

УДК 621.565

## Сравнительные расчеты коэффициента теплоотдачи при кипении хладагентов в трубах

С. В. КОШЕЛЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук Ю. Н. СЛАСТИХИН,  
канд. техн. наук А. И. ЕЙДЕЮС

<sup>1</sup>xktk@bga.gazinter.net

Калининградский государственный университет  
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота

Статья подготовлена с целью выявления наиболее подходящих для инженерной практики методик расчета коэффициента теплоотдачи (КТО) при кипении хладагентов в горизонтальных трубах с внутренним диаметром  $d_T > 3$  мм. Сделан обзор методик расчета КТО. Обсуждаются условия, при которых методики расчета КТО в макро-каналах можно распространить на мини-каналы. Проведен анализ ряда опубликованных работ, посвященных оценке точности методик предсказания КТО при кипении жидкостей в трубах, выбрано по пять лучших методик. В разных сочетаниях к числу лучших отнесена 21 методика. Пять из них использовано в расчетах с помощью компьютерной программы. Определены средние КТО  $\alpha_{ср}$  и по 15 другим методикам для 11 вариантов условий кипения хладагентов R134a, R22, R290, R32, R404A, R407C, R410A, R507. Охвачен диапазон изменения температуры кипения  $t_0 = -15...+5$  °C, диаметра  $d_T = 6...13,84$  мм, массовой скорости  $w_p = 100...500$  кг/(м<sup>2</sup>·с), плотности теплового потока  $q = 3750...15000$  Вт/м<sup>2</sup>, массового паросодержания в начале зоны кипения  $x_n = 0,01...0,1$  и на выходе  $x_e = 0,9...0,95$ . Сравнение результатов расчета проводилось по трем показателям, а к наиболее подходящим отнесены методики: которые при одинаковых исходных данных дают наиболее близкие значения среднего КТО; по которым отношения наибольшего КТО к наименьшему во всех вариантах не превышает 1,4 для всех хладагентов; а также локальные КТО по которым имеют наибольшие значения при паросодержаниях  $x$ , соответствующих кольцевому режиму потока. Указанным условиям удовлетворяют компьютерная программа со свидетельством № 2015610039, а также методики авторов Wattlelet и др. (1994), Kattan и др. (1998), Fang и др. (2017), хотя последняя не учитывает изменения локальных КТО.

**Ключевые слова:** хладагенты, кипение, горизонтальные трубы, коэффициент теплоотдачи, методики расчета, выбор.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 27.01.2020, принята к печати 03.03.2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-65-72

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Кошелев С.В., Сластихин Ю. Н., Ейдеюс А. И. Сравнительные расчеты коэффициента теплоотдачи при кипении хладагентов в трубах // Вестник Международной академии холода. 2020. № 2. С. 65–72.

## Comparative calculations of the heat transfer coefficient during refrigerant boiling in tubes

S. V. KOSHELEV<sup>1</sup>, Ph. D. Yu. N. SLASTIKHIN, Ph. D. A. I. EIDEYUS

xktk@bga.gazinter.net

Kaliningrad State Technical University  
Baltic Fishing Fleet State Academy

The article is aimed at identifying the most suitable heat transfer coefficient (HTC) correlations for refrigerant flow boiling in conventional horizontal tubes with an inner diameter  $d_T > 3$  mm. A review of the HTC correlations is made. The conditions under which the HTC correlations in macro-channels can be extended to mini-channels are discussed. The analysis of a number of published works is carried out the accuracy of the methods for predicting HTC during boiling liquids in tubes, five best correlations were selected. In various combinations, 21 correlations are among the best. Five of them were used in our computer program. After its expansion, the average HTC  $\alpha_{ср}$  was also determined by 15 other correlations for 11 variants of the boiling conditions of the refrigerants R134a, R22, R290, R32, R404A, R407C, R410A, and R507. The range of variation of the boiling temperature  $t_0 = -15...+5$  °C, diameter  $d_T = 6...13,84$  mm, mass velocity  $w_p = 100...500$  kg/(m<sup>2</sup>·s), heat flux density  $q = 3750...15000$  W/m<sup>2</sup>, vapor quality at the beginning of the boiling zone  $x_n = 0,01...0,1$  and at the outlet  $x_e = 0,9...0,95$ . Comparison of the calculation results was carried out according to three indicators, and the most suitable methods are: a) which, with the same initial data, give the closest values of the average HTC; b) for which the ratio

of the largest HTC to the lowest one in all cases does not exceed 1.4 for all refrigerants; c) local HTC for which have the greatest values at vapor qualities  $x$  corresponding to the annular flow regime. These conditions are met by a computer program with certificate No. 2015610039, as well as the methods by Wattelet et al. (1994), Kattan et al. (1998), and Fang et al. (2017), although the latter does not take into account changes in local HTC.

**Keywords:** refrigerants, boiling, horizontal tubes, heat transfer coefficient, calculation methods, choice.

#### Article info:

Received 27/01/2020, accepted 03/03/2020

DOI: 10.17586/1606-4313-2020-19-2-65-72

Article in Russian

#### For citation:

Koshelev S. V., Slastikhin Yu. N., Eideyus A. I. Comparative calculations of the heat transfer coefficient during refrigerant boiling in tubes. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2020. No 2. p. 65-72.

### Введение

Достоверные данные о коэффициентах теплоотдачи (КТО) необходимы для грамотного проектирования новых, подбора готовых и анализа работы существующих испарителей с кипением хладагента в трубах. К настоящему времени разработано много методик расчета КТО. Как правило, результаты по ним при конкретных условиях кипения выбранного хладагента не совпадают, а степень их расхождения зависит от вида хладагента и условий кипения. Неоднократно проводилась оценка достоверности того или иного числа методик. В качестве показателя точности чаще всего используется среднее абсолютное отклонение расчетных КТО  $\alpha_p$  от экспериментальных значений  $\alpha_e$ . Другие показатели точности определяются не всегда.

