

Анализ холодильной установки с режимом «естественного охлаждения»

М.С. Талызин¹, К.В. Печерских², А.В. Сколов³

¹ Международная Академия Холода, г. Москва, Российская Федерация;

² Международная Академия Холода, г. Екатеринбург, Российская Федерация;

³ ООО «Лекма Холод», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Холодильные установки широко применяются на предприятиях молочной промышленности, в частности для получения «ледяной воды» с температурой 0,5...2°C, которая используется для первичного охлаждения молока после дойки. Данный процесс критически важен для предотвращения роста бактерий и поддержания качества молока. Скорость охлаждения влияет на микробиологическую стабильность и срок годности продукта. Снижение энергопотребления является актуальной задачей на всех этапах жизненного цикла холодильной установки. Важность данной задачи решается на государственном уровне (Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации») и собственниками холодильного оборудования. Одним из путей решения задачи энергосбережения является использование «естественного холода» если температура окружающей среды ниже требуемой температуры хладоносителя или температуры в охлаждаемом помещении. Для реализации данной технологии, как правило, используется контур с хладоносителем. Однако, существует возможность использовать только контур хладагента.

Цель – анализ схемы холодильной установки с функцией «свободного охлаждения» без дополнительного контура хладоносителя на этапе проектирования

Методы. В качестве основного метода исследования холодильной установки для получения «ледяной воды» с функцией «свободного охлаждения» без использования промежуточного хладоносителя применялся энтропийно-статистический метод термодинамического анализа, который позволяет определить потери по элементам холодильной системы. В качестве хладагента рассматривался R717 как один из наиболее перспективных хладагентов для будущего применения в промышленных холодильных установках.

Результаты. Применение «свободного охлаждения» позволяет снизить энергетические потери в цикле на 68,65%. Потенциально получаемая работа в процессе реализации схемы «свободного охлаждения» расходуется на компенсацию потерь вследствие неравновесного теплообмена в конденсаторе и испарителе

Заключение. Результаты анализа показали перспективу применения функции «свободного охлаждения» без использования промежуточного хладоносителя.

Ключевые слова: энтропийно-статистический метод анализа; эффективность; фрикулинг; хладагент; хладоноситель; степень термодинамической эффективности; потери.

Рукопись получена: 21.11.2024

Рукопись одобрена: 25.12.2024

Опубликована онлайн: 28.11.2025

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Талызин М.С., Печерских К.В., Сколов А.В. Анализ холодильной установки с режимом «естественного охлаждения» // Холодильная техника. 2024. Т. 113, № 4. С. XX-XX. doi: <https://doi.org/10.17816/RF696789> EDN: OIOCPF

Analysis of the refrigeration unit with freecooling

Maxim S. Talyzin¹, Konstantin V. Pecherskih², Andrey V. Skolov³

¹ International Academy of Refrigeration, Moscow, Russian Federation;

² International Academy of Refrigeration, Ekaterinburg, Russian Federation;

³ Lekma Holod», Rostov-on-Don, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Refrigeration units are widely used in the dairy industry, in particular to obtain "ice water" with a temperature of 0.5... 2 °C, which is used for primary cooling of milk after milking. This process is critically important to prevent bacterial growth and maintain milk quality. The cooling rate affects the microbiological stability and shelf life of the product. Reducing energy consumption is an urgent task at all stages of the refrigeration plant life cycle. The importance of this task is solved at the state level (Federal Law No. 261-FZ "On Energy Saving and on Increasing Energy Efficiency and on Amending Certain Legislative Acts of the Russian Federation") and by the owners of refrigeration equipment. One way to solve the problem of energy saving is to use "natural cold" if the ambient temperature is lower than the required coolant temperature or the temperature in the cooled room. To implement this technology, as a rule, a coolant circuit is used. However, it is possible to use only the coolant circuit.

AIMS: analyze the refrigeration unit with the "free cooling" function without an additional coolant circuit

MATERIALS AND METHODS: A study of losses in a refrigeration unit was carried out to obtain "ice water" with the function of "free cooling" without using an intermediate coolant by the entropy-statistical method of thermodynamic analysis [1]. As a refrigerant, R717 was considered as one of the most promising refrigerants for future use in industrial refrigeration plants [2].

