

УДК 534.282

Миниканальные теплообменники в холодильной технике

Д-р техн. наук, проф. **Бараненко А.В.** baranenko@mail.ifmo.ru

Д-р техн. наук, проф. **Цветков О.Б.**

Канд. техн. наук **Лаптев Ю.А.** max-iar@gunipt.spb.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Канд. техн. наук **Ховалыг Д.М.** khovalyg.d@gmail.com

University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

В статье представлены сведения об эволюционном развитии теплообменных аппаратов, позволившем существенно повысить их удельную эффективность. Показано, что в теплообменных устройствах в последние десятилетия широко применяются микроканальные технологии, позволяющие создавать компактные аппараты. Чем меньше диаметр канала, тем большую теплообменную поверхность можно сконцентрировать в единице объема. Применительно к холодильной технике созданы миниканальные конденсаторы с воздушным охлаждением. Ими комплектуются холодильные агрегаты и кондиционеры относительно небольшой производительности. При этом улучшаются технические характеристики агрегатов, сокращается объем заправки хладагента в систему.

Для создания миниканальных испарителей требуется решение ряда технических проблем.

Ключевые слова: холодильная техника, миниканальные теплообменники, конденсатор, испаритель, хладагент.

Minichannel heat exchangers in refrigerating equipment

D.Sc. prof. **Baranenko A.V.** baranenko@mail.ifmo.ru

D.Sc., prof. **Tsvetkov O.B.**

Ph.D. **Laptev Yu.A.** max-iar@gunipt.spb.ru

University ITMO

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Ph.D. **Hovalyg D.M.** khovalyg.d@gmail.com

University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

Data on the evolutionary development of heatexchange devices which allowed to increase significantly their specific efficiency are presented in article. It is shown that in heatexchange devices in the last decades the microchannel technologies allowing to create compact devices are widely applied. The diameter of the channel is less, the big heatexchange surface can be concentrated in unit of volume. In relation to refrigerating equipment minichannel condensers with air cooling are created. They complete refrigerating units and conditioners of rather small productivity. Thus technical characteristics of units improve, the volume of gas station of coolant in system is reduced.

Creation of minichannel evaporators requires the solution of a number of technical problems.

Keywords: refrigerating equipment, minichannel heat exchangers, condenser, evaporator, coolant.

Интенсивность теплообмена между средами в различных технических системах во многом определяет их эффективность. За период становления промышленности теплообменные аппараты претерпели существенное эволюционное развитие. Теплосъем с единицы объема или массы аппарата постоянно возрастает. Например, в кожухотрубных испарителях холодильных систем теплосъем с единицы массы медных теплообменных труб с 1960-70 гг. по 2000-2010 гг. увеличился почти на порядок [1], рис. 1.

Этот результат достигнут вследствие применения труб меньшей толщины и различных конструктивных решений.

Дальнейшим шагом существенного повышения эффективности теплообменных устройств явилось применение в них миниканальных технологий [2,3,4,5].

Научные исследования, проводимые в данной области в предшествующие 20-25 лет, значительно активизировались в последние годы, о чем свидетельствуют изданные монографии и увеличивающееся число публикаций в научно-технических журналах [6,7,8,9,10].