В целях выявления наиболее подходящих для инженерной практики методик рассмотрено восемь работ, посвященных оценке достоверности разного числа методик предсказания КТО [1]–[8]. Из них для дальнейшего анализа выбраны методики, которые по этим оценкам входят в пятерку лучших и дают среднее абсолютное отклонение не больше 50%. Оказалось, что 21 методика в разных сочетаниях попадает в пятерку лучших. Они подготовлены на базе экспериментальных данных по кипению современных хладагентов в обыкновенных (макро-) и мини — трубах. Пять обобщенных методик из упомянутого числа лучших после некоторой корректировки используются в компьютерной программе [9]. Сопоставление результатов расчета по ней с доступными экспериментальными данными показало, что наилучшее их совпадение достигается, когда средний КТО  $\alpha_{oc}$  определяется путем осреднения результатов расчета по всем пяти методикам.

### Обзор методик расчета КТО

По виду экспериментальных данных, использованных при подготовке методик, различают два их типа:

- методики на базе данных по кипению одной жидкости;
- методики на базе данных по кипению ряда жидкостей [10].

Обобщенные методики, опирающиеся на многочисленные данные по кипению разных жидкостей в широком диапазоне варьируемых переменных, были получены до 2000 г. Позднее внимание специалистов переключилось на определение КТО в малых каналах, а также

на корректировку известных методик применительно к кипению отдельных, как в обычных трубах, так и в малых каналах.

В зависимости от гидравлического диаметра  $d_r$  различают обычные каналы  $d_r > 3$  мм, мини-каналы  $d_r = 0,2–3$  мм и микро-каналы  $d_r = 0,01–0,2$  мм [11]. Существует также деление на макро-каналы  $d_r > 6$  мм, компактные каналы  $d_r = 1–6$  мм, мезо-каналы  $d_r = 0,1–1$  мм и микро-каналы  $d_r = 1–100$  мм [12]. По способу учета составляющих механизма кипения, авторы статьи [1] делят методики на семь групп и приводят краткое описание методики каждой группы с некоторыми комментариями.

Экспериментальные данные по кипению конкретного хладагента в трубах выбранного диаметра  $d_r$  обычно представляют в виде зависимости локальных КТО от массового паросодержания  $x$ , плотности теплового потока  $q$  и массовой скорости  $w_p$  при температуре кипения  $t_0$ , которую поддерживают постоянной на входе или выходе зоны кипения. При подготовке методик расчета КТО считаются известными значения  $d_r$ ,  $t_0$ ,  $q$ ,  $w_p$  и показатели свойств хладагента. Паросодержания в начале  $x_n$  и на выходе  $x_v$  зоны кипения или некоторого ее участка относятся к управляемым (независимым) переменным. В некоторых методиках используется дополнительная информация о режимах потока (составе парожидкостной смеси) в характерных диапазонах паросодержания  $x$ . Для примера результаты экспериментального определения локальных КТО по кипению R134a в горизонтальной трубе с  $d_r = 13,84$  мм, взятые из статьи [13], показаны на рис. 1. Характерно наличие большого числа точек на каждой из трех кривых, полученных при разных температурах  $t_0$ . Области режимов потока обозначены буквами:  $S$  — снарядный,  $I$  — перемежающийся,  $A$  — кольцевой,  $D$  — высыхания пленки,  $M$  — тумана. Наибольшие значения КТО получаются в кольцевом режиме потока.

Количество теплоты  $Q_n$ , подведенной к испарительному участку, находится по уравнению теплового баланса, которое можно представить в нескольких формах:

$$Q_n = G \Delta i = q \cdot \pi \cdot d_r \cdot l_k = w_p \cdot \pi \cdot d_r^2 \cdot r \cdot \Delta x / 4, \quad (1)$$

где  $G$  — массовый расход хладагента, кг/с;  $\Delta i$  — изменение энтальпии хладагента, Дж/кг;  $q$  — плотность теплового потока, отнесенная к внутренней поверхности зоны кипения, Вт/м<sup>2</sup>;  $l_k$  — длина зоны кипения, м;  $w_p$  — массовая скорость, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $d_r$  — внутренний диаметр, м;

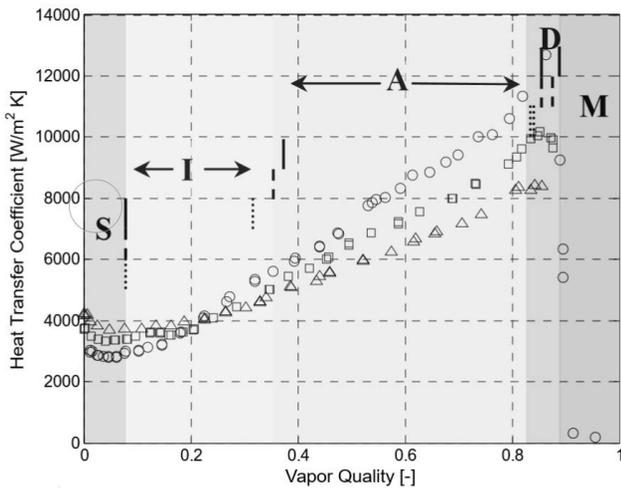


Рис. 1. Результаты экспериментального определения КТО для R134a:  $\circ$  —  $t_0 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $wp = 499,7 \text{ кг/л}$ ;  $q = 7530 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\square$  —  $t_0 = 15,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $wp = 499,6 \text{ кг/л}$ ;  $q = 7560 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\Delta$  —  $t_0 = 20,02 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $wp = 500,6 \text{ кг/л}$ ;  $q = 7570 \text{ Вт/м}^2$

Fig. 1. Experimental values of HTC for R134a

$r$  — удельная теплота парообразования,  $r = i'' - i'$ , Дж/кг;  $\Delta x$  — изменение массового паросодержания,  $x_b - x_n$ .

