

Посвящается 85-летию Института холода и биотехнологий Университета ИТМО

Эта работа является развитием всемирно-известной научной школы в области исследований теплообмена и гидродинамики при фазовых переходах хладагентов, созданной в первые послевоенные годы профессором Даниловой Галиной Николаевной

УДК 621.56

Новые методы прогнозирования режимов течения кипящих хладагентов в макро- и миниканалах

Канд. техн. наук А. А. МАЛЫШЕВ, К. В. КИССЕР¹, А. С. ФИЛАТОВ²

¹kisser90@list.ru, ²fil24725@yandex.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Существует достаточно большое количество карт режимов кипения двухфазных потоков хладагентов, однако они построены на основе расходных параметров. Параметры имеют ограниченный физический смысл, что не позволяет расширить область применения данных карт, а также не позволяет объединить данные по кипению в макро- и миниканалах. В статье представлена модифицированная карта режимов кипения двухфазных потоков построенная на основе истинных параметров фаз, которая обобщает данные для кипящих хладагентов R134a, R12, R22, R717, воды, а также адиабатных водо-воздушных смесей в каналах с внутренним диаметром $d_0 > 5$ мм, а также данные Д. Ховалыг при кипении хладагента R134a в миниканалах с гидравлическим диаметром $d_{\text{гкв}} = 538$ мкм. Введено в рассмотрение отношение (Fr/We) , учитывающее соотношение сил гравитации и сил поверхностного натяжения, которое в наибольшей степени учитывает переход режимов при течении в каналах малых эквивалентных диаметрах. С учетом данного соотношения получена модифицированная расчетная формула для расчета истинного паросодержания при кипении в макро- и миниканалах.

Ключевые слова: двухфазные потоки, режимы течения хладагентов, карты режимов течения, скольжение фаз, скорость смеси, истинные скорости пара и жидкости, границы переходов режимов.

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.02.2016, принята к печати 20.04.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-2-67-70

Ссылка для цитирования

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.

New methods of forecasting flow regimes for boiling refrigerant in macro- and minichannels

Ph. D. A. A. MALYSHEV, K. V. KISSER¹, A. S. FILATOV²

¹kisser90@list.ru, ²fil24725@yandex.ru

ITMO University

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

Nowadays there are a number of maps for boiling regimes of two-phase refrigerant flows, but they based on expenditure parameters that have a limited physical sense. The fact does not allow to extend the scope of the map application and does not allow combing the data on boiling in macro- and minichannels. This article presents a modified map of two-phase flow boiling regimes based on the true parameters of the phases which summarizes the data for the boiling of R134a, R12, R22, and R717 refrigerant, water, as well as adiabatic hydrogen-air mixtures in the channels with an internal diameter $d_0 > 5$ mm, and the data by D. Khovalyg when R134a refrigerant boils in macro and minichannels with hydraulic diameter = 538 μ m. Fr/We ratio for the balance of gravity forces and surface tension is considered which takes into account to the maximum extent mode transfer of the flow in the channels of small equivalent diameters. A modified formula for calculating true void fraction during boiling in the macro- and minichannels is obtained with the ratio.

Keywords: two-phase flow, refrigerant flow conditions, flow regime map, phase slip, mixture speed, true rate of steam and fluid, regime transition border.

Решение проблемы энергосбережения и экологической безопасности требует создание нового поколения теплообменных аппаратов энергетических установок и холодильных систем. В настоящее время установлено, что теплоотдача и потери давления при кипении жидкостей в теплообменных аппаратах зависят от режимов течения. Существует большое число карт режимов течения, сопоставление которых показывает неудовлетворительное согласование.