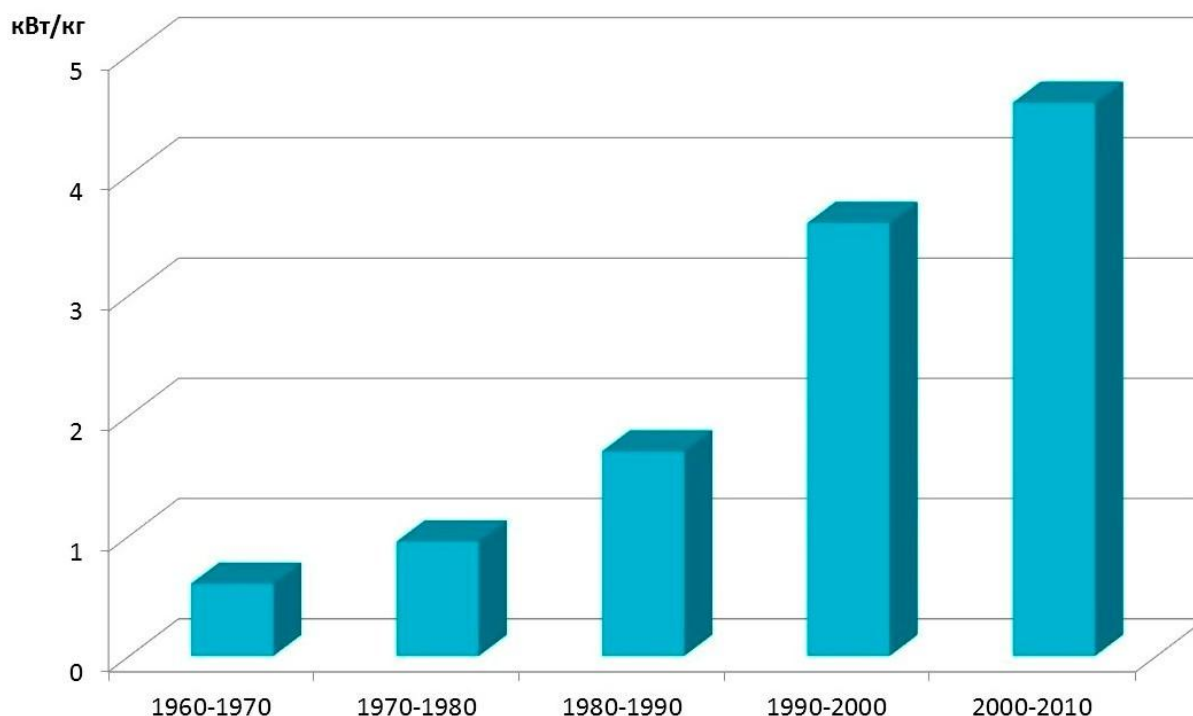


Рис.1. Повышение эффективности кожухотрубных испарителей холодильных машин с медными трубами [1]

Минимизация размера канала позволяет сконцентрировать в единице объема аппарата большую площадь теплообменной поверхности. Она может достигать чрезвычайно больших значений. Эта величина находится в степенной зависимости от размера канала с показателем степени k меньше нуля [11], рис. 2.