Из уравнения (1) получаются выражения для определения длины  $l_k$  и массовой скорости  $wr$ :

$$l_k = wr \cdot d_t \cdot r \cdot \Delta x / (4q); wr = 4q \cdot l_k / (d_t \cdot r \cdot \Delta x). \quad (2)$$

Зависимость длины  $l_k$  от  $wr$  и  $q$  учитывается при обработке опытных данных, полученных на экспериментальной установке с фиксированной длиной испытуемой трубы  $l_t$ . Чтобы расширить диапазон значений  $wr$  и  $q$ , испытания проводят поочередно при небольших изменениях паросодержания  $\Delta x$ . Заметим, что по уравнению (1) при заданных значениях  $Q_n$ ,  $l_k$  и  $\Delta x$  можно находить  $wr$  и  $q$ . В ряде случаев целесообразно считать нагрузку  $Q_n$  и длину  $l_t$  известными, а к искомым переменным отнести  $q$  и  $wr$ . Из выражений (2) также следует, что при совпадении варьируемых переменных значения  $l_k$ ,  $wr$ , а следовательно, и КТО зависят от вида хладагента, показатели свойств у которых, включая теплоту парообразования  $r$ , индивидуальны.

В последнее время предложено много методик расчета КТО в мини-каналах. Нередко их распространяют на кипение в обычных трубах и зачастую получают приемлемое совпадение с экспериментальными данными. Ряд авторов переход от макро- к мини-каналам определяет по числу Бонда  $Bo = g \cdot d_t^2 (\rho' - \rho'') / \sigma$ , однако граничное его значение у разных авторов неодинаковое. Используя безразмерные числа, М. Shah [14] предложил находить границу между макро- и мини- каналами по числу  $F$ , которое можно представить в виде:

$$F = 2,1 - 0,008 (wr)^2 \cdot d_t / (\rho'' \cdot \sigma) - 110g / (wr \cdot r). \quad (3)$$

Здесь  $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости, Н/м;  $g$  — ускорение свободного падения. Если  $F < 1$ , методики определения КТО в обычных трубах можно применить к расчету КТО в мини-каналах. Они подходят, в частности, при  $d_t \geq 0,3$  и  $Bo > 0,15$ . Возможности применения методик расчета КТО в мини-каналах к кипению в обычных трубах пока не установлены.

### Данные о точности методик расчета КТО

При оценке достоверности методик расчета КТО в число подходящих для горизонтальных труб зачастую включают и методики, подготовленные по данным о кипении в вертикальных трубах. Не всегда оговаривается по данным о средних или локальных КТО определялись отклонения расчетных КТО от экспериментальных их значений. Поскольку локальные КТО зависят от паросодержания  $x$ , оценка по отклонениям средних КТО оказывается менее трудоемкой. При таком подходе в число сравниваемых (и даже лучших) попадают и методики, по которым расчетный КТО не зависит от паросодержания  $x$ , т.е. рассчитывается только средний КТО. Остается неопределенным лишь вопрос о количестве сравниваемых точек и характере изменения КТО по ходу движения потока. В целях экономии места описание методик здесь не приводится.

По мере появления конкурирующих методик расчета КТО проводилась сравнительная оценка как их авторами, так и независимыми специалистами. Степень совпадения расчетных КТО  $\alpha_r$  с экспериментальными их значениями  $\alpha_e$  находят с использованием показателей  $\epsilon_i$  — индивидуальное отклонение для каждой точки,  $\epsilon_c$  — среднее отклонение для сравниваемого массива,  $\epsilon_{ac}$  — среднее абсолютное отклонение,  $\sigma$  — среднее квадратичное (стандартное) отклонение [15]. Часто их выражают в процентах. Наряду с ними находят относительное количество сравниваемых точек, отклонения  $\epsilon_i$  которых не превышают некоторой заданной в процентах величины  $\lambda$ . Чаще всего находят относительное число точек, попадающих в диапазон  $\pm 30\%$ . Его нередко обозначают как  $\lambda_{30}$ . Не всегда определяют все показатели точности. Во многих работах результаты расчета по соответствующей методике считаются удовлетворительными, если среднее абсолютное отклонение  $\epsilon_{ac} \leq 50\%$  и не менее 70% точек попадает в диапазон  $\lambda_{30}$ .

Достаточно полный обзор и сравнительная оценка методик расчета КТО при внутритрубном кипении жидкостей проводится в статье [1]. Авторы ее выполнили оценку 50 методик путем сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными из 67 источников. Количественная оценка точности методик проводилась для пяти групп условий кипения. По каждой из них выделено пять лучших методик с указанием погрешностей  $\epsilon_c$  и  $\epsilon_{ac}$  в процентах. Проявляя интерес к кипению в обычных горизонтальных трубах, приведем после номера источника количественные данные о лучших методиках лишь для трех групп:

- общий массив:  $\epsilon_c = -2,8\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 7,2\%$  [10];  $\epsilon_c = -20,9\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 41,7\%$  [16];  $\epsilon_c = 6,8\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 43,5\%$  [17];  $\epsilon_c = -3,7\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 43,8\%$  [18];  $\epsilon_c = -6,5\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 44,7\%$  [19];
- трубы с  $d_t \geq 3$  мм:  $\epsilon_c = 1,4\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 6,9\%$  [10];  $\epsilon_c = -26,0\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 40,0\%$  [16];  $\epsilon_c = -0,2\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 41,9\%$  [20];  $\epsilon_c = -11,5\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 42,6\%$  [18];  $\epsilon_c = 2,5\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 44,4\%$  [21];
- горизонтальные трубы:  $\epsilon_c = 3,4\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 7,4\%$  [10];  $\epsilon_c = -22,3\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 41,9\%$  [16];  $\epsilon_c = 4,8\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 42,1\%$  [17];  $\epsilon_c = -9,3\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 43,7\%$  [19];  $\epsilon_c = 2,5\%$ ,  $\epsilon_{ac} = 44,1\%$  [21].

Методика [10] названа универсальной и занимает первое место во всех пяти группах. Особенности ее рассмотрим далее. Возможность применения методики [16] к кипению в обычных трубах не очевидна, так как она

получена по экспериментальным данным для малых каналов с  $d_t=0,16-2,92$  мм. К сожалению, в статье [1] при определении погрешностей КТО для труб с  $d_t \geq 3$  мм не разграничены экспериментальные данные, отнесенные к кипению в вертикальных и горизонтальных трубах. Аналогично, данные по горизонтальным трубам объединены без их разграничения по диаметру больше и меньше 3 мм.

