

УДК 621.56

Разработка карты режимов кипения R134a, R12, R22, NH₃, водо-воздушных смесей и воды в каналах диаметром 6 мм

Канд. техн. наук **Малышев А.А.**

Киссер К.В. kisser90@list.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований режимов течения двухфазных потоков хладагентов R134a, R22 в горизонтальных трубах внутренним диаметром 6 мм. В ходе исследований была получена зависимость границ режимов течения двухфазных потоков хладагентов R134a, R22 от скорости смеси $w_{см}$ при температуре $t_0 = +20^\circ\text{C}$ и диаметре $d_0 = 6$ мм.

На основе сопоставления полученных экспериментальных данных с такими диаграммами, как Зана, Костерина, Гардиенко, Авдеева, Хугердона, Малышева, была построена карта режимов кипения, которая объединяет данные по таким хладагентам, как R134a, R12, R22, NH₃; водо-воздушным смесям и воде в макроканалах $d_0 > 5$ мм. Установлено, что 90% полученных опытных данных согласуются с выше перечисленными диаграммами.

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

Development of the card of the modes of boiling of R134a, R12, R22, NH₃, air-and-water mixes and water in channels with a diameter of 6 mm

Ph.D. **Malyshev A.A**

Kisser K.V. kisser90@list.ru

ITMO University

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

This article presents the results of experimental studies of flow regimes of two-phase flow of refrigerant R134a, R22 in horizontal pipes an internal diameter of 6 mm. During the research was obtained the dependence of the boundaries of the two-phase flow regimes flow of refrigerant R134a, R22 on the speed of the mixture $w_{см}$ at a temperature of $t_0 = +20^\circ\text{C}$ and a diameter $d_0 = 6$ mm.

On the basis of a comparison of the experimental data with these diagrams as Zana, Dempsey, Gardienko, Avdeyev, Hugerдона, Malyshev was built a map of boiling regimes, that integrates together data on refrigerants such as R134a, R12, R22, NH₃; water-air mixture and water in makro channels $d_0 > 5$ mm. It was found that 90% of the obtained experimental data are consistent with the above listed charts.

Keywords: two-phase streams, modes of a current of coolants, cards of the modes of a current, sliding of phases, mix speed, true speeds of steam and liquid, border of transitions of the modes.

В результате многолетних исследований теплогидродинамических процессов при кипении хладагентов в трубах были разработаны основы комплексного подхода к анализу теплообмена и потерь давления в трубах и каналах [5,7,8,9,13]. Суть подхода сводится к совместному решению трех теплофизических задач:

- Исследование скольжения фаз и создание методики расчета истинных параметров двухфазной среды;
- Прогнозирование режимов течения кипящих хладагентов на основе истинных скоростей фаз;
- Расчет локальной теплоотдачи для каждого из режимов с использованием истинного паросодержания.

Правомерность такого подхода была доказана еще в 1982 году Малышевым А.А. [9], когда в результате сопоставления известных методик, основанных на расходных параметрах, приводят к расхождениям до 300%. Также была предложена карта режимов течения, обобщающая данные по R134a, R12, R22 в трубах внутреннего диаметра $6 \div 10$ мм [9,8]. В качестве определяющих параметров были выбраны истинное объемное паросодержание φ и критерий Фруда $Fr_0 = \frac{w_0^2}{gd_0}$ - здесь w_0 – скорость циркуляции [1,2,8]. Предложенная ранее диаграмма $\varphi - Fr_0$ дает удовлетворительное согласование по фреонам, но для кипящего аммиака, воды и адиабатным воздуховодяным потокам точность определения границ режимов достигает $30 \div 50\%$.

Между тем, одной из задач комплексного подхода является разработка универсальной расчетной методики, наиболее полно отражающей физику происходящих процессов и описывающей фазовые переходы веществ с разными физическими свойствами.

Нами был проведен анализ наиболее известных работ по методикам прогнозирования [8,13] режимов двухфазных потоков в трубах и макроканалах $d_0 > 5$ мм.

На основе анализа литературных данных был определен перечень величин определяющих границы переходов режимов [1,2,3,4,5,8,12]:

$$Gr = f_1(d_0, w_0, \mu', x, \beta, \varphi, \sigma, g, w_0', w_0'', p_0, p_{кр}, \rho', \rho'') \quad (1)$$

Здесь соответственно: внутренний гидравлический диаметр, скорость циркуляции, динамический коэффициент вязкости жидкости, массовое расходное паросодержание, истинное объемное паросодержание, коэффициент поверхностного натяжения, ускорение свободного падения, приведенная скорость жидкости, приведенная скорость пара, давление, критическое давление, плотность жидкости и плотность пара.

На рисунке 1 представлено влияние диаметра, скорости циркуляции и массового расходного паросодержания по границам режимов течения R12 при $t_0 = +20^\circ\text{C}$.

