

УДК 621.56, 621.57

Сравнительный анализ расчета теплообмена при внутриканальном кипении хладагентов

Канд. техн. наук А. А. МАЛЫШЕВ¹, канд. техн. наук О. С. МАЛИНИНА²,
Д. Е. КАЛИМЖАНОВ³, П. С. СУХОВ⁴, К. Ф. КУАДИО⁵

¹malyshev46@list.ru, ²holmash_malinina@mail.ru, ³danik95_95@mail.ru

⁴noks536@yandex.ru, ⁵fabkoffi2000@yahoo.fr

Университет ИТМО

Проведен анализ и сопоставление методик расчета теплообмена при кипении хладагентов в горизонтальных трубах, включая традиционные методы для расчета средней теплоотдачи В. Брайна, Г. Квейта, М. Бэйкура, С. Богданова, а также работ, посвященных исследованию локального теплообмена, таких как Локарта — Мартинелли, Д. Хавла, К. Шарма. Было установлено, что при массовой скорости 50 кг/(с·м²), рассмотренные методики расчета средней теплоотдачи удовлетворительно согласуются между собой, что объясняется общностью режимов двухфазных потоков при этой скорости. При скорости 150 кг/(с·м²) наблюдается существенное расхождение расчетных данных. При этом методика основанная на использовании истинных параметров фаз и прогнозирования режимов течения дает значения коэффициентов теплоотдачи на 30% выше других уравнений. Это объясняется тем обстоятельством, что приведенные методы расчета средних коэффициентов теплоотдачи получены в основном для расслоенного и снарядного режимов, а при высоких скоростях имеет место кольцевой режим течения, который известными уравнениями, как правило, не учитывался. Подтверждением правомерности использования комплексного метода основанного на истинных параметрах является хорошая сходимость с опытными данными Х. Юсиды и С. Ямогучи для труб диаметром 6 мм и миниканалов с величиной эквивалентного диаметра 0,5 мм.

Ключевые слова: миниканалы, локальный теплообмен, истинные параметры фаз, массовая скорость, коэффициент теплоотдачи, теплообменное аппаратостроение.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 29.11.2019, принята к печати 18.02.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-34-39

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Малышев А. А., Малинина О. С., Калимжанов Д. Е., Сухов П. С., Куадио К. Ф. Сравнительный анализ расчета теплообмена при внутриканальном кипении хладагентов // Вестник Международной академии холода. 2020. № 1. С. 34–39.

Comparative analysis of thermal exchange calculation for refrigerants boiling in channels

Ph. D. A. A. MALYSHEV¹, Ph. D. O. S. MALININA², D. E. KALIMGANOV³, P. S. SUKHOV⁴, K. F. KUADIO⁵

¹malyshev46@list.ru, ²holmash_malinina@mail.ru, ³danik95_95@mail.ru

⁴noks536@yandex.ru, ⁵fabkoffi2000@yahoo.fr

ITMO University

The article concerns an analysis and comparison of heat conductivity calculation techniques for refrigerants boiling in horizontal channels, including popular techniques of average heat conductivity calculation by Brayan, Guaint, Baker, and Bogdanov, as well as the papers on local thermal exchange such as those by Lokhart-Marinelli, Chawel and Shrama. The techniques of average heat exchange calculation in question are shown to fit each other in a satisfactory way at mass velocity of 50 kg/(s·m²), which can be explained by their having analogous mode of two-phase flow at this velocity. At the velocity of 150 kg/(s·m²) the calculated data vary significantly. The technique based on the use of true phase parameters and flow mode prediction results in 30% higher values of heat exchange coefficients. This fact can be explained by the techniques of calculating heat exchange average coefficients given being obtained for stratified and slugging flow in general, but it is annular flow that occurs at high velocities and it did not take into account by popular equations. Good convergence of the data obtained with the experimental data by H. Yushida and S. Yamaguchi for the tubes of 6 mm diameter and minichannels of 0.5 mm equivalent diameter justifies the use of the complex technique based on true parameters.