Малышевым А. А. [1, 2] была предложена карта режимов течения, обобщающая данные по R134a, R12, R22 в трубах внутреннего диаметра $6 \div 10$ мм. Данная карта дает удовлетворительное согласование по фреонам, однако точность определения границ режимов для кипящего аммиака, воды и адиабатным воздуховодящим потокам, достигает 30–50%. В качестве определяющих параметров были выбраны истинное объемное паросодержание φ и критерий Фруда:

$$\varphi = \beta - 0,06\beta \cdot (1-\beta)^{0,5} \cdot \left(\frac{Fr_0}{Re_0}\right)^{-0,23} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{кр}}\right)^{-0,15}; \quad (1)$$

$$Fr_0 = \frac{w_0^2}{g \cdot d_0}, \quad (2)$$

здесь β — объемное расходное паросодержание; w_0 — скорость циркуляции [2, 3]

$$w_0 = \frac{M}{f_{сеч} \cdot \rho'} = \frac{\omega \rho}{\rho'}, \quad (3)$$

где M — массовый расход, кг/с; $\omega \rho$ — массовая скорость, кг/(с·м²); ρ' — плотность жидкости, кг/м³.

Следует заметить, что скорость циркуляции не является гидромеханической характеристикой потока, хоть и входит в условия однозначности при расчете характеристик потока. Следовательно, влияние на границы режимов является косвенным [3].

В связи с этим при расчете характеристик потока было предложено скорость смеси, которая является суммой приведенных скоростей фаз. В свою очередь приведенные скорости пара и жидкости в первом приближении являются гидравлическими характеристиками, что позволяет более точно определить границы режимов при кипении двухфазных потоков:

$$w_{см} = w_0' + w_0'' = w_0 \left[1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho'' - 1} \right) \right] \quad (4)$$

где w_0' , w_0'' — приведенные скорости жидкости и пара.

Подставив в уравнение (2) уравнение (4) получим:

$$Fr_{см} = \frac{w_{см}^2}{g \cdot d_0}; \quad Re_{см} = \frac{w_{см} \cdot d_0}{\nu} \quad (5)$$

Подставляя в формулу (1) значения критерия $Fr_{см}$ и $Re_{см}$ получим истинное объемное паросодержание φ :

$$\varphi = \beta - 0,06\beta \cdot (1-\beta)^{0,5} \cdot \left(\frac{Fr_{см}}{Re_{см}}\right)^{-0,23} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{кр}}\right)^{-0,15} \quad (6)$$

На рис. 1 показана модифицированная карта режимов течения двухфазных потоков, объединяющая данные по кипению таких хладагентов как R134a, R12, R22, NH₃, водо-воздушных смесей и воды для труб $d_0 > 5$ мм.

В рассмотренном диапазоне диаметров влияние сил поверхностного натяжения было не учтено. Это связано с тем, что в трубах большого диаметра силы гравитации во много больше сил поверхностного натяжения [4, 5]. Значение сил поверхностного натяжения (критерий Вебера) оказывает большое влияние в каналах с гидравлическим диаметром менее 1 мм [6–8].

Во всех предыдущих работах А. А. Малышева не было найдено влияния сил поверхностного натяжения, хотя есть свидетельство о влиянии этой характеристики на границы режимов. В частности Kattan–Thome–Favrat в своей работе [5], рассматривают кипение в горизонтальной трубе $d_0 = 12$ мм для R134a, где границы режимов зависят от соотношения $(Fr/We)'$, где $(Fr)'$ это соотношение сил инерции к силам тяжести, в то время как $(We)'$ — соотношение сил поверхностного натяжения к силам гравитации.

Согласно [4], зависимость критерия We к критерию Fr имеет следующий вид:

$$\left(\frac{We}{Fr}\right)' = \frac{g \cdot d_0^2 \cdot \rho'}{\sigma} \quad (7)$$

Выразив из уравнения (7) критерий Фруда, получим:

$$Fr = \frac{\sigma \cdot We}{g \cdot d_0^2 \cdot \rho'} \quad (8)$$

Преобразовав выражение (6) получим:

$$\varphi = \beta - 0,06\beta \cdot (1-\beta)^{0,5} \cdot \left[\frac{\left(\frac{\sigma \cdot We}{g \cdot d_0^2 \cdot \rho'}\right)^{-0,23}}{Re_{см}} \right] \cdot \left(\frac{P_0}{P_{кр}}\right)^{-0,15} \quad (9)$$

Выражение (9) позволяет определить истинное объемное паросодержание для каналов $d_0 < 5$ мм.

