

УДК 621.565

UDC 621.565

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex

АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА КОНДИЦИОНЕРА С УЛУЧШЕННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**ANALYSIS OF THE THERMODYNAMIC CYCLE OF AN AIR CONDITIONER WITH IMPROVED ENERGY CHARACTERISTICS**Романов Виктор Викторович
к.т.н., доцентRomanov Viktor Viktorovich
Candidate of Technical Sciences, Associate ProfessorАлехин Сергей Николаевич
к.т.н., доцентAlyokhin Sergey Nikolaevich
Candidate of Technical Sciences, Associate ProfessorГалка Галина Александровна
старший преподавательGalka Galina Alexandrovna
senior lecturerГалка Андрей Сергеевич
студент
andrew8werner@gmail.com
*Донской Государственный Технический
Университет, Ростов-на-Дону, Россия*Galka Andrey Sergeevich
student
andrew8werner@gmail.com
*Don State Technical University, Rostov-on-Don,
Russia*

В статье рассматривается актуальность использования кондиционеров в помещениях, требующих охлаждения. Подробно описывается термодинамический цикл таких кондиционеров, формулы, применяемые на каждом этапе цикла. Приводятся диаграммы, визуально показывающие работу каждого участка, а также важность и факторы, определяющие энергетическую эффективность холодильного агрегата кондиционера

The article discusses the relevance of using air conditioners in rooms that require cooling. The thermodynamic cycle of such air conditioners is described in detail, the formulas applied at each stage of the cycle. Diagrams are provided that visually show the operation of each section, as well as the importance and factors determining the energy efficiency of the air conditioner refrigeration unit

Ключевые слова: КОНДИЦИОНЕР, КОМПРЕССОР, ОХЛАЖДЕНИЕ, ЗАТРАТЫ, КИПЕНИЕ, ИСПАРИТЕЛЬ, АГРЕГАТ, СЖАТИЕ

Keywords: AIR CONDITIONER, COMPRESSOR, COOLING, COSTS, BOILING, EVAPORATOR, UNIT, COMPRESSION

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-216-006>

Роль холодильных систем в современном мире трудно переоценить, а, следовательно, огромное значение играют компрессоры, которые являются «сердцем» любой холодильной машины, в том числе в системах кондиционирования воздуха (СКВ). Большинство холодильного оборудования в агропромышленном, коммерческом и бытовом секторах использует компрессоры объемного сжатия. Только ежегодный выпуск таких компрессоров превышает 230 млн шт. Такое положение дел естественно вызывает огромный интерес производителей

<http://ej.kubagro.ru/2026/02/pdf/06.pdf>

к данной области, а энергоемкость компрессорного оборудования и общие тенденции развития холодильной техники диктует необходимость совершенствования технологий [1].

Одним из наиболее энергоемких секторов экономики является агропромышленный комплекс (АПК), который в процессе производства продуктов питания использует значительное количество разнообразных технических систем, потребляющих электроэнергию, в том числе СКВ, обеспечивающих необходимый микроклимат в производственных помещениях.

Как указывает автор работы [2], большинство систем кондиционирования воздуха используют компрессионное охлаждение для управления температурой и тепловыми потоками.

Анализ термодинамических циклов холодильных машин представлен в ряде научных публикаций, из которых выделим следующие [3], [4], [5], [6], [7] и другие.

Укажем также на научные труды известных отечественных ученых, также рассматривающих в своих работах термодинамические циклы холодильных машин, в частности [8], [9], [10], [11] и ряд других известных публикаций.

Среди зарубежных следует выделить работы Рой Дж. Доссата [12] и Ramesh Chandra Arora, в которых были достаточно подробно рассмотрены вопросы анализа термодинамических циклов холодильных машин.

Таким образом, целью данной научной работы является анализ термодинамического цикла кондиционера с улучшенными энергетическими характеристиками на основе дополнительного переохлаждения рабочего тела и охлаждения компрессора с использованием современных положений теории холодильной техники.

Условные обозначения, используемые в работе:

T_1 (T_0) – температура кипения хладагента, К;

T_2 – температура всасывания хладагента, К;

T_3 – температура конца адиабатического сжатия хладагента в компрессоре, К;

$T_4, T_5 (T_k)$ – температура конденсации пара хладагента, К;

T_6 – температура переохлаждения хладагента, К;

T_7 – температура конца дросселирования (равна температуре кипения T_0), К;

$T_{1'}$, $T_{3'}$ – температуры всасывания и конца политропного сжатия хладагента в компрессоре после введения охлаждения компрессора, К;

$T_{6'}$, $T_{7'}$ – температуры переохлаждения хладагента и конца дросселирования после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела, К;

$s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_{1'}, s_{3'}, s_{6'}, s_{7'}$ – удельные энтропии в соответствующих точках рассматриваемого цикла, кДж/(кг·К);

