

УДК 621.56

Комплексные экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов кипящих хладагентов в мини- (микро) каналах

Канд. техн. наук **Малышев А.А.** maa-110@mail.ru

Киссер К.В. kisser90@list.ru

Куадио Коффи Фабрис fabkoffi2000@yahoo.fr

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В статье представлен обзор научных исследований теплогидродинамических характеристик при кипении рабочих веществ в мини- (микро) каналах. Определены преимущества миниканальных теплообменников с позиции энергоэффективности, надежности, массогабаритных характеристик. Рассмотрены методики проведения теплофизических экспериментов в мини- (микро) каналах с разными гидравлическими диаметрами и рабочими веществами, такими как R134a, R410A, водо-воздушные смеси и вода. В статье представлены схемы экспериментальных стендов как с мини-, так и с микроканалами для исследования режимов кипения, а также определения коэффициентов теплоотдачи. Показана целесообразность продолжения исследования теплообмена и гидродинамики в миниканалах, основываясь на комплексном подходе, включающем исследования режимов кипения, истинного паросодержания, локального теплообмена и перепадов давления. Представлена схема экспериментального стенда.

Ключевые слова: хладоносители; теплогидродинамические характеристики; кипение хладагентов; миниканальный теплообменник; экспериментальный стенд.

DOI:10.17586/2310-1148-2017-10-2/3-12-17

Complex pilot studies of heat hydrodynamic processes of the boiling coolants in mini-(micro) channels

Ph.D. Malyshev A.A. maa-110@mail.ru

Kisser K.V. kisser90@list.ru

Kouadio Koffi Fabrice fabkoffi2000@yahoo.fr

ITMO University

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

This article provides overview of scientific works on heat hydrodynamic characteristics during the boiling of refrigerants in mini-(micro) channels. The article shows also the advantages of the mini channels heat exchanges from the standpoint of energy efficiency, reliability, weight and size characteristics. The article describes methods for carrying out thermophysical experiments in mini (micro) channels with different hydraulic diameters and refrigerants, such as R134a, R410A, water-air mixtures and water. In the article the schemas of the experimental installations with mini channels, also with micro channels to study the boiling regimes and the heat transfer coefficients are presented. The expediency of continuing the study of heat transfer and hydrodynamic in the mini channels is shown, basing on complex approach, including studies of boiling regimes, true vapor content, local heat transfer, and pressure drops. The schema of the experimental stand is presented.

Keywords: coolants; teplogodinamicheskie characteristics; boiling of refrigerants; minicanal heat exchanger; experimental stand.

Энергосбережение, как основной тренд научно-технического процесса современности в значительной степени связан с вопросом создания новых типов теплообменного оборудования. Миниканальные испарители (в ряде работ микроканальные испарители) по мнению многих исследователей наиболее перспективны, как для энергетики, так и для холодильной техники.

Кипению различных рабочих веществ в мини- (микро) каналах посвящены исследования [1], [2], [3], [4], [11], [12], [14].

В работах [2], [4], [11], [12], [13], [14] экспериментально изучались теплогидродинамические характеристики при кипении воды, R134a в мини- (микро) каналах с гидравлическим диаметром от 0,2 до 1 мм.

П. Хрняк [2], изучал процессы кипения хладагентов R134a, R410A и водо-воздушные смеси в микрочаналах с гидравлическим диаметром канала 1 мм. В работах Д. Ховалыг и А.В. Бараненко [1] исследовалось кипение хладагента R134a в канале с гидравлическим диаметром $D_h = 0,5$ мм при положительных температурах. В этих работах были отмечены следующие преимущества микрочанальных технологий:

- высокий коэффициент теплоотдачи;
- высокая коррозионная стойкость, надежность;
- малый объем заправки рабочего вещества;
- малые габариты и масса теплообменника и т.д.

В работе [8] также было отмечено превышение интенсивности теплообмена при кипении в микрочаналах в 2÷4 раза по сравнению с теплоотдачей в трубах.

Между тем, наряду с высокой тепловой эффективностью микрочаналов, была выявлена область неустойчивого течения двухфазных потоков при значении массовой скорости $w_r < 160$ кг/(с·м²) [13], что сопровождалось резким возрастанием потерь давления и пульсации в канале. Это явление не отмечалось ни одним из исследователей кипения в трубах.

Для оценки полученных результатов следует рассмотреть методику проведенных экспериментов.

