

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ КИПЕНИИ ХЛАДАГЕНТОВ В МИНИКАНАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСТИННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФАЗ

А. А. Малышев, А. В. Зайцев, К. Ф. Куадио, К. В. Киссер

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики,
Россия, 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Данная работа посвящена развитию комплексного метода расчета теплогидродинамических характеристик двухфазных потоков с учетом специфики течения в миниканалах. В основу предлагаемого подхода заложена методология расчета истинного объемного паросодержания и прогнозирование режимов течения двухфазных потоков. В работе представлены экспериментальные данные по истинному объемному паросодержанию и модифицированная карта режимов течения.

Ключевые слова: миниканал, двухфазный поток, устойчивое течение, истинное объемное паросодержание, режим течения, диаграмма режимов течения, критерий Фруда, критерий Вебера.

Введение

В настоящее время миниканальные технологии являются одним из «прорывных» направлений теплообменного аппаратостроения. В частности, в [1] отмечается, что миниканалы начинают широко применяться в новых типах паровых котлов и тепловых насосов, аппаратах водородной энергетики и химических технологий, в криогенной и холодильной технике. Активно развивается направление по созданию компактных миниканальных теплообменников для компьютерных систем.

Особый интерес представляют миниканальные технологии в аппаратах с фазовыми переходами рабочих веществ [1–5].

Коэффициент теплоотдачи в миниканалах в 2–3 раза превышает аналогичный показатель в щелевых каналах пластинчатых аппаратов [6], а уровень заправки рабочим веществом в 3–4 раза ниже. По сравнению с пластинчатыми теплообменниками аппараты с миниканалами имеют улучшенные массогабаритные характеристики, изготавливаются методом алюминиевого литья, обладают высокой прочностью и технологичностью.

Тем не менее расчет теплогидродинамических характеристик испарителей с кипением в миниканалах все еще является актуальной задачей теплофизики [7].

Установлено, что при разработке методологии расчета теплогидродинамических процессов в стесненном пространстве (в том числе и в миниканалах) одним из наиболее перспективных направлений является установление связи этих процессов с режимами двухфазных потоков с использованием истинных параметров фаз.

Целью данной работы является построение диаграммы режимов устойчивого течения двухфазных потоков в миниканалах на основе истинных параметров.

Развитие гидродинамической теории двухфазных течений в каналах

В [1, 7–12] были предложены методики расчета тепло-гидродинамических характеристик в стесненном пространстве, в том числе в трубах и щелевых каналах.

На основе анализа подходов, примененных авторами этих работ к анализу теплогидродинамических процессов, может быть использована следующая классификация каналов:

— миниканал — эквивалентный диаметр $D_h \leq 1,6$ мм;

— щелевой канал — $D_h = 1,6–3$ мм;

— труба (макрочанал) — $D_h > 4$ мм.

Методики расчета теплоотдачи и потерь давления в миниканалах приводятся в ряде работ. В частности, в [7] даны уравнения для вычисления коэффициентов теплоотдачи и потерь давления для двух режимов кипения хладагента R134a в миниканале с эквивалентным диаметром 0,568 мм при положительных температурах для диапазона массового паросодержания $x \geq 0,5$.

В качестве общего замечания ко всем уравнениям из вышеназванных источников следует отметить следующее:

— применение расчетных зависимостей в основном ограничено условиями проведенных экспериментов;

— отсутствует достаточно надежная и физически обоснованная методология прогнозирования режимов двухфазных потоков при том, что

в большинстве современных работ отмечается связь режимов с закономерностями теплообмена [13];

— во всех известных уравнениях были использованы расходные параметры фаз, которые, в отличие от истинных, имеют физический смысл в ограниченном диапазоне режимных параметров.

С целью дальнейшего развития гидродинамической теории двухфазных течений в трубах и каналах авторами данной статьи предложен комплексный подход, основные положения которого впервые изложены в [14]. В дальнейшем методология комплексного подхода была развита и дополнена в [6, 8, 11, 13, 15].

Метод основан на использовании истинного объемного паросодержания и истинных скоростей фаз при расчете локальной теплоотдачи для различных режимов и построении карты режимов [6, 13].