Keywords: minichannels, local thermal exchange, true phase parameters, mass velocity, heat exchange coefficient, design of thermal exchange apparatus.

Article info:

Received 29/11/2019, accepted 18/02/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-1-34-39

Article in Russian

For citation:

Malyshev A. A., Malinina O. S., Kalimjanov D. E., Sukhov P. S., Kuadio K. F. Comparative analysis of thermal exchange calculation for refrigerants boiling in channels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 1. p. 34–39.

Введение

Проблема внутриканального кипения рабочих веществ, в первую очередь, обусловлена необходимостью повышения энергоэффективности, как основного тренда технологического развития на современном этапе.

Кипение жидкостей в трубах и каналах находит применение во многих конструкциях теплообменного оборудования в энергетике, холодильной технике, пищевых и химических технологиях. В виду сложности процесса кипения тепло-гидродинамические задачи в этих случаях, как правило, не решаются аналитически, а эмпирические и полуэмпирические подходы часто противоречивы и не достаточно надежны.

Проблема становится еще более актуальной в связи с развитием «прорывных» технологий интенсификации теплообмена в теплообменном аппаратостроении и появлением новых конструкций с кипением в щелевых и миниканалах [1]–[6], а также каналов с интенсифицированными поверхностями [6]–[9], включая новейшую технологию «Данфосс» Micro Plate [10].

Во всех работах, посвященных проблеме интенсификации, констатируется увеличение коэффициентов теплоотдачи на 40% и более, но при этом вопросы тепло-гидродинамического расчета остаются открытыми.

Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является апробация комплексного метода анализа теплообмена при внутритрубном кипении, основанного на истинных параметрах фаз, для кипения в трубах и миниканалах.

Для реализации поставленных задач необходимо провести:

— сопоставление и анализ известных методов расчета теплообмена при внутритрубном кипении хладагентов;

— сопоставление экспериментальных данных по теплообмену при кипении в трубах и миниканалах с расчетом по комплексной методике.

Методы исследования**1. Расчетно-теоретические**

Изучению теплообмена при кипении хладагентов в горизонтальных трубах посвящено множество работ, которые могут быть разделены на две основные группы по принципу различия метода экспериментального исследования.

К первой группе относятся работы 40–70-х гг. прошлого века, в которых изучалась средняя теплоотдача по длине канала. Такой метод использовался В. Брайаном и Г. Квейтом [11] М. Бэйкером [12], С. Н. Богдановыми [13] др.

В этих работах изучалась теплоотдача в определенном диапазоне свойств, температур, режимных и геоме-

трических параметров. В результате каждого исследования были получены уравнения для средних значений коэффициентов теплоотдачи вне зависимости от режимов течения.

Из названных работ следует выделить формулу С. Н. Богданова поскольку она до настоящего времени широко используется в инженерной практик.

$$\alpha = A \cdot q^{0.6} (w_p)^{0.2} d_{\text{вн}}^{-0.2}. \quad (1)$$

Как и в большинстве методик расчета средней теплоотдачи влияние пузырькового кипения $q^{0.6}$ и конвекции $w_p^{0.2}$ (w_p — массовая скорость) выражены постоянными значениями.

В ряде работ [14], [15] был использован известный подход к моделированию тепло-гидродинамических процессов, основанный на математической формализации процесса, при котором учитывалось взаимное влияние на теплоотдачу двух механизмов переноса теплоты — пузырькового кипения и конвекции. С учетом режимов течения, рассматривалась зависимость:

$$\alpha = \alpha_q + \alpha_w. \quad (2)$$

С этой точки зрения интересен подход С. С. Кутателадзе, который предусматривает переменное влияния пузырькового кипения и конвекции.

$$\alpha = \alpha_{\text{кон}} \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_{\text{б.о}}}{\alpha_{\text{кон}}} \right)^2}. \quad (3)$$

Математическая структура формулы обеспечивает условие предельных переходов от одного механизма к другому при изменении скорости и теплового потока при сохранении общего вида зависимости.

