

УДК 621.56

## Истинные параметры кипящих хладагентов в трубах и каналах

Канд. техн. наук А. А. МАЛЫШЕВ<sup>1</sup>, К. В. КИССЕР<sup>2</sup>,  
канд. техн. наук А. В. ЗАЙЦЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>maa-110@mail.ru, <sup>2</sup>kisser90@list.ru, <sup>3</sup>zai\_@inbox.ru  
Университет ИТМО

*Представлен обзор научных исследований тепло-гидродинамических параметров при кипении рабочих веществ в каналах с различными гидравлическими диаметрами. В статье описаны основные положения комплексного подхода при анализе тепло-гидродинамических характеристик при кипении в стесненном пространстве. Приведен общий вид зависимости описывающей влияние как размерных, так и безразмерных параметров на величину истинного объемного паросодержания  $\phi$  для макро- и миниканалов. Введен эмпирический коэффициент, учитывающий влияние критерия Вебера на границы раздела фаз. Представлено сопоставление экспериментальных данных П. Хрньяк по кипению хладагента R134a в миниканале  $D_h = 1,4$  мм, при температуре  $t = 10$  °С, в диапазоне массовых скоростей  $G = 100 \div 300$  кг/(с·м<sup>2</sup>), с модифицированным уравнением истинного объемного паросодержания для миниканалов.*

**Ключевые слова:** истинное объемное паросодержание, критерий Вебера, миниканал, кольцевой режим, скольжение фаз, кипение хладагентов.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 10.04.2017, принята к печати 15.05.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-53-56

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

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.

## True parameters of boiling refrigerants in tubes and channels

Ph. D. A. A. MALYSHEV<sup>1</sup>, K. V. KISSER<sup>2</sup>, Ph. D. A. V. ZAYTSEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>maa-110@mail.ru, <sup>2</sup>kisser90@list.ru, <sup>3</sup>zai\_@inbox.ru  
ITMO University

*This article provides overview of researches concerning thermo-hydrodynamic parameters of working fluid boiling in channels with different hydraulic diameter. The principles of a complex approach to analyzing thermo-hydrodynamic parameters when boiling in a closed space are described. Dependence of influence for both dimensional and dimensionless parameters on the modified equation of vapor voidage in macro- and mini channels is presented. Empirical coefficient taking into account the influence of Weber criterion at the phase thresholds was introduced. Comparison of experimental data by P. Hrnnyak for the boiling of R134 refrigerant in mini channel  $D_h = 1.4$  mm at the temperature  $t = 10$  °C within the limits of mass velocity  $G = 100 \div 300$  kg/(s·m<sup>2</sup>) to the modified equation of vapor voidage for mini channel were made.*

**Keywords:** vapor voidage, Weber criterion, mini channel, annular flow, slip flow, refrigerant boiling.

### Article info:

Received 10/04/2017, accepted 15/05/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-2-53-56

Article in Russian

### For citation:

Malyshev A. A., Kisser K. V., Zaytsev A. V. True parameters of boiling refrigerants in tubes and channels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 2. p. 53–56.

Решение проблемы энергосбережения в низкотемпературной технике в значительной степени обусловлено интенсификацией теплообмена в аппаратах холодильных машин, оптимизацией тепло-гидродинамических процессов и разработкой новых технологий теплообменного аппаратостроения.

Исследование тепло-гидродинамических характеристик кипящих хладагентов в трубах  $D_h > 6$  мм отражено в работах [1–4].

В последнее время становится актуальным использование кипения в трубах или каналах диаметром  $D_h > 2,5 \div 6$  мм [5] или миниканалах при  $D_h < 1,5$  мм [4, 6, 7].

Миниканальные технологии в теплообменном аппаратоостроении обладают целым рядом преимуществ перед известными типами аппаратов:

- высокая интенсивность теплообмена. Коэффициент теплоотдачи в миниканалах в 2÷3 раза [5] превышает аналогичный коэффициент в щелевых каналах пластинчатых испарителей;

- снижение в 3÷4 раза уровня заправки рабочим веществом;

- улучшенные массогабаритные характеристики.