В [6] была получена зависимость для расчета истинного паросодержания, обобщающая экспериментальные данные различных авторов. В основу расчетной методики был заложен метод [8], использованный для обработки данных при кипении хладагентов R12 и R22 в горизонтальных трубах, а также результаты экспериментов [2, 4] для воды, хладагентов R134a, R410c и водовоздушных потоков, а также в миниканалах с $D_h = 1,6$ мм.

С учетом положений теории термодинамического подобия предлагаемая методика в первом приближении может быть также использована для метана и пропана.

Специфика кипения в миниканалах учитывалась в результате использования критерия Вебера, включающего силы поверхностного натяжения, в отличие от принятых методов расчета кипения в трубах [8], где определяющими скольжение фаз являются силы инерции.

Применяя критерий Вебера

$$We = \frac{\rho' D_h w_{cm}^2}{\sigma} \quad (1)$$

в модифицированной зависимости для истинного объемного паросодержания ϕ в безразмерных параметрах [6], получаем

$$\phi = \beta - 0,06\beta(1 - \beta)^{0,5} \left[\frac{\sigma We}{g d_n^2 \rho'} \right] / Re_{cm}^{-0,23} \left(\frac{P_0}{P_k} \right)^{-0,15}, \quad (2)$$

где ρ' — плотность жидкости, кг/м³.

Результаты расчета по уравнению (2) свидетельствуют об удовлетворительном согласовании с экспериментами на миниканалах $D_h = 1$ мм и $D_h = 1,6$ мм [4]. Для условий течения в миниканалах с эквивалентным диаметром менее 1 мм требуется дополнительная экспериментальная проработка.

С использованием уравнения (2) была разработана модифицированная диаграмма режимов $\phi - Fr_{cm}$ [13]. Диаграмма с удовлетворительной точностью обобщает данные по кипению R134a,

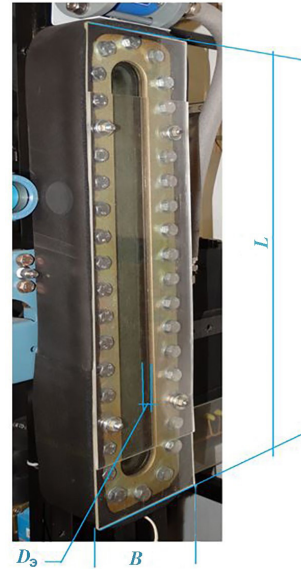


Рис. 1. Конструкция экспериментального блока
 Fig. 1. The experimental unit design

R12, R22, NH₃ в трубах с D_h более 5 мм, а также данные [7] для R134a, кипящего в миниканале с $D_h = 0,565$ мм при массовых скоростях менее 100 кг/(с·м²).

Следует отметить, что, согласно [7], устойчивое течение в миниканалах имеет место при w более 160 кг/(с·м²), а при меньших значениях массовой скорости наблюдаются реверс потока, пульсации и гидродинамическая неустойчивость.

Таким образом, актуальной задачей является разработка комплексной методологии теплогидродинамического анализа двухфазных потоков для миниканалов при массовых скоростях, обеспечивающих устойчивое течение.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились на стенде, схема которого представлена в [16].

Схема экспериментального блока представлена на рис. 1.

Вертикальный миниканал экспериментального блока с величиной зазора $D_0 = 0,5$ мм, длиной $L = 700$ мм и шириной $B = 70$ мм был образован двумя пластинами. Одна из пластин была выполнена из стали, другая — из стекла, что давало возможность проводить визуальные наблюдения и идентифицировать режимы течения. На входе и выходе экспериментального блока расположены быстродействующие соленоидные вентили, «мертвый» объем которых (по жидкости не подлежащей измерению) составляет 3% от общего объема участка целевого канала.

Опыты проводились на хладагенте R134a при следующих условиях:

- адиабатные потоки;
- температуры насыщения от $-10... +20$ °C;
- массовые скорости w 100...500 кг/(с·м²);
- массовое расходное паросодержание $x = 0,1...0,9$.