В настоящее время более перспективным методом признано исследование локальных коэффициентов теплоотдачи для каждого из режимов в отдельности, что при наличии методики определения границ существования отдельных форм течения, дает возможность разработать более обоснованную и точную методику расчета теплообмена

В качестве основополагающей работы, посвященной анализу локальной теплоотдачи, следует отнести модель Локкарта — Мартинелли [16], которая до настоящего времени оказывается весьма актуальной. Модель основана на анализе раздельного течения фаз. В качестве определяющего параметра использован параметр Мартинелли:

$$X = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.875} \left(\frac{\rho''}{\rho'} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu'}{\mu''} \right). \quad (4)$$

Параметр Мартинелли не включает динамических характеристик, а в качестве определяющих параметров

выбрано массовое расходное паросодержание и физические свойства. Модель дополняется эмпирическими коэффициентами, учитывающими специфику процессов.

Д. Хавла [17] предлагает зависимости для локальной теплоотдачи для пузырькового (5) и снарядного (6) режимов.

$$\alpha_{st} = 0,071 \frac{\lambda'}{d_0} \left(\frac{q d_0}{T_H \rho' C_p v'} \right)^{0,7} \times \left(\text{Pr}' \frac{\rho' d_0 C_p T_H}{\sigma} \right)^{0,3} \left(\frac{r p'' R_p}{1,75^2 \rho' d_0} \right)^{0,133} \quad (5)$$

$$\frac{\alpha d_{\text{ЭКВ}}}{\lambda'} = 0,035 \frac{x \mu'}{(1-x) \mu''} \text{Re}_F^{0,825} \text{Fr}_F^{0,475} \quad (6)$$

Для первого режима теплоотдача определяется только процессом парообразования на стенке трубы, а для второго — взаимодействием сил инерции, вязкости и гравитации. Характерно, что динамика процесса определяется массовым расходным паросодержанием x .

Совместное влияние пузырькового кипения и конвекции учитывается уравнением К. Шарма [18]:

$$\frac{\alpha}{\alpha_w} = 376 \left[x^{0,126} \left(q / w_0 r p'' \right)^{0,324} \left(\rho'' / \rho' \right)^{0,72} \right] \quad (7)$$

Представленные выше зависимости выражают наиболее распространенные подходы к анализу тепло-гидродинамических процессов в каналах. Подобные подходы впоследствии были использованы в современных работах, таких как [5, 6, 8, 19] и др.

Тем не менее анализ локальной теплоотдачи не является гарантией полной достоверности расчетных данных для широкого диапазона физических свойств, расходных и геометрических параметров.

Свидетельством этому является результат сопоставления опытных данных Х. Юсиды и С. Ямогучи [20] с расчетом по наиболее известным уравнениям для локальной теплоотдачи [21]. Расхождения в ряде случаев превышают 100%.

Было высказано предположение [21], что причина расхождений заключается в использовании авторами расчетных методик расходных параметров фаз, основанных на уравнениях материального и теплового балансов (в отличие от истинных параметров, базирующихся на знании скольжения фаз). Было также установлено, что при относительно небольших скоростях и низких температурах различие расходных и истинных параметров достигает 80% и более, что может приводить к неточностям.

С целью разработки наиболее физически обоснованной методологии расчета тепло-гидродинамических характеристик при внутритрубном кипении в работах [21]–[25] был предложен комплексный метод анализа, включающий:

- исследование скольжения фаз;
- прогнозирование режимов течения с использованием истинных параметров фаз;
- расчет локальной теплоотдачи для каждого режима с использованием истинных скоростей.