$$\frac{m}{m} \frac{^2}{^3} = f(d_r^{k<0})$$

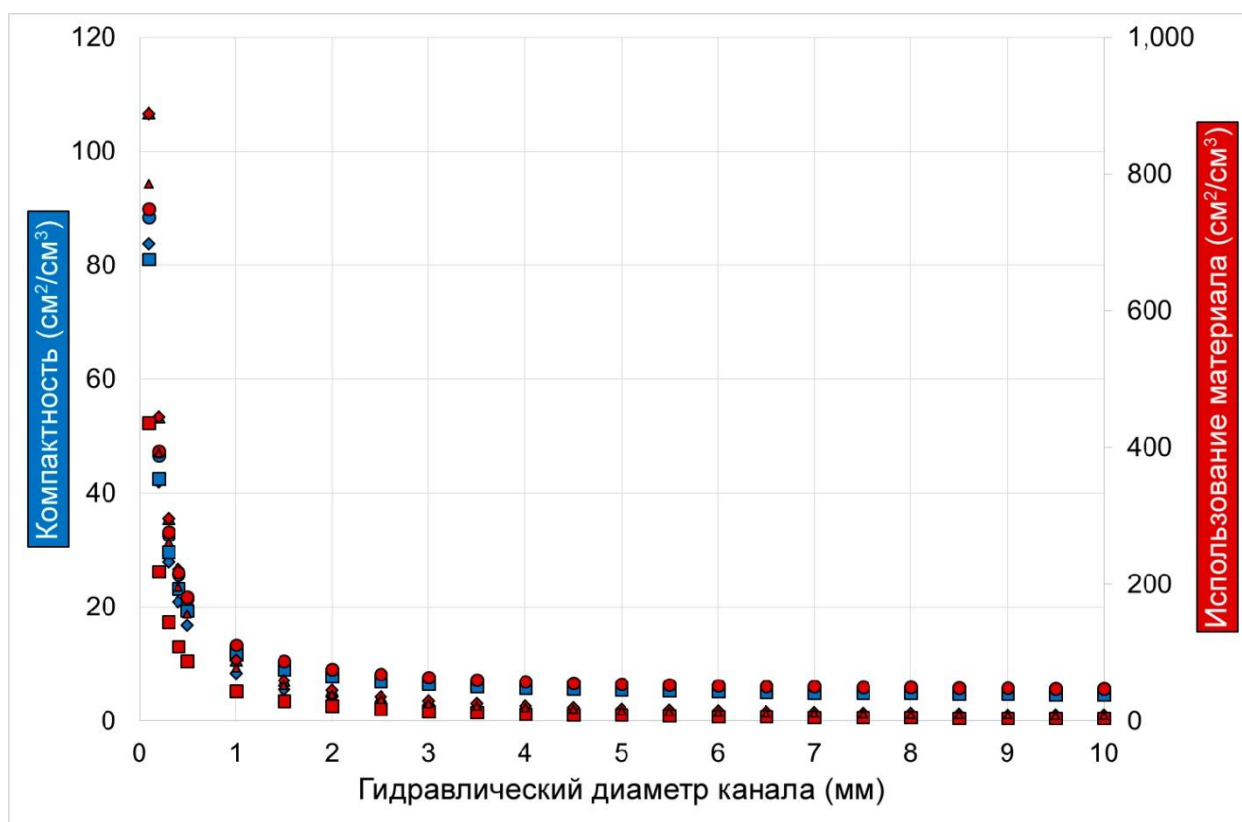


Рис. 2. Влияние размера канала на компактность теплообменника [11]

Миниканальные теплообменники обеспечивают высокую интенсивность теплообмена, прочность конструкции аппаратов, а использование их в различных агрегатах позволяет существенно сократить объемы рабочих жидкостей, находящихся в системах [3, 12].

Миниканальные теплообменники нашли применение во многих отраслях промышленности: атомной энергетике, химии, нефтехимии, микроэлектронике, аэрокосмической индустрии, в микроэлектромеханических устройствах для биологических и химических исследований [2,3,9,10].

Такие теплообменники незаменимы в технических устройствах, в которых главным требованием является возможность охлаждения различных сред в ограниченном пространстве [3,9].

Миниканальные теплообменники реализованы также в технике низких температур [13, 14, 15, 16].

На сегодняшний день более 75% автомобильных кондиционеров оснащаются миниканальными теплообменными аппаратами [17]. Значительное число зарубежных производителей (Guentner, Carrier, Johnson Controls, Danfoss, Delphi, Modine, Goodman, Nordyne, Climetal и др.) выпускают микроканальные конденсаторы как отдельно, так и в составе сплит-систем и чиллеров.

Применение миниканальных технологий в конденсаторах холодильных машин улучшает технические характеристики последних. Масса теплообменного аппарата уменьшается до 50%, а габариты на 25%. Объем заправки хладагентом снижается от 20 до 40 % [18, 19].

На рис. 3 и 4 представлены внешний вид микроканальных и трубчаторебристых конденсаторов, конструкции выпускаемых миниканальных пластин и конденсаторов.