Аппараты изготавливаются из алюминиевого литья;

- высокая прочность при повышенных давлениях.

До настоящего времени миниканальные технологии в основном использовались в электронике и автомобильном кондиционировании. Начиная примерно с 2012–2014 гг. появились работы о перспективах использования миниканальных испарителей и конденсаторов в холодильной технике.

К числу наиболее полных исследований по этому направлению следует отнести монографию П. Хрняк [6], а также работы А. В. Бараненко и Д. Ховалыг [5]. Авторами [4, 7, 8] получен весьма интересный экспериментальный материал по изучению тепло-гидродинамических процессов при течении различных сред в миниканалах  $D_h = 0,25 \div 0,5$  мм. При этом остается открытым вопрос обобщения накопленного экспериментального материала.

В работах [1–3, 9, 10] были сформулированы основные положения комплексного метода анализа тепло-гидродинамических процессов при кипении в стесненном пространстве, включая:

- исследование скольжения фаз и расчет истинных параметров двухфазных потоков;

- методологию прогнозирования режимов течения;

- методологию расчета локальной теплоотдачи на основе истинных параметров.

В работах [2, 9] показано, что значение истинного объемного паросодержания (скольжение фаз) является основой комплексного метода, обеспечивающего наиболее корректное моделирование тепло-гидродинамических процессов в широком диапазоне режимных, геометрических и физических параметров.

Методика расчета истинного паросодержания для макроканалов  $D_h = 5 \div 10$  мм представлена в [3, 9]. В каналах малого проходного сечения, как правило, скольжением фаз пренебрегалось и принималось равенство расходного и истинного объемных паросодержаний. Таким образом, использовалась гомогенная модель течения правомерная в основном при малых  $x$  и пузырьковом режиме течения. При кольцевом режиме такой, в достаточной степени упрощенный подход, приводит к серьезным неточностям [9].

Исследованию истинного объемного паросодержания хладагентов миниканалах была посвящена работа П. Хрняк [6], в ней изучалось кипение R134a, R410a, CO<sub>2</sub> и водо-воздушных потоков при температуре насыщения  $t_{\text{нас}} = 10$  °С в миниканалах с  $D_h = 1,6$  мм и  $D_h = 1,0$  мм. Обработка экспериментальных данных проводилась на основе модели Локкарта — Мартинелли [6].

В. М. Шустов исследовал процесс кипения воды в микроканале длиной 5 мм и величиной щелевого за-

зора 0,2 мм [4]. Автор предлагает эмпирическую зависимость в диапазоне  $0,05 < x < 0,2$ , построенную также на основе методологии Локкарта — Мартинелли с использованием критерия Вебера. Условия экспериментов [4] весьма специфичны, поскольку процесс реализуется в каналах очень малых размеров. Только благодаря переохлаждению до 80 °С перед экспериментальным участком, автору удалось организовать двухфазный поток вполне характерный и для каналов больших размеров.

Известно что, в основу методологии Локкарта — Мартинелли положена модель кольцевого течения адиабатных газожидкостных потоков. С точки зрения авторов данной статьи такой подход не всегда обоснован, поскольку в ряде случаев при малых режимах приводит к серьезным погрешностям.