В работе [25], с применением комплексного подхода, было получено уравнение для расчета коэффициентов

теплоотдачи при волновом и расслоенном режимах при кипении R12 и R22 в трубах $d=(10 \div 20)$ мм

$$\alpha = 0,695 \cdot (w \cdot \rho)^{0,85} \cdot q^{0,047} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{кр}} \right)^{-1,1} \quad (8)$$

При выводе уравнения была использована карта режимов течения [21], а также уравнения для истинного объемного паросодержания (9)

$$\beta - \varphi = 0,06 \cdot \beta (1 - \beta)^{0,5} \left(\frac{\text{Fr}_0}{\text{Re}_0} \right)^{-0,23} \left(\frac{P_0}{P_{кр}} \right)^{-0,15} \quad (9)$$

где β — расходное объемное паросодержание; критерии Fr_0 и Re_0 рассчитываются по скорости циркуляции; φ — истинное объемное паросодержание.

Для кольцевого режим было получено уравнение:

$$\alpha_{\text{кол}} = \alpha' \sqrt{1 + 36,5 \cdot 10^{-9} \left(\frac{w'' \cdot r \cdot q'}{q} \right)^{1,5} \left(\frac{\alpha_{6,0}}{\alpha'} \right)^2} \quad (10)$$

Здесь: $w'' = w_0'' / \varphi$ — истинная скорость пара, м/с. w_0'' — приведенная скорость пара, м/с.

Результаты расчетов

На рис. 1 представлен результат сопоставления расчета, выполненные по уравнениям (8)–(10) с опытными данными Х. Юсиды и С. Ямогучи.

Из рассмотрения представленных данных следует, что при массовой скорости $w_r = 50$ кг/(с·м²) расхождения расчетных значений по формулам для средних значений теплоотдачи [1] и [11] не превышает 10%. При условно принятых значениях массового расходного паросодержания x в диапазоне $0,1 \div 0,8$ и рассматриваемых значений плотности теплового потока с помощью диаграммы режимов [21] был выявлен волновой режим течения. С помощью уравнения (8) были рассчитаны локальные значения коэффициентов теплоотдачи, усредненные в диапазоне x (кривая 3). Максимальные отклонения значений, полученных по формуле (8), от расчета по уравнениям для средних коэффициентов теплоотдачи находятся в пределах 30% при $q > 2$ кВт/м². При этом характеры зависимостей качественно различаются, что объясняется отличием значений истинных и расходных скоростей.

Как было определено с помощью карты режимов [21], при $w_r = 150$ кг/(с·м²) при данных условиях существует кольцевой режим течения. Расчет по уравнению (10) (кривая 4) дает хорошее согласование с данными экспериментов [20]. Результаты расчета по уравнениям [13] и [1] оказываются на (45÷55) % ниже экспериментальных данных. Такая ситуация объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, формулы [13] и [1] не учитывают режимы течения и были получены в основном при массовых скоростях $d=(50 \div 100)$ мм и в трубах диаметром $d=(10 \div 20)$ мм. Для этих условий кольцевой режим, для которого характерны наибольшие значения коэффициентов теплоотдачи, как правило не существует. Во-вторых, в уравнениях С. Н. Богданова и С. С. Кутателадзе использовались расходные параметры фаз, которые в отличие от истинных (уравнения 8, 9, 10) имеют ограниченный физический смысл.