RESULTS: The use of "free cooling" reduces energy losses in the cycle by 68.65%.

Potentially obtained work during the implementation of the "free cooling" scheme is spent on compensation for losses due to non-equilibrium heat exchange in the condenser and evaporator.

CONCLUSIONS: The results of the analysis showed the prospect of using the "free cooling" function without using an intermediate coolant.

Keywords: entropy-statistical method of analysis; efficiency; freecooling; refrigerant; coolant; losses.

Received: 21.11.2024

Accepted: 25.12.2024

Published online: 28.11.2025

TO CITE THIS ARTICLE:

Talyzin MS, Pecherskih KV, Skolov AV. Analysis of the refrigeration unit with freecooling. *Refrigeration Technology*. 2024;113(4): XX–XX. doi: <https://doi.org/10.17816/RF696789> EDN: OIOCPF

ОБОСНОВАНИЕ

Применение искусственного охлаждения в молочной промышленности является критически важным аспектом, обеспечивающим не только сохранность продукции, но и оптимизацию производственных процессов. В последние годы особое внимание уделяется энергосберегающим технологиям и использованию природных хладагентов, что обусловлено как экономическими, так и экологическими факторами.

Снижение энергопотребления является актуальной задачей при эксплуатации холодильной установки. Важность данной задачи решается на государственном уровне (Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации») и собственниками холодильного оборудования. Одним из решений задачи, наряду с алгоритмом «плавающего давления конденсации» [1], снижением величины температурного напора в конденсаторах воздушного охлаждения [2], применением аккумуляторов холода [3, 4], с целью повышения эффективности является использование так называемой функции «свободного охлаждения» («фрикулинг») при температуре окружающей среды ниже требуемой.

«Фрикулинг» – это система, которая позволяет использовать низкие уличные температуры для охлаждения производственных помещений и технологических установок, снижая таким образом потребности в электрической энергии для работы традиционных холодильных установок. В молочной промышленности «фрикулинг» применим для охлаждения воды, используемой в технологических процессах, и сервера, обеспечивающего функционирование систем управления.

Система включает теплообменники, которые способны использовать уличный воздух для непосредственного охлаждения или предварительного охлаждения хладоносителя. В холодное время года, когда температура наружного воздуха достаточно низкая, «фрикулинг» практически полностью заменяет работу компрессорных установок, снижая нагрузку на эти системы.

Одним из технологических процессов, применяемых на предприятиях молочной промышленности, где целесообразно применение «фрикулинга», является процесс первичного охлаждения молока. После дойки молоко необходимо быстро охладить до температуры около +4°C. Этот шаг критически важен для предотвращения роста бактерий и поддержания качества молока. Скорость охлаждения влияет на микробиологическую стабильность и срок годности продукта.

Поскольку требуемая температура продукта составляет +4°C, становится возможным использовать низкие температуры окружающего воздуха для получения следующих преимуществ:

- снижение энергопотребления;
- увеличение долговечности оборудования;
- снижение эксплуатационных затрат.

Традиционно данное решение, как было указано выше, подразумевало использование дополнительного контура промежуточного хладоносителя (вода) с использованием аккумуляторов холода. В данной публикации рассматривается холодильная установка для получения «ледяной воды» (вода, температура которой близка к 0°C) с использованием хладагента в режиме «свободного охлаждения» (рис. 1).

Указанная холодильная установка работает следующим образом: одноступенчатый парокомпрессионный цикл работает, если температура окружающей среды превышает требуемую температуру охлаждаемой среды (в случае холодильной установки для получения «ледяной воды» эта величина составляет 0,5...2°C) – пары хладагента сжимаются компрессором (КМ), конденсация происходит в конденсаторе воздушного охлаждения (КД), далее следует процесс дросселирования в регулирующем вентиле (РВ), после чего хладагент поступает в отделитель жидкости (ОЖ), где происходит разделение на жидкую и паровую фазы – жидкий хладагент под действием силы тяжести поступает в испаритель (И), где охлаждает хладоноситель (вода) до требуемой температуры, а образовавшиеся при дросселировании пары поступают в компрессор. Пары хладагента, образовавшиеся при кипении в испарителе, поступают обратно в отделитель жидкости ОЖ и, совместно с парами, образовавшимися после дросселирования, поступают в компрессор КМ. Запорные клапаны К31 и К33 открыты, К32 и К34 закрыты.