В процессе экспериментов объемным методом измерялись расход жидкости, скорость потока на входе в экспериментальный участок, количество

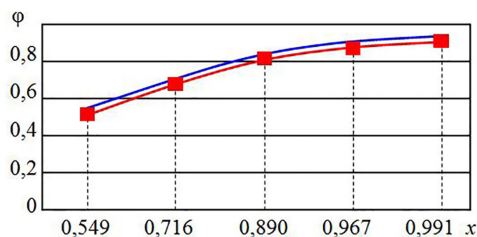


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных с расчетом по формуле [2]:

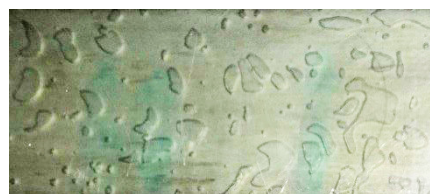
ϕ — истинное объемное паросодержание;
 x — массовое паросодержание;
 $D_h = 0,5$ мм; R134a; $t = -8$ °C;
 $w_p = 450$ кг/(с·м²) = const;
 — расчет; — эксперимент

Fig. 2. Comparison of experimental data calculated by the formula [2]:

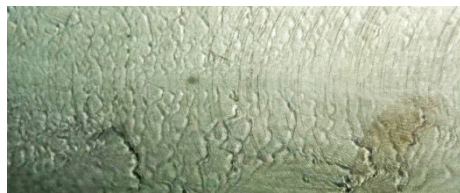
ϕ — true volumetric vapor quality;
 x — mass vapor quality;
 $D_h = 0,5$ mm; R134a; $t = -8$ °C;
 $w_p = 450$ kg/(s·m²) = const;
 — calculation; — experiment



а



б



в



г

Рис. 3. Съемки режимов течения двухфазных потоков:

а — пузырьковый; б — снарядный; в — переходный; г — кольцевой

Fig. 3. Snapshots of flow regimes of two-phase flows:

а — bubble; б — slag; в — transitional; г — annular

сконденсировавшегося пара (пар образовывался в парогенераторе и поступал в экспериментальной блок), мощность нагревателя в парогенераторе, перепады давления при прохождении двухфазного потока через экспериментальный блок, истинное объемное паросодержание (методом отсечки потока).

Результаты экспериментального исследования истинного объемного паросодержания представлены на рис. 2. На этом же рисунке приведены результаты расчета по уравнению (2).

Представленные данные свидетельствуют о вполне удовлетворительном согласовании опытных и расчетных данных, что может являться рекомендацией к использованию уравнения (2)

для вычисления истинных параметров жидкостей, кипящих в миканалах.

Идентификация режимов течения двухфазных потоков производилась на основе визуальных наблюдений и фотографирования потока. Характеристика наблюдаемых режимов (рис. 3) качественно согласуется с результатами [1, 10, 15].

Для разработки методики прогнозирования режимов течения хладагентов, кипящих в миканалах, за основу была взята модифицированная диаграмма режимов [13]. В этой диаграмме, полученной с использованием координат $\phi - Fr_{cm}$, с достаточной точностью были обобщены экспериментальные данные по кипению различных рабочих веществ в трубах диаметром 6–10 мм,