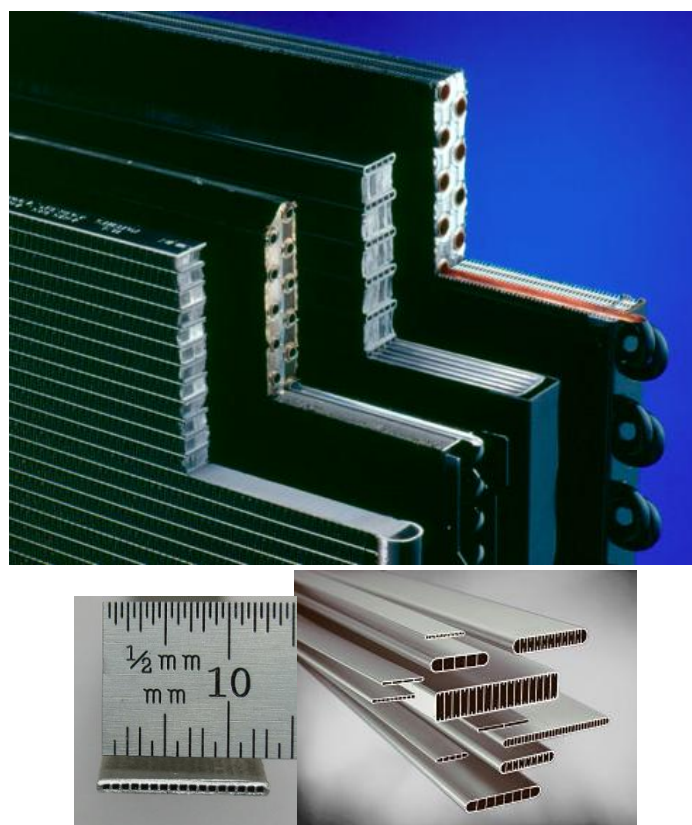


Рис.3. Сравнение ребристо-трубных и микроканальных теплообменников (вверху) [19]; габариты пластины с микроканалами 500 мкм (слева внизу); разнообразие микроканальных алюминиевых пластин (справа внизу) [20]

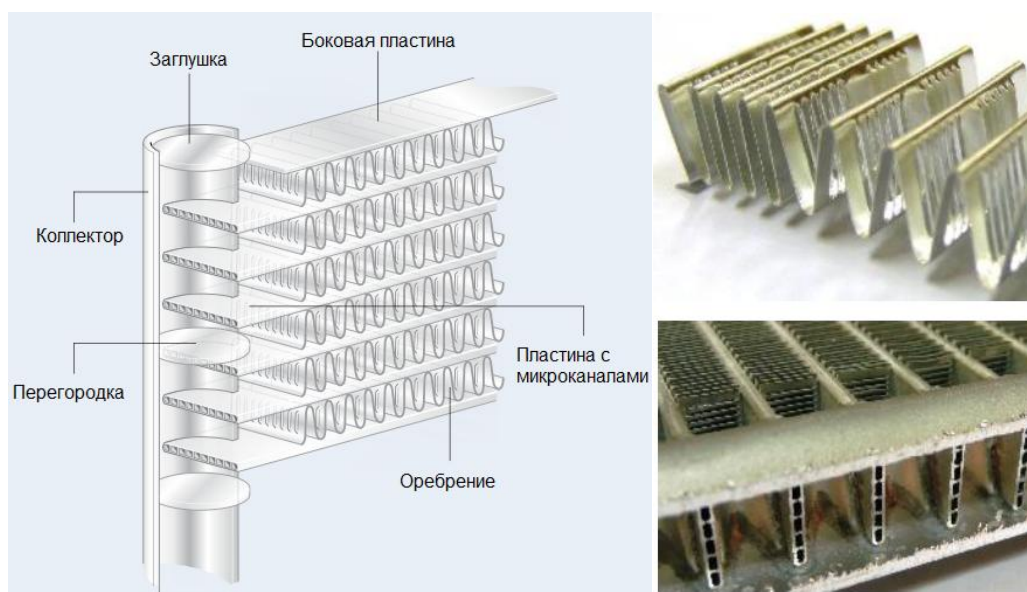


Рис.4. Конструкция микроканального теплообменника [18, 21]

Процессы при фазовых переходах в миканалах весьма сложны, что обусловлено в первую очередь малыми размерами каналов. Условия осуществления процесса по длине канала меняются весьма интенсивно.