Для возможности работы режима «свободного охлаждения» необходимо, чтобы температура окружающей среды была ниже требуемой температуры хладоносителя на определенную величину, которая определяется технико-экономическим расчетом [5]. В данном случае компрессор КМ отключается, пары хладагента конденсируются в конденсаторе КД и под действием силы тяжести поступают в отделитель жидкости ОЖ, жидкий хладагент под действием силы тяжести поступает в испаритель И, где охлаждает хладоноситель (вода) до требуемой температуры за счет кипения хладагента, образовавшиеся при этом пары поступают обратно в отделитель жидкости и далее в конденсатор. Запорные клапаны К31 и К33 закрыты, К32 и К34 открыты, РВ закрыт.

Таким образом, установка работает в трех режимах – режим одноступенчатого парокомпрессионного цикла, режим «свободного охлаждения» и смешанный режим, из которых мы будем рассматривать два. При работе таких установок экономический эффект целесообразно оценивать за один календарный год работы [6]. Система автоматического управления на рис. 1 не показана.

ЦЕЛЬ

Целью исследования является анализ схемы холодильной установки с функцией «свободного охлаждения» без дополнительного контура хладоносителя на этапе проектирования.

МЕТОДЫ

В качестве основного метода исследования холодильной установки для получения «ледяной воды» с функцией «свободного охлаждения» без использования промежуточного хладоносителя применялся энтропийно-статистический метод термодинамического анализа [7], как наиболее подходящий для машин, задачей которых является получение низких температур [8–11].

В качестве хладагента рассматривается аммиак, что в современных условиях [12], несмотря на токсичность и горючесть, является одним из лучших решений [13–16].

В табл. 1 показаны исходные данные для анализа холодильной установки для получения «ледяной воды». Принципиальная пневмогидравлическая схема и цикл работы в диаграмме давление – энтальпия приведены на рис. 1.

Методика, применяемая для анализа, описана в [7] и [17]. Дополнительно используются следующие зависимости:

- массовый расход хладагента через испаритель

$$G_1 = \frac{Q_0}{q_0}, (1)$$

- массовый расход хладагента в компрессоре

$$G_2 = \frac{Q_0}{h_1 - h_5}, (2)$$

- действительная удельная работа сжатия

$$l_{сж} = \frac{l_{ад}}{\eta_{ад}} \times \frac{G_2}{G_1}, (3)$$

- удельные затраты работы сжатия для компенсации производства энтропии в отделителе жидкости:

$$\Delta l_{ОЖ} = T_{oc} \times \left[\frac{G_2}{G_1} \times s_5 - (s_6) - \left(\frac{G_2 - G_1}{G_1} \right) \times s_1 \right], (4)$$

- величина расчетной адиабатной работы сжатия определяется суммой удельных затрат работ для компенсации производства энтропии во всех элементах холодильной установки:

$$l_{ад.р} = l_{min} + \Delta l_{кд} + \Delta l_{др} + \Delta l_{и} + \Delta l_{ОЖ}, (5)$$

- потери в компрессоре определяются как разница между действительной удельной работой сжатия и расчетной величиной адиабатной работы сжатия, определяемой по (17):

$$\Delta l_{км} = l_{сж} - l_{ад.р}, (6)$$

- расчетная величина удельной работы сжатия:

$$l_{сж.р} = l_{ад.р} + \Delta l_{км}, (7)$$

- потери мощности в каждом элементе холодильной установки определяются по следующей зависимости:

$$\Delta N_i = l_i \times G_i, (8)$$

Результаты анализа показаны на рис. 2 и в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 2 приведены результаты анализа, на рис. 2 приведены значения распределения потерь мощности по элементам системы при работе в режиме парокомпрессионного цикла и «свободного охлаждения».