Уравнение (9) позволяет объединить данные Д. Ховалыги по миниканалам [6, 9, 10] и результаты, представленные на рис. 1, для режимов кипения в каналах $d_0 > 5$ мм. На рис. 2 представлена модифицированная карта режимов течения.

Применение безразмерных параметров позволяет расширить область применения карты режимов, объединив макро- и микроканалы. Анализ карты (рис. 2) позволяет сделать выводы о том, что 90% полученных данных согласуются с вышеперечисленными диаграммами. Для расчетов режимов течения двухфазных потоков в каналах малых размеров ($d_0 < 5$ мм) необходимо учитывать влияние сил поверхностного натяжения, которое превалирует над силами гравитации для данного диапазона гидравлических диаметров каналов.

Список литературы

1. Шуршев В. Ф., Умеров А. Н. Идентификация режимов течения двухфазных потоков холодильных агентов и их сме-

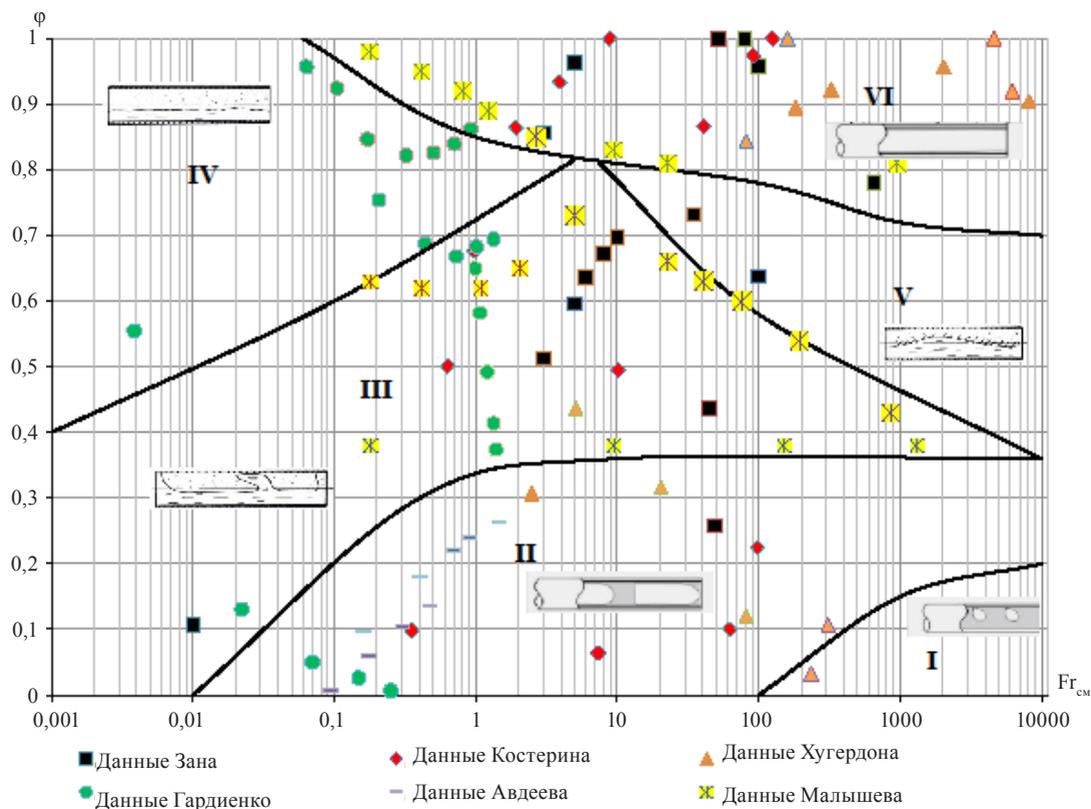


Рис. 1. Карта режимов кипения R134a, R12, R22, NH₃, водо-воздушных смесей и воды в каналах диаметром $d_0 > 5$ мм; Режимы: I — пузырьковый; II — снарядный; III — волновой; IV — расслоенный; V — переходный; VI — кольцевой