Согласно оценке шести обобщенных методик при кипении 30 жидкостей в горизонтальных трубах диаметром от 2 до 25 мм, в статье [2] приводятся следующие показатели точности пяти обобщенных методик:  $\varepsilon_c = -6,4\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 17,5\%$  [22];  $\varepsilon_c = -4,9\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 18,9\%$  [17];  $\varepsilon_c = -7,5\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 23,7\%$  [23];  $\varepsilon_c = -4,9\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 26,0\%$  [18];  $\varepsilon_c = 6,6\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 27,8\%$  [21].

Чтобы упростить методику, представленную в работе [23], автор статьи [2] предложил для определения пузырьковой составляющей КТО использовать методику [24].

По данным статьи [3], для расчета КТО при кипении R22 в горизонтальных трубах из 26 рассмотренных наилучшие показатели точности имеют методики:  $\varepsilon_c = -2,4\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 30,2\%$  [17];  $\varepsilon_c = 26,5\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 31,1\%$  [25];  $\varepsilon_c = 8,5\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 32,0\%$  [20];  $\varepsilon_c = -9,2\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 32,4\%$  [18];  $\varepsilon_c = -27,9\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 34,3\%$  [16].

Авторы статьи [4] провели экспериментальное исследование кипения R1234ze (E) и R134a в горизонтальной трубе  $d_t=6$  мм. Оказалось, что КТО обоих хладагентов близки между собой. Для 467 значений локальных КТО выполнено сопоставление с результатами расчета по восьми методикам. Определялись четыре показателя точности. Для пяти лучших методик получены значения  $\varepsilon_c$ ,  $\varepsilon_{ac}$  в процентах:  $\varepsilon_c = -6,3\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 16,7\%$  [22];  $\varepsilon_c = 17,2$ ,  $\varepsilon_{ac} = 20,2$  [26];  $\varepsilon_c = -13,7$ ,  $\varepsilon_{ac} = 22,2$  [17];  $\varepsilon_c = 10,2$ ,  $\varepsilon_{ac} = 24,7$  [27];  $\varepsilon_c = -15,1$ ,  $\varepsilon_{ac} = 32,3$  [28].

По оценкам авторов статьи [8], применительно к кипению R134a в трубах с  $d_t=8,62$  мм, в пятерку лучших входят методики [29], [28], [30], [31], [22].

Авторы статьи [5] подготовили методику расчета КТО при кипении R410A в горизонтальных трубах с  $d_t > 3,1$  мм. Они сопоставили результаты расчета по ней и шести другим методикам с 61 точкой собственных экспериментальных данных. Абсолютная погрешность пяти лучших методик составила:  $\varepsilon_{ac} = 21,0\%$  [5];  $\varepsilon_{ac} = 25,3\%$  [17];  $\varepsilon_{ac} = 33,4\%$  [32];  $\varepsilon_{ac} = 45,8\%$  [22];  $\varepsilon_{ac} = 50,2\%$  [18].

В статье [6] экспериментальные данные по кипению смеси R50/R170 для восьми сочетаний компонентов сравнивались с результатами расчета по пяти методикам. Абсолютную погрешность менее 50% показали лишь три методики:  $\varepsilon_{ac} = 27,8\%$  [6];  $\varepsilon_{ac} = 30,4\%$  [33];  $\varepsilon_{ac} = 41,4\%$  [26].

Сопоставление расчетных и экспериментальных КТО при кипении R134a в трубах диаметром  $d_t=0,5-13,84$  мм представлено в статье [7]. Собранные из 19 источников опытные данные включают 134 точки для труб с  $d_t > 3,1$  мм. По ним проведена оценка достоверности 11 методик. В пятерку лучших вошли методики:  $\varepsilon_c = -8,9\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 19,1\%$  [7];  $\varepsilon_c = -12,9$ ,  $\varepsilon_{ac} = 30,1$  [28];  $\varepsilon_c = -19,4$ ,  $\varepsilon_{ac} = 30,3$  [17];  $\varepsilon_c = -31,3\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 35,1\%$  [21];  $\varepsilon_c = -22,6\%$ ,  $\varepsilon_{ac} = 35,6\%$  [32].

Из приведенных данных видно, что разные исследователи в пятерку лучших включают методики расчета

КТО, средняя абсолютная погрешность которых доходит до 50%. Если не считать методики [10], то на первое место выходят методики с  $\varepsilon_{ac} = (16,7-30,2)\%$ . Показатели точности конкретной методики зависят также от массива экспериментальных данных. Важную роль играют параметры кипения и вид хладагента. Чем шире диапазон изменения варьируемых переменных, тем больше становятся отклонения результатов расчета от опытных данных. Характер влияния одноименных переменных на расчетные КТО неодинаков в разных методиках. Вполне вероятны неодинаковые погрешности экспериментального определения КТО на разных установках. Наблюдается тенденция к оценке точности методик применительно к кипению одного хладагента.

### Расчет КТО по разным методикам

По приведенным в источниках [1]–[8] оценкам достоверности методик расчета КТО к лучшим в разных сочетаниях относится 21 методика. За основу выполнения расчета принята компьютерная программа [9]. В нее заложены методики [22], [28], [17], [21], [18]. Наряду с локальными  $\alpha_n$  она рассчитывает средний КТО  $\alpha_c$ . Одновременно определяются длина зоны кипения  $l_k$  и падение давления  $\Delta P_n$ , по которому можно найти понижение температуры насыщения  $\Delta t_s$  соответствующего хладагента в зоне кипения. Ранее проводилось сопоставление результатов расчета КТО с экспериментальными данными [15]. Из разных источников получено 255 значений среднего КТО  $\alpha_c$  при кипении шести хладагентов. Расчетные КТО  $\alpha_c$  сопоставлялись с КТО  $\alpha_n$  при условиях кипения, соответствующих каждому эксперименту. Статистический анализ показал, что наилучшее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными достигается при использовании осредненного по пяти методикам КТО  $\alpha_{oc}$ . При этом предварительно выполнялась корректировка заложенных в программу пяти методик, учитывающая наряду с турбулентным переходный и ламинарный режимы течения жидкой и паровой фаз кипящего потока.