При анализе результатов, приведенных в табл. 2, можно заметить, что в режиме «свободного охлаждения» величина необходимой минимальной удельной работы для генерации холода принимает отрицательные значения. В данном случае, отрицательное значение говорит о потенциальной возможности получения дополнительной работы.

Однако, при расчете потерь в испарителе и конденсаторе становится очевидным, что потенциально возможная работа расходуется на компенсацию потерь в данных элементах.

При реализации данной схемы предполагается использовать конденсаторы воздушного охлаждения (рис. 3), в то время как традиционным решением для систем с аммиаком в качестве хладагента является использование испарительных конденсаторов (рис. 4). Данная необходимость обусловлена большей площадью теплообменной поверхности конденсаторов воздушного охлаждения, что позволяет реализовать описанную выше систему «свободного охлаждения» при отрицательных температурах окружающего воздуха.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного исследования говорят о том, что:

1. применение «свободного охлаждения» позволяет снизить энергетические потери в цикле на 68,65%;
2. потенциально получаемая работа в процессе реализации схемы «свободного охлаждения» расходуется на компенсацию потерь вследствие неравновесного теплообмена в конденсаторе и испарителе;
3. при реализации описанной выше системы потребуются дополнительные капитальные затраты на установку конденсаторов воздушного охлаждения.

Опыт реализации подобных схем показывает, что при холодопроизводительности установки 2 МВт срок окупаемости дополнительных капитальных затрат благодаря экономии электроэнергии не превысит 2 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

«Свободное охлаждение» представляет собой перспективное направление, способствующее оптимизации производственных процессов, однако его реализация возможна не во всех климатических зонах без дополнительных затрат.

Применение режима «свободного охлаждения» позволяет снизить потери в элементах холодильного контура, однако может потребовать установки дополнительного оборудования [18]. Также стоит отметить тот факт, что эффективность применения данного решения зависит от температуры окружающей среды.

Целесообразность выбора расчетных параметров определяется технико-экономическим анализом конкретной холодильной установки.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли значимый вклад в проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию статьи до публикации.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источник финансирования. Отсутствуют.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовал один член редакционной коллегии.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contribution. All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: No funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or non-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: When creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing is not applicable to this work, and no new data has been collected or created.

Generative AI: Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review: This work was submitted to the journal on its own initiative and reviewed according to the usual procedure. A member of the editorial board participated in the review.

REFERENCES

1. Talyzin MS, Solodkii AS. On the "floating" condensation pressure. *Refrigeration Technology*. 2013;(11):27–29. EDN: SMKGJJ
2. Shishov VV, Talyzin MS. Temperature difference in air-cooled condensers. *Refrigeration Technology*. 2014;(9):35–37. EDN: STGQZP
3. Kornienko VN, Suchkov AN. Cold accumulators in the dairy industry. *Molochnaia Promyshlennost*. 2022;(8):9–13. doi: 10.31515/1019-8946-2022-08-9-13. EDN: SLTDGC
4. Babakin BS, Suchkov AN, Babakin BS. Natural cold accumulators for dairy farms. *Molochnaia Promyshlennost*. 2022;(7):18–19. doi: 10.31515/1019-8946-2022-07-18-19. EDN: QKBDIN
5. Maslakov VN. Method for calculating the payback period of natural cooling (free cooling). *Refrigeration Technology*. 2018;(2):44–48. EDN: YVVLIL
6. Shishov VV, Talyzin MS. Efficiency of refrigeration equipment taking into account the annual change in ambient temperatures. *Refrigeration Technology*. 2019;(2):28–31. EDN: KNLBDP
7. Arkharov AM. Fundamentals of Cryology. *Entropy-Statistical Analysis of Low-Temperature Systems*. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman; 2014. EDN: ZCKYTT
8. Arkharov AM. Why the exergetic version of thermodynamic analysis is not rational for studying basic low-temperature systems. *Refrigeration Technology*. 2011;(10):8–12. EDN: PHGQUF
9. Arkharov AM, Sychev VV. Fundamentals of entropy-statistical analysis of real energy losses in low-temperature and high-temperature machines and plants. *Refrigeration Technology*. 2005;(12):14–23.
10. Arkharov AM. On a unified thermodynamic space, heat, cold, exergy and entropy as basic concepts of engineering cryology. *Refrigeration Technology*. 2009;(6):34–39. EDN: LAGWJL
11. Arkharov AM, Sychev VV. Once again on entropy and the problem of determining the real (actual) values of energy losses due to irreversibility. *Refrigeration Technology*. 2007;(4):8–13. EDN: IASYVD
12. Talyzin MS. Alternative refrigerants - problems and prospects. *Molochnaia Promyshlennost*.

