

УДК 697.975.4

Расчетно-экспериментальное обоснование эффективной работы испарителя в составе автономного кондиционера

Д. О. ДМИТРИЕВ^{1,2}, д-р техн. наук А. Б. СУЛИН^{2*}, канд. техн. наук М. И. ПОЛТОРАЦКИЙ¹

¹ООО «НПК Морсвязьавтоматика»

²Университет ИТМО

*E-mail: miconta@rambler.ru

Рассмотрено влияние на холодопроизводительность установки кондиционирования воздуха неравномерностей в поле скоростей воздушного потока, набегающего на фронтальное сечение трубчато-ребристого испарителя непосредственного кипения. Проведено численное моделирование, расчёт в специализированных программных пакетах характеристик испарителя при неравномерном обдуве и проведено экспериментальное исследование, подтверждающее результат моделирования. Установлено, что вследствие неравномерности поля скоростей воздушного потока и некорректной работы терморегулирующего вентиля производительность испарителя в случае неравномерного обдува не соответствует заявленной изготовителем. С целью повышения производительности испарителя предложено новое схемное решение распределения хладагента в трубных проходах и выполнено моделирование режимных параметров теплообменника модернизированной конфигурации при не перпендикулярном угле атаки воздушного потока. По результатам экспериментальных исследований аппарата подтверждены результаты математического моделирования и установлено, что его производительность после модернизации соответствует заявленной производителем. Предложенное решение не приводит к увеличению габаритных размеров установки и к изменению остальных компоненты системы. Описанная методика по изменению трубных проходов испарителя успешно распространена на другие типоразмеры автономного судового кондиционера.

Ключевые слова: испаритель, воздухоохладитель, неравномерность воздушного потока, автономный кондиционер.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 28.03.2024, одобрена после рецензирования 23.04.2024, принята к печати 26.04.2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-22-29

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Дмитриев Д. О., Сулин А. Б., Полторацкий М. И. Расчетно-экспериментальное обоснование эффективной работы испарителя в составе автономного кондиционера. // Вестник Международной академии холода. 2024. № 2. С. 22–29. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-22-29

Calculation-experimental substantiation of effective work for an evaporator in the self contained air conditioner

D. O. DMITRIEV^{1,2}, D. Sc. A. B. SULIN^{2*}, Ph. D. M. I. POLTORATSKY¹

¹LLC NPK Morsvyazavtomatika

²ITMO University

*E-mail: miconta@rambler.ru

The article examines the effect of unevenness in the field of air flow velocities impinging on the front section of a direct-boiling tubular-fin evaporator on the cooling capacity of an air conditioning unit. A mathematical modeling was carried out to calculate the characteristics of the evaporator with uneven airflow using specialized software packages, and an experimental study was conducted to confirm the simulation result. It has been established that the unevenness of the air flow pressure field and incorrect operation of the thermostatic valve lead to the discrepancy between the declared performance and the real one in the evaporator. In order to increase the performance of the evaporator, a new schematic solution for the distribution of refrigerant in the pipe passages was proposed and modeling of the operating parameters of a heat exchanger with a modernized configuration was carried out at a non-perpendicular angle of attack of the air flow. The results of mathematical modeling were confirmed experimentally and it was found out that the performance of the unit after modernization corresponds to that declared by the producer. The proposed solution does not lead to an increase in the overall dimensions of the unit or to the changes in other components of the system. The described technique for improvement the evaporator pipe passages has been successfully applied to other standard sizes of the self contained marine air conditioners.

Keywords: evaporator, air cooler, uneven air flow, self contained air conditioner.

Article info:

Received 28/03/2024, approved after reviewing 23/04/2024, accepted 26/04/2024

DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-22-29

Article in Russian

For citation:

Dmitriev D. O., Sulin A. B., Poltoratsky M. I. Calculation-experimental substantiation of effective work for an evaporator in the self contained air conditioner. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2024. No 2. p. 22-29. DOI: 10.17586/1606-4313-2024-23-2-22-29

Введение

Традиционные способы расчета трубчато-ребристых теплообменников, применяемых в промышленности, основаны на методиках, описанных, например, в [1, 2]. Так, Захаров Ю. В. рекомендует задавать скорость набегающего воздушного потока на рабочее сечение испарителя в пределах от 3 м/с до 5 м/с [1]. Однако данная рекомендация не учитывает неравномерный профиль скорости набегающего потока воздуха, характерный для условий стесненного внутреннего пространства в современных климатических установках и, особенно, в судовых автономных кондиционерах. В работе Идельчика И. Е. [3] описано влияние ограждающих конструкций на воздушный поток при прохождении по каналу прямоугольного сечения с пониженными скоростями потока на границах канала. В работе [4] показано, что неравномерность потока воздуха в стесненных условиях не учитывается в расчетных программах. Указанный фактор усугубляется стремлением современных производителей климатического оборудования к компактности выпускаемой продукции [5]. Данная проблема вынуждает искать все более неординарные способы установки испарителей в корпус установок, при этом чаще всего условия обтекания воздушным потоком теплообменника не рассматривается [6].