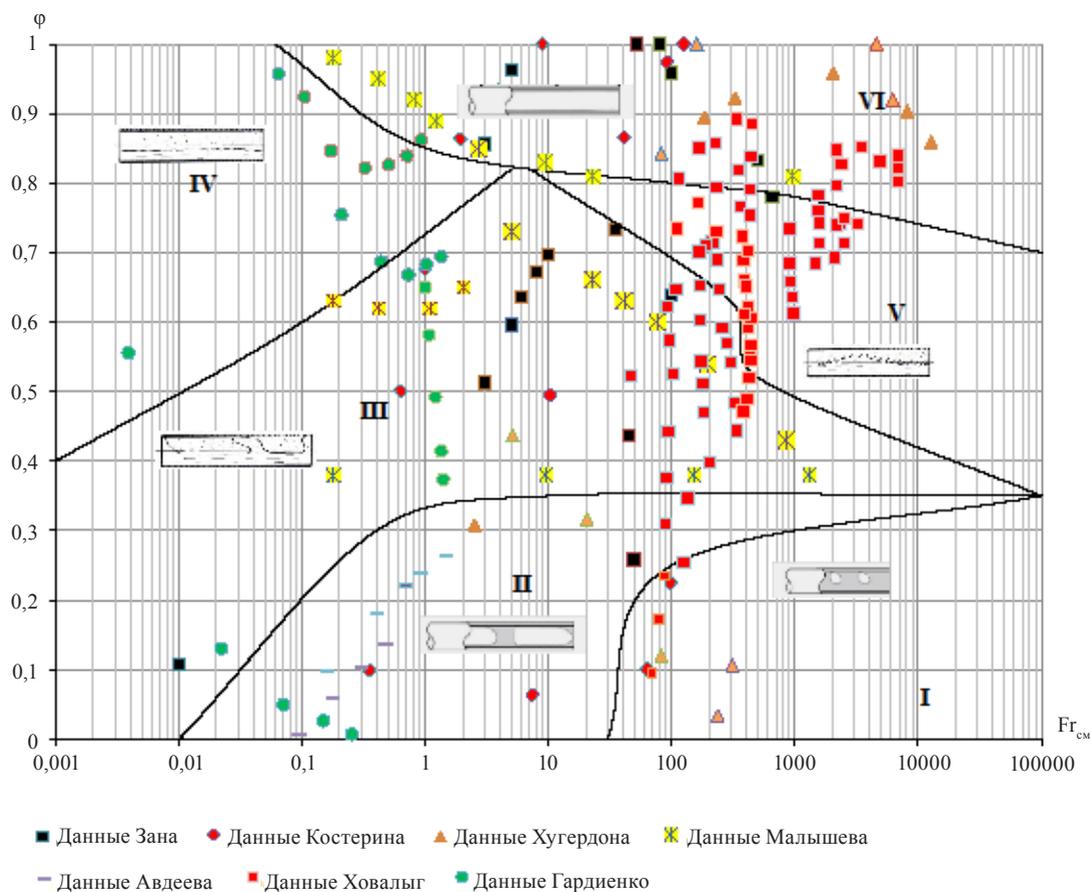


Рис. 2. Модифицированная карта режимов кипения R134a, R12, R22, NH₃; Режимы: I — пузырьковый; II — снарядный; III — волновой; IV — расслоенный; V — переходный; VI — кольцевой