В исследованиях Шустова М.В. [11], [14] был проведен теплофизический эксперимент, при котором изучался теплообмен и режимы течения на экспериментальном стенде, представленном на рис. 1.

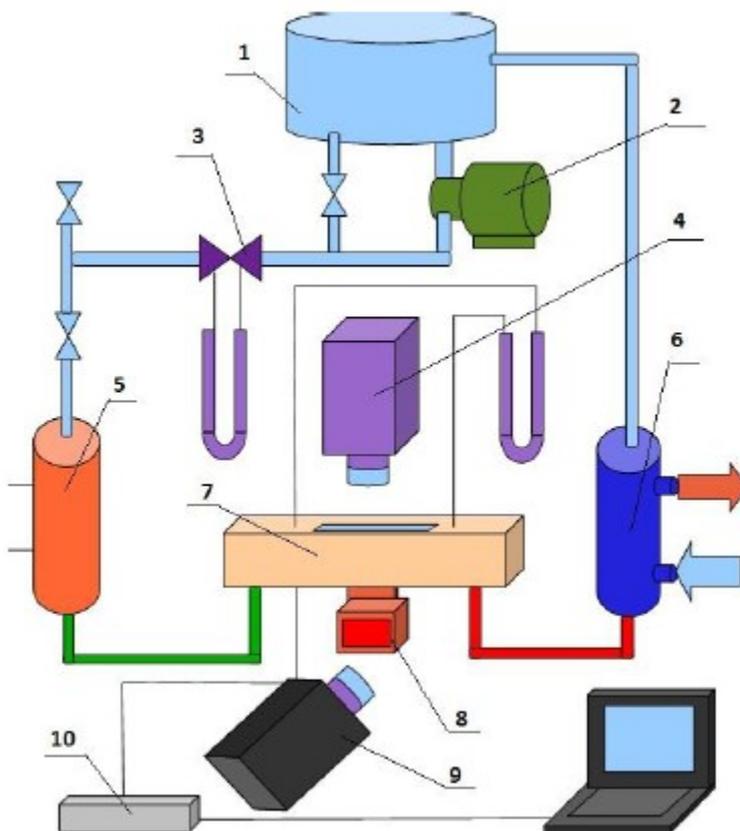


Рис. 1. Схема установки для исследования кипения в микроканале [14]
 1 – емкость с рабочей жидкостью; 2 – насос; 3 – расходомерное устройство;
 4 – скоростная видеокамера; 5 – предварительный нагреватель; 6 – конденсатор;
 7 – рабочий участок; 8 – медный блок с тепловым клином; 9 – тепловизор;
 10 – измерительный преобразователь напряжения

В работах [1], [12], [13] также был проведен теплофизический эксперимент, при котором определение коэффициента теплоотдачи сопровождалось лазерным просвечиванием потока и скоростной киносъемкой. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 2.

Из анализа литературных источников следует, что накоплен значительный экспериментальный материал, посвященный изучению процессов кипения различных жидкостей в мини- (микро) каналах. При этом в основном результаты исследований относятся к решению отдельных вопросов теплообмена либо гидродинамики. В частности, в [14] проводились исследования кипения воды в микрочаналах с величиной щелевого зазора $D_h = 0,2$ мм. При этом вода перед экспериментальным участком переохлаждалась на 80°С. В работах [1], [2] изучались

режимы кипения хладагентов, и теплоотдача, но в основном при положительных температурах. Полученные этими учеными данные, являются пионерскими, но не претендуют на возможность широкого общения в виду ограниченности режимных и геометрических параметров.