Для создания универсальной методики расчета истинных параметров кипящих жидкостей, как в миниканалах, так и в каналах с диаметром более 5 мм был проведен анализ и уточнение величин влияющих на процесс скольжения (истинного объемного паросодержания). В результате общий вид модифицированной зависимости размерных параметров приобретает вид:

$$\varphi = f_1(\beta, w_{\text{см}}, w_0, \mu', \rho'', \sigma, D_h, P_0, P_{\text{кр}}) \quad (1)$$

или в безразмерном виде:

$$\varphi = f_2(Fr_{\text{см}}, Re_{\text{см}}, We, \rho', \mu', P_0/P_{\text{кр}}) \quad (2)$$

Далее используя общий вид уравнений для расчета истинного объемного паросодержания для труб  $D_h = 6 \div 10$  мм [9] и модифицированной зависимости (2) получаем уравнение:

$$\varphi = \beta - 0,06\beta \cdot (1 - \beta)^{0,5} \cdot \left( \frac{Fr_{\text{см}}}{Re_{\text{см}}} \right)^{-0,23} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{\text{кр}}} \right)^{-0,15} \quad (3)$$

С учетом модели раздельного течения в рассмотренное вводится эмпирический коэффициент, учитывающий взаимодействие фаз на границе раздела [2]:

$$\left( \frac{We}{Fr} \right)' = \frac{g \cdot D_h^2 \cdot \rho'}{\sigma} \quad (4)$$

где  $We = \frac{\rho' \cdot D_h \cdot w_{\text{см}}^2}{\sigma}$  — критерий Вебера;

$g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$D_h$  — гидравлический диаметр канала, м;

$\rho'$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$w_{\text{см}}$  — скорость смеси, м/с;

$\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

С точки зрения авторов данной статьи, формула (4) является одним из определяющих параметров при расчете скольжения фаз в миниканалах.

В результате получено уравнение для истинного объемного паросодержания, описывающее область течения в миниканалах [2]:

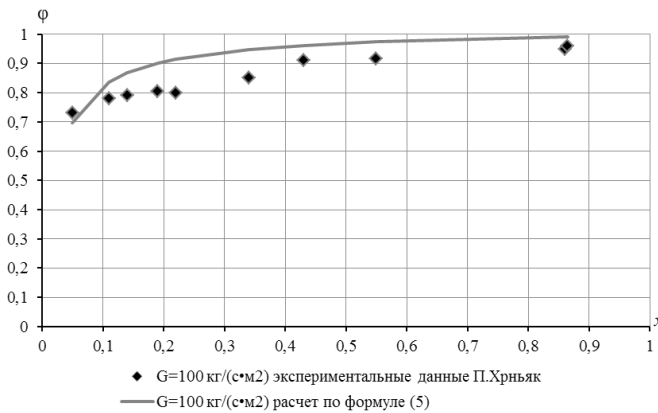


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных данных П. Хрняк ( $D_h = 1,4$  мм, R134a,  $t = 10$  °C,  $G = 100$  кг/(см<sup>2</sup>) с расчетом по формуле (5)

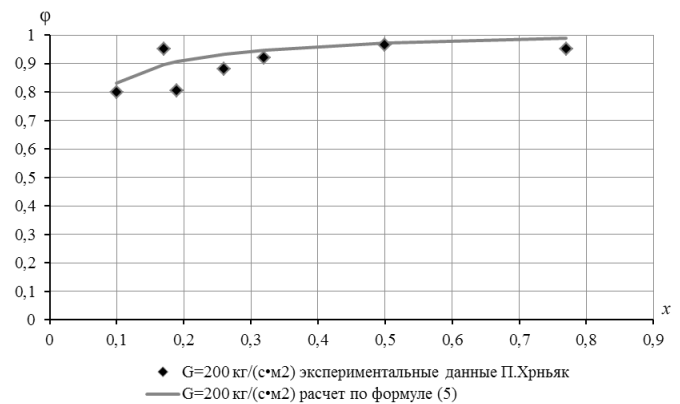


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных П. Хрняк ( $D_h = 1,4$  мм, R134a,  $t = 10$  °C,  $G = 200$  кг/(см<sup>2</sup>) с расчетом по формуле (5)

$$\phi = \beta - 0,06\beta \cdot (1 - \beta)^{0,5} \cdot \left( \frac{\sigma \cdot We}{g \cdot d_n^2 \cdot \rho'} \right)^{-0,23} \cdot \left( \frac{P_0}{P_{кр}} \right)^{-0,15} \quad (5)$$

На рис. 1, 2, 3 показано сопоставление экспериментальных данных по кипению хладагента R134a в мини-канале с  $D_h = 1,4$  мм [6] с расчетом по уравнению (5). Сопоставление демонстрирует удовлетворительное согласование результатов расчета и эксперимента во всем диапазоне  $x$  при значениях массовой скорости  $w_p > 100$  м/(см<sup>2</sup>).