Влияние ограждающих конструкций особенно важно учитывать при применении испарителей с непосредственным кипением хладагента. Как известно, для поддержания перегрева в таких испарителях применяются механические или электронные терморегулирующие вентили. При снижении значения перегрева ниже установленного значения

шток терморегулирующего вентиля начинает прикрывать проходное сечение холодильного агента, тем самым, уменьшая подачу хладагента в испаритель. Современные испарители состоят из большого числа труб, по которым циркулирует холодильный агент. Распределение хладагента по этим трубам происходит в дистрибьюторе типа «паук», расположенном на выходе из терморегулирующего вентиля, где и установлен термочувствительный элемент. На первый взгляд такой испаритель можно рассматривать как последовательность параллельно установленных однозаходных теплообменников, находящихся в одинаковых расчетных условиях. Однако, на практике не все однозаходные теплообменники находятся в равных условиях из-за их неравномерного обдува воздухом.

Данная проблема описывается, например, в работах [6]–[12]. Экспериментально подтверждено, что при набегающем воздушного потока на испаритель температура хладагента в трубных проходах, расположенных по краям, является наименьшей [6]–[9]. При этом наибольшая температура наблюдается в средней части теплообменника [12].

Расчетные параметры испарителя при равномерном обдуве

Объектом данного исследования является испаритель автономного судового кондиционера модели КАС-35 производства ООО «НПК Морсвязьавтоматика» [13]. Аппарат представляет собой трубчато-ребристый теплообменник, состоящий из медных труб с алюминиевым оребрением (рис. 1). Холодильным агентом является хладон R407C.

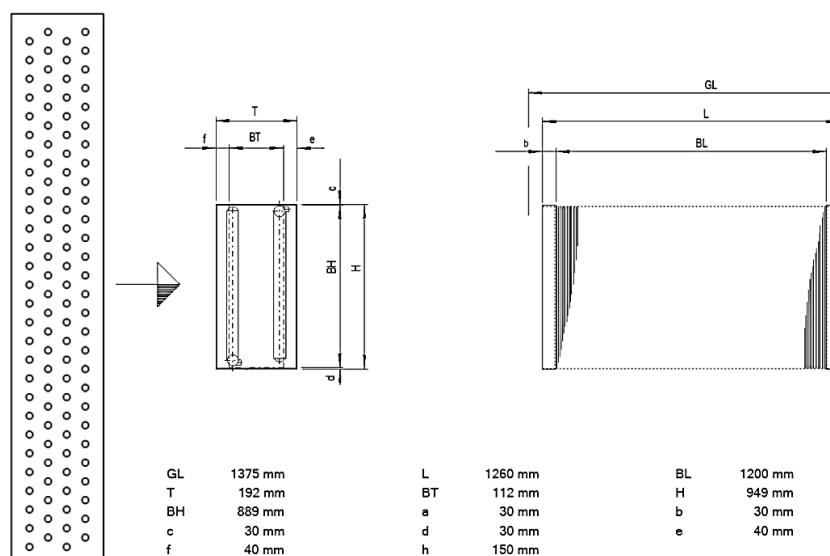


Рис. 1. Габаритные размеры испарителя КАС-35

Fig. 1. Dimensions of the KAS-35 evaporator

Блок испарителя		ВАТ В/4/28/2.50/1200/ACS/ /015032	
Мощность:	34.5 kW	Для размещения в:	Корпус
Пл. пов-ти:	87.4 m ²	Соединение:	справа
Требуемая площадь:	87.8 m ²	Геом. порядок труб:	шахматный
Резерв поверхности:	-0.5 %	Толщина инея:	0.0 mm
Конденсат:	12.90 kg/h	Отн. явная мощность :	74.0 %
К теплопередачи:	36.41 W/(m ² ·K)		
LMTD:	10.79 K		
Воздух	Вход	Выход	Хладагент:
Объемный расход:	5300 m ³ /h	5025 m ³ /h	R407C⁽⁴⁾
Температура:	27.0 °C	12.4 °C	Т кипения:
Отн. влажность:	46 %	91 %	Перегрев:
Скорость:		1.3 m/s	Т конденсации:
Давление воздуха:		1013 mbar	Т переохлаждения:
Потери давления:		25 Pa	Массовый расход:
			Объемный расход (газ):
			Потери давления:

Рис. 2. Расчетные параметры испарителя КАС-35

Fig. 2. Parameters of the KAS-35 evaporator

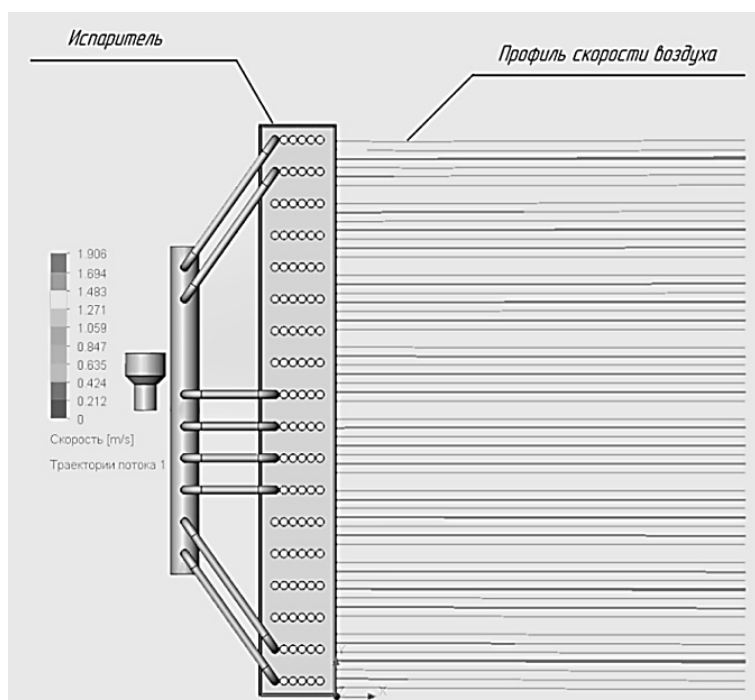


Рис. 3. Магнитуда скорости воздуха при обдуве испарителя под углом 90° к рабочему сечению
Fig. 3. Magnitude of air speed when blowing the evaporator at an angle of 90° to the working section

Расчетная температура кипения составляет 7 °C, температура конденсации 45 °C, перегрев сухого пара 7K, переохлаждение жидкости 2K. Геометрическое расположение труб шахматное, толщина ламелей 0,15 мм, шаг оребрения 2,5 мм. Количество труб по глубине 4. Для распределения холодильного агента между четырнадцатью входами используется дистрибьютор типа «паук».

Расчет испарителя выполнен в специализированном программном обеспечении для подбора теплообменников [14]. Поток воздуха, набегающего на теплообменник, предполагается равномерным. Результат расчета представлен на рис. 2, из которого видно, что производительность испарителя составляет 34,5 кВт, что соответствует производительности, заявляемой производителем.

В рамках данного исследования в программе SOLIDWORKS [15] выполнено моделирование процесса

обдува испарителя воздухом под углом 90° к фронтальному сечению.

При моделировании приняты следующие граничные условия:

- расход воздуха на входе 5300 м³/ч;
- температура воздуха на входе 27 °C;
- давление воздуха 10⁵ Па;
- геометрические параметры теплообменника, согласно данным рис. 1;
- угол обдува испарителя воздухом 90°.

Профиль скорости потока воздуха во фронтальном сечении приведен на рис. 3.

По результатам моделирования установлено, что поле скоростей набегающего потока можно считать равномерным. Данное допущение принято в специализированных программных продуктах для расчета такого типа

теплообменников. Следует отметить, что равномерный обдув испарителя характерен скорее для центральных кондиционеров, где существует возможность расположения испарителя на существенном удалении от ограждающих конструкций, вызывающих неравномерности воздушного потока.

Параметры испарителя при неравномерном обдуве

Испаритель непосредственного кипения, применяемый в кондиционере КАС-35, должен обеспечивать холодопроизводительность 35 кВт при заданных расчетных условиях. Однако, по многочисленным испытаниям производителя до выпуска продукции в коммерческое производство, заявленная холодопроизводительность не достигалась. В рамках данного исследования анализируются причины этого несоответствия.

В конструкции автономного кондиционера испаритель установлен под углом 45° к потоку обрабатываемого воздуха, как показано на рис. 4.

В программном обеспечении [15] выполнено моделирование воздушного потока, набегающего на фронтальное сечение теплообменника, установленного под углом 45° по отношению к потоку воздуха. Результат моделирования представлен на рис. 5, анализ которого указывает на существенную неравномерность воздушного потока на входе в теплообменник.

Натурные измерения скорости воздуха термоанемометром во фронтальном сечении в точках, приведенных на рис. 6, сведены в табл. 1.

Таблица 1
Скорость воздуха в точках измерения

Table 1
Air velocity at the points of measurements

№ точки	Скорость воздуха, м/с	№ точки	Скорость воздуха, м/с
1	0,29	9	0,92
2	0,61	10	1,67
3	0,71	11	1,77
4	0,37	12	0,95
5	0,97	13	0,46
6	1,34	14	0,89
7	1,56	15	0,78
8	0,93	16	0,54

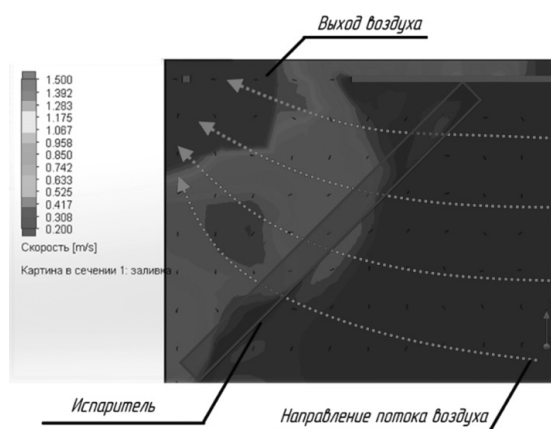


Рис. 5. Профиль распределения скоростей воздушного потока на испаритель. Вид сбоку