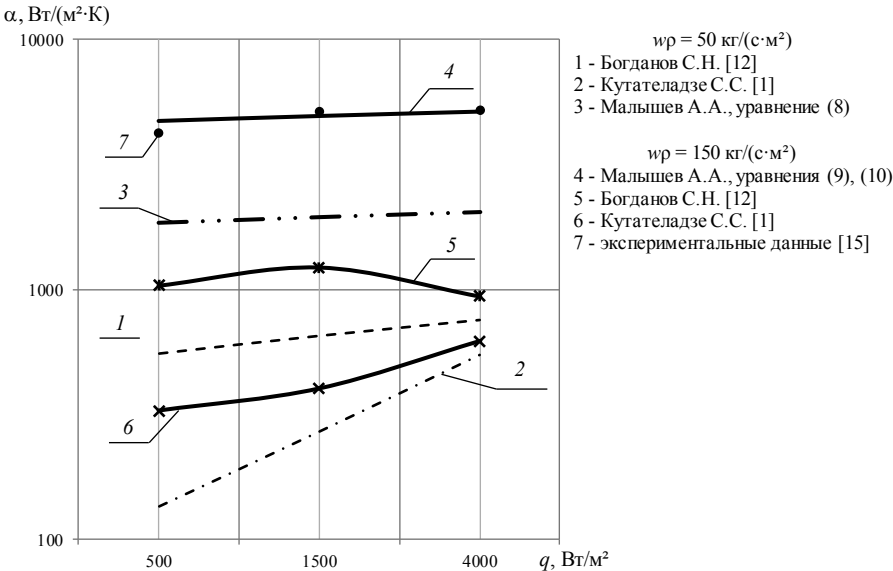


Рис. 1. Сопоставление расчетных зависимостей с результатом эксперимента Х. Юсиды и С. Ямагучи при $t_0=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $d_0=6\text{ мм}$
Fig. 1. Comparison of theoretical dependencies with the ones experimentally obtained by H. Yushida and S. Yamaguchi at $t_0=10^{\circ}\text{C}$, $d_0=6\text{ mm}$

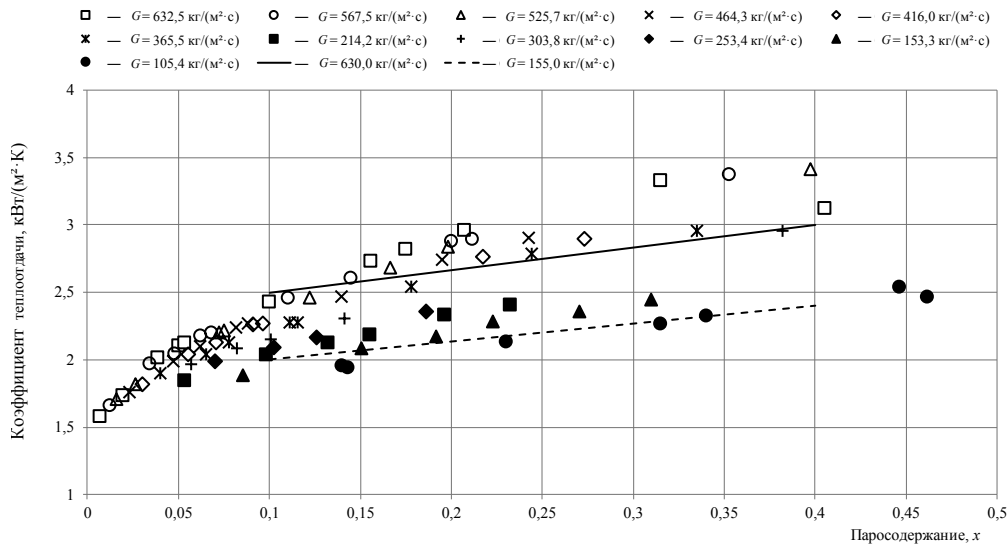


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных [26] с расчетом по уравнению (10) R134a, $t_0=30^{\circ}\text{C}$, $D_s=0,5\text{ мм}$
Fig. 2. Comparison of experimental data [25] with the calculation according to equation (10) for R134a, $t_0=30^{\circ}\text{C}$, $D_s=0.5\text{ mm}$

Значительный интерес представляет апробация, разработанного для труб комплексного метода, основанного на истинных параметрах, применительно к кипению в миниканалах.

Кипение в миниканалах имеет определенную специфику, что подробно рассмотрено в работах [3]–[5]. Однако, как было указано авторами, вопросы расчета теплоотдачи и потерь давления полностью не исследованы.

В работе [26] было отмечено, что в миниканалах с величиной щелевого зазора $D_s=0,5\text{ мм}$ в диапазоне массового паросодержания $x=0,1\div 0,5$ существует аналог кольцевого режима. Исходя из этого был произведен расчет локального теплообмена в миниканале для условий [26].

На рис. 2 показано сопоставление экспериментальных данных [26] с расчетом по уравнениям (9) и (10).