При доработке программы [9] в нее дополнительно включены возможности расчета локальных и средних КТО по 15 другим методикам с общими для каждого варианта исходными данными. В таблицах, с учетом даты публикации, им присвоены номера: 1 — Chen [23], 2 — Lazarek [19], 3 — Jung [26], 4 — Kenning [31], 5 — Wattlelet [20], 6 — Tran [32], 7 — Kattan [30], 8 — Choi [33], 9 — Wansagnam [29], 10 — Bertch [16], 11 — Zou [6], 12 — Chien [5], 13 — Fang [25], 14 — Turgut [7], 15 — Fang [10]. Расчеты выполнялись применительно к кипению хладагентов R134a, R22, R290, R32, R404A, R407C, R410A, R507 в горизонтальных трубах. В доработанную программу не вошла методика [27]. Она ориентирована на использование карты режимов потока, которая составлена не для всех рассматриваемых хладагентов.

Расчеты КТО проводились при разных сочетаниях диаметра труб  $d_t$ , температуры кипения  $t_0$ , паросодержания  $x_n$  и  $x_a$ , теплового потока  $q$  и массовой скорости  $w_p$ . Для сравнительного анализа выполнено 11 вариантов расчета, сочетания исходных данных для семи хладагентов в которых приводятся в табл. 1. В расчетах, по кипению R290 при тех же сочетаниях других переменных

Таблица 1

Параметры исходных данных по вариантам

Table 1

Original data parameters for variants

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$t_0, ^\circ\text{C}$	5,0	5,0	5,0	-5,0	-15,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
$d_r, \text{мм}$	13,84	10	6	10	10	10	10	10	10	10	10
$q, \text{Вт/м}^2$	7500	7500	7500	7500	7500	3750	15000	7500	7500	7500	7500
$\text{wr}, \text{кг/ (м}^2\text{с)}$	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	300,0	200,0	100,0	300,0	500,0
$x_n$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10	0,01
$x_b$	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,90	0,95

задано  $q=5000-20000 \text{ Вт/м}^2$  и  $\text{wr}=66,6-333,3 \text{ кг/ (м}^2\text{с)}$ , чтобы исключить завышенные значения длины зоны кипения  $l_k$  и падения давления  $\Delta P_n$ . Результаты расчета осредненного  $\alpha_{oc}$  и средних по каждой из 15 методик КТО  $\alpha_{ci}$  для 8 хладагентов будут рассмотрены в последующей публикации.

Как основная [9], так и доработанная по 15 методикам, программа расчета КТО использует задаваемые значения варьируемых переменных и показатели свойств выбранного хладагента, извлекаемые автоматически из электронной таблицы в зависимости от температуры кипения  $t_0$ . Особенность методики 15 обусловлена тем, что в уравнение для определения числа Нуссельта Nu не входит паросодержание  $x$ , и используется отношение вязкости насыщенного хладагента  $\mu_{ef}$  к его вязкости  $\mu_{ew}$  при температуре внутренней стенки трубы  $t_w$  [10]. Это означает, что определяется только средний КТО  $\alpha_c$ , а повышение температуры  $t_w$  можно находить по выражению  $q=\alpha_c (t_w-t_0)$ . Пока КТО  $\alpha_c$  не найден, для определения температуры  $t_w$  приходится делать последовательные приближения и многократно находить вязкость  $\mu_{ew}$ . Чтобы упростить процедуру, для определения температуры  $t_w$  мы использовали осредненный по пяти методикам КТО

$\alpha_{oc}$ . Расчеты показывают, что расчетный КТО  $\alpha_c$  существенно зависит от отношения вязкостей  $\mu_{ef}/\mu_{ew}$ . За счет небольшой его корректировки можно приблизиться к желаемому результату.

Обсуждение результатов

Значения средних КТО  $\alpha_{ci}$  заметно расходятся в зависимости от методики их расчета и варианта исходных данных. Чтобы выявить характерные особенности рассматриваемых методик, целесообразно перейти к относительным значениям. Ввиду ограниченного доступа к широкой базе экспериментальных данных определялись отношения расчетных КТО  $\alpha_{ci}$  к осредненным их значениям  $\alpha_{oc}$ , то есть  $\bar{\alpha}_{ci} = \alpha_{ci} / \alpha_{oc}$ . Как отмечалось выше, сопоставление расчетных значений  $\alpha_{oc}$  с доступными экспериментальными данными показало хорошее их совпадение [15].

Относительные значения  $\bar{\alpha}_{ci} = \alpha_{ci} / \alpha_{oc}$  удобнее сравнивать. К сожалению, они также занимают много места. В табл. 2 приведены данные о  $\bar{\alpha}_{ci}$  для R410A, полученные по прежним методикам и вариантам исходных данных, которые указывают на значительные расхождения между значениями  $\bar{\alpha}_{ci}$  в зависимости от методики расчета

Таблица 2

Относительные коэффициенты теплоотдачи (КТО)  $\bar{\alpha}_{ci} = \alpha_{ci} / \alpha_{oc}$  для R410A

Table 2

Relative heat coefficients (HTC)  $\bar{\alpha}_{ci} = \alpha_{ci} / \alpha_{oc}$  for R410A

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,099	1,130	1,170	1,100	1,067	1,138	1,104	1,189	1,454	1,136	1,096
2	0,614	0,599	0,573	0,514	0,435	0,401	0,846	0,700	0,914	0,587	0,457
3	1,453	1,423	1,372	1,414	1,395	1,262	1,464	1,578	2,219	1,272	1,242
4	0,968	0,961	0,947	0,991	1,012	1,056	0,828	0,861	0,714	0,980	1,066
5	1,145	1,114	1,067	1,080	1,056	1,110	1,171	1,133	1,276	1,118	1,121
6	1,133	0,957	0,730	0,707	0,516	0,693	1,249	1,185	1,710	0,938	0,679
7	1,164	1,168	1,180	1,161	1,140	1,195	1,189	1,157	1,309	1,209	1,236
8	0,616	0,610	0,597	0,606	0,600	0,508	0,694	0,645	0,713	0,631	0,559
9	1,036	1,030	1,015	0,944	0,854	0,857	1,170	1,085	1,186	1,022	0,907
10	0,459	0,441	0,423	0,373	0,313	0,342	0,557	0,538	0,762	0,430	0,320
11	0,704	0,676	0,632	0,615	0,569	0,585	0,812	0,764	1,029	0,673	0,593
12	2,836	1,907	1,055	1,444	1,102	1,396	2,516	2,297	3,208	1,772	1,347
13	1,392	1,381	1,394	1,454	1,501	1,751	1,111	1,271	1,179	1,422	1,621
14	1,324	1,276	1,202	1,168	1,112	1,204	1,361	1,354	1,643	1,245	1,168
15	0,980	0,974	1,015	0,977	0,965	1,006	0,977	1,002	1,016	0,990	0,983