- 2021;(12):36–37. EDN: JIDRFA
13. Tsvetkov OB, Baranenko AV, Laptev IuA, et al. Ozone-safe refrigerants. *Nauchnyi Zhurnal NIU ITMO. Seriya: Refrigeration Technology i Konditsionirovanie*. 2014;(3):98–111. EDN: TBVUYT
 14. Babakin BS, Babakin SB, Belozerov AG, Kuz'mina IA. Natural mixed refrigerants. *Molochnaia Promyshlennost*. 2017;(12). EDN: ZUVPQH
 15. Flammable refrigerants. 36th Informational Note on Refrigeration Technologies (February 2018). *Refrigeration Technology*. 2018;(5):4–8. EDN: YAEUXJ
 16. Babakin BS, Belozerov AG, Babakin SB, Suchkov AN. Modern environmentally safe refrigerants for agro-industrial complex enterprises. *Miasnye Tekhnologii*. 2019;5(197):44–47. doi: 10.33465/2308-2941-2019-5-44-46. EDN: VZPFLU
 17. Talyzin MS, Skolov AV. Selection of a refrigerant for use in liquid chilling refrigeration machines (chillers). *Refrigeration Technology*. 2024;(1):13–20. doi: 10.17816/RF632560. EDN: LZVWBV
 18. Veliukhanov VI. Energy saving in cold supply through the use of natural cold. *Imperiia Kholoda*. 2021;3(108):28–30.

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Исходные данные

Хладагент	R717
Хладоноситель	вода
Температура хладоносителя на входе, °С (К)	+15 (288)
Температура хладоносителя на выходе, °С (К)	+0,5 (273,5)
Объемный расход хладоносителя, м³/ч	10
Температура кипения, °С (К)	-3 (270)
Температура конденсации, °С (К)	+40 (313)
Температура окружающей среды, °С (К)	+32 (305)
Перегрев на всасывании, К	0
Переохлаждение, К	0
Температура перехода на режим «свободного охлаждения», °С (К)	-13 (260)
Адиабатный КПД, %	70

Таблица 2. Результаты анализа

	Режим одноступенчатого парокompрессионного цикла	Режим «свободного охлаждения»
Минимально необходимая мощность для генерации холода, кВт	13,88	-12,41
Энергетические потери в конденсаторе, кВт	7,96	6,24
Энергетические потери в испарителе, кВт	6,44	6,17
Энергетические потери в компрессоре, кВт	15,14	-
Энергетические потери в регулирующем вентиле, кВт	3,23	-
Энергетические потери в отделителе жидкости, кВт	0,01	0,00
Степень термодинамического совершенства, %	32,7	-
Холодильный коэффициент при адиабатном сжатии	4,45	-
Действительный холодильный коэффициент	3,11	-