P_k – давление конденсации, кПа;

P_0 – давление кипения в испарителе, кПа;

c_p – средняя удельная массовая теплоемкость перегретого пара при постоянном давлении (изобарная), кДж/(кг·К);

c'_x – средняя удельная массовая теплоемкость жидкости на левой пограничной кривой (теплоемкость насыщенной жидкости), кДж/(кг·К);

$i_1, i_2, i_3, i_4, i_5, i_6, i_7, i_{1'}, i_{3'}, i_{6'}, i_{7'}$ – энтальпии в соответствующих точках рассматриваемого цикла, кДж/кг;

k – показатель адиабаты;

n – показатель политропы;

r_0 – удельная теплота парообразования при температуре T_1 , кДж/кг.

Основные расчетные зависимости:

Данные зависимости получены на основании материалов и положений, изложенных в научных работах, указанных выше.

1) Изменение энтропии пара на всасывании в процессе перегрева без охлаждения компрессора $\Delta S_{1-2} = S_2 - S_1 = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$.

2) Изменение энтропии в процессе снижения температуры перегретого пара после адиабатного сжатия в компрессоре без дополнительного перегрева пара на всасывании $\Delta S_{c-4} = S_c - S_4 = c_p \cdot \ln \frac{T_c}{T_4}$, где

$$T_c = T_1 \cdot \left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

3) Изменение энтропии в процессе дополнительного перегрева на всасывании $\Delta S_{2-1'} = S_2 - S_{1'} = c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_{1'}}$.

4) Изменение энтропии в политропном процессе сжатия при охлаждении компрессора $\Delta S_{1'-3'} = S_{1'} - S_{3'} = c_p \cdot \ln \frac{T_c}{T_{1'}}$,

где $T_c = T_{1'} \cdot \left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ и $T_{3'} = T_{1'} \cdot \left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{n-1}{n}}$, откуда $S_{1'} - S_{3'} = c_p \cdot \ln \left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{k-n}{n-k}}$.

5) $T_3 = T_2 \cdot \left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}$.

6) Изменение энтропии в процессе дросселирования без дополнительного переохлаждения $\Delta S_{5-6} = S_5 - S_6 = c'_x \cdot \ln \frac{T_4}{T_6}$.

7) Дополнительное изменение энтропии в процессе дросселирования при дополнительном переохлаждении $\Delta S_{6-6'} = S_6 - S_{6'} = c'_x \cdot \ln \frac{T_6}{T_{6'}}$.

отразится адиабатой 2–3. При этом точка 3 образуется пересечением изобары процесса конденсации с этой адиабатой. Процесс охлаждения перегретых паров до температуры конденсации t_k (t_4) отразится изобарой 3–4, а процесс конденсации паров – изотермой 4–5. Процесс переохлаждения жидкого хладагента отображаются отрезком 5–6 (положение точки 6 определяется на основе теплового баланса регенеративного теплообменника), процесс дросселирования – отрезком 6–7, процесс кипения рабочего тела – отрезком 7–1.

Получаем контур 1-2-3-4-5-6-7-1, представляющий цикл работы холодильного агрегата до введения дополнительного переохлаждения рабочего тела и охлаждения компрессора.

После введения дополнительного переохлаждения рабочего тела и охлаждения компрессора, характеризующегося переходом процесса сжатия от адиабатного к политропному, теоретический цикл принимает вид, описываемый контуром 1-1'-3'-4-5-6'-7'-1 (рис.1 и рис.2), где контур 7-6-6'-7'-7 – это величина роста работы $l_{k.m}$ при переохлаждении жидкого хладона, а контур 1'-2-3-3'-1' – это величина снижения работы $l_{o.k}$ в процессе охлаждения компрессора.

С учетом вышесказанного величину полной работы A_l в цикле с дополнительным переохлаждением рабочего тела и охлаждением компрессора определяем из выражения:

$$A_l = l_p + l_{k.m} - l_{o.k}, \quad (1)$$

где $l_p = A_{lp}$ – работа холодильного агрегата;

$l_{k.m}$ – работа дополнительного переохлаждения жидкого хладагента;

$l_{o.k}$ – работа охлаждения компрессора.