- сей с использованием фазовых диаграмм. // Вестник АГТУ. 2005. № 2 (25). С. 224–231.
2. Малышев А. А., Данилова Г. Н. и др. Влияние режимов течения двухфазного потока хладагента R12 на теплоотдачу при кипении в горизонтальных трубах. // Холодильная техника. 1982. № 2.
 3. Малышев 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.
 4. Thome R. J. Engineering Data Book III // Wolverine Tube, Inc. 2004–2010.
 8. Ullmann A., Brauner N. The prediction of flow pattern maps in minichannels. // Multiphase Science and Technology, 2007. Vol. 19 (1), pp. 49–73.
 5. Kattan, N., Thome, J. R., Favrat, D. Flow Boiling in Horizontal Tubes. Part 1: Development of a Diabatic Two-Phase Flow Pattern Map. // J. Heat Transfer. 1998. Vol. 120, p. 140–147.
 6. Ховалыг Д. М., Бараненко А. В. Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах. // Холодильная техника. — 2013. — № 10. — С. 45–49.
 7. Chang K. H. Pan C. Two-phase flow instability for boiling in a microchannel heat sink // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 2078–2088.
 9. Ховалыг Д. М., Бараненко А. В. Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2013. № 4. С. 3–11.
 10. Khovalyg, D. M., Baranenko, A. V. Twophase flow dynamics during boiling of R134a refrigerant in minichannels. // Technical Physics. 2015. Vol. 85. No 3. p. 34–41.

References

1. Shurshev V. F., Umerov A. N. Identification of flow regimes of two-phase refrigerant flows, and mixtures thereof with the phase diagrams. *Bulletin ASTU*. 2005. No. 25. p. 224–231. (in Russian)
2. Malyshev A. A., Danilov G. N. et al. Effect of flow regimes of two-phase flow of R12 refrigerant at boiling heat in horizontal pipes. *Kholodil'naya tekhnika*. 1982. No. 2. (in Russian)
3. Malyshev A. A., Kisser K. V. Development cards R134a boiling regimes, R12, R22, NH₃, water-air mixture and the water in the channels with a diameter of 6 mm. *Scientific Journal ITMO. «Refrigeration and Air Conditioning»*, 2015. No. 4. p. 46–51. (in Russian)
4. Thome R. J. Engineering Data Book III. Wolverine Tube, Inc. 2004–2010.
5. Kattan, N., Thome, J. R., and Favrat, D. Flow Boiling in Horizontal Tubes. Part 1: Development of a Diabatic Two-Phase Flow Pattern Map. *J. Heat Transfer*. 1998. Vol. 120, p. 140–147.
6. Khovalyg D. M., Baranenko A. V. Instability of two-phase flow of substances at boiling in microchannels. *Kholodil'naya tekhnika*. 2013, No. 10. p. 45–49. (in Russian)
7. Chang K. H. Pan C. Two-phase flow instability for boiling in a microchannel heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007. V. 50. 2078–2088 p.
8. Ullmann A., Brauner N. The prediction of flow pattern maps in minichannels. *Multiphase Science and Technology*, 2007. Vol. 19 (1), pp. 49–73.
9. Khovalyg D. M., Baranenko A. V. Heat transfer during boiling of refrigerant in small channels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. No. 4. pp. 3–11. (in Russian)
10. Khovalyg, D. M., Baranenko, A. V. Twophase flow dynamics during boiling of R134a refrigerant in minichannels. *Technical Physics*. 2015. Vol. 85. No 3. p. 34–41.

Международная агропромышленная выставка-ярмарка



<http://agrorus.expoforum.ru/>

30 августа – 4 сентября 2016 г.

Организатор выставки-ярмарки «АГРОРУСЬ»: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, при официальной поддержке Правительств Санкт-Петербурга и Ленинградской области.

Место проведения: КВЦ «Экспофорум»

ВЫСТАВКА. РАЗДЕЛЫ:

- Импортзамещение;
- Инновационные научные разработки и технологии;
- Сельскохозяйственная техника;
- Оборудование для переработки и хранения сельскохозяйственной и рыбной продукции;
- Животноводство, звероводство, птицеводство;
- Растениеводство. Удобрения. Семена. Теплицы;
- Продукты питания и напитки. Пищевые добавки;
- Экология и энергосбережение;
- Услуги для АПК;
- Агрострахование и сельскохозяйственная кооперация;
- Транспорт и логистика.

Контакты:

Тел./факс: +7 (812) 240-40-40,
доб.235,231,232

E-mail: e.gabuchiya@expoforum.ru,
v.panch@expoforum.ru