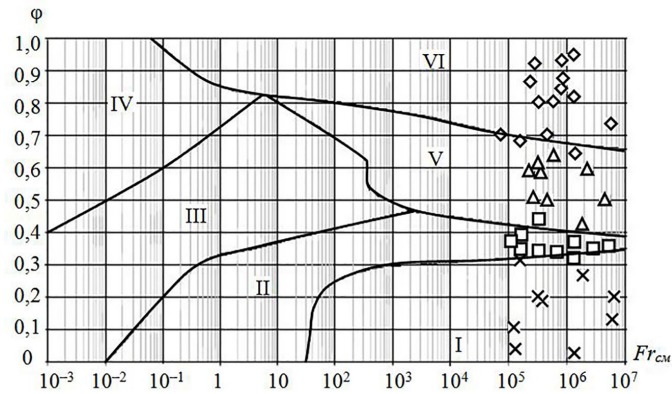


Рис. 4. Модифицированная карта режимов кипения хладагентов R134a, R22, R12, NH₃ при $D_h = 0,5-1,6$ мм и значениях $w\rho = 50-500$ кг/(с·м²):
Режимы: I — пузырьковый (x); II — снарядный (□);
III — волновой; IV — расслоенный;
V — переходный (Δ); VI — кольцевой (◇)
Fig. 4. Modified map of boiling regimes of refrigerants R134a, R22, R12, NH₃ when $D_h = 0,5-1,6$ mm and $w\rho = 50-500$ kg/(s·m²):
Modes: I — bubble (x); II — slag (□);
III — wavy; IV — stratified;
V — transitional (Δ); VI — annular (◇)

а также в миканалах с $D_h = 0,56-1,6$ мм при массовых скоростях менее 100 кг/(с·м²).

Диаграмма режимов [13] была дополнена результатами экспериментов, полученных при массовых скоростях в диапазоне $200-500$ кг/(с·м²).

В представленной на рис. 4 диаграмме, по сравнению с известной диаграммой [13], расширен диапазон значений критериев $Fr_{cm} = 10^4-10^7$, что наиболее характерно для области устойчивого течения в миканалах. Модифицированная диаграмма вполне удовлетворительно описывает результаты экспериментов.

Заключение

1. Полученные в данной работе результаты экспериментальных исследований истинного объемного паросодержания и режимов течения двухфазных потоков жидкостей, кипящих в миканалах, позволяют применить ранее разработанный комплексный метод расчета теплогидродинамических процессов в стесненном пространстве [6, 8, 12] для моделирования аналогичных процессов в миканалах.

2. Полученные результаты позволяют продолжить разработку общей модели течения кипящих жидкостей в стесненном пространстве.

Список источников

1. Шамирзаев А. С. Режимы течения и теплообмен при кипении движущихся хладонов в миканалах: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2007. 105 с.
2. Шустов М. В. Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 119 с.

3. 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. DOI: 10.1134/S1063784215030123.

4. Niño V. G., Hrnjak P. S., Newell T. A. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // ACRC TR-202, October, 2002.

5. Козулин И. А., Кузнецов В. В., Шамирзаев А. С. Режимы течения и теплоотдачи при кипении в микроканалах различной ориентации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 5, № 2. С. 136–141.

6. Малышев 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. Ховалыг Долаана Маадыр-Ооловна. Закономерности динамики двухфазных потоков и теплообмена при кипении хладагента R134a в микроканалах: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 149 с.

8. Малышев А. А., Азарсков В. М. Исследование локальных теплогидродинамических характеристик двухфазного горизонтального потока R12 // Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации. Рига, 1982. С. 114–116.

9. Сеницына К. М., Зайцев А. В., Бараненко А. В. Аналитическая модель конденсации в миканалах // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 66–72.

10. Kuznetsov V. V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // 14th International Heat Transfer Conference, IHTC 14. 8. 2010. DOI: 10.1115/IHTC14-22570.

11. Малышев А. А., Киссер К. В., Fabrice K. K. Local Heat Transfer by simmering the tube // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. В 2 ч. СПб.: Изд-во ИТМО, 2015. Ч. 1. С. 162–164. ISBN 978-5-7577-0511-8.

12. Чиннов Е. А., Кабов О. А. Двухфазные течения в трубах и капиллярных каналах // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, вып. 5. С. 777–795.

13. Малышев 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.

14. Малышев А. А. Локальные теплогидродинамические характеристики двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах: дис. ... канд. техн. наук. Ленинград, 1982. 208 с.

15. Кузнецов В. В., Шамирзаев А. С. Режимы течения и теплообмен при кипении движущегося хладона R318С в кольцевом миниканале // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14, № 1. С. 57–66.

16. Малышев А. А., Киссер К. В., Фабрис К. К. Комплексные экспериментальные исследования теплогидродинамических процессов кипящих хладагентов в мини-(микро) каналах // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Холодильная техника и кондиционирование. 2017. № 2. С. 12–17. DOI:10.17586/2310-1148-2017-10-2/3-12-17.