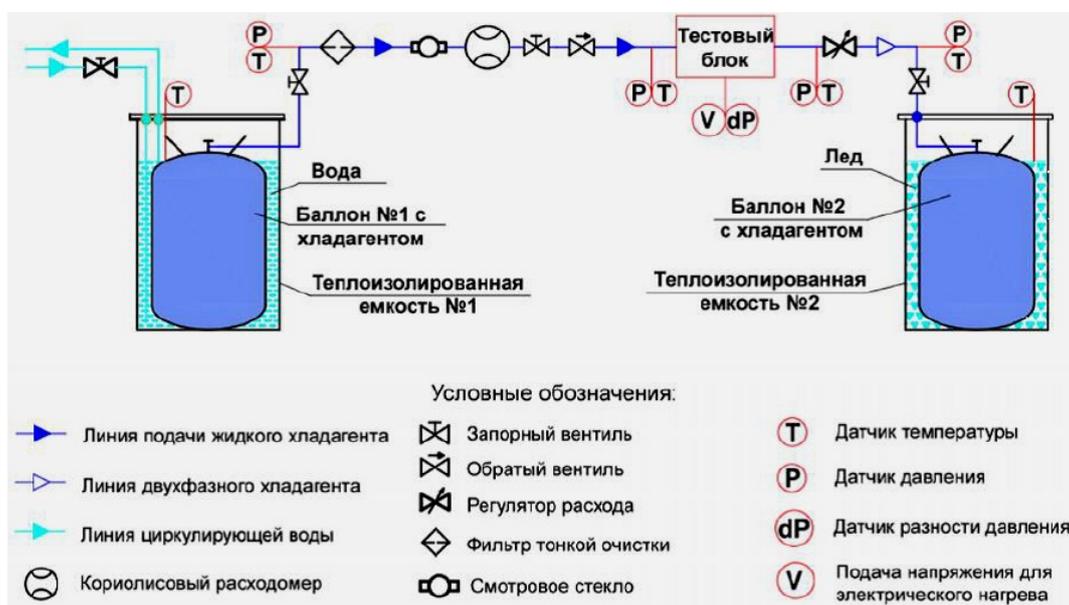


Рис. 2. Схема экспериментального стенда [1]

В работах [5], [7], [9], [6] основываясь на изучении процессов кипения хладагентов в трубах [1], были разработаны основы комплексного подхода к исследованию и моделированию теплогидродинамических процессов в трубах и миканалах. Комплексный метод включает: разработку методики прогнозирования режимов течения, методику расчета скольжения фаз, локального теплообмена с учетом режимов течения и истинных скоростей фаз.

Реализация комплексного метода, помимо проведенной расчетно-теоретической проработки, требует экспериментальной апробации в широком диапазоне температур, скоростей, геометрических параметров и кроме того необходимо уточнение вопроса устойчивости двухфазного потока в миканале и потерь давления.

Для этих целей был спроектирован экспериментальный стенд (рис. 3), состоящий из контура хладагента, хладоносителя и вспомогательной холодильной машины.

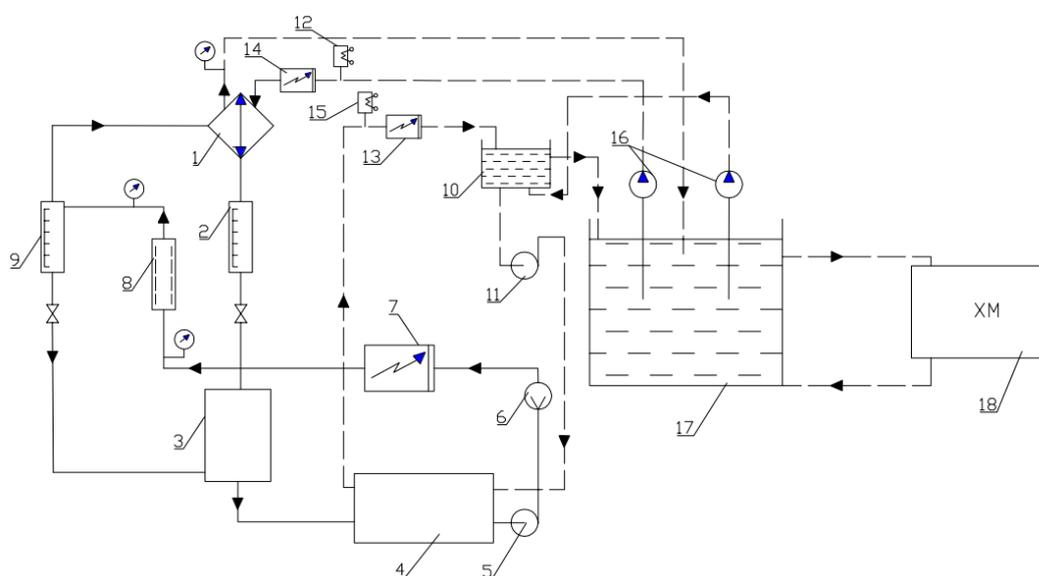


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

- 1 – конденсатор; 2 – мерная емкость; 3 – ресивер; 4 – переохладитель; 5 – фреоновый насос;
 6 – расходомер; 7 – парогенератор; 8 – экспериментальный участок; 9 – мерная емкость;
 10 – термостат; 11 – рассольный насос; 12, 15 – контактные термометры;
 13, 14 – электронагреватели; 16 – погружные насосы; 17 – термостат; 18 – холодильная машина