Таблица 3

Усредненные по всем вариантам относительные КТО  $\bar{\alpha}_{cp}$ 

Table 3

Average values for all the variants with respect to HTC  $\bar{\alpha}_{cp}$ 

№	R134a	R22	R290	R32	R404A	R407C	R410A	R507	$\bar{\alpha}_{cp8}$
1	1,077	1,114	1,205	1,181	1,120	1,115	1,153	1,123	1,136
2	0,411	0,517	0,550	0,543	0,595	0,483	0,604	0,607	0,539
3	1,451	1,412	1,337	1,494	1,369	1,434	1,463	1,368	1,416
4	0,959	0,936	0,936	1,053	0,859	0,948	0,944	0,850	0,936
5	1,018	1,062	1,201	1,165	1,088	1,068	1,126	1,093	1,103
6	0,706	0,845	0,804	0,533	1,491	0,783	0,954	1,577	0,962
7	1,128	1,156	1,276	1,240	1,156	1,161	1,192	1,156	1,183
8	0,643	0,622	0,638	0,589	0,638	0,626	0,616	0,639	0,626
9	0,875	0,926	0,988	0,921	1,049	0,922	1,010	1,061	0,969
10	0,347	0,397	0,505	0,400	0,477	0,393	0,451	0,482	0,431
11	0,633	0,648	0,802	0,638	0,734	0,661	0,696	0,743	0,694
12	1,164	1,449	1,377	1,429	2,176	1,475	1,898	2,267	1,654
13	1,286	1,385	1,452	1,732	1,174	1,355	1,407	1,155	1,368
14	1,117	1,168	1,165	1,211	1,362	1,208	1,278	1,387	1,237
15	0,928	0,993	1,009	0,859	0,948	1,061	0,990	0,937	0,965

и варианта исходных данных. Так, по методике 12 для всех хладагентов в рассматриваемых вариантах  $\bar{\alpha}_{ci} = 1,1-3,21$ , а по методике 15 –  $\bar{\alpha}_{ci} = 0,965-1,016$ . Близкие к единице значения  $\bar{\alpha}_{ci}$  во многих вариантах получают также по методикам 4, 5, 7 и 9.

Сравнение относительных КТО по хладагентам и вариантам исходных данных показывает, что наименьшие значения  $\bar{\alpha}_{ci} = 0,236-0,342$  получают по методике 10 (Bertch) в варианте 5. Лишь для R134a  $\bar{\alpha}_{ci} = 0,231$  в варианте 11. Наибольшие значения  $\bar{\alpha}_{ci} = 2,119-3,802$  для семи хладагентов оказываются по методике 12 (Chien) в варианте 9, хотя для R134a  $\bar{\alpha}_{ci} = 2,369$  — по методике 3 (Jung).

С целью компактного представления расчетных данных для каждого хладагента найдены средние по всем вариантам относительные КТО  $\bar{\alpha}_{cp} = \sum \alpha_{ci} / 11$  (табл. 3). Правый столбец таблицы содержит осредненные по 11 вариантам и 8 хладагентам относительные КТО  $\bar{\alpha}_{cp8} = \sum \bar{\alpha}_{ci} / 8$ . Значения  $\bar{\alpha}_{cp}$  свидетельствуют об удовлетворительно совпадении средних относительных КТО для всех восьми хладагентов по методикам 1, 4, 5, 7, 9, 15 с данными, полученными по программе [9].

Если судить по осредненным КТО  $\bar{\alpha}_{cp8}$ , приведенным в правом столбце табл. 3, то в число приемлемых можно включить также методики 6 и 14, хотя для некоторых хладагентов по ним получают завышенные значения  $\bar{\alpha}_{cp}$ . К тому же, индивидуальные значения  $\bar{\alpha}_{ci}$  имеют в ряде случаев значительные отклонения от единицы. Малопригодными для рассматриваемых хладагентов в выбранном диапазоне исходных данных следует признать методики 2, 3, 8, 10, 11, 12, 13. Они тем не менее, могут найти применение для определения КТО при других условиях кипения хладагентов.

Чтобы оценить разброс КТО, найденных по разным методикам для 11 вариантов исходных данных дополнительно выявлялись крайние для каждого варианта значения относительного КТО по всем хладагентам, то есть

наибольшее  $\bar{\alpha}_{ci,max}$  и наименьшее  $\bar{\alpha}_{ci,min}$  значения, а также их отношения  $\bar{\alpha}_{ci,max} / \bar{\alpha}_{ci,min}$ , полученные в разных вариантах расчета. В правом столбце приведены средние по 8 хладагентам значения указанного отношения.

Как следует из табл. 4, отношения  $\bar{\alpha}_{ci,max} / \bar{\alpha}_{ci,min}$  превышают 1,6 почти для всех хладагентов по методикам 2, 3, 6, 10, 11, 12. Это означает, что они плохо учитывают влияние исходных данных. Отношения  $\bar{\alpha}_{ci,max} / \bar{\alpha}_{ci,min}$  менее 1,4 для всех хладагентов получают по методикам 5, 7 и 15. Среднее по 8 хладагентам значение этого отношения минимально по методике 15, что свидетельствует о наилучшем учете свойств хладагента. Судя по среднему значению рассматриваемого отношения (правый столбец) неплохие показатели имеют методики 1, 4, 8, 9, 14, хотя по ним  $\bar{\alpha}_{ci,max} / \bar{\alpha}_{ci,min} > 1,5$  для одного или нескольких хладагентов.