С ростом скорости циркуляции граница между волновым и волновым-кольцевым режимами смещается в сторону меньших значений x (линии 2). Причем на трубах меньшего диаметра переход наступления волнового-кольцевого режимов наступает при меньших паросодержаниях. Такая же закономерность проявляется при переходе от волнового-кольцевого к кольцевому режиму (линия 3).

Влияние скорости циркуляции объясняется тем, что с ее увеличением растут силы инерции, которые определяют распределение жидкостной пленки в виде кольца по поверхности трубы.

Влияние диаметра на границу перехода к кольцевому режиму видимо также связано с влиянием сил инерции, обусловленных в первую очередь большей величиной скорости пара, как истинной, так и приведенной, а кроме того приближением размера трубы к размеру отрывного диаметра парового пузыря.

Эти соображения свидетельствуют о том, что скорость циркуляции или иначе говоря скорость на входе в трубу, по мере движения потока по длине канала теряет физический смысл.

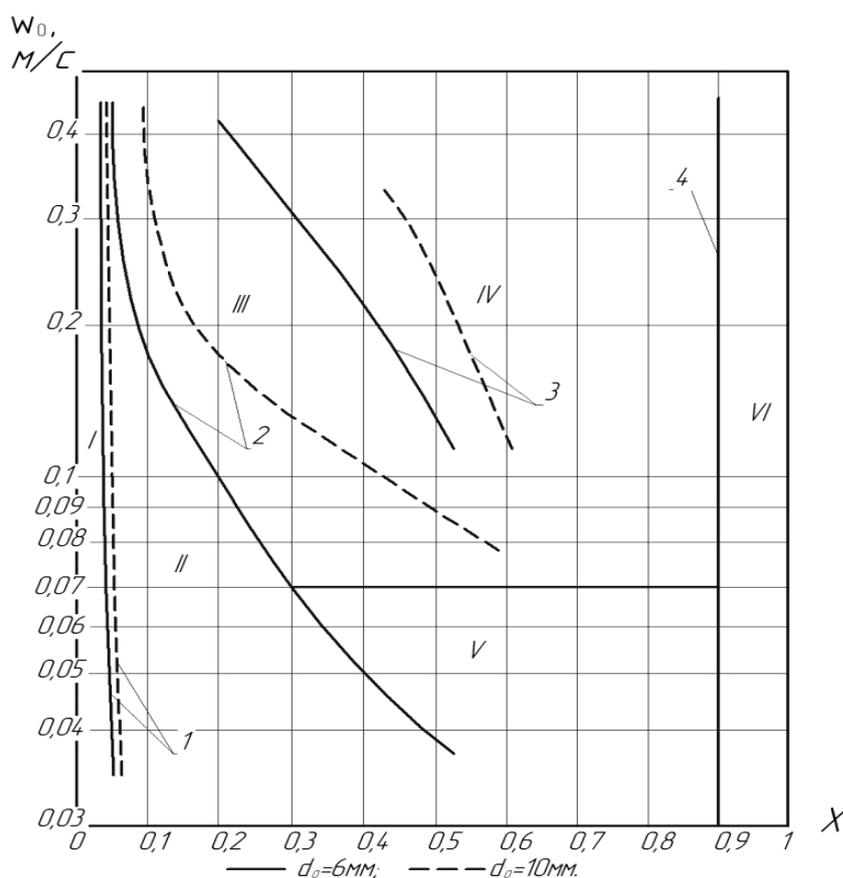


Рис. 1. Зависимость границ режимов течения от скорости циркуляции при $t_0=+20^{\circ}\text{C}$
режимы: I – снарядный; II – волновой; III – волновой-кольцевой (переходный);
IV – кольцевой; V – расслоенный; VI – эмульсионный.
границы режимов: 1- снарядный-волновой; 2-волновой-переходный; 3-переходный-кольцевой;
4-кольцевой-эмульсионный либо расслоенный-эмульсионный

Скорость циркуляции входит в условия однозначности при расчете характеристик потока, но сама по себе не является гидродинамической характеристикой и может влиять на границы режимов лишь косвенно, поскольку связана с приведенными скоростями фаз. Приведенные скорости фаз могут являться гидравлическими характеристиками потока лишь в первом приближении, поскольку объемные расходы фаз относятся по всему сечению трубы, что не всегда правомерно. Более обоснованным является использование скорости смеси, как суммы приведенных скоростей:

$$w_{см} = w_0' + w_0'' \tag{2}$$

где: $w_0' = w_0(1 - x)$ – приведенная скорость жидкости, м/с;