Перед экспериментальным участком 8 расположен парогенератор 7, в котором за счет электронагрева задается начальное паросодержание $x_{вх}$. Пройдя экспериментальный участок двухфазный поток направляется в мерную емкость 9, в которой фазы разделяются: паровая направляется в конденсатор 1, а жидкость стекает в ресивер 3. В мерной емкости 9 объемным методом измеряется расход жидкой фазы. В конденсаторе 1 располагается нагреватель 14 включенный в цепь контактного термометра 12. Температура конденсации (равна температуре кипения) регулируется ступенчато с помощью электронагрева и подачи холодного хладоносителя из бака-аккумулятора 17. Количество конденсата определяется объемным методом с помощью мерной емкости 2. Конденсат стекает в ресивер 3, а затем насосом 5 через расходомер 6 подается в парогенератор 7. Чтобы не допустить подкипания в трубопроводах и насосе жидкость слегка переохлаждается в переохладителе 4.

На рисунке 4 представлена схема экспериментального блока, состоящего из внутренней стальной трубы 2 и наружной прозрачной 1, между центрами образован миниканал с величиной зазора $D_h = 0,5 \div 1$ мм. Участок Б является участком гидродинамической стабилизации, а изолированная от участка Б часть трубы А – измерительным. На измерительном участке за счет электронагрева задается плотность теплового потока и измеряются температура стенки, на основании которых определяются коэффициенты теплоотдачи. На экспериментальном блоке так определяются режимы течения и методом отсечек определяются истинное паросодержание. Визуализация сопровождается скоростной видеосъемкой.

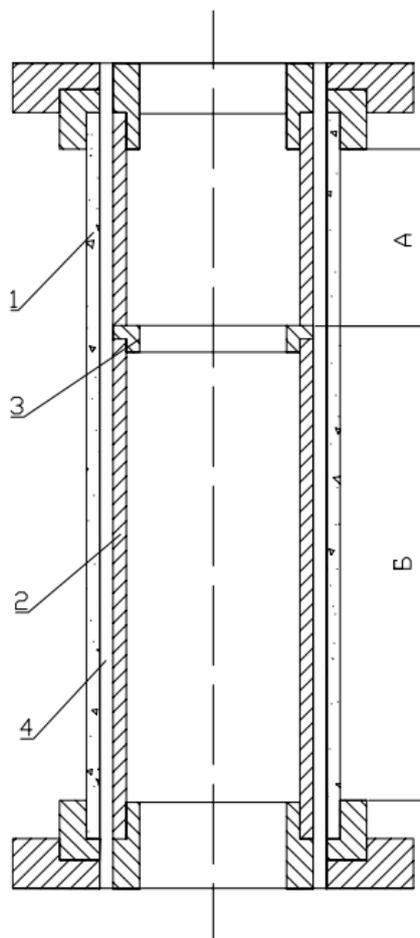


Рис. 4. Схема экспериментального блока

1 – прозрачная трубка, 2 – стальная трубка, 3 – прокладка, 4 – миниканал,
А – тепловой участок, Б – участок гидродинамической стабилизации

Заключение

Предполагаемый экспериментальный стенд дает возможность применять комплексный метод к исследованию теплогидродинамических характеристик двухфазных потоков в миниканалах. Возможность стенда позволяет обобщить широкий диапазон данных, необходимых для создания универсальной модели парожидкостных течений в мини- (микро) каналах.