При конденсации пара в миканалах скорость пара во входном сечении очень высока, особенно при больших массовых плотностях потока, достигающих $1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [22]. По мере конденсации пара, вследствие резкого сокращения суммарного объема двухфазного потока, скорость потока постоянно уменьшается. Образуется кольцевой режим течения жидкой фазы, между жидкой и паровой фазами проявляется эффект скольжения фаз. В конечной части канала жидкая фаза заполняет практически все сечения канала. Малые размеры канала оказывают влияние на величины падения давления в каналах [6, 7, 23].

В связи с тем, что при конденсации характеристики теплогидродинамического процесса в миканале резко меняются по длине канала, аналитическое описание процесса весьма затруднено. Исследователи, как правило, ограничиваются рассмотрением участка, на котором имеет место кольцевой режим течения двухфазного потока.

Тем не менее, расчеты по отдельным моделям [10, 24] показывают достаточно хорошую сходимость расчетных и экспериментальных величин коэффициентов теплоотдачи и падения давления (рис. 5 и 6). Как видно по рис. 5, при конденсации пропана в миканале гидравлическим диаметром $0,96 \text{ мм}$, коэффициент теплоотдачи достигает величины $20 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, при $G = 800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [24].

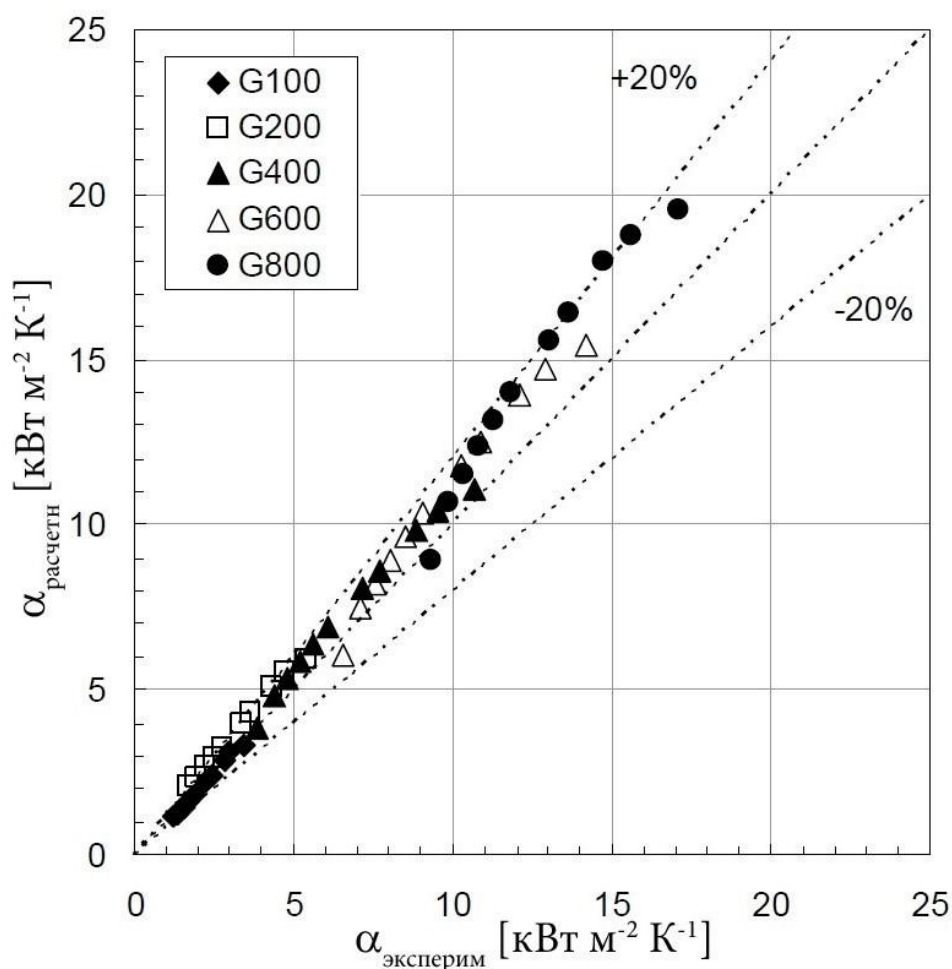


Рис. 5. Величины коэффициентов теплоотдачи при конденсации пропана в миканалах, $d_r = 0,96$ [24]

