионных холодильников. Резников В.С., Романов П.В. Интеллектуальный потенциал XXI века: ступени познания. 2014. № 23. С. 143-146.
5. Сумзина Л.В., Кочеткова Я.А., Аржанов П.А., Бурцев И.А., Литвиненко А.А. Влияние рекуперативного теплообмена на эффективность цикла холодильного агрегата // Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» Том 3, №2 (2016) <http://resources.today/PDF/07RRO216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.;
6. Способ повышения энергоэффективности холодильников / Сучилин В.А., Максимов А.В., Сумзина Л.В., Бурцева Л.А.: пат. 2630813 С2 РФ. №F25B 1/00 (2006.01); заявл. 30.10.2015; опубл. 04.05.2017, Бюл. №13; 7 с.
7. Основы криологии. энтропийно-статистический анализ низкотемпературных систем / А.М. Архаров. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана. 2014. – 507.
8. Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В., Кочетков А.С. Энергоэффективный холодильный агрегат для двухкамерных холодильников и морозильников бытового и промышленного назначения // Промышленный сервис. 2019. № 1 (70). С. 24-26.
9. Сумзина Л.В. Повышение энергетической эффективности бытовых компрессионных холодильников с двухиспарительной системой охлаждения. диссертация ... кандидата технических наук: 05.02.13. - Москва, 1994.
10. Максимов А.В., Коляда В.В., Сиротенко Я.А. Зависимость показателей термодинамической эффективности цикла холодильного агрегата от температуры переохлаждения в теплообменнике // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. №2
11. Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В. Сравнительный анализ циклов бытового холодильника на хладагентах R134A, R600A. Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 2. С. 57-59.
12. Лемешко М.А. Технологии повышения энергетической эффективности бытовых холодильных приборов // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. –2014. –№ 13. –С. 188-196.
13. Analysis of thermodynamic efficiency of small-scale natural gas liquefying plant operating on medium-pressure cycle. Arkharov A.M., Semenov V.Y. Chemical and Petroleum Engineering. 2016. Т. 51. № 9. С. 656-664.
14. Сумзина Л.В., Максимов А.В. Анализ потерь эксергии в цикле компрессионного бытового холодильника // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 1. С. 37-39.;

15. Максимов А.В., Кудров Ю.В., Равилов Ф.А., Бурцева Л.А. Особенности процесса дросселирования хладагента в капиллярных трубках. Интернет-журнал «Отходы и ресурсы», 2016, Т.3, №2 <http://resources.today/PDF/01RRO216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.;
16. Холодильный агрегат с теплообменником-докипатель/Максимов А.В., Сумзина Л.В., Кочеткова Я.А.: пат. 155867 Р Ф. №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 29.05.2015; опубл. 20.10.2015, Бюл. №29; 5 с.
17. Особенности идеализированных циклов парокомпрессорных холодильных машин. Вассерман А.А., Лавренченко Г.К., Слынько А.Г. Технические газы. 2014. № 6 (2014). С. 30-36.
18. Архаров А.М., Шишов В.В., Талызин М.С. Энтропийно-статистический анализ низкотемпературных холодильных циклов и выбор на его основе оптимальной системы холодоснабжения магазина // Холодильная техника. 2016. № 3. С. 30-34.
19. Архаров А.М., Шишов В.В., Шамсутдинов И.Р., Серебряков Н.Ю. Энтропийно-статистический анализ холодильных циклов для "шоковой" заморозки // Холодильная техника. 2015. № 11. С. 38-42.
20. Патент РФ № 2018125056, №F25D 11/00 (2006.01); заявл. 10.07.2018 Холодильный агрегат для двухкамерного холодильника / Сумзина Л.В., Максимов А.В., Кудров Ю.В. // опубл. 15.01.2019, Бюл. №2

References:

1. Comparative analysis of thermodynamic efficiency of cycles for various flowcharts of refrigerating unit. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020; 8(8):
2. Yu.V. Kudrov, L.V. Sumzina, A.V. Maksimov, S.L. Filimonov. Calorimetric stand for the study of processes in the refrigeration unit. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2022; 49 (2): 18-23.(In Russ)
3. Evaluation of the efficiency of thermodynamic cycles of steam compression refrigerating machines and heat pumps. Kalnin I.M., Fadekov K.N. *Refrigeration technology*. 2006; 3:16-25. (In Russ)
4. Analysis of methods for increasing the energy efficiency of compression refrigerators. Reznikov V.S., Romanov P.V. Intellectual potential of the XXI century: stages of cognition. 2014; 23: 143-146. (In Russ)
5. Sumzina L.V., Kochetkova Ya.A., Arzhanov P.A., Burtsev I.A., Litvinenko A.A. Influence of regenerative heat exchange on the efficiency of the refrigeration unit cycle. *Online magazine "Waste and Resources"* 2016; 3(2) <http://resources.today/PDF/07RRO216.pdf> (access is free). Cover from the screen. (In Russ)
6. A way to increase the energy efficiency of refrigerators / Suchilin V.A., Maksimov A.V., Sumzina L.V., Burtseva L.A.: pat. 2630813 C2 Ros. Federation. no.F25B 1/00 (2006.01); application 30.10.2015; publ. 04.05.2017;13: 7 . (In Russ)
7. Fundamentals of cryology. Entropy-statistical analysis of low-temperature systems / A.M. Arkharov. M.: Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 2014;507. (In Russ)
8. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V., Kochetkov A.S. Energy-efficient refrigeration unit for two-chamber refrigerators and freezers for domestic and industrial use. *Industrial service*. 2019; 1(70): 24-26. (In Russ)
9. Sumzina L.V. Improving the energy efficiency of household compression refrigerators with a two-vapor cooling system. dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.02.13. Moscow, 1994. (In Russ)
10. Maksimov A.V., Kolyada V.V., Sirotenko Ya.A. The dependence of the thermodynamic efficiency indicators of the refrigeration unit cycle on the supercooling temperature in the heat exchanger. *Electrotechnical and information complexes and systems*. 2012; 8(2): (In Russ)
11. Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. Comparative analysis of the cycles of a household refrigerator with refrigerants R134A, R600A. *Electrical and information complexes and systems*. 2012; 8(2): 57-59. (In Russ)
12. Lemeshko, M.A. Technologies for increasing the energy efficiency of household refrigerating appliances. *Fundamental and applied research: problems and results*. 201; 13:188-196. (In Russ)
13. Analysis of thermodynamic efficiency of small-scale natural gas liquefying plant operating on medium-pressure cycle. Arkharov A.M., Semenov V.Y. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2016; 51(9.): 656-664.
14. Sumzina L.V., Maksimov A.V. Analysis of exergy losses in the cycle of a compression household refrigerator. *Electrical and information complexes and systems*. 2012; 8(1): 37-39. (In Russ)
15. Maksimov A.V., Kudrov Yu.V., Ravilov F.A., Burtseva L.A. Features of the process of throttling refrigerant in capillary tubes // Online journal "Waste and resources" 2016; 3(2) <http://resources.today/PDF/01RRO216.pdf> (access is free). Cover from the screen. Яз. рус., Eng.; (In Russ)
16. Refrigerating unit with heat exchanger / Maksimov A.V., Sumzina L.V., Kochetkova Ya.A.: pat. 155867 Ros. Federation. No. F25D 11/00 (2006.01); application. 29.05.2015; publ. 20.10.2015; 29: 5. (In Russ)
17. Features of idealized cycles of steam compressor refrigerating machines. Wasserman A.A., Lavrenchenko G.K., Slynko A.G. *Technical gases*. 2014; 6: 30-36. (In Russ)
18. Arkharov A.M., Shishov V.V., Talyzin M.S. Entropy-statistical analysis of low-temperature refrigeration cycles and the choice based on it of the optimal cooling system of the store. *Refrigerating equipment*. 2016; 3: 30-34. (In Russ)
19. Arkharov A.M., Shishov V.V., Shamsutdinov I.R., Serebryakov N.Yu. Entropy-statistical analysis of refrigeration cycles for "shock" freezing. *Refrigerating equipment*. 2015; 11: 38-42. (In Russ)
20. Patent of the Russian Federation No. 2018125056, No. F25D 11/00 (2006.01); application 10.07.2018 Refrigeration unit for a two-chamber refrigerator / Sumzina L.V., Maksimov A.V., Kudrov Yu.V. // publ. 15.01.2019; 2(In Russ)

Сведения об авторе:

Кудров Юрий Владимирович, старший преподаватель; yurakudrov@yanex.ru

Information about authors:

Yury V. Kudrov, Senior Lecturer, yurakudrov@yanex.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов/The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 25.10.2022.

Одобрена после рецензирования/ Revised 17.11.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 17.11.2022.