Основываясь на материалы известных научных работ, указанных выше, и исходя из современных представлений о реализации термодинамических

циклов холодильных машин компрессионного типа, применяемых в кондиционерах, опишем характеристические точки термодинамического цикла и процессы работы холодильного агрегата кондиционера, используя диаграммы $T-S$ (рис. 1) и $lpP-i$ (рис.2):

$x = 0$ – линия насыщенной жидкости; $x = 1$ – линия насыщенного пара;

(\cdot)1 – характеризует состояние насыщенного пара рабочего тела (хладагента) на выходе из испарителя;

(\cdot)2 и (\cdot)1' – характеризуют состояние перегретого пара в начале процесса сжатия рабочего тела в компрессоре, соответственно до и после введения охлаждения компрессора;

(\cdot)3 – характеризуют состояние перегретого пара в конце адиабатного процесса сжатия рабочего тела в компрессоре до введения охлаждения компрессора;

(\cdot)3' – характеризует состояние перегретого пара в конце политропного процесса сжатия рабочего тела в компрессоре после введения охлаждения компрессора;

(\cdot)4 – характеризует состояние насыщенного пара рабочего тела в начале процесса конденсации в конденсаторе;

(\cdot)5 – характеризует состояние насыщенной жидкости рабочего тела в конце процесса конденсации в конденсаторе и начало процесса переохлаждения;

(\cdot)6 и (\cdot)6' – характеризуют состояние насыщенной жидкости рабочего тела в конце процесса переохлаждения и начале процесса дросселирования, соответственно до и после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела;

(\cdot)7 и (\cdot)7' – характеризуют парожидкостное состояние рабочего тела в конце процесса дросселирования на входе в испаритель, соответственно до и после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела;

1 – 2 и 1 – 1' – процессы перегрева пара рабочего тела при поступлении из испарителя в компрессор до начала процесса сжатия, соответственно до и после введения охлаждения компрессора (изобарный процесс);

2 – 3 – процесс адиабатного сжатия перегретого пара в компрессоре до введения охлаждения компрессора;

1' – 3' – процесс политропного сжатия перегретого пара в компрессоре после введения охлаждения компрессора;

3 – 4 и 3' – 4 – процессы охлаждения перегретого пара рабочего тела после завершения процесса сжатия в компрессоре до температуры конденсации (изобарный процесс), соответственно до и после введения охлаждения компрессора;

4 – 5 – процесс конденсации пара рабочего тела в конденсаторе (изотермический процесс);

5 – 6 и 5 – 6' – процессы переохлаждения жидкого рабочего тела, соответственно до и после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела (изобарный процесс);

6 – 7 и 6' – 7' – процессы дросселирования жидкого рабочего тела, соответственно до и после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела (изоэнтальпийный процесс);

7 – 1 и 7' – 1 – процессы кипения парожидкостной смеси рабочего тела в испарителе, соответственно до и после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела (изотермический процесс).

Работа холодильного агрегата до введения дополнительного переохлаждения рабочего тела и охлаждения компрессора состоит из суммы площадей фигур:

$$A_{lp} = F_{1-2-3-b} + F_{1-b-4-d} + F_{4-a-7-d} + F_{a-5-6-7}. \quad (2)$$

Рассмотрим отдельно эти фигуры.

Фигура 1–2–3–*b* (рис. 3).

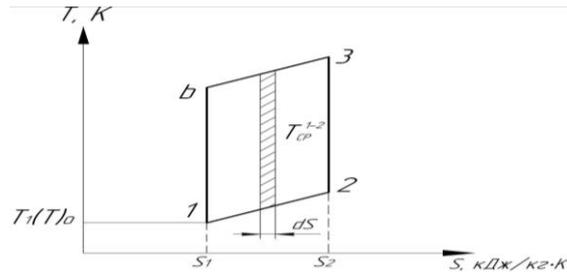


Рис.3. Фигура 1–2–3–b.

В данной фигуре рассмотрим элементарную площадку $dF = T_{cp}^{1-2} \cdot dS$, высота которой T_{cp}^{1-2} , а основание dS .

Площадь фигуры 1–2–3–b равна:

$$F_{1-2-3-b} = \int_{S_1}^{S_2} T_{cp}^{1-2} dS = T_{cp}^{1-2} \cdot S_{S_1}^{S_2} = T_{cp}^{1-2} \cdot (S_2 - S_1) = T_{cp}^{1-2} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1},$$

где $T_{cp}^{1-2} = \frac{T_{3-2} + T_{b-1}}{2} = \frac{T_3 - T_2 + T_b - T_1}{2}$,

тогда $F_{1-2-3-b} = \left(\frac{T_3 - T_2 + T_b - T_1}{2} \right) \cdot (S_2 - S_1) = \left(\frac{T_3 - T_2 + T_b - T_1}{2} \right) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$.

Фигура 1–b–4–d (рис. 4).

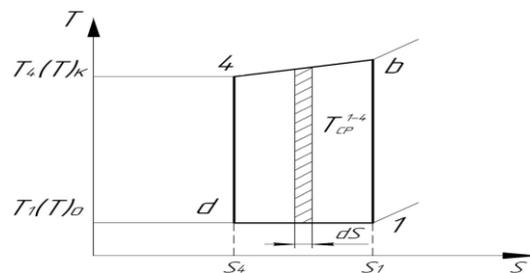


Рис.4. Фигура 1–b–4–d.