Литература

1. Khovalyg, D.M., Baranenko, A.V. Two phase flow dynamics during boiling of R134a refrigerant in minichannels. // *Technical Physics*. 2015. Vol. 85. No 3. p. 34-41.
2. V.G. Niño, P.S. Hrnjak and T.A. Newell Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // ACRC TR-202, October 2002
3. Козулин И.А., Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С. Режимы течения и теплоотдача при кипении в микроканалах различной ориентации // *Интерэкспо Гео – Сибирь*. Выпуск № 2, том 5, 2011 г.
4. Кузнецов В.В., Шамирзаев А.С. Режимы течения и теплообмена при кипении движущегося хладагента R318с в кольцевом миниканале // *Теплофизика и аэромеханика*, 2007, том 4, № 1. с. 57 – 65.
5. Мальшев А.А., Киссер К.В. Разработка карты режимов кипения R134a, R12, R22, NH₃, водо-воздушных смесей и воды в каналах диаметром 6 мм // *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование»*. 2015. № 4. С. 46–51.
6. Мальшев А.А., Киссер К.В., Зайцев А.В. Истинные параметры кипящих хладагентов в трубах и каналах // *Вестник Международной академии холода*. 2017. № 2. С. 53–56.
7. Мальшев А.А., Киссер К.В., Филатов А.С. Новые методы прогнозирования режимов течения кипящих хладагентов в макро- и миниканалах // *Вестник Международной академии холода*. 2016. № 2. С. 67–70.
8. Мальшев А.А., Мамченко В.О., Киссер К.В. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков хладагентов: Учеб. - метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 116с.
9. Мальшев А.А., Мамченко В.О., Киссер К.В. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков хладагентов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 116 с.
10. Пекарев В.И., Дзино А.А. Испытания одноступенчатой холодильной машины: Метод. указания к лабораторной работе для студентов спец. 140401, 140504, 190603, 260601, 080502. СПб: СПбГУНиПТ, 2009. – 17с.
11. Сузуки К., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В., Чурсин П.С. Исследование теплообмена и гидродинамики при кипении недогретой воды в канале малого диаметра // *Тепловые процессы в технике*. 2012. № 7. С. 307–311.
12. 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.
13. Ховалыг Д.М., Бараненко А.В. Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах. // *Холодильная техника*. 2013. №10. С.45–47.
14. Шустов М.В. Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц. Автореферат диссертации на соискание кандидата технических наук. 2015г.

References

1. Khovalyg, D.M., Baranenko, A.V. Two phase flow dynamics during boiling of R134a refrigerant in minichannels. // *Technical Physics*. 2015. Vol. 85. No 3. P. 34-41.
2. V.G. Niño, P.S. Hrnjak and T.A. Newell Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // ACRC TR-202, October 2002
3. Kozulin I.A., Kuznetsov V.V., Shamirzayev A. S. The modes of a current and a thermolysis when boiling in microchannels of various orientation // *Interekspo of Geo – Siberia. Release No. 2, volume 5, 2011 of*.
4. Smiths V. V., Shamirzayev A. S. The modes of a current and heat exchange when boiling moving R318c freon in the ring minichannel // *Thermophysics and aeromechanics*, 2007, volume 4, No. 1. P. 57 – 65.
5. Malyshev A.A., Kisser K.V. Development of the card of the modes of boiling of R134a, R12, R22, NH₃, air-and-water mixes and water in channels with a diameter of 6 mm // *the NIU ITMO Scientific magazine. "Refrigerating Equipment and Conditioning" series*. 2015. No. 4. P. 46-51.
6. Malyshev A.A., Kisser K.V., Zaytsev A.V. True parameters of the boiling coolants in pipes and channels // *the Bulletin of the International academy of cold*. 2017. No. 2. P. 53-56.
7. Malyshev A.A., Kisser K.V., Filatov Ampere-second. New methods of forecasting of the modes of a current of the boiling coolants in macro - and minichannels // *the Bulletin of the International academy of cold*. 2016. No. 2. P. 67-70.
8. Malyshev A.A., Mamchenko V.O., Kisser K.V. Heat exchange and hydrodynamics of two-phase streams of coolants: Studies. - method. grant. SPB.: ITMO university, 2016. 116 p.
9. Malyshev A.A., Mamchenko V.O., Kisser K.V. Heat exchange and hydrodynamics of two-phase streams of coolants: Studies. - a method. grant. SPb.: ITMO university, 2016. 116 p.
10. Pekarev V.I., Dzino A.A. Tests of the one-stage refrigerator: Method. instructions to laboratory work for students special 140401, 140504, 190603, 260601, 080502. SPb: СПбГУНиПТ, 2009. – 17 p.

11. Suzuki K., Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M.V., Chursin P. S. A research of heat exchange and hydrodynamics when boiling nedogrety water in the channel of small diameter // *Thermal processes in the equipment*. 2012. No. 7. P. 307-311.
12. Khovalyg D.M., Baranenko A.V. Methods of calculation of a gradient of pressure of a two-phase stream at a current in small channels. // *Bulletin of the International academy of cold*. 2012.-№1. P. 3-10.
13. Khovalyg D.M., Baranenko of A.V. Neustoychivosti of a two-phase current of substances when boiling in microchannels. // *Refrigerating equipment*. 2013. No. 10. P. 45-47.
14. Shustov M.V. A boiling research in the microchannel with a covering from nanoparticles. The abstract of the thesis on a competition of Candidate of Technical Sciences. 2015.

Статья поступила в редакцию 21.06.2017 г.