Графики изменения локальных КТО  $\alpha_{ci}$  в зависимости от паросодержания  $x$  содержат дополнительную информацию о достоверности методик расчета. Подобные графики для R134a при исходных данных варианта 2 имеют правдоподобный вид нарастающей кривой с точкой перегиба при  $x > 0,8$  в случае их построения по программе [9] и методикам 1 (Chen), 4 (Kenning), 5 (Wattelet), 7 (Kattan), 8 (Choi), 13 (Fang 2013). К сожалению, средние КТО  $\alpha_c$  получают заниженными по методике 8 и завышенными по методике 13. Три методики дают значения среднего КТО  $\alpha_c$  независимо от паросодержания  $x$ . Лишь по методике 15 (Fang, 2017) получают ожидаемые значения  $\alpha_c$ . С учетом предыдущих замечаний наиболее достоверными среди 15 анализируемых можно считать методики 5 [20], 7 [30] и 15 [10].

## Выводы

Проведенное исследование методик расчета коэффициента теплоотдачи (КТО) при кипении хладагентов в горизонтальных трубах показало следующее.

Таблица 4

Отношения крайних значений  $\bar{\alpha}_{ci,max} / \bar{\alpha}_{ci,min}$

Table 4

Extreme values ratios  $\bar{\alpha}_{ci,max} / \bar{\alpha}_{ci,min}$

№	R134a	R22	R290	R32	R404A	R407C	R410A	R507	8 хладагент
1	1,502	1,430	1,425	1,284	1,436	1,471	1,363	1,435	1,418
2	2,970	2,509	2,238	2,453	2,241	2,614	2,281	2,207	2,439
3	1,958	1,664	1,328	1,895	1,668	1,797	1,786	1,668	1,720
4	1,176	1,346	1,916	1,192	1,494	1,292	1,494	1,530	1,430
5	1,126	1,180	1,333	1,076	1,326	1,209	1,208	1,339	1,224
6	3,911	3,460	2,928	3,484	3,181	3,797	3,313	3,131	3,401
7	1,203	1,171	1,393	1,078	1,230	1,216	1,148	1,237	1,209
8	1,801	1,529	1,366	1,484	1,315	1,592	1,403	1,381	1,484
9	1,802	1,522	1,370	1,488	1,363	1,600	1,388	1,342	1,484
10	3,206	2,613	2,267	2,557	2,366	2,767	2,437	2,346	2,570
11	1,630	1,766	1,812	1,752	1,776	1,760	1,807	1,778	1,760
12	3,087	2,956	2,828	2,819	4,576	3,043	2,910	3,077	3,162
13	1,456	1,555	1,608	1,553	1,565	1,504	1,459	1,549	1,531
14	1,345	1,364	1,327	1,179	1,767	1,454	1,478	1,768	1,460
15	1,101	1,144	1,389	1,056	1,036	1,037	1,053	1,033	1,106

1. Высокая точность как экспериментального, так и расчетного определения КТО при кипении хладагентов в трубах пока не достигнута, что объясняется сложностью протекающих процессов.

2. Сравнительные расчеты показывают, что для достаточно широкого диапазона условий кипения хладагентов наиболее подходящими являются методики [10, 20, 30], а также заложенные в программу [9] обобщенные методики [17, 18, 21, 22, 28] с учетом их корректировки и осреднения КТО.

3. Расчеты КТО при кипении в трубах следует объединять с определением падения давления двухфазного потока, чтобы избежать завышенного его значения и нежелательного понижения температуры насыщения.

4. Наименее изученными остаются процессы кипения хладагентов при малых значениях плотности теплового потока  $q$  и массовой скорости  $w$ , т. к. в этих условиях наступает переходный или ламинарный режим течения, и возрастают относительные погрешности измерения ряда параметров.

**Литература/References**

1. Fang X., Zhuang F., Chen C., et al. Saturated flow boiling heat transfer: review and assessment of prediction methods. *Heat Mass Transfer*. 2019. Vol. 55. p. 197–222.

2. Shah M. Evaluation of general correlation for heat transfer during boiling of saturated liquids in tubes and annuli. *HVAC&R Research*. 2006. 12 (4): p. 1047–1063.

3. Zhou Z., Fang X. Evaluation of Correlations of Flow Boiling Heat Transfer of R22 in Horizontal Channels. *The Scientific World Journal*. Volume April 29. 2013. 14 p. DOI:10.1155/2013/458797

4. Grauso S., Mastrullo R., Mauro A. W., et al. Flow pattern map, heat transfer and pressure drops during evaporation of R-1234ze (E) and R134a in a horizontal, circular smooth tube: Experiments

and assessment of predictive methods. *International Journal of Refrigeration* 2013. 36: p. 478–491.

5. Chien N., Vu P., Choi K., et al. A general correlation to predict the flow boiling heat transfer of R410a in macro/mini-channels. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. 2014. P. 1466.

6. Zou A., Gong M. Q., Wu J. F., et al. Heat transfer correlations for flow boiling of hydrocarbon mixtures inside horizontal tubes. *Physics Procedia*. 2015. Vol. 67. p. 655–660.

7. Turgut O. E., Asker M., Coban M. T. Saturated flow boiling heat transfer correlation for small channels based on R134a experimental data. Springer. *Arab J Sci Eng*. 2016. 19 p.

8. Celen A., Dalkilic S. A complete evaluation method for experimental data of flow boiling in smooth tubes. *International communications in heat and mass transfer*. 2017. Vol. 89. p. 108–121.

9. Кошелев С. В., Ейдеус А. И., Анищенко А. С. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610039. «Расчет коэффициентов теплоотдачи по разным методикам при кипении хладагента в горизонтальных трубах». Правообладатель КГТУ. Заявка № 20144619009 от 5.09.2014. Дата гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ 12.01.2015. [Koshelev S. V., Eideus A. I., Anischenko A. S. Certificate of state registration of computer programs No. 2015610039. «Calculation of heat transfer coefficients by different methods for boiling refrigerant in horizontal tubes.» Copyright holder: KSTU. Application No. 20144619009 dated 09/05/2014. State date registration in the Register of computer programs 01/12/2015. (in Russian)]

10. Fang X., Wu Q., Yuan Y. A general correlation for saturated flow boiling heat transfer in channels of various sizes and flow directions. *International journal of heat and mass transfer*. 2017. Vol. 107. p. 972–981.