Результаты сопоставления показывают, что в диапазоне $x=0,04\div 0,4$ расчет по уравнению (10) описывает опытные данные по кипению в миниканале в среднем с точностью до 10%, как при массовых скоростях $G=630\text{ кг/ (м}^2\cdot\text{с)}$, так и при $G=155\text{ кг/ (с}\cdot\text{м}^2)$.

Выводы

1. Для расчета теплообмена при кипении хладагентов в трубах малого диаметра наилучший результат дает зависимость локального теплообмена для кольцевого режима с использованием истинных параметров фаз.

2. Разработанный метод расчета локального теплообмена при внутритрубном кипении, основанный на истинных параметрах потока, с удовлетворительной точностью описывает экспериментальные данные по кипению в миниканалах.

3. Перспективным направлением дальнейших исследований является развитие комплексного метода исследований теплообмена и потерь давления с использованием истинных параметров в области течения в ми-

каналах при отрицательных температурах, а также на поверхностях с интенсифицированными покрытиями и турбулизаторами. Важным направлением является оптимизация тепло-гидродинамических параметров.

Литература

1. Данилова Г. Н., Богданов С. Н., Иванов О. П. и др. Теплообменные аппараты холодильных установок. Л.: Машиностроение, 1986. 303 с.
2. Мамченко В. О., Малышев А. А. Пластинчатые теплообменники в низкотемпературной технике и биотехнологических процессах: учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2014. 216 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.
4. Niño V. G., Hrnjak P. S. and Newell T. A. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels // *ACRC TR-202*, October 2002.
5. Yan C. et al. Research on the Flow Boiling Characteristics of Water in a Multi-Furcated Tree-Shaped Mini-Channel // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 629. pp. 691–698.
6. Шишкин А. В. Теплоотдача при течении хладагента R134a в трубах со скрученными ленточными вставками / С. Э. Тарасевич, А. В. Шишкин, А. Б. Яковлев // *Вестник КГТУ им. А. Н. Туполева*. 2015. № 4. С. 25–30.
7. Кузнецов В. В., Шамирзаев А. С. Режимы течения и теплообмена при кипении движущегося хладагента RC 318 в кольцевом миниканале // *Теплофизика и аэромеханика*. 2007. Т. 14. № 1. с. 57–65.
8. Минеев Ю. В. Гидродинамика и теплообмен при кипении смешанного холодильного агента R407C внутри трубы с ленточными турбулизаторами: дис... канд. техн. наук. Астрахань: АГТУ, 2007.
9. Малаховский С. А., Варавва А. Н., Дедов А. В., Захаров Е. М., Комов А. Т. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в каналах малого диаметра // *Вестник МЭИ*. 2007. № 1. С. 51–55.
10. Бурцев С. А., Васильев В. К., Виноградов Ю. А., Киселёв Н. А., Титов А. А. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом // *Наука и образование*. № 1. 2013. С. 263–290.
11. Brayon W. L., Guaint G. W. Heat transfer coefficients in horizontal tube evaporators // *Refrigerating engineering*. 1951. № 1. p. 114–121.
12. Baker O. Multiphase flow in pipelines // *Oil Gas J., Progress Rep.*, 1958, June rep., p. 156–167.
13. Богданов С. Н. Исследование теплообмена при кипении фреонов внутри горизонтальных труб. — В кн.: Теплообмен при конденсации и кипении: Л.: Машгиз, 1964. с. 81–87.
14. Шуришев В. Ф. Построение модели процесса теплоотдачи при кипении смеси холодильных агентов внутри горизонтальной трубы // *Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-18*. Сб. трудов XVIII Международной научной конференции. Казань: Изд-во Казанского гос. технол. ун-та. 2005. Т. 9. С. 121–122.
15. Мезентцева Н. Н. Особенности кипения неазеотропных хладагентов в испарителе парокомпрессионного теплового насоса. Сборник трудов Всероссийского форума научной молодежи «ЭРЭЛ — 2011». Якутск. 2011. С. 113–115.