Fig. 5. Profile of air flow velocity distribution to the evaporator. Side view

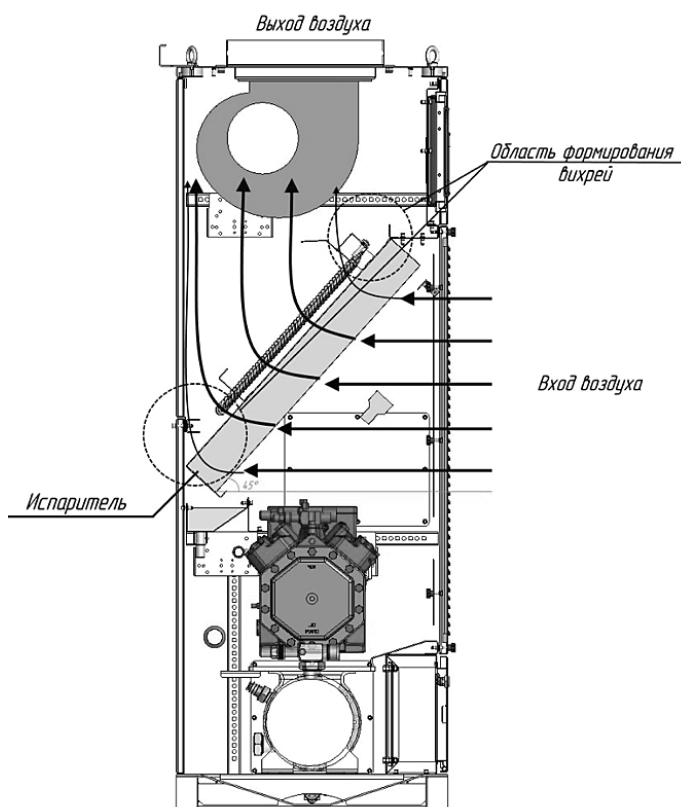


Рис. 4. Схема установки испарителя КАС-35
Fig. 4. Installation diagram of the KAS-35 evaporator

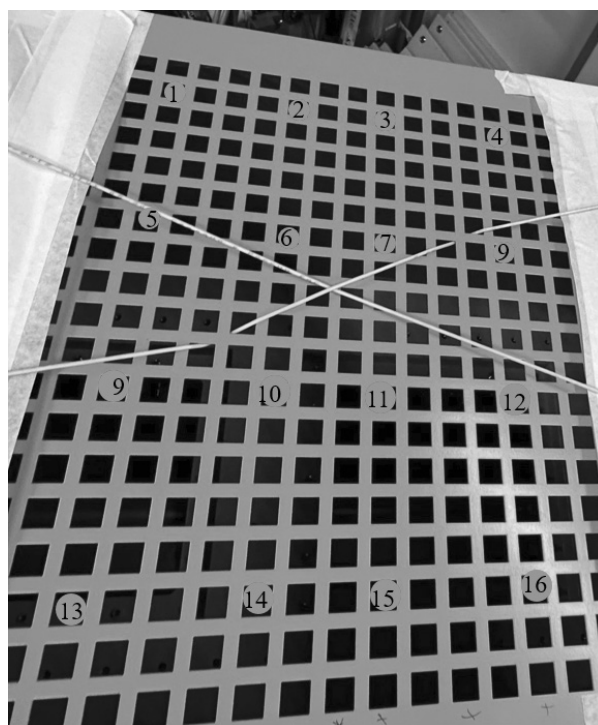


Рис. 6. Расположение точек измерения скорости воздуха
Fig. 6. Location of air velocity measurement points