В этой и последующих фигурах процесс нахождения площади элементарной площадки аналогичен вышеизложенному, с учетом этого находим непосредственно площадь фигуры 1–b–4–d:

$$F_{1-b-4-d} = \int_{S_4}^{S_1} T_{cp}^{1-4} dS = T_{cp}^{1-4} \cdot S_{S_4}^{S_1} = T_{cp}^{1-4} \cdot (S_1 - S_4) = T_{cp}^{1-4} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_b}{T_4},$$

где $T_{cp}^{1-4} = \frac{T_{b-1} + T_{4-d}}{2} = \frac{T_b - T_1 + T_4 - T_d}{2}$.

Так как $T_d = T_1$, то $T_{cp}^{1-4} = \frac{T_b + T_4}{2} - T_1$,

тогда $F_{1-b-4-d} = \left(\frac{T_b + T_4}{2} - T \right) \cdot (S_1 - S_4) = \left(\frac{T_b + T_4}{2} - T \right) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_b}{T_4}$.

Фигура 5–6–7–а (рис. 5)

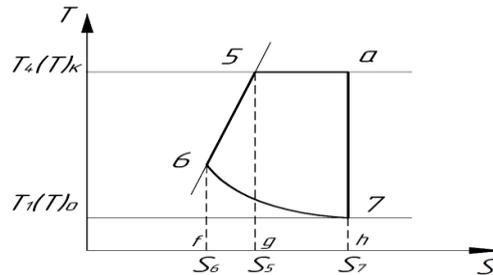


Рис. 5. Фигура 5–6–7–а.

Эта фигура состоит из алгебраической суммы площадей:

$$F_{5-6-7-a} = F_{5-6-f-g} + F_{5-g-h-a} - F_{6-f-h-7}.$$

$$F_{5-g-h-a} = (S_7 - S_5) \cdot (T_4 - T_g) = (S_7 - S_5) \cdot T_4,$$

где $T_g = T_f = T_h = 0$.

$$F_{5-6-f-g} = \int_{S_6}^{S_5} T_{cp}^{5-6} dS = T_{cp}^{5-6} \cdot (S_5 - S_6) = T_{cp}^{5-6} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_4}{T_6},$$

$$\text{где } T_{cp}^{5-6} = \frac{T_4 - T_g + T_6 - T_f}{2} = \frac{T_4 + T_6}{2}.$$

$$F_{6-f-h-7} = \int_{S_6}^{S_7} T_{cp}^{6-7} dS = T_{cp}^{6-7} \cdot (S_7 - S_6),$$

$$\text{где } T_{cp}^{6-7} = \frac{T_6 - T_f + T_7 - T_h}{2} = \frac{T_6 + T_1}{2}.$$

Тогда $F_{5-6-7-a} = T_{cp}^{5-6} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_4}{T_6} + (S_7 - S_5) \cdot T_4 - T_{cp}^{6-7} \cdot (S_7 - S_6)$,

или $F_{5-6-7-a} = \left(\frac{T_4 - T_6}{2} \right) \cdot (S_5 - S_6) + (S_7 - S_5) \cdot T_4 - \left(\frac{T_6 + T_1}{2} \right) \cdot (S_7 - S_6)$.

Рассмотрим фигуру a–4–d–7 (рис. 6).

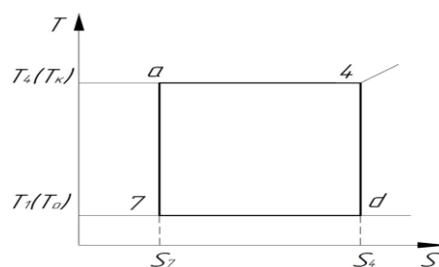


Рис.6. Фигура a-4-d-7.

Здесь будем иметь:

$$F_{a-4-d-7} = (S_4 - S_7) \cdot (T_4 - T_1).$$

Таким образом, работа холодильного агрегата до введения дополнительного переохлаждения рабочего тела и охлаждения компрессора будет равна:

$$A_{lp} = T_{cp}^{1-2} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + T_{cp}^{1-4} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_b}{T_4} + T_{cp}^{5-6} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_4}{T_6} + (S_7 - S_5) \cdot T_4 - \quad (3)$$

$$- T_{cp}^{6-7} \cdot (S_7 - S_6) + (S_4 - S_7) \cdot (T_4 - T_1).$$

или

$$A_{lp} = \left(\frac{T_3 - T_2 + T_b - T_1}{2} \right) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + \left(\frac{T_b + T_4}{2} - T \right) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_b}{T_4},$$

$$A_{lp} = c'_x \cdot (T_4 - T_1) \cdot \left[\left(L_1 \cdot (M_2 + \frac{\Delta p^k - 1}{T_4 - T_1} \cdot (T_2 - T_1 \cdot M_2)) \right) - \frac{\Pi_1}{M_1} \right], \quad (4)$$

где $\Delta p^k = \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}$; $M_2 = \frac{2T_1}{T_b + T_4}$; $L_1 = \frac{c_p}{c'_x}$; $\Pi_1 = \frac{T_6 - T_1}{T_4 - T_1}$; $M_1 = \frac{2T_1}{T_6 + T_1}$.