References

1. Danilova G. N., Bogdanov S. N., Ivanov O. P., et al. Heat exchangers of refrigeration plants. Leningrad, Mashinostroyeniye, 1986. 303 P. (in Russian)
2. Mamchenko V. O., Malyshev A. A. Plate heat exchangers in low-temperature engineering and biotechnological processes: a textbook. Saint Petersburg: ITMO University, 2014. 216 PP. (in Russian)
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.
4. Niño V. G., Hrnjak P. S. and Newell T. A. Characterization of Two-Phase Flow in Microchannels. *ACRC TR-202*, October 2002.
5. Yan C. et al. Research on the Flow Boiling Characteristics of Water in a Multi-Furcated Tree-Shaped Mini-Channel. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 629. pp. 691–698.
6. Shishkin A. V. Heat transfer during the flow of R134a refrigerant in pipes with twisted tape inserts / S. E. Tarasevich, A. V. Shishkin, A. B. Yakovlev. *Vestnik KSTU im. A. N. Tupolev*. 2015. No. 4. Pp. 25–30. (in Russian)
7. Kuznetsov V. V., Shamirzaev A. S. Modes of flow and heat exchange during boiling of moving RC 318 freon in a ring minichannel. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2007. Vol. 14. No. 1. pp. 57–65. (in Russian)
8. Mineev Yu. V. Hydrodynamics and heat exchange during boiling of R407C mixed refrigerating agent inside a pipe with belt turbulators: thesis PhD. Astrakhan: AGTU, 2007. (in Russian)
9. Malakhovsky S. A., Varava A. N., Dedov A. V., Zakharov E. M., Komov A. T. Experimental study of hydrodynamics and heat transfer in small diameter channels. *Vestnik MEI*. 2007. No. 1. Pp. 51–55. (in Russian)
10. Burtsev S. A., Vasiliev V. K., Vinogradov Yu. A., Kiselev N. A., Titov A. A. Experimental study of the characteristics of surfaces covered with regular relief. *Science and education*. No. 1. 2013. Pp. 263–290. (in Russian)
11. Brayon W. L., Guaint G. W. Heat transfer coefficients in horizontal tube evaporators. *Refrigerating engineering*. 1951. № 1. p. 114–121.
12. Baker O. Multiphase flow in pipelines. *Oil Gas J., Progress Rep.*, 1958, June rep., p. 156–167.
13. Bogdanov S. N. Investigation of heat transfer during boiling of freons inside horizontal pipes. — In the book.: Heat exchange during condensation and boiling: Leningrad, Mashgiz, 1964. pp. 81–87. (in Russian)
14. Shurshev V. F. Building a model of the heat transfer process when boiling a mixture of refrigerating agents inside a horizontal pipe. *Mathematical methods in engineering and technology-MMTT-18*. Proceedings of the XVIII International scientific conference. Kazan, 2005. Vol. 9. Pp. 121–122. (in Russian)
15. Mezentseva N. N. features of boiling of non-azeotropic refrigerants in the evaporator of a steam compression heat pump. Collection of works of the all-Russian forum of scientific youth «EREL-2011». Yakutsk. 2011. Pp. 113–115. (in Russian)