**Вывод.** Рассмотрены работы, посвященные одному из наиболее перспективных направлений теплофизики двухфазных потоков — кипению в каналах различного гидравлического диаметра. Предложена новая методология расчета истинного объемного паросодержания макро- и микроканалов основанная на анализе определяющих параметров и результатов экспериментов исследования истинных параметров при кипении в трубах. Результаты сопоставления экспериментальных данных по кипению в каналах с эквивалентным диаметром

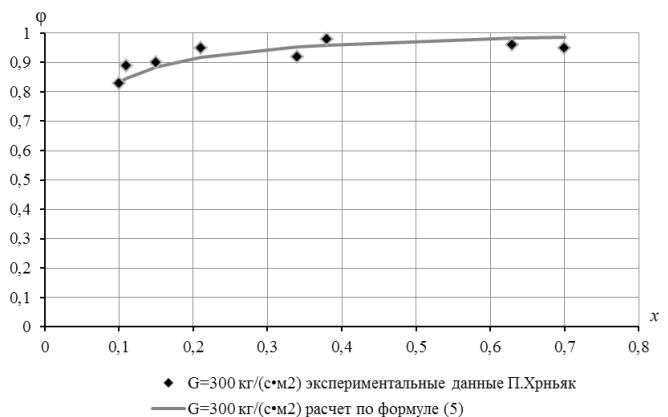


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных П. Хрняк ( $D_h = 1,4$  мм, R134a,  $t = 10$  °C,  $G = 300$  кг/(см<sup>2</sup>) с расчетом по формуле (5)

$D_h = 1,4$  мм с расчетом по полученному уравнению показали удовлетворительное согласование. Таким образом, предложенная методология может быть рекомендована для расчета истинных параметров в каналах различных гидравлических диаметров.

### Литература

1. Мальшев А. А., Азарсков В. М. Исследование локальных тепло-гидродинамических характеристик двухфазного горизонтального потока R12 // Тезисы доклада Всесоюзной конференции «Теплофизика и гидродинамика процессов кипения и конденсации». Рига. 1982. 114–116 с.
2. Мальшев А. А., Киссер К. В., Филатов А. С. Новые методы прогнозирования режимов течения кипящих хладагентов в макро- и микроканалах // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 67–70.
3. Ullmann A., Brauner N. The prediction of flow pattern maps in minichannels. // Multiphase Science and Technology, 2007. Vol. 19 (1), pp. 49–73.
4. Шустов М. В. Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, 2015.
5. 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.

### References

1. Malyshev A. A., Azarskov V. M. Research of local warm and hydrodynamic characteristics of a two-phase horizontal stream R12//Theses of the report of the All-Union conference «Thermal Physics and Hydrodynamics of Processes of Boiling and Condensation» Riga. 1982. 114–116 p. (in Russian)
2. Malyshev A. A., Kisser K. V., Filatov A. S. New methods of forecasting flow regimes for boiling refrigerant in macro- and minichannels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2016. No 2. p. 67–70. (in Russian)
3. Ullmann A., Brauner N. The prediction of flow pattern maps in minichannels. *Multiphase Science and Technology*, 2007. Vol. 19 (1), pp. 49–73.
4. Shustov M. V. Boiling research in a pinhole with a covering from nanoparticles. Abstract of the thesis PhD, 2015. (in Russian)
5. 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.