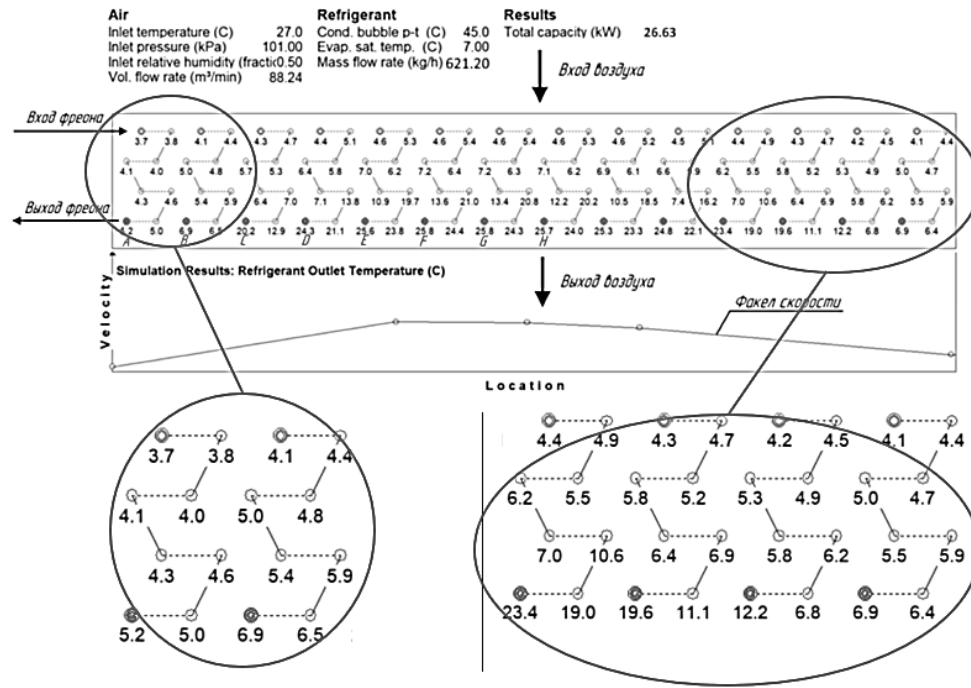


Рис. 7. Температура холодильного агента в испарителе при неравномерном обдуве воздухом
 Fig. 7. Refrigerant temperature in the evaporator with uneven airflow

Таким образом, расчетно и экспериментально установлена значительная неравномерность воздушного потока во фронтальном сечении испарителя, расположенного под углом 45° к потоку. Минимальное значение скорости воздуха составило 0,3 м/с, максимальное — 1,8 м/с. При этом наибольшие значения скорости выяв-

лены в центральном сечении теплообменного аппарата, а наименьшие — по нижнему и верхнему краям. Следствием неравномерного распределения воздушного потока является неравномерный тепловой поток в кипящем хладагенте в трубках испарителя. На рис. 7 и 8 приведены расчетные значения температуры и сте-

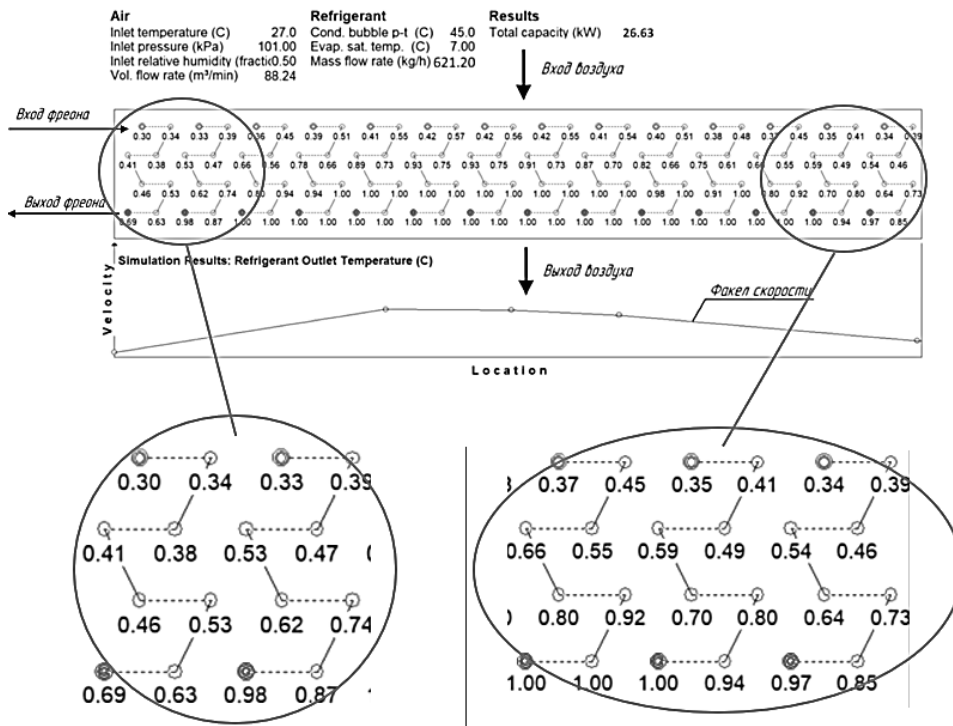


Рис. 8. Степень сухости холодильного агента в испарителе KAS-35 при неравномерном обдуве воздухом
 Fig. 8. Refrigerant dryness in the KAS-35 evaporator with uneven airflow

пени сухости хладагента R407C при расходе воздуха 5300 м³/ч в трубных соединениях аппарата.

Анализ результатов расчетов показывает, что результирующее значение перегрева в 7° достигается при смешении потоков с разными температурами в выходном коллекторе. При этом значение перегрева варьируется от 2÷5 К на краях теплообменного аппарата до 19 К в центральной части. Неэффективное использование теплообменной поверхности крайних частей испарителя и некорректная работа терморегулирующего вентиля приводит к снижению ожидаемой холодопроизводительности испарителя более, чем на 20 %. Вместо требуемых 35 кВт испаритель обеспечивает только 26,63 кВт.

Повышение эффективности испарителя при неравномерном обдуве

Для устранения влияния неравномерности обдува воздухом и снижения негативного влияния параметров хладагента [16]–[19] в крайних трубных проходах предложено изменить схему соединения труб испарителя (рис. 9).

На рис. 10, 11 приведены расчетные значения температуры и степени сухости хладагента после модернизации испарителя.