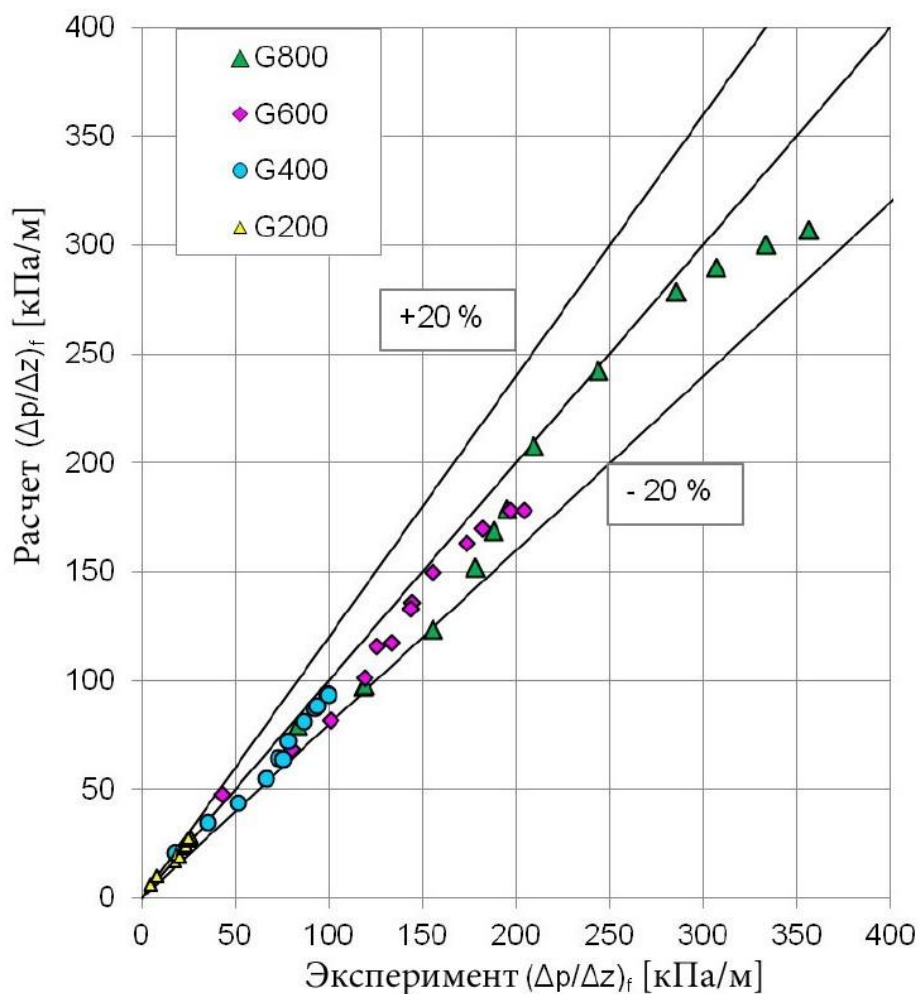


Рис. 6. Величины падений давления при конденсации пропана в микросканалах, $d_r = 0,96$ [24]

Не менее сложные процессы протекают при кипении жидкостей в микросканалах [4,5, 25, 26].