6. V. G. Niño, P. S. Hrnjak and T. A. Newell. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // ACRC TR-202, October 2002.
7. Козулин И. А., Кузнецов В. В., Шамирзаев А. С. Режимы течения и теплоотдачи при кипении в микроканалах различной ориентации // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. № 2, том 5.
8. Кузнецов В. В., Шамирзаев А. С. Режимы течения и теплообмена при кипении движущегося хладагента R318C в кольцевом миниканале // Теплофизика и аэромеханика, 2007, том 14, № 1, с. 57–65.
9. Малышев А. А., Данилова Г. Н. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков фреонов в каналах испарителей холодильных машин // Инженерно-физический журнал. 1984. XLVIII. 17–27 с.
10. Малышев А. А., Киссер К. В. Разработка карты режимов кипения R134a, R12, R22, NH<sub>3</sub>, 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. V. G. Niño, P. S. Hrnjak and T. A. Newell. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels. ACRC TR-202, October 2002. (in Russian)
7. Kozulin I. A., Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S. The modes of a current and thermolysis when boiling in pinholes of various orientation. *Interekspos Geo-Sibir*. 2011. No 2, vol. 5. (in Russian)
8. Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S. The modes of a current and heat exchange when boiling moving R318C freon in the ring minichannel. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2007, vol. 14, No 1, p. 57–65. (in Russian)
9. Malyshev A. A., Danilova G. N. Heat exchange and hydrodynamics of two-phase streams of freons in channels of evaporators of refrigerators. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1984. XLVIII. 17–27 p. (in Russian)
10. Malyshev A. A., Kisser K. V. Development of the card of the modes of boiling of R134a, R12, R22, NH<sub>3</sub>, air-and-water mixes and water in channels with a diameter of 6 mm. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya «Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovanie»*. 2015. No 4. p. 46–51. (in Russian)

### Сведения об авторах

#### Малышев Александр Александрович

к. т. н., профессор кафедры холодильной техники и возобновляемой энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, maa-110@mail.ru

#### Киссер Кристина Владимировна

аспирант кафедры холодильной техники и возобновляемой энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, kisser90@list.ru

#### Зайцев Андрей Викторович

к. т. н., доцент кафедры криогенной техники и технологий сжиженного природного газа Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, zai\_@inbox.ru

### Information about authors

#### Malyshev Aleksandr Aleksandrovich

Ph.D., department of refrigerating technique and renewable power engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, maa-110@mail.ru

#### Kisser Kristina Vladimirovna

graduate student of department of refrigerating technique and renewable power engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, kisser90@list.ru

#### Zaitsev Andrei Viktorovich

Ph.D., department of cryogenic technique and technologies of liquefied natural gas of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, zai\_@inbox.ru

**peterfood**

Тел.: +7 (495) 730-79-06, +7 (812) 327-49-18

XXVI Международная  
Продовольственная  
выставка «Петерфуд»

15-17 НОЯБРЯ, 2017  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
ЭКСПОФОРУМ

#### Разделы выставки:

- Мясо и мясопродукты. Мясная гастрономия.
- Птица. Яйцо.
- Рыба и морепродукты.
- Овощи. Фрукты.
- Замороженные продукты. П/ф.
- Молочная продукция. Сыры.
- Бакалея (зернопродукты, макаронные изделия, специи)
- Готовые блюда, салаты.
- Масложировая группа.
- Кондитерская продукция. Снэки, орехи, сухофрукты .
- Соки. Воды. Безалкогольные напитки.
- Чай. Кофе. Какао.
- Спиртные напитки. Табак.
- Здоровое питание. Детское питание.
- Консервация. Соусы.
- Салон сопутствующего оборудования «ПетерфудТех».

#### Контакты:

Тел./ф.: 8 (812) 327-49-18

E-mail: imperia@imperiaforum.com, press@imperiaforum.com

<http://peterfood.ru/>