Работа переохлаждения рабочего тела.

Работа переохлаждения $l_{к.т}$ рабочего тела определяется площадью фигуры 6-6'-7'-7 цикла (рис. 1). Рассмотрим фигуру 6-6'-7'-7 (рис. 7).

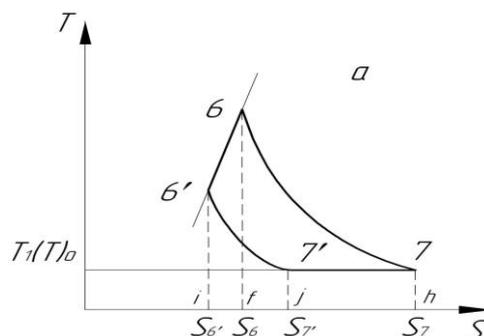


Рис. 7 – Фигура 6-6'-7'-7.

Эта фигура состоит из алгебраической суммы следующих площадей:

$$F_{6-6'-7'-7} = l_{к.м} = F_{6'-i-f-6} + F_{6-f-h-7} - F_{6'-i-j-7'} - F_{7'-j-h-7}. \quad (5)$$

Здесь отдельные составляющие площади равны:

$$F_{7'-j-h-7} = (s_7 - s_{7'}) \cdot (T_1 - T_h) = (s_7 - s_{7'}) \cdot T_1, \text{ т.к. } T_i = T_f = T_j = T_h = 0.$$

$$F_{6'-i-f-6} = \int_{s_{6'}}^{s_6} T_{cp}^{6-6'} \cdot ds = T_{cp}^{6-6'} \cdot (s_6 - s_{6'}) = T_{cp}^{6-6'} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_6}{T_{6'}},$$

$$\text{где } T_{cp}^{6-6'} = \frac{T_{6-f} + T_{6'-i}}{2} = \frac{T_6 - T_f + T_{6'} - T_i}{2} = \frac{T_6 + T_{6'}}{2}.$$

$$F_{6-f-h-7} = \int_{s_6}^{s_7} T_{cp}^{6-7} \cdot ds = T_{cp}^{6-7} \cdot (s_7 - s_6),$$

$$\text{где } T_{cp}^{6-7} = \frac{T_{6-f} + T_{1-h}}{2} = \frac{T_6 - T_f + T_1 - T_h}{2} = \frac{T_6 + T_1}{2}.$$

$$F_{6'-i-j-7'} = \int_{s_{6'}}^{s_{7'}} T_{cp}^{6'-7'} \cdot ds = T_{cp}^{6'-7'} \cdot (s_{7'} - s_{6'}),$$

$$\text{где } T_{cp}^{6'-7'} = \frac{T_{6'-i} + T_{1-j}}{2} = \frac{T_{6'} - T_i + T_1 - T_j}{2} = \frac{T_{6'} + T_1}{2}.$$

Тогда получим:

$$l_{к.м} = T_{cp}^{6-6'} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_6}{T_{6'}} + T_{cp}^{6-7} \cdot (s_7 - s_6) - T_{cp}^{6'-7'} \cdot (s_{7'} - s_{6'}) - T_1(s_7 - s_{7'}). \quad (6)$$

Работа охлаждения компрессора.

Работа охлаждения компрессора $l_{o.к}$ определяется площадью фигуры 1'–2–3–c–3' цикла (рис. 1). Рассмотрим фигуру 1'–2–3–c–3' (рис. 8).

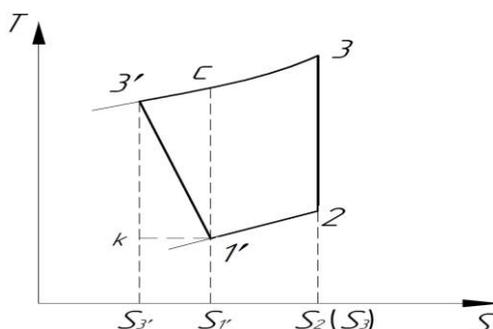


Рис. 8. Фигура 1'–2–3–c–3'.