Таблица 3. Условные обозначения

s	удельная энтропия, кДж/(кг×К)	h	удельная энтальпия, кДж/кг
T _{oc}	температура окружающей среды, К	η _{ад}	адиабатный КПД компрессора, %
q _o	удельная массовая холодопроизводительность, кДж/кг	Q _o	массовая холодопроизводительность, кВт
l _{ад}	адиабатная работа сжатия, кДж/кг	l _{min}	минимальная удельная работа, необходимая для генерации холода, кДж/кг
Δl _{км}	энергетические потери в компрессоре, кДж/кг	l _{сж}	действительная работа сжатия, кДж/кг
Δl _{кд}	энергетические потери в конденсаторе, кДж/кг	Δl _и	энергетические потери в испарителе, кДж/кг
Δl _{ож}	энергетические потери в отделителе жидкости, кДж/кг	Δl _{др}	энергетические потери в дросселирующем устройстве, кДж/кг
КМ	компрессор	КД	конденсатор
И	испаритель	РВ	регулирующий клапан
ОЖ	отделитель жидкого хладагента	КЗ	запорный клапан

РИСУНКИ

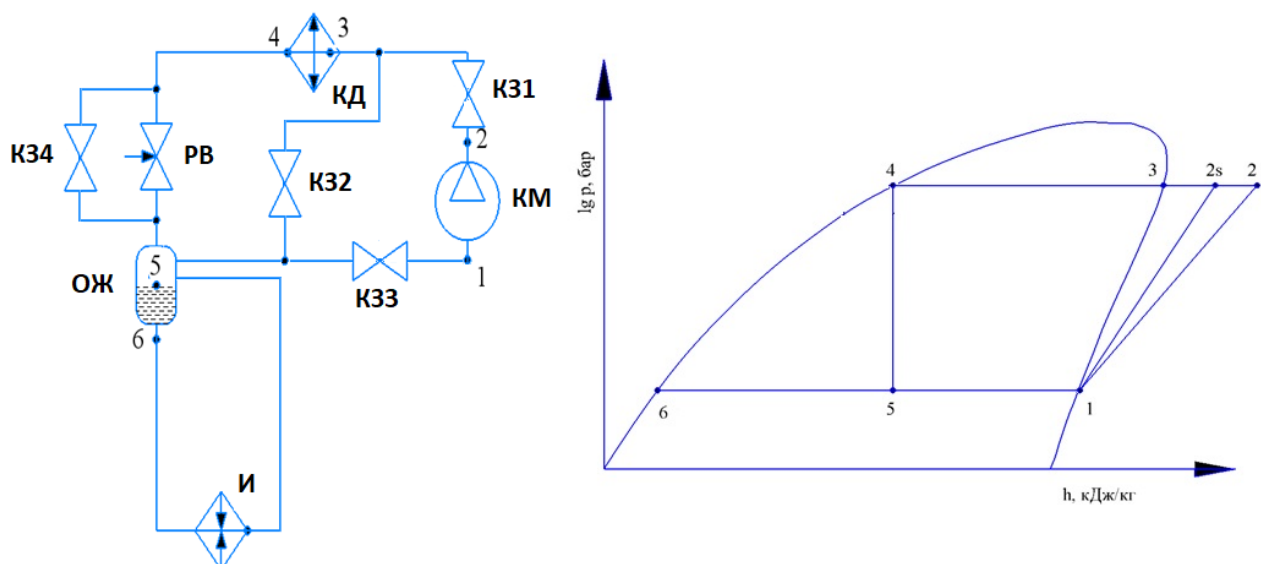


Рис. 1. Принципиальная схема цикла.