МАЛЫШЕВ Александр Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент факультета низкотемпературной энергетики.

SPIN-код: 1895-7245

AuthorID (РИНЦ): 185420

ЗАЙЦЕВ Андрей Викторович, кандидат технических наук, доцент факультета низкотемпературной энергетики.

SPIN-код: 1652-6922

AuthorID (РИНЦ): 200047

ORCID: 0000-0003-0677-6320

ResearcherID: E-1700-2017

КУАДИО Коффи Фабрис, аспирант факультета низкотемпературной энергетики.

КИССЕР Кристина Владимировна, аспирантка факультета низкотемпературной энергетики.

Адрес для переписки: zai_@inbox.ru

Для цитирования

Малышев А. А., Зайцев А. В., Куадио К. Ф., Киссер К. В. Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик при кипении хладагентов в миниканалах с использованием истинных параметров фаз // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2019. Т. 3, № 2. С. 44–50. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-44-50.

Статья поступила в редакцию 20.03.2019 г.

© А. А. Малышев, А. В. Зайцев, К. Ф. Куадио, К. В. Киссер

EXPERIMENTAL RESEARCH OF HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS DURING BOILING OF REFRIGERANTS IN MINICHANNELS USING TRUE PARAMETERS OF PHASES

A. A. Malyshev, A. V. Zaitsev, K. F. Kuadio, K. V. Kisser

Saint Petersburg National Research University
of Information Technologies, Mechanics and Optics,
Russia, Saint Petersburg, Kronverkskiy Ave., 49, 197101

This paper is devoted to the development of an integrated method for calculating heat hydrodynamic characteristics of two-phase flows taking into account the specificity of the flow in minichannels. The proposed approach is based on the methodology for calculating the true volumetric vapor quality and the prediction of two-phase flow regimes. The paper presents experimental data on true volumetric vapor quality and a modified map of flow regimes.

Keywords: minichannel, two-phase flow, steady flow, true volumetric vapor quality, flow regime, diagram of flow regimes, Froude criterion, Weber criterion.