Эта фигура состоит из алгебраической суммы следующих площадей:

$$F_{1'-2-3-c-3'} = l_{o.k} = F_{1'-2-3-c} + F_{1'-c-3'-k} - F_{1'-3'-c}.$$

По аналогии с вышеизложенной методикой получим следующие формулы для каждой из площадей:

$$F_{1'-2-3-c} = \int_{S_{1'}}^{S_2} T_{cp}^{1'-2} \cdot dS = T_{cp}^{1'-2} \cdot (S_2 - S_{1'}) = T_{cp}^{1'-2} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_{1'}},$$

$$\text{где } T_{cp}^{1'-2} = \frac{T_{3-2} + T_{c-1'}}{2} = \frac{T_3 - T_2 + T_c - T_{1'}}{2}.$$

$$F_{1'-c-3'-k} = \int_{S_{3'}}^{S_{1'}} T_{cp}^{3'-1'} \cdot dS = T_{cp}^{3'-1'} \cdot (S_{1'} - S_{3'}) = T_{cp}^{3'-1'} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_c}{T_{3'}},$$

$$\text{где } T_{cp}^{3'-1'} = \frac{T_{c-1'} + T_{3'-k}}{2} = \frac{T_c - T_{1'} + T_{3'} - T_k}{2},$$

$$\text{т.к. } T_k = T_{1'}, \text{ то } T_{cp}^{3'-1'} = \frac{T_c + T_{3'}}{2} - T_{1'}.$$

$$F_{1'-3'-k} = \frac{1}{2} (S_{1'} - S_{3'}) \cdot (T_{3'} - T_{1'}) = \frac{c_p \cdot (T_{3'} - T_{1'})}{2} \cdot \ln \frac{T_c}{T_{3'}}.$$

Тогда получим:

$$\begin{aligned} l_{o.k} &= T_{cp}^{1'-2} \cdot (S_2 - S_{1'}) + T_{cp}^{3'-1'} \cdot (S_{1'} - S_{3'}) - \frac{1}{2} (T_{3'} - T_{1'}) \cdot (S_{1'} - S_{3'}) = \\ &= \frac{1}{2} [(T_3 - T_2) \cdot (S_2 - S_{1'}) + (T_c - T_{1'}) \cdot (S_2 - S_{3'})]. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Откуда } l_{o.k} = \frac{1}{2} \left[(T_3 - T_2) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_{1'}} + (T_c - T_{1'}) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_{3'}} \right],$$

или

$$l_{o.k} = \frac{c_p}{2} \left[(T_3 - T_2) \cdot \ln \frac{T_2}{T_{1'}} + (T_c - T_{1'}) \cdot \ln \frac{T_3}{T_{3'}} \right].$$

(8)

Работа холодильного агрегата после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела и охлаждения компрессора:

$$A_l = l_p + l_{k.m} - l_{o.k}. \quad (9)$$

Подставив полученные выше уравнения, получим:

$$\begin{aligned}
 A_l = & T_{cp}^{1-2} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + T_{cp}^{1-4} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_b}{T_4} + T_{cp}^{5-6} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_4}{T_6} + (s_7 - s_5) \cdot T_4 - \\
 & - T_{cp}^{6-7} \cdot (s_7 - s_6) + (s_4 - s_7) \cdot (T_4 - T_1) + \\
 & + T_{cp}^{6-6'} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_6}{T_{6'}} + T_{cp}^{6-7} \cdot (s_7 - s_6) - T_{cp}^{6'-7'} \cdot (s_{7'} - s_{6'}) - T_1(s_7 - s_{7'}) - \\
 & - \frac{1}{2} \left[(T_3 - T_2) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + (T_c - T_{1'}) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_{3'}} \right].
 \end{aligned}$$

Или после преобразования:

$$\begin{aligned}
 A_l = & \frac{T_3 - T_2 + T_b - T_1}{2} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + \left(\frac{T_b + T_4}{2} - T_1 \right) \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_b}{T_4} + \frac{T_4 + T_6}{2} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_4}{T_6} + \\
 & + (s_7 - s_5) \cdot T_4 - \frac{T_6 + T_1}{2} \cdot (s_7 - s_6) + (s_4 - s_7) \cdot (T_4 - T_1) + \frac{T_6 + T_{6'}}{2} \cdot c'_x \cdot \ln \frac{T_6}{T_{6'}} + \\
 & + \frac{T_6 + T_1}{2} \cdot (s_7 - s_6) - \frac{T_{6'} + T_1}{2} \cdot (s_{7'} - s_{6'}) - T_1(s_7 - s_{7'}) - \frac{(T_3 - T_2)}{2} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - \\
 & - \frac{(T_c - T_{1'})}{2} \cdot c_p \cdot \ln \frac{T_3}{T_{3'}} = \\
 = & c_p \left(\frac{T_3 - T_2 + T_b - T_1}{2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - \frac{(T_c - T_{1'})}{2} \cdot \ln \frac{T_3}{T_{3'}} \right) + c_p \left(\left(\frac{T_b + T_4}{2} - T_1 \right) \cdot \ln \frac{T_b}{T_4} - \frac{(T_3 - T_2)}{2} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \right) + \\
 & + c'_x \left(\frac{T_4 + T_6}{2} \cdot \ln \frac{T_4}{T_6} + \frac{T_6 + T_{6'}}{2} \cdot \ln \frac{T_6}{T_{6'}} \right) - \frac{T_{6'} + T_1}{2} \cdot (s_{7'} - s_{6'}) + T_4(s_4 - s_5) - T_1(s_4 - s_{7'}).
 \end{aligned}$$