Размер канала оказывает существенное влияние на характер парообразования при кипении жидкости в потоке. При этом основную роль играют силы инерции, вязкость и поверхностное натяжение жидкости. В зависимости от геометрии канала, свойств жидкости и условий осуществления процесса наблюдаются различные режимы течения двухфазного потока при кипении в микроканале: пузырьковый, снарядный и кольцевой. Образующиеся паровые пузыри ограничены стенками канала и поэтому растут вдоль него, что способствует повышению давления в канале. На возникновение колебаний давления также оказывают влияние флуктуации плотности двухфазного потока. Отношение длины канала к его диаметру больше 150 определяет границу возникновения колебаний давления [26,27]. Последние в свою очередь приводят к изменениям массового расхода в канале. Когда же давление в канале превысит давление на входе в канал, возникает реверс потока и парожидкостная смесь выбрасывается во входной коллектор. Реверс потока проявляется при больших плотностях теплового потока и малых массовых расходах жидкости [26]. Микросканальный испаритель может включать в себя более сотни каналов. Описанные явления приводят к неравномерному распределению жидкости по каналам и снижению эффективности испарителя.

Применительно к технике низких температур микросканальные испарители еще не созданы. Для решения этой задачи необходимо решить проблему равномерного распределения жидкости по каналам и определить параметры устойчивой работы испарителя в зависимости от геометрии каналов, условий осуществления процесса кипения и свойств каждого хладагента.

На сегодняшний момент накоплен большой массив результатов фундаментальных теоретических и экспериментальных исследований теплогидродинамических процессов при фазовых переходах

различных хладагентов в миниканалах [7, 8, 9, 10, 13]. В том числе составлены карты режимов течение двухфазных потоков различных рабочих веществ в каналах малых размеров.

Для более широкого применения микроканальных теплообменников в холодильной технике необходимы дальнейшие фундаментальные исследования. Следует изучить динамику двухфазных потоков и теплообмен в миниканалах новых сечений, например эллипсовидных и трапециевидных. Новые конструкции секций из пластин с миниканалами возможно позволят повысить компактность аппаратов и увеличить теплосъём с единицы объёма. Крайне мало исследований по изучению влияния находящегося в хладагенте масла на теплодинамические характеристики процессов в миниканалах при фазовых переходах.

Решение проблем воздействия холодильной техники на среду обитания, обусловленных разрушением хладагентами озонового слоя Земли и созданием парникового эффекта, привело к постоянному поиску новых холодильных агентов с приемлемыми потенциалами парникового эффекта и разрушения озонового слоя. Пока сложно сказать, какие из предлагаемых хладагентов получают широкое распространение взамен попавших под ограничение и вывод из обращения в соответствии с Монреальским и Киотским протоколами, а также поправкам к ним. Всесторонние исследования влияния новых рабочих веществ на эффективность холодильных систем и их отдельных элементов, позволят определиться с перечнем хладагентов, которые наиболее перспективны. Данные исследования должны быть направлены, в том числе, и на изучение процессов с новыми хладагентами при фазовых переходах в миниканалах.

Для создания микроканальных испарителей холодильных систем первоочередной задачей, как уже было отмечено, является решение проблемы равномерного распределения жидкого хладагента по миниканалам.

Широкое применение микроканальных теплообменников в холодильных системах с различными хладагентами позволит улучшить их технические и экологические характеристики, такие как компактность, энергоэффективность, сокращение заправки рабочего вещества.

Список литературы (References)

1. Бараненко А.В. Холод в глобальном мире. Холодильная техника, 2013, №3, с. 4-9.
2. Накоряков В.Е., Кузнецов В.В. Теплообмен при фазовых переходах и химических превращениях в микроканальных системах. Труды Четвертой Российской национальной Конференции по теплообмену. В 8 томах. Том 1: Пленарные и общие проблемные доклады. // Изд. Дом МЭИ. 2006. – 350с.
3. Минаков А.В., Лобанов А.А., Дектерев А.А. Моделирование гидродинамики и конвективного теплообмена в микроканалах. Вычислительная механика сплошных сред, 2012, Т.5, № 4, с.481-488.
4. Y.R.Thome, V.Dupont, A.M. Yacobi. Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part 1: presentation of the model. International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004), p. 3375-3385.
5. Y.R.Thome, V.Dupont, A.M. Yacobi. Heat transfer model for evaporation in microchannels. Part II: comparison with the database. International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004), p. 3387-3401.
6. Chang Youg Park, Pega Hrnjak. CO₂ flow condensation heat transfer and pressure drop in multi-port microchannels at low temperatures. International Journal of Refrigeration 32 (2009), p. 1129-1139.
7. A.Cavallini, D. Del Col, L. Rossetto. Heat transfer and pressure drop of refrigerants in minichannels (low charge equipment). International Journal of Refrigeration 36 (2013), p. 287-300.