References

1. Shamirzayev A. S. Rezhimy techeniya i teploobmen pri kipenii dvizhushchikhsya khladonov v minikanalakh [Flow regimes and heat transfer during boiling of moving refrigerants in minichannels]. Novosibirsk, 2007. 105 p. (In Russ.).
2. Shustov M. V. Issledovaniye kipeniya v mikrokanale s pokrytiyem iz nanochastits [The study of boiling in a microchannel coated with nanoparticles]. Moscow, 2015. 119 p. (In Russ.).
3. 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. DOI: 10.1134/S1063784215030123. (In Engl.).
4. Niño V. G., Hrnjak P. S., Newell T. A. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // ACRC TR-202, October, 2002. (In Engl.).
5. Kozulin I. A., Kuznetsov V. V., Shamirzayev A. S. Rezhimy techeniya i teplootdachi pri kipenii v mikrokanalakh razlichnoy orientatsii [Flow pattern and heat transfer at flowboiling in microchannels with different orientation] // Interekspo Geo-Sibir'. *Interexpo GEO-Siberia*. 2011. Vol. 5, no. 2. P. 136–141. (In Russ.).
6. Malyshev A. A., Kisser K. V., Zaytsev A. V. Istinnyye parametry kipyashchikh khladagentov v trubakh i kanalakh [True parameters of boiling refrigerants in tubes and channels] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2017. No. 2. P. 53–56. (In Russ.).
7. Khovalyg Dolaana Maadyr-Oolovna. Zakonomernosti dinamiki dvukhfaznykh potokov i teploobmena pri kipenii khladagenta R134a v mikrokanalakh [Regularities of the dynamics of two-phase flows and heat transfer during boiling of refrigerant R134a in microchannels]. St. Petersburg, 2013. 149 p. (In Russ.).
8. Malyshev A. A., Azarskov V. M. Issledovaniye lokal'nykh teplogidrodinamicheskikh kharakteristik dvukhfaznogo gorizontaln'nogo potoka R12 [Investigation of local thermohydrodynamic characteristics of a two-phase horizontal flow R12] // Teplofizika i gidrodinamika protsessov kipeniya i kondensatsii. *Teplofizika i gidrodinamika protsessov kipeniya i kondensatsii*. Riga, 1982. P. 114–116. (In Russ.).
9. Sinitsyna K. M., Zaytsev A. V., Baranenko A. V. Analiticheskaya model' kondensatsii v minikanalakh [Analytical model of condensation in minichannels] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2016. No. 1. P. 66–72. (In Russ.).
10. Kuznetsov V. V. Heat and Mass Transfer with Phase Change and Chemical Reactions in Microscale // 14th International Heat Transfer Conference, IHTC 14. 8. 2010. DOI: 10.1115/IHTC14-22570. (In Engl.).
11. Malyshev A. A., Kisser K. V., Fabrice K. K. Local Heat Transfer by simmering the tube // Nizkotemperaturnyye i pishchevyye tekhnologii v XXI veke. *Refrigeration and Food Technologies in the 21st Century*. In 2 Parts. St. Petersburg: ITMO Publ., 2015. Part 1. P. 162–164. ISBN 978-5-7577-0511-8. (In Russ.).
12. Chinnov E. A., Kabov O. A. Dvukhfaznyye techeniya v trubakh i kapillyarnykh kanalakh [Two-phase flows in pipes and capillary channels] // Teplofizika vysokikh temperatur. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*. 2006. Vol. 44, Issue 5. P. 777–795. (In Russ.).
13. Malyshev A. A., Kisser K. V., Filatov A. S. Novyye metody prognozirovaniya rezhimov techeniya kipyashchikh khladagentov v makro- i minikanalakh [New methods of forecasting flow regimes for boiling refrigerant in macro- and minichannels] // Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2016. No. 2. P. 67–70. (In Russ.).
14. Malyshev A. A. Lokal'nyye teplogidrodinamicheskiye kharakteristiki dvukhfaznykh potokov khladagentov v gorizontaln'nykh trubakh [Local heat hydrodynamic characteristics of two-phase coolant flows in horizontal pipes]. Leningrad, 1982. 208 p. (In Russ.).
15. Kuznetsov V. V., Shamirzayev A. S. Rezhimy techeniya i teploobmen pri kipenii dvizhushchegosya khladona R318C v kol'tsevom minikanale [Flow patterns and flowboiling heat transfer of freon R318C] // Teplofizika i aeromekhanika. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2007. Vol. 14, no. 1. P. 57–66. (In Russ.).
16. Malyshev A. A., Kisser K. V., Fabris K. K. Kompleksnyye eksperimental'nyye issledovaniya teplogidrodinamicheskikh protsessov kipyashchikh khladagentov v mini-(mikro) kanalakh [Complex pilot studies of heathydrody-

amic processes of the boiling coolants in mini- (micro) channels] // Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Ser. Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye. *Scientific Journal NRU ITMO. Series «Refrigeration and Air Conditioning»*. 2017. No. 2. P. 12–17. DOI:10.17586/2310-1148-2017-10-2/3-12-17. (In Russ.).

MALYSHEV Aleksandr Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of Cryogenic Engineering Department.

SPIN-code: 1895-7245

AuthorID (RSCI): 185420

ZAITSEV Andrey Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Cryogenic Engineering Department.

SPIN-code: 1652-6922

AuthorID (RSCI): 200047

ORCID: 0000-0003-0677-6320

ResearcherID: E-1700-2017

KUADIO Koffi Fabris, Graduate Student of Cryogenic Engineering Department.

KISSER Kristina Vladimirovna, Graduate Student of Cryogenic Engineering Department.

Address for correspondence: zai_@inbox.ru

For citations

Malyshev A. A., Zaitsev A. V., Kuadio K. F., Kisser K. V. Experimental research of hydrodynamic characteristics during boiling of refrigerants in minichannels using true parameters of phases // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2019. Vol. 3, no. 2. P. 44–50. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-2-44-50.

Received 20 March 2019.

© A. A. Malyshev, A. V. Zaitsev, K. F. Kuadio, K. V. Kisser