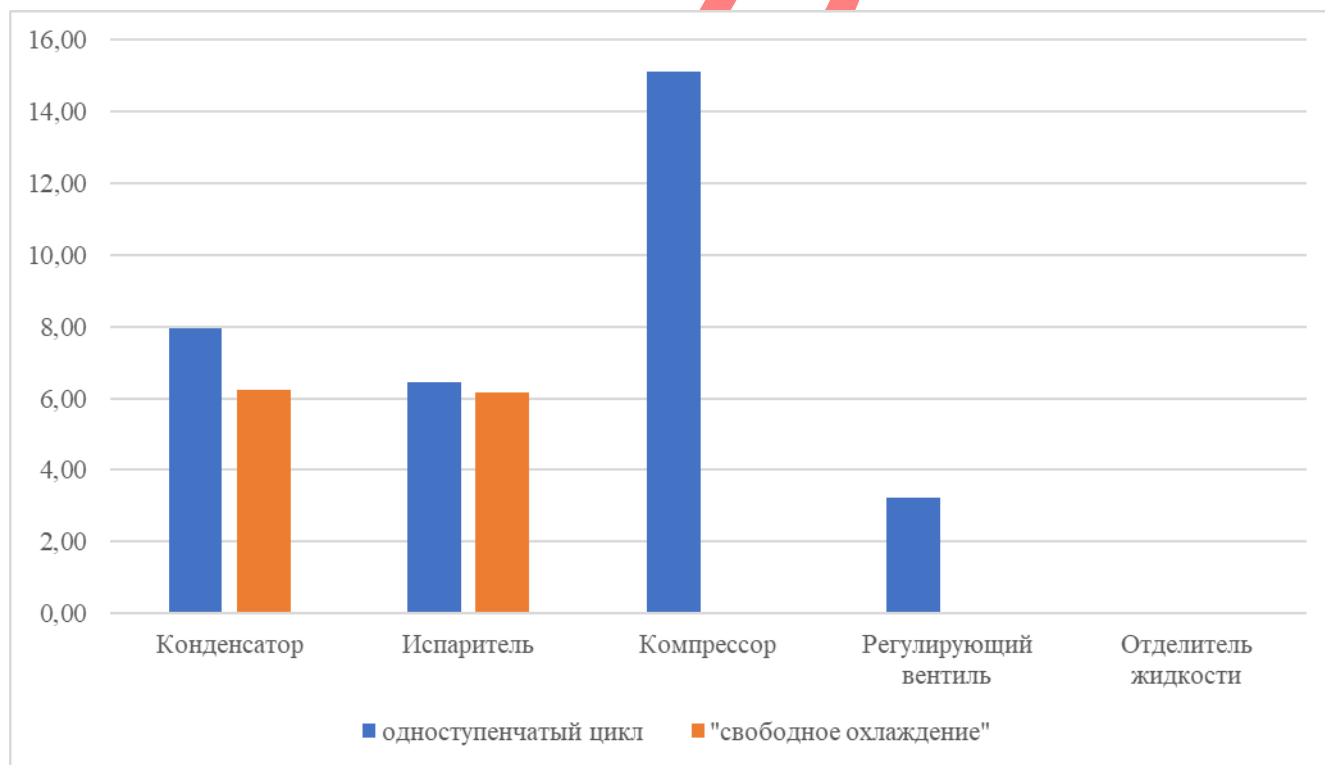


Рис. 2. Распределение потерь мощности по элементам, кВт.



Рис. 3. Внешний вид конденсатора воздушного охлаждения.



Рис. 4. Внешний вид испарительного конденсатора.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Автор, ответственный за переписку:	
*Талызин Максим Сергеевич, канд. техн. наук; адрес: Международная Академия Холода: 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7244-1946; eLibrary SPIN: <u>6524-3085</u>; e-mail: talyzin_maxim@mail.ru	*Talyzin Maxim Sergeevich, Cand. Sci. (Engineering); address: International Academy of Refrigeration: 2-nd Baumanskaya str., 5, Moscow, 105005; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7244-1946; eLibrary SPIN: <u>6524-3085</u>; e-mail: talyzin_maxim@mail.ru

*Печерских Константин Викторович; а адрес: Международная Академия Холода: 2-я Бауманская, 5, г. Москва, 105005; e-mail: const83@mail.ru	*Pecherskih KonstantinViktorovich; address: International Academy of Refrigeration: 2-nd Baumanskaya str., 5, Moscow, 105005; e-mail: const83@mail.ru
*Сколов Андрей Викторович; адрес: ООО «Лекма Холод»: Ростовская Область, г.о. Город Ростов-на-дону, г Ростов-на-дону, ул Доватора, зд. 158/6, стр. 1, помещ. 13, 344041 e-mail: skolov@lekmaholod.ru	*Skolov Andrey Viktorovich; address: Rostov Region, G.O. The city of Rostov-on-Don, Rostov- on-Don, Dovatora St., build. 158/6, 344041; e- mail: skolov@lekmaholod.ru