8. M.M. Awad, A.S. Dalkilic, S. Wongwises. A Critical Review on Condensation Heat Transfer in Microchannels and Minichannels. *Journal of Nanotechnology in Engineering and Medicine*, February 2014, Vol. 5.
9. Satish G.Kandlikar, Stephane Colin, Yoav Peles, Srinivas Garimella, R. Fabian Pease, Juergen J. Brandner, David B. Tuckerman. Heat Transfer in Microchannels—2012 Status and Research Needs. *Journal of Heat Transfer*. September 2013, Vol. 135.
10. Satish G.Kandlikar, Srinivas Garimella, Dongqing Li, Stephane Colin, Michael R. King. Heat Transfer and Fluid Flow in Minichannels and Microchannels. 2006 Elsevier Ltd. ISBN: 0-0804-4527-6.
11. Radermachev Reinhrd. *Ausblick auf die Kalte-Klima-Wärmepumpen Technik*. Chillventa Cougvesing, Nuremberg, 2014.
12. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах. // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. С. 3-12.
13. Малышев А.А., Мамченко О.В, Мизин В.М. и др. Перспективные типы испарителей холодильных машин // Вестник Международной академии холода. 2013. №2.
14. Марк Скаер. Стремление к сверхэффективности. // TheNews. Air Conditioning, Heating, Refrigeration. - 2008 г. - №10 [Электронный ресурс] www.acrnews.com
15. Хомутский Ю. Микроканальные теплообменники // Мир климата. –2011- №66. [Электронный ресурс] www.mir-klimata.ru
16. Шишов В.В., Клоков М.Ю. Веселков С.И. Алюминиевые теплообменники – микроканальная технология. //Сантехника. Отопление. Кондиционирование. - 2007 г. - №2.
17. Microchannel technology. More efficient, compact and corrosion resistant technology for air cooled chiller application./ Carrier Corp., NY, 2006.
18. Danfoss microchannel heat exchangers. Product brochure. www.danfoss.com
19. Johnson, M., Hrnjak, P., Investigation of Microchannel Heat Exchangers. UIUC ACRC technical report, 2009.
20. Aluminium microchannels. Hydro product brochure. www.hydro.com.
21. Aluminium microchannel heat exchangers. Product brochure. Climalmetal S.A. www.climalmetal.com
22. Jaehyeok Heo, Hanvit Park, Rin Yun. Condensation heat Transfer and pressure drop characteristics of CO₂ in microchannel. *International journal of refrigeration* 36 (2013) 1657-1668
23. M.M. Awad, Y.S. Muzychka. A Robust Asymptotically Based Molding Approach For Two-Phase Flows. *Advances in Mechanical Engineering* Volume 2014, Article ID 327653. P. 1-10.
24. Davide DEL COL, Stefano BORTOLATO, Luisa ROSSETTO. Condensation Heat Transfer and Pressure Drop with Propane in Minichannel. *International Refrigeration and Conditioning Conference at Purdue*, July 16-19, 2012.
25. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах. // Вестник Международной академии холода. 2012. №1. С.3-10.
26. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах. // Холодильная техника. - 2013. – №10. – С.45-47.
27. Dolaana M. Khovalyg, Pega S.Hrnjak, Aleksandr V. Baranenko, Antony M. Jacobi. Interactions between parallel minichannels during flow boiling of R134A. *Proceeding of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluid Engineering Division Summer Meeting and 11th International Conference on Nanochannels, Microchannels, Minichannels. FEDSM2014 August 3-7, 2014, Chicago, Illinois, USA. FEDSM2014-22246.*