

А. Г. Сайфетдинов, Ю. А. Фирсова, Д. Д. Дюжин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКАНАЛЬНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Ключевые слова: микроканальный конденсатор, пластинчато-трубчатый конденсатор, температура конденсации, эффективность теплообмена.

Примером внедрения в повседневную практику работы предприятий холодильной отрасли новых технологий является появление микроканальных воздушных теплообменников. По сравнению с эксплуатируемыми долгое время аппаратами их отличает высокая энергетическая эффективность, минимальное содержание хладагента и меньшая металлоемкость. Такие особенности способствуют развитию холодильной отрасли, а также внедрению в промышленность природоохранных и экологических решений. Микроканальные технологии активно применяются в промышленном, автомобильном, бытовом кондиционировании, аэрокосмической отрасли, активно затрагивая и рынок холодильной техники. Такие теплообменники позволяют увеличить интенсивность теплообмена, прочность конструкции аппаратов, а использование их в различных агрегатах дает возможность существенно сократить объемы рабочих жидкостей, находящихся в контуре. Актуальность данной работы состоит в том, что такие аппараты – относительно новая технология в холодильной технике. Несмотря на отмеченные плюсы, микроканальные конденсаторы на настоящее время малоизучены. Данная работа посвящена исследованию этих теплообменников, а именно, опытному определению параметров теплообмена и сравнительному анализу микроканальных и пластинчато-трубчатых воздушных конденсаторов. Приведено подробное описание экспериментального стенда с установленным оборудованием, показаны результаты исследования – разности температур конденсации и окружающей среды, от которых зависит эффективность теплообменных процессов, а также величины переохлаждения хладагента в аппаратах. Для вариантов применения микроканального и пластинчато-трубчатого конденсаторов выполнен тепловой расчёт пароконденсационной холодильной машины с целью сравнения значений ее холодильного коэффициента. На основе анализа литературы, результатов проведенного исследования и опыта эксплуатации описаны преимущества и недостатки микроканального теплообменника, а также перспективы развития и более широкого его применения в холодильной технике.

A. G. Sayfetdinov, Yu. A. Firsova, D. D. Dyuzhin

EXPERIMENTAL STUDY OF MICROCHANNEL CONDENSERS

Keywords: Microchannel capacitor, plate-tube condenser, condensation temperature, heat exchange efficiency.

An example of the introduction of new technologies into the daily practice of refrigeration industry enterprises is the emergence of microchannel air heat exchangers. Compared to devices that have been in operation for a long time, they are distinguished by high energy efficiency, minimal refrigerant content and lower metal consumption. Such features contribute to the development of the refrigeration industry, as well as the introduction of environmental and ecological solutions into the industry. Microchannel technologies are actively used in industrial, automotive, household air conditioning, aerospace industry, actively affecting the refrigeration equipment market. Such heat exchangers allow increasing the intensity of heat exchange, the strength of the device design, and their use in various units makes it possible to significantly reduce the volumes of working fluids in the circuit. The relevance of this work is that such devices are a relatively new technology in refrigeration engineering. Despite the noted advantages, microchannel condensers are currently poorly studied. This work is devoted to the study of these heat exchangers, namely, the experimental determination of heat exchange parameters and comparative analysis of microchannel and plate-and-tube air condensers. A detailed description of the experimental stand with the installed equipment is given, the results of the study are shown - the differences in condensation and ambient temperatures, on which the efficiency of heat exchange processes depends, as well as the values of refrigerant supercooling in the devices. For the options for using microchannel and plate-and-tube condensers, a thermal calculation of the vapor compression refrigeration machine is performed in order to compare the values of its refrigeration coefficient. Based on the analysis of the literature, the results of the study and operating experience, the advantages and disadvantages of the microchannel heat exchanger are described, as well as the prospects for development and wider use in refrigeration technology.