11. Kandlikar S. G., Grande W. J. Evolution of microchannel flow passages — thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transf. Eng*. 2003. Vol. 24. p. 3–17.

12. Mehendale S. S., Shah R. K., Jacobi A. M. Fluid flow and heat transfer at micro and meso scales with applications to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews*. 2000. vol. 53, pp. 175–193.
13. Silva Lima R. J., Moreno Quiben J., Thome J. R. Flow boiling in horizontal smooth tubes: new heat transfer results for R-134a at three saturation temperatures. *Applied Thermal Engineering*, May 2009, Vol. 29, Issue 7. P. 1289–1298.
14. Shah M. M., Applicability of Correlations for Boiling/Condensing in Macrochannels to Minichannels. *Heat and Mass Transfer Research Journal*. 2018. Vol. 2. No. 1. P. 20–32.
15. Ейдеюс А. И. Теплоотдача и падение давления при кипении хладагентов в змеевиках / А. И. Ейдеюс, С. В. Кошелев, М. Ю. Никишин // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 42–47. [Eideus, A. I. Heat transfer and pressure drop during boiling of refrigerants in coils / A. I. Eideus, S. V. Koshelev, M. Yu. Nikishin. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2016. No. 2. p. 42–47. (in Russian)]
16. Bertsch S. S., Groll E. A., Garimella S. V. A composite heat transfer correlation for saturated flow boiling in small channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. P. 2110–2118.
17. Gungor K. E., Winterton R. H. S. Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparison with data. *Chemical Engineering Research and Design*. 1987. Vol. 65, No 2. P. 148–156.
18. Liu Z., Winterton R. H. S. General correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation. *International Journal Heat Mass Transfer*. 1991. Vol. 34, No 11. P. 2759–2766.
19. Lazarek G. M., Black S. H. Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113. *Int. J. Heat Mass Transfer* 25 (1982) P. 945–959.
20. Wattelet J. P., Chato J. C., Souza A. L., Christoffersen B. R. Evaporative characteristics of R-12, R-134 a, and a mixture at low mass fluxes, *ASHRAE Trans*. 1994. Vol. 100. P. 603–615.
21. Kandlikar S. G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes. *Journal of heat transfer*. 1990. Vol. 112. P. 219–228.
22. Shah M. M. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equation and further study. *ASHRAE Trans*. 1982. Vol. 88. P. 185–196.
23. Chen J. C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow. *I & EC Process Des. Dev*. 1966. Vol. 5. P. 322–329.
24. Cooper M. G. Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling — a wide ranging examination using reduced properties, *Adv. Heat Transfer*. 1984. Vol. 16. P. 157–239.
25. Fang X. A new correlation of flow boiling heat transfer coefficient based on R134a data. *International journal of heat and mass transfer*. 2013. Vol. 66. P. 279–283.
26. Jung D. S., Radermacher R., Mc Linden M., Didion D. A study of flow boiling heat transfer with refrigerant mixtures. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1989. Vol. 32. P. 1751–1764.
27. Wojtan L., Ursenbacher T., Thome J. R. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part II—Development of a new heat transfer model for stratified-wavy, dryout and mist flow regimes. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2005. vol. 48. P. 2970–2985.
28. Gungor K. E., Winterton R. H. S. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli. *International Journal Heat Mass Transfer*. 1986. Vol. 29, No 3. P. 351–358.
29. Wongsangam J., Nualboonrueng T., Wongwises S. Performance of smooth and micro-fin tubes in high mass flux region of R-134a during evaporation. *Heat Mass Transf.* 2004. Vol. 40. P. 424–435.
30. Kattan N., Thome N. J. R., Favrat D. Flow boiling in horizontal tubes: part 3 — development of a new heat transfer model based on flow pattern. *J. Heat Transf.* 1998. Vol. 120 (1). P. 156–165.
31. Kenning D. B. R., Cooper M. G. Saturated flow boiling of water in vertical tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1989. Vol. 32. P. 445–458.
32. Tran T. N., Wambsgans M. W., France D. M. Small circular- and rectangular-channel boiling with two refrigerants. *Int. J. Multiph. Flow*. 1996. Vol. 22 (3). P. 485–498.
33. Choi T. Y., Kim Y. J., Kim M. S., Ro S. T. Evaporation heat transfer of R-32, R-134a, R-32/134a, and R-32/125/134a inside a horizontal smooth tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2000. Vol. 43. P. 3651–3660.

### Сведения об авторах

#### Кошелев Сергей Валерьевич

Заведующий лабораторно-исследовательским центром холодильных систем кафедры холодильной, криогенной техники и кондиционирования КГТУ Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота, 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, xktk@bga.gazinter.net

#### Сластикин Юрий Николаевич

К.т. н., заведующий кафедрой холодильной, криогенной техники и кондиционирования КГТУ Балтийской государственной академии рыбопромыслового флота, 236029, г. Калининград, ул. Молодежная, 6, xktk@bga.gazinter.net

#### Ейдеюс Альгирдас Иозапавич

К.т. н., доцент, КГТУ Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, 236029, Калининград, ул. Молодежная, 6, eydeyus@mail.ru

### Information about authors

#### Koshelev Sergey V.

Head of laboratory and research center of refrigeration systems of the Department of refrigeration, cryogenic engineering and air conditioning of KSTU Baltic Fishing Fleet State Academy, 236035, Russia, Kaliningrad, Molodezhnaya, 6, xktk@bga.gazinter.net

#### Slastikhin Yuri N.

Ph.D., Head of the Department of refrigeration, cryogenic engineering and air conditioning of KSTU Baltic Fishing Fleet State Academy, 236035, Russia, Kaliningrad, Molodezhnaya, 6, xktk@bga.gazinter.net

#### Eideyus Algirdas I.

Ph.D., Associate Professor, KSTU Baltic Fishing Fleet State Academy, 236035, Russia, Kaliningrad, Molodezhnaya, 6, eydeyus@mail.ru