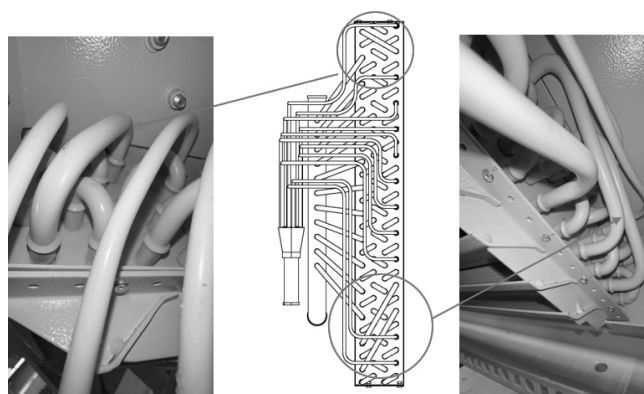


Рис. 9. Изменение конфигурации трубных проходов
Fig. 9. Changing the configuration of the pipe passages

Анализ данных на рис. 10, 11 показывает, что изменение схемы трубных соединений испарителя компенсирует негативное влияние неравномерного распределения потока воздуха в испарителе автономного кондиционера. Расчетная производительность аппарата повысилась с 26,63 кВт до 34,81 кВт и достигла номинального значения, заявленного производителем.

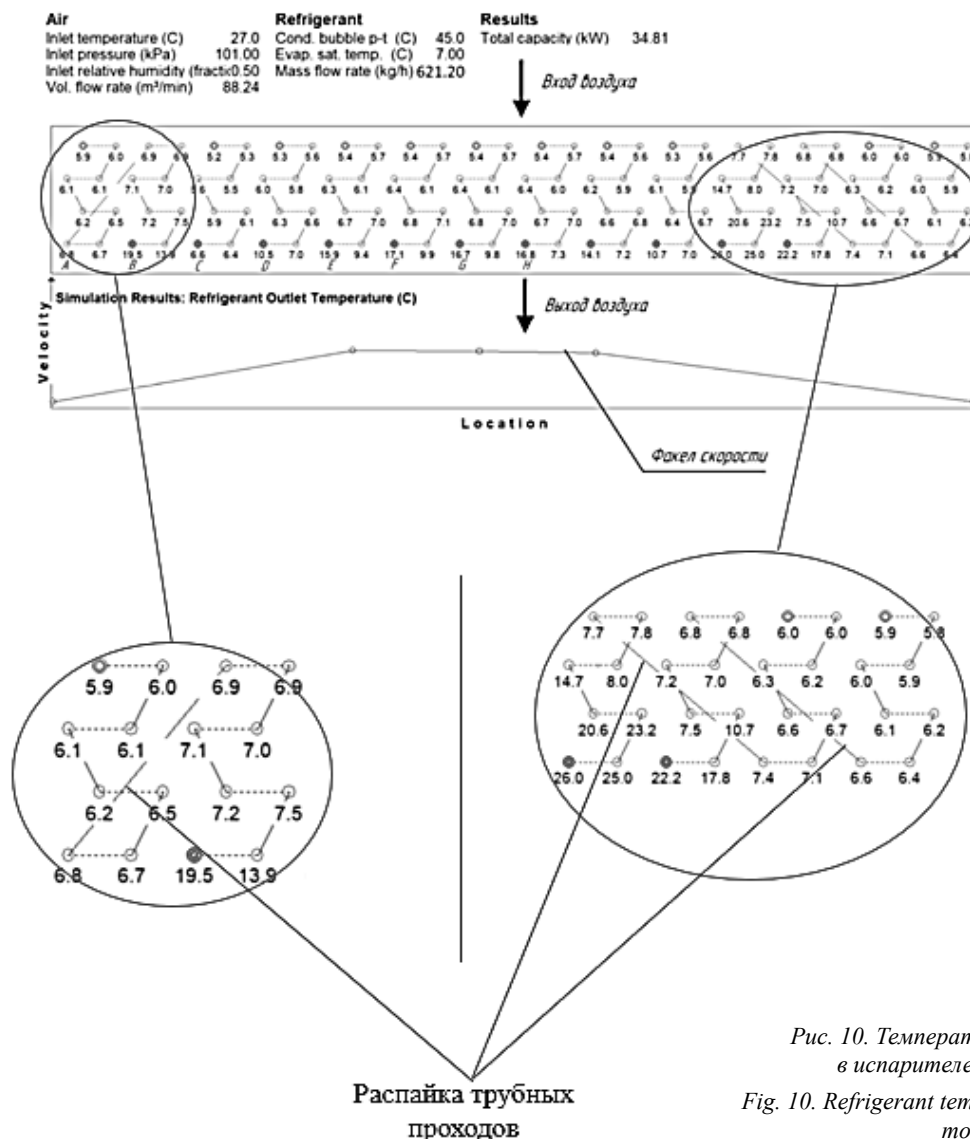


Рис. 10. Температура холодильного агента в испарителе после модернизации
Fig. 10. Refrigerant temperature in the evaporator after modernization