Таким образом, работа цикла холодильного агрегата после введения дополнительного переохлаждения рабочего тела и охлаждения компрессора равна:

$$\begin{aligned}
 A_l = & c'_x \cdot J_1 \cdot (T_4 - T_1) \cdot \left(1 + \frac{(1 - \Delta p^k)}{T_4 - T_1} [T_1 \cdot (3 - M_2) + T_{1'} \cdot (1 + M_3 - M_4)] \right) + \\
 & + i_6 - i_{6'} - \frac{c'_x (T_{6'} - T_1) \cdot (T_{6'} + T_1)}{2T_1} + i_4 - i_5 - i_4 \frac{T_1}{T_4} + i_6.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Таким образом, в данной научной работе на основе анализа термодинамического цикла были получены уравнения, определяющие энергетическую эффективность холодильного агрегата кондиционера с учетом температурных параметров режима его работы и использования процессов охлаждения герметичного компрессора и дополнительного переохлаждения хладагента. Для обеспечения более точного расчета работы холодильного агрегата кондиционера на диаграмме $T-s$

термодинамический цикл был разбит на более детальные отдельные зоны с учетом особенностей протекания процессов в каждой из них. Данные уравнения позволяют проводить энергетическую оценку использования перспективных систем охлаждения компрессора и дополнительного переохлаждения рабочего тела с целью выбора их рациональных конструктивных и режимных параметров, обеспечивающих более высокие показатели энергоэффективности кондиционеров.

Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании или модернизации холодильных систем кондиционеров с целью повышения их энергетической эффективности, в том числе на предприятиях АПК для обеспечения роста рентабельности производимой продукции.

Библиографический список

1. Пронин В. А., Кованов А. В., Цветков В. А. Современное состояние и перспективы развития холодильного компрессоростроения. Часть 1. Рынок и производство. // Вестник Международной академии холода. 2023. № 1. С. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22.

2. By Bryan Orr. Impacts of Compression on Temperature // January 22, 2021 (Брайан Опп. Влияние давления сжатия на температуру / 22.01.2021) // <https://hvacschool.com/impacts-of-compression-on-temperature/>.

3. Эффективность трансформации тепла и процессов системы охлаждения компрессора при дополнительном переохлаждении рабочего тела // А.В. Сухарников, Н.Н. Тропина, В.В. Левкин, А.Б. Сурмилова. / Известия вузов. Северо-Кавказский регион: Технические науки. 2008 - № 2. С.46-48.

4. Левкин В.В. Повышение теплоэнергетических характеристик бытовых холодильных приборов // дисс. д.т.н. 05.02.13 – «Машины, агрегаты и процессы (коммунальное хозяйство и бытовое обслуживание). – Москва, 2004.

5. Сумзина Л. В. Теоретические основы расчета рабочих процессов компрессионного бытового холодильника. [Электронный ресурс]: монография / Л. В. Сумзина, А. В. Максимов, Ю. В. Кудров. – СПб: Научное издание, 2023. – 73 с. – URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/Teoreticheskie-osnovi-rascheta.pdf>.

6. Гамзаян А.Ю. Повышение теплоэнергетических характеристик бытовых холодильных приборов посредством охлаждения компрессора и дополнительного переохлаждения рабочего тела // Автореферат. к.т.н. Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (коммунальное хозяйство и бытовое обслуживание). – Шахты, 2006.

7. Ибраев, А.М. Теоретические основы холодильной техники: монография / А.М. Ибраев, А.А. Сагдеев. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2012. – 124 с.

8. Холодильные машины / [Бараненко А. В. и др.]; под общ. ред. Л. С. Тимофеевского. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург: Политехника, 2006. – 941 с. – ISBN 5-7325-0792-2.

9. Теплофизические основы получения искусственного холода Справочник / [Сост. Н. А. Бучко, Г. Н. Данилова, А. А. Гоголин и др.; Редкол.: А. А. Гоголин и др.]. — Москва: Пищ. пром-сть, 1980. — 231 с.: ил.: 22 см. — (Холодил. техника); ISBN В пер. (В пер.).

10. Холодильные машины: Учебн. для вузов по специальности «Холодильные машины и установки» / Н. Н. Кошкин, И. А. Сақун, Е. М. Бамбушек и др.; Под общ. ред. И. А. Сақуна. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 510 с.