16. Martinelli R. C., Nelson D. B. Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water // *Trans. ASME.*, 1948, v. 70, No 6, p. 695–720.
17. Chawla J. Wärmeübergang und Druckabfall in waagrechten Rohren bei der Stromung von verdampfenden Kältemitteln // *VDI-Forschungsheft.* 1967. No 523. p. 523–530.
18. Sharma C. P., Varshney B. S., Gupta C. P. Forced circulation heat transfer during boiling of freon 12 // *J. Inst. Eng. Mech. Eng. Div.*, 1976. vol. 57. No 1. p. 96–111.
19. Кошелев С. В. Оптимизация массовой скорости хладагента в трубах испарителей судовых установок // *Эксплуатация морского транспорта.* 2017. № 1. С. 55–64.
20. Юсида Х., Ямагути С. Теплообмен при двухфазном течении фреона-12 в горизонтальной трубе. — В кн.: Достижения в области теплообмена / Под общ. ред. В. М. Боришанского. М.: Мир, 1970, с. 253–271.
21. Малышев А. А. Локальные теплогидродинамические характеристики двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах: автореф. дисс.... канд. техн. наук. Л.: ЛТИХП, 1982, 18с.
22. 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.
23. 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.
24. Малышев 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.
25. Малышев А. А., Горячевская А. Н., Яковлева М. В. Расчет коэффициента теплоотдачи при внутритрубном кипении фреонов в каналах // *Вестник Международной академии холода.* 2009. № 4 С. 19–21
26. Хоवालг Д. М., Бараненко А. В. Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах. // *Вестник Международной академии холода.* 2013. № 4. С. 3–12.
16. Martinelli R. C., Nelson D. B. Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water. *Trans. ASME.* 1948, v. 70, No 6. p. 695–720.
17. Chawla J. Wärmeübergang und Druckabfall in waagrechten Rohren bei der Stromung von verdampfenden Kältemitteln. *VDI-Forschungsheft.* 1967. No 523. p. 523–530.
18. Sharma C. P., Varshney B. S., Gupta C. P. Forced circulation heat transfer during boiling of freon 12. *J. Inst. Eng. Mech. Eng. Div.*, 1976. vol. 57. No 1. p. 96–111.
19. Koshelev S. V. Optimization of the mass speed of the refrigerant in the pipes of evaporators of ship installations. *Operation of marine transport.* 2017. No. 1. Pp. 55–64. (in Russian)
20. Yushida X., Yamaguchi S. heat Transfer in two-phase flow of freon-12 in a horizontal pipe. — In the book.: Achievements in the field of heat transfer / Ed. by V. M. Borishansky. Moscow: Mir, 1970, pp. 253–271. (in Russian)
21. Malyshev A. A. Local heat-hydrodynamic characteristics of two-phase refrigerant flows in horizontal pipes: thesis PhD. Leningrad, 1982, 18 p. (in Russian)
22. Malyshev A. A., Danilova G. N. heat Transfer and hydrodynamics of two-phase freon flows in the channels of refrigerating machine evaporators. *Engineering and physics journal.* 1984. XLVIII. 17–27 p. (in Russian)
23. 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. (in Russian)
24. Malyshev A. A., Kisser K. V., Filatov A. S. New methods for predicting the flow modes of boiling refrigerants in micro-and mini-channels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2016. No. 2. Pp. 67–70. (in Russian)
25. Malyshev A. A., Goryachevskaya A. N., Yakovleva M. V. Calculation of the heat transfer coefficient for in-tube boiling of freons in channels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2009. No. 4 p. 19–21. (in Russian)
26. Khovalyg D. M., Baranenko A. V. heat Transfer at boiling of refrigerants in small channels. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda.* 2013. No. 4. Pp. 3–12. (in Russian)

Сведения об авторах

Малышев Александр Александрович

К. т. н., старший научный сотрудник, доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, malyshev46@list.ru

Малинина Ольга Сергеевна

К. т. н., доцент факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, holmash_malinina@mail.ru

Калимжанов Данияр Ерболович

Магистрант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, danik95_95@mail.ru

Сухов Павел Сергеевич

Магистрант факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, noks536@yandex.ru

Куадио Коффи Фабрис

Аспирант, инженер факультета низкотемпературной энергетики Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, fabkoffi2000@yahoo.fr

Information about authors

Malyshev Aleksander A.

Ph. D., Senior researcher, Associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, malyshev46@list.ru

Malinina Olga S.

Ph. D., Associate professor of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, holmash_malinina@mail.ru

Kalimjanov Daniyar E.

Undergraduate of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, danik95_95@mail.ru

Sukhov Pavel S.

Undergraduate of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, noks536@yandex.ru

Kuadio Koffi Fabris

Graduate student, Engineer of Faculty of Cryogenic Engineering of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, fabkoffi2000@yahoo.fr