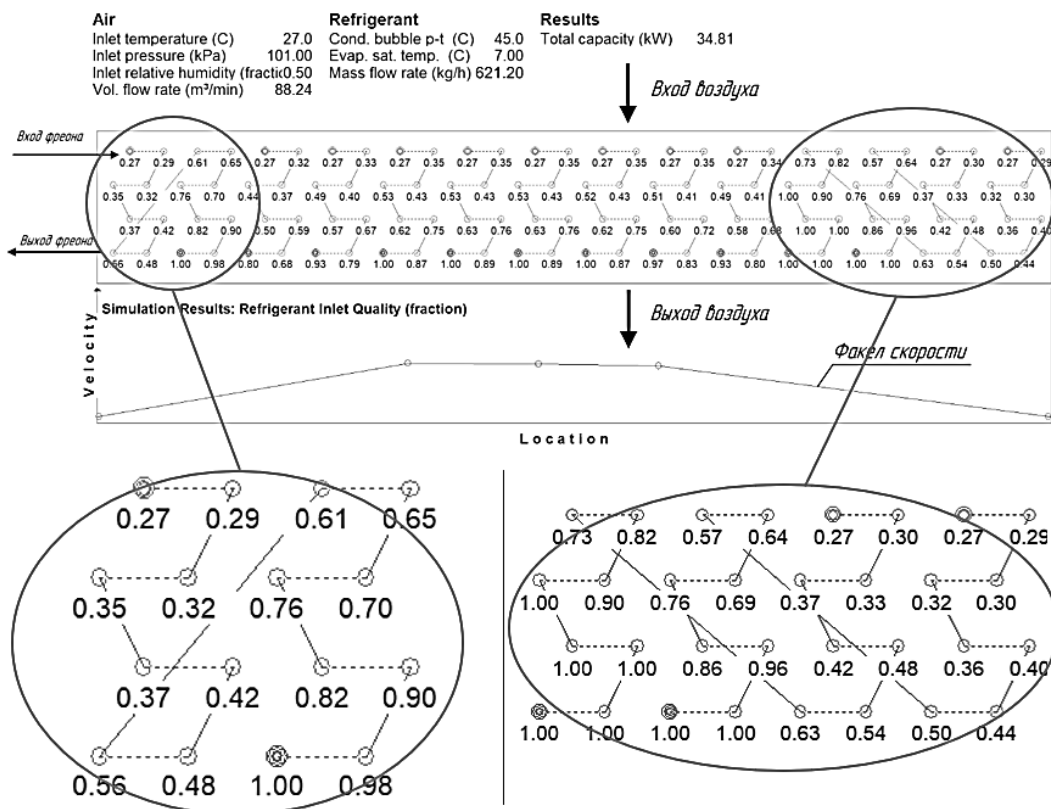


Рис. 11. Степень сухости холодильного агента в испарителе после модернизации
 Fig. 11. Refrigerant dryness in the evaporator after modernization

Заключение

По результатам вычислительного моделирования и экспериментальных исследований воздухоохладителя непосредственного кипения установлено, что снижение производительности при неравномерном распределении воздушного потока превышает 20 %.

Первой причиной снижения производительности является неэффективное использование теплообменной поверхности вследствие неравномерного распределения жидкого холодильного агента по трубам испарителя. Основной воздушный поток проходит в средней части теплообменного аппарата, где возникает избыточный перегрев и, соответственно, снижается температурный напор от потока воздуха к холодильному агенту.

Второй причиной снижения холодопроизводительности является уменьшение температуры кипения холодильного агента из-за некорректной работы терморегулирующего вентиля вследствие попадания капель жидкого холодильного агента в районе установки термобаллона.

Для достижения требуемой производительности предложено изменение схемы трубных соединений с целью перенаправления жидкой части холодильного агента в более нагретые области испарителя. Данное решение не приводит к увеличению габаритных размеров установок и к изменению остальных компонентов системы.

Описанную методику удалось успешно распространить на другие типоразмеры автономного судового кондиционера и получить требуемую холодопроизводительность в условиях неравномерного потока воздуха, обдувающего испаритель.

Литература / References

- Захаров Ю. В. Судовые установки кондиционирования воздуха и холодильные машины. — 3 изд. Ленинград: Судостроение, 1972. 584 с. [Zakharov Yu. V. Ship air conditioning units and refrigeration machines: Leningrad: Shipbuilding, 1979. 584 p. (in Russian)]
- Чичиндаев А. В. Оптимизация полей температур и термических напряжений в первичном теплообменнике системы кондиционирования воздуха / А. В. Чичиндаев, И. Г. Диомидов // 10 Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2011»: тез. докл., Москва, 8–10 нояб. 2011 г. СПб.: Мастерская печати, 2011. С. 51–52. [Chichindaev A. V., Optimization of temperature fields and thermal stresses in the primary heat exchanger of an air conditioning system / A. V. Chichindaev, I. G. Diomidov. 10th International Conference «Aviation and Cosmonautics-2011»: abstract. Report, Moscow, November 8–10. 2011. St. Petersburg: Printing Workshop, 2011. pp. 51–52. (in Russian)]
- Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — 3-е изд. Москва: Машиностроение, 1992. 672 с. [Idelchik I. E. Handbook on hydraulic resistance. — 3rd ed. Moscow: Mechanical Engineering, 1992. 672 p. (in Russian)]
- Mahmoud K., Khaireldin F., Hicham El H., Jalal F., Rani T., Mehdi M. Multi-passage concept applied to water-air cross flow tubes-and-fins heat exchangers. Thermal modelling and feasibility study. *International Journal of Thermofluids*. 2023. No 17.
- Absar A., Rajan K., Anil Singh Y., Ranjit Kumar A. Trends of Recent Developments in HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) Systems: A Comprehensive Review, *Materials Today: Proceedings*, 2023.