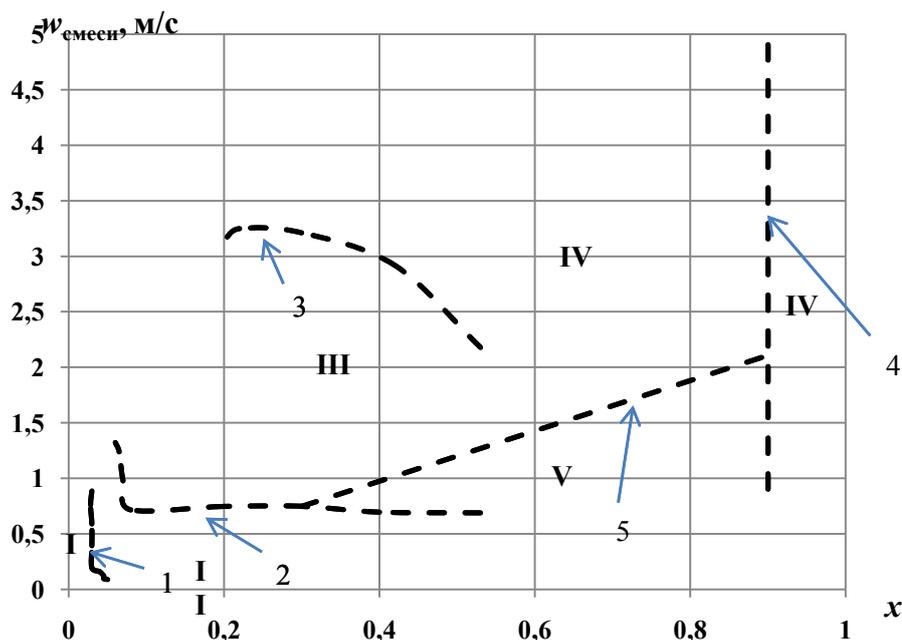
$w_0'' = w_0 \cdot x$ – приведенная скорость пара, м/с.

В частности подтверждением преимуществу использования скорости смеси является то, что как свидетельствуют данные приведенные на рисунке 1, граница перехода от расслоенного режима к кольцевому режиму автомодельна от скорости циркуляции, что не понятно, поскольку такой переход должен быть связан со скоростными характеристиками, обуславливающими силы инерции.

На рисунке 2 в качестве примера представлена зависимость границ режимов течения от скорости смеси.

Сопоставление двух предлагаемых методик (рис.1, 2) в которых использованы расходные параметры (скорость смеси и скорость циркуляции) не совсем корректно, поскольку представленные

данные носят частный характер и не могут быть основой для обобщения в широком диапазоне параметров.



**Рис. 2. Зависимость границ режимов течения от скорости смеси $w_{см}$ при $t_0 = +20^\circ\text{C}$, $d_0 = 6$ мм
 режимы: I – снарядный; II – волновой; III – волновой-кольцевой (переходный);
 IV – кольцевой; V – расслоенный; VI – эмульсионный.
 границы режимов: 1- снарядный-волновой; 2-волновой-переходный; 3-переходный-кольцевой;
 4-кольцевой-эмульсионный либо расслоенный-эмульсионный**

Представляется целесообразным, что при построении универсальной диаграммы должно быть учтено истинное паросодержание, как величина, имеющая строгий физический смысл во всем диапазоне режимных параметров.

Из динамических характеристик следует выбрать скорость смеси, поскольку она хоть и является расходной характеристикой, но наиболее полно отображает сущность гидродинамических процессов, чем скорость циркуляции.

Следующим этапом развития методологии построения универсальной диаграммы режимов является переход от размерных величин к безразмерным.

Величины x и β , входящие в зависимость (1) связаны между собой также однозначными зависимостями:

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

$$x = \frac{1}{\left\{1 + \left[\frac{(1-\beta)\rho'}{\beta\rho}\right]\right\}} \quad (5)$$

Влияние теплофизических свойств $\mu', g, \sigma, p_0, p_{кр}$, следует рассматривать в комплексе, включив их в критерии подобия.

Следует особо отметить величину истинного объемного паросодержания ϕ , расчет которой представляет собой самостоятельную теплофизическую задачу. Между тем величина ϕ и рассчитанные на ее основе истинные скорости фаз w' и w'' имеют строгий физический смысл во всем диапазоне режимных и теплофизических параметров. В отличие от приведенных скоростей w_0' и w_0'' , истинные скорости рассчитываются исходя из отнесения объемных расходов фаз не к общему сечению трубы, а к части сечения занятыми этими фазами.

Выражение (1) может быть приведена к безразмерному виду:

$$\Gamma p = f_2(Fr_0, Re_0, x, \beta, \varphi, We, Fr_{cm}, Re_{cm}, p_0/p_{кр}) \quad (7)$$

Где: $Fr_0 = \frac{w_0^2}{gd_0}$, $Re_0 = \frac{w_0 d_0}{\nu'}$

$$Fr_{cm} = \frac{w_{cm}^2}{gd_0}, \quad Re_{cm} = \frac{w_{cm} d_0}{\nu'}, \quad We = \frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'') \cdot d_0^2}$$

С учетом выше изложенного при построении новой модифицированной диаграммы режимов были использованы следующие определяющие параметры φ и Fr_{cm} .

В окончательном виде выражение (7) преобразовано к следующему виду:

$$\Gamma p = f_3(\varphi, We, Fr_{cm}, Re_{cm}, p_0/p_{кр}) \quad (8)$$