11. Изучающим основы холодильной техники / [А. Е. Береснев, В. С. Буряк, Ю. М. Воробьев и др.]; Под общ. ред. Л. Д. Акимовой. – Москва: Журн. "Холодил. техника", 1996. - 141 с.: ил.; 21 см.; ISBN 5-900951-01-4.

12. Доссат, Рой Дж. Основы холодильной техники / Рой Дж. Доссат, Томас Дж. Хоран ; пер. с англ. С. В. Аникина под ред. Л. Г. Каплана]. – Москва: Техносфера, 2008. – 821 с. – ISBN 978-5-94836-158-1.

References

1. Pronin V. A., Kovanov A. V., Czvetkov V. A. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy` razvitiya xolodil`nogo kompressorostroeniya. Chast` 1. Ry`nok i proizvodstvo. // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii xoloda. 2023. № 1. S. 10–22. DOI: 10.17586/1606-4313-2023-22-1-10-22.

2. By Bryan Orr. Impacts of Compression on Temperature // January 22, 2021 (Brajn Orr. Vliyanie davleniya szhatiya na temperaturu / 22.01.2021) // <https://hvacschool.com/impacts-of-compression-on-temperature/>.

3. E`ffektivnost` transformacii tepla i processov sistemy` oxlazhdeniya kompressora pri dopolnitel`nom pereoxlazhdenii rabocheho tela // A.V. Suxarnikov, N.N. Tropina, V.V. Levkin, A.B. Surmilova. / Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region: Texnicheskie nauki. 2008 - № 2. S.46-48.

4. Levkin V.V. Povy`shenie teploe`nergeticheskix xarakteristik by`tovy`x xolodil`ny`x priborov // diss. d.t.n. 05.02.13 – «Mashiny`, agregaty` i processy` (kommunal`noe xozyajstvo i by`tovoe obsluzhivanie). – Moskva, 2004.

5. Sumzina L. V. Teoreticheskie osnovy` rascheta rabochix processov kompressionnogo by`tovogo xolodil`nika. [E`lektronny`j resurs]: monografiya / L. V. Sumzina, A. V. Maksimov, Yu. V. Kudrov. – SPb: Naukoemkie tehnologii, 2023. – 73 s. – URL: <https://publishing.intelgr.com/archive/Teoreticheskie-osnovi-rascheta.pdf>.

6. Gamzayan A.Yu. Povy`shenie teploe`nergeticheskix xarakteristik by`tovy`x xolodil`ny`x priborov posredstvom oxlazhdeniya kompressora i dopolnitel`nogo pereoxlazhdeniya rabocheho tela // Avtoreferat. k.t.n. Special`nost` 05.02.13 – Mashiny`, agregaty` i processy` (kommunal`noe xozyajstvo i by`tovoe obsluzhivanie). – Shaxty`, 2006.

7. Ibraev, A.M. Teoreticheskie osnovy` xolodil`noj texniki: monografiya / A.M. Ibraev, A.A. Sagdееv. – Nizhnekamsk: Nizhnekamskij ximiko-texnologicheskij institut (filial) FGBOU VPO «KНИТУ», 2012. – 124 с.

8. Xolodil`ny`e mashiny` / [Baranenko A. V. i dr.]; pod obshh. red. L. S. Timofeevskogo. – Izd. 2-е, pererab. i dop. – Sankt-Peterburg: Politexnika, 2006. – 941 с. – ISBN 5-7325-0792-2.

9. *Терлофизические основы` получениа искусственного холода Spravochnik / [Sost. N. A. Buchko, G. N. Danilova, A. A. Gogolin i dr.; Redkol.: A. A. Gogolin i dr.]. — Moskva: Pishh. prom-st`, 1980. — 231 s.: il.: 22 sm. — (Xolodil. texnika).; ISBN V per. (V per.).*

10. *Xolodil`ny`e mashiny`: Uchebn. dlya vtuzov po special`nosti «Xolodil`ny`e mashiny` i ustanovki» / N. N. Koshkin, I. A. Sakun, E. M. Bambushek i dr.; Pod obshh. red. I. A. Sakuna. — L.: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1985. — 510 s.*

11. *Izuchayushhim osnovy` xolodil`noj texniki / [A. E. Beresnev, V. S. Buryak, Yu. M. Vorob`ev i dr.]; Pod obshh. red. L. D. Akimovoj. — Moskva: Zhurn. Xolodil. texnika, 1996. — 141 s.: il.; 21 sm.; ISBN 5-900951-01-4.*

12. *Dossat, Roj Dzh. Osnovy` xolodil`noj texniki / Roj Dzh. Dossat, Tomas Dzh. Xoran ; per. s angl. S. V. Anikina pod red. L. G. Kaplana]. — Moskva: Texnosfera, 2008. — 821 s. — ISBN 978-5-94836-158-1.*