6. Harun B., Stephen D., Edward K. Levy numerical modeling of finned heat exchangers. *Applied Heat Engineering*. 2013. No. 61. pp. 278–288.
7. Ge Y. T., Cropper R. Modeling and performance evaluation of CO₂ gas coolers with finned tubes for refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering*. 2009. No. 29. pp. 957–965.
8. Xinyu Z., Yunting G., Jining S. CFD analysis of the performance of CO₂ gas coolers with finned tubes under different inlet air supply conditions. *Energy and artificial environment*. 2020. No. 3. pp. 233–241.
9. Arafat A. Bhuiyan, A. K. M., Sadrul I. Thermal and hydraulic performance of finned tube heat exchangers at different flow ranges: a review of modeling and experiments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016. No. 101. pp. 38–59.
10. Chiou J. P. Deterioration of thermal performance of a cross-flow heat exchanger due to flow unevenness. *Heat transfer*. 1978. No. 100. pp. 580–587.
11. Jonas H.-V., James N., Michael W. The influence of inlet conditions on air-side hydraulic resistance and uneven flow distribution in industrial air heaters. *International Journal of Heat and Fluid Flows*. 2011. No. 32. pp. 834–845.
12. Paolo B. Experimental study of the influence of air flow unevenness on the performance of a fin-tube heat exchanger. *International Journal of Refrigeration Engineering*. 2015. No. 59. P. 65–74.
13. Холодильное оборудование // Морсвязьавтоматика. [Электронный ресурс]: URL: unicont.com/climate/ (дата обращения: 19.06.2023). [Refrigeration equipment. *Morsvyaz-avtomatika*. [Electronic resource]: URL: unicont.com/climate/ (date of application: 06/19/2023). (in Russian)]
14. HVAC SYSTEMS. *Guntner*. [Electronic resource]: URL: guntner.com/applications/hvac (date of application: 15.06.2023).
15. SOLIDWORKS — All Products by Domain. *SOLIDWORKS*. [Electronic resource]: URL: <https://www.solidworks.com/product/all-products> (date of application: 24.09.2023)

Сведения об авторах

Дмитриев Денис Олегович

Магистрант второго года обучения института «Высшая инженерно-техническая школа» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9. Инженер-проектировщик отдела холодильного оборудования компании ООО «НПК Морсвязьавтоматика», 192174, г. Санкт-Петербург, ул. Кибальчича, 26, лит. Е, denisdmitriev2012@gmail.com

Сулин Александр Борисович

Д. т. н., профессор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, miconata@rambler.ru

Полторацкий Максим Ильич

К. т. н., главный конструктор, заместитель начальника отдела холодильного оборудования компании, ООО «НПК Морсвязьавтоматика», 192174, Санкт-Петербург, ул. Кибальчича, 26, лит. Е, pmi@unicont.com

Information about authors

Dmitriev Denis O.

Second-year master's student at the Institute «Higher Engineering and Technical School» of ITMO University, 191002, St. Petersburg, st. Lomonosova, 9. Design engineer of the refrigeration equipment department of the company LLC NPK Morsvyazavtomatika, 192174, St. Petersburg, st. Kibalchicha, 26, lit. E, denisdmitriev2012@gmail.com

Sulin Aleksandr B.

D. Sc., professor of Educational Center «Energy Efficient Engineering Systems» of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, miconata@rambler.ru

Poltoratsky Maxim I.

Ph. D., chief designer, deputy head of the company's refrigeration equipment department, LLC NPK Morsvyaz-avtomatika, 192174, St. Petersburg, st. Kibalchicha, 26, lit. E, pmi@unicont.com



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»

О Перечне рецензируемых научных изданий

Журнал «Вестник Международной академии холода», включенный в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК (по состоянию на 27.05.2024 г.) под № 533, принимает статьи по следующим научным направлениям:

- 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики
- 1.3.8. Физика конденсированного состояния
- 1.3.10. Физика низких температур
- 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника
- 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника
- 2.4.8. Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники
- 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса
- 4.3.3. Пищевые системы
- 4.3.5. Биотехнология продуктов питания и биологически активных веществ

Подробная информация на сайте ВАК РФ в разделе "Документы" – "Рецензируемые издания"
https://vak.minobrnauki.gov.ru/documents#tab=_tab:editions~