Введение

Микроканальные теплообменники (МКТО) применяются в целом ряде отраслей промышленности: химии, нефтехимии, атомной энергетике, микроэлектронике и аэрокосмической индустрии. В настоящее время более 75% автомобильных кондиционеров оснащаются микроканальными теплообменными аппаратами [1]. Они являются незаменимыми в технологических устройствах, в которых основным требованием является возможность охлаждения различных сред в ограниченном пространстве [2, 3, 4].

К текущему времени накоплен немалый объем результатов теоретических и экспериментальных исследований теплогидродинамических процессов при фазовых переходах хладагентов в миниканалах [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

Для возможности более широкого применения микроканальных теплообменников в холодильной отрасли необходимы дальнейшие фундаментальные исследования.

С этой целью для сравнения характеристик широко используемого в настоящее время пластинчато-трубчатого воздушного (ПТТО) и микроканального конденсаторов на базе

лаборатории ООО «ПК «Интерколд» было проведено экспериментальное исследование.

Испытательный стенд располагается внутри лаборатории. В состав холодильного агрегата входит поршневой компрессор Tecumseh TAJ4519z, воздушный конденсатор, фильтр-осушитель Sanhua DTG-F053s, дроссельная трубка и испаритель. Система была заправлена фреоном R404A. Конденсаторы были установлены в смонтированные в помещении серийно выпускаемые сплит-системы. Внутренний блок находится в охлаждаемом объеме (камере). Схема стенда представлена на рис. 1.

Управление агрегатом, внешними и внутренними блоками осуществляется через щит автоматического управления, который соединён с вводным силовым щитом.

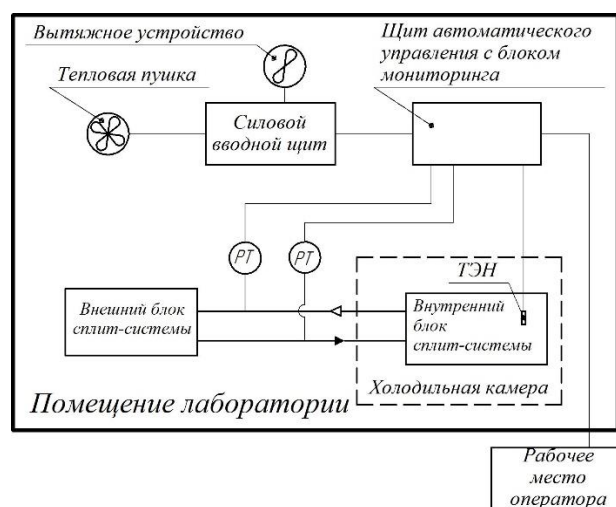


Рис. 1 – Схема испытательного стенда

Fig. 1 – Test bench diagram

Для создания тепловой нагрузки внутри холодильной камеры находятся четыре трубчатых нагревательных элемента (ТЭН) номинальной мощностью 2000 Вт. Они, с целью регулирования производительности, через цифровой ваттметр соединены с лабораторным трансформатором (ЛАТР), который вынесен за пределы лаборатории на рабочее место оператора.

На щите автоматического управления располагается блок мониторинга «Индис», который соединён с соответствующими контроллерами для снятия показаний давлений и температур во всасывающей трубке компрессора и трубке на выходе из конденсатора, что позволяет замерить величины перегрева и переохлаждения холодильного агента. Связь блока мониторинга с персональным компьютером (ПК) на рабочем месте оператора обеспечивает передачу данных с контроллеров на экран ПК, а также на сервер «Индис».

Для обеспечения микроклимата в лаборатории установлена тепловая пушка, а также вытяжное устройство (осевой вентилятор), которые соединены с вводным силовым щитом.

В ходе эксперимента велась запись таких характеристик двух конденсаторов, как давление и температура конденсации, разница температур

окружающей среды и конденсации хладагента, температура переохлаждения жидкого рабочего тела на выходе из аппарата. Замеры производились при установившемся режиме работы каждые 10 минут. Снимаемые показатели сравнивались и рассчитывалась производительность агрегата. После измерений оценена их погрешность, значения которой находятся в пределах допустимых значений.

Результаты эксперимента показали, что разница температур θ окружающей среды и конденсации на пластинчато-трубчатом конденсаторе составляет, в среднем, около 12-13К, а на микроканальном - 9К (рис.2).

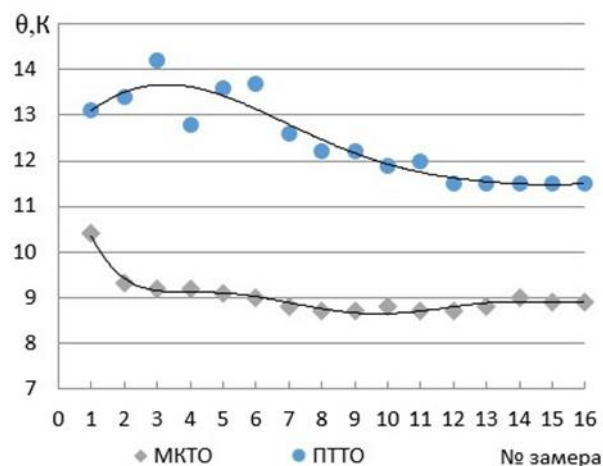


Рис. 2 – Разница температур окружающей среды и конденсации на МКТО и ПТТО

Fig. 2 – Difference between ambient temperature and condensation temperature on the MCOT and PTOT

Величина переохлаждения жидкого хладагента в установившемся режиме работы на выходе из обоих теплообменников (рис.3) практически не отличается и имеет оптимальное значение для холодильной машины.

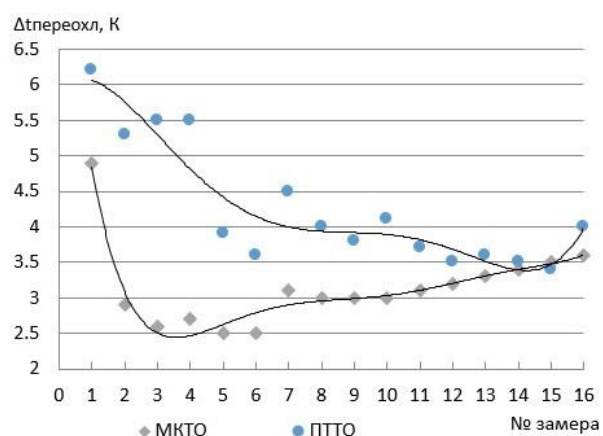


Рис. 3 – Величина переохлаждения жидкого хладагента на выходе из МКТО и ПТТО

Fig. 3 – Liquid refrigerant supercooling at the outlet of the MCOT and PTOT

Для сравнения эффективности машин, работающих на базе микроканального и пластинчато-трубчатого конденсаторов выполнен

тепловой расчёт парокомпрессионной холодильной установки [12, 13]. Результаты расчетов показали, что машина с микроканальным теплообменником имеет более высокий эффективный холодильный коэффициент, ее энергоэффективность на 10-15% выше.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование показало, что градиент температур на микроканальном конденсаторе, по сравнению с пластинчато-трубчатым аппаратом, ниже на 3-4°C. Это положительно сказывается на работе компрессора и также повышает энергетическую эффективность холодильной системы в целом. Более высокая интенсивность теплообмена в МКТО объясняется применением в их конструкции микроканальных технологий, которые заключаются в применении каналов меньшей толщины.

На основе анализа литературы [14, 15] и опыта эксплуатации ООО «ПК «Интерколд» можно выделить преимущества и недостатки МКТО в сравнении с ПТТО. Достоинством микроканального теплообменника является его масса и стоимость. Так, если трубчато-ребристые аппараты предполагают использование медных трубок и алюминиевых ребер, то микроканальные изготовлены только из алюминия. Это приводит к тому, что при одинаковых площадях теплообмена, но разной глубине (обусловленной конструктивными различиями) масса микроканального конденсатора снижается до 40% в сравнении с пластинчато-трубчатыми конденсаторами. Благодаря конструктивным особенностям глубина микроканального конденсатора в 3-4 раза меньше, чем аналогичного по площади теплообмена пластинчато-трубчатого конденсатора. Поэтому потеря давления по воздуху в МКТО снижается до 50%, энергопотребление до 45%. Кроме того, МКТО отличается повышенной коррозионная стойкость конструкции за счет применения алюминия и отсутствия гальванической коррозии, характерной для стыков двух разных металлов в традиционной конструкции. Микроканальные теплообменники могут использоваться в агрессивных средах. Также внутренний объем МКТО почти в 3 раза ниже, чем у ПТТО, что позволяет снизить дозу заправки фреоном.

Несмотря на множество достоинств новой технологии, у микроканальных теплообменников имеются некоторые недостатки. Во-первых, учитывая плотное расположение ребер, существует вероятность более быстрого загрязнения теплообменников. Во-вторых, толщина ребер очень мала, поэтому их проще замять и повредить, следовательно, чистка требует гораздо большей аккуратности от сервисных бригад. На определенном этапе эксплуатации своих изделий ООО «ПК «Интерколд» столкнулся со следующей проблемой. В случае, когда несущий швеллер микроканального конденсатора приваривался к коллектору, при резких перепадах температур стальной швеллер «рвал» алюминиевый коллектор из-за относительно высокого температурного коэффициента линейного расширения последнего. Кроме того, нет возможности использовать МКТО в качестве испарителя ввиду того, что при сегодняшнем

технологическом уровне не представляется возможным сконструировать правильный гидрораспределитель, соединяющий сотни, а то и тысячи микроканалов.

В ближайшее время микроканальные конденсаторы не смогут полностью заменить пластинчато-трубчатые ввиду консервативности рынка холодильной техники и описанных выше недостатков МКТО. Но на них делается большая ставка в охлаждении микроэлектроники. С решением проблем, связанных с использованием этих аппаратов в качестве испарителей, можно будет ожидать перехода всего климатического оборудования на теплообменные секции нового типа. Традиционные пластинчатые теплообменники также могут быть переведены на микроканальную технологию при условии соблюдения чистоты обменивающихся тепловой энергией сред во избежание загрязнения микроканалов. Таким образом, процесс освоения данной технологии идет достаточно активно, и в обозримом будущем она сможет занять лидирующие позиции на рынке.

Литература

1. К. М. Сеницына, А. В. Зайцев, А. В. Бараненко, *Вестник Международной академии холода*, 1, 66-72 (2016).
2. Ю. Хомутский, *Вестник УКЦ АПИК*, 82, 94-101 (2014).
3. С.Р. Гопин, В.М. Шавра, *Воздушные конденсаторы малых холодильных машин*. Агропромиздат, Москва, 1987. 151 с.
4. А. А. Малышев, В.О. Мамченко, В.М. Мизин, К.В. Киссер, *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*, 1 (2015).
5. Y.R. Thome, V. Dupont, A.M. Yacobi, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. P. 1, 47, 3375-3385 (2004).
6. Н.Ф. Крупенников, А.С. Филатов, *Материалы VII Междуна. науч.-техн. конф. «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке»*. Ч. 1. Санкт-Петербург, 2015. С. 157-158.
7. А.В. Бараненко, О.Б. Цветков, Ю.А. Лаптев, Д.М. Ховалыг, *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*, 3 (2014).
8. В.В. Шишов, М.Ю. Клоков, С.И. Веселков, *Сантехника. Отопление. Кондиционирование.*, 2 (2007).
9. A.Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto, *International Journal of Refrigeration*, 36, 287-300 (2013).
10. M.M. Awad, A.S. Dalkilic, S. Wongwises, *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 5 (2014).
11. Satish G. Kandlikar, Stephanie Colin, Yoav Peles, Srinivas Garimella, R. Fabian Pease, Juergen J. Brandner, David B. Tuckerman.. *Journal of Heat Transfer*. 135 (2013).
12. Ю.А. Фирсова, А.Г. Сайфетдинов, *Расчеты по холодильной технике и технологии*. Минобрнауки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т, КНИТУ, Казань, 2020. 112 с.
13. С.В. Визгалов, А.М. Ибраев, М.С. Хамидуллин, И.Г. Хисамеев, *Теоретические основы холодильной техники*. Слово, Казань, 2019. 304 с.
14. Ю. Хомутский, *Мир климата*, 66 (2011). <https://mir-klimata.info/mikrokanalnye-teploobmenniki/>.
15. Д.М. Ховалыг, А.В. Бараненко, *Вестник Международной академии холода*, 4, 3-12 (2013).

References

1. K. M. Sinitsyna, A. V. Zaitsev, A. V. Baranenko, *Bulletin of the International Academy of Cold*, 1, 66-72 (2016).

2. Yu. Khomutsky, *Bulletin of the UKC APIC*, 82, 94-101 (2014).
3. S.R. Gopin, V.M. Shavra, Air condensers for small refrigeration machines. *Agropromizdat*, Moscow, 1987. 151 p.
4. A.A. Malyshev, V.O. Mamchenko, V.M. Mizin, K.V. Kisser, *Scientific Journal of ITMO University. Series "Refrigeration and Air Conditioning"*, 1 (2015).
5. Y.R. Thome, V. Dupont, A.M. Yacobi, *International Journal of Heat and Mass Transfer*. P. 1, 47, 3375-3385 (2004).
6. N.F. Krupenenkov, A.S. Filatov, *Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Low-Temperature and Food Technologies in the 21st Century."* Part 1. St. Petersburg, 2015. P. 157-158.
7. A.V. Baranenko, O.B. Tsvetkov, Yu.A. Laptev, D.M. Khovalyg, *Scientific Journal of ITMO University. Series "Refrigeration and Air Conditioning"*, 3 (2014).
8. V.V. Shishov, M.Yu. Klokov, S.I. Veselkov, *Plumbing. Heating. Air Conditioning*, 2 (2007).
9. A.Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto, *International Journal of Refrigeration*, 36, 287-300 (2013).
10. M.M. Awad, A.S. Dalkilic, S. Wongwises, *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, 5 (2014).
11. Satish G. Kandlikar, Stephane Colin, Yoav Peles, Srinivas Garimella, R. Fabian Pease, Juergen J. Brandner, David B. Tuckerman. *Journal of Heat Transfer*. 135 (2013).
12. Yu.A. Firsova, A.G. Saifetdinov, *Calculations in Refrigeration Engineering and Technology*. Ministry of Education and Science of Russia, Kazan National Research Technological University, KNRTU, Kazan, 2020. 112 p.
13. S.V. Vizgalov, A.M. Ibraev, M.S. Khamidullin, I.G. Khisameev, *Theoretical Foundations of Refrigeration Technology*. Slovo, Kazan, 2019. 304 p.
14. Yu. Khomutsky, *Mir Klimata*, 66 (2011). <https://mir-klimata.info/mikrokanalnye-teploobmenniki/>.
15. D.M. Khovalyg, A.V. Baranenko, *Bulletin of the International Academy of Cold*, 4, 3-12 (2013).

© А. Г. Сайфетдинов – канд. техн. наук, доцент кафедры Низкотемпературной и компрессорной техники и технологии (НКТТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, SaifetdinovAG@corp.knrtu.ru; Ю. А. Фирсова - канд. техн. наук, доцент кафедры НКТТ, КНИТУ, FirsovaYuA@corp.knrtu.ru; Д. Д. Дюжин – студент кафедры НКТТ, КНИТУ, warriorcwz@gmail.com.

© A. G. Sayfedinov – PhD (Technical Sci.), Associate professor, department of Low-temperature and Compressor Engineering and Technology (LCET), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, SaifetdinovAG@corp.knrtu.ru; Yu. A. Firsova – PhD (Technical Sci.), Associate professor, the LCET department, KNRTU, FirsovaYuA@corp.knrtu.ru; D. D. Dyuzhin – Student, the LCET department, KNRTU, warriorcwz@gmail.com.

Дата поступления рукописи в редакцию – 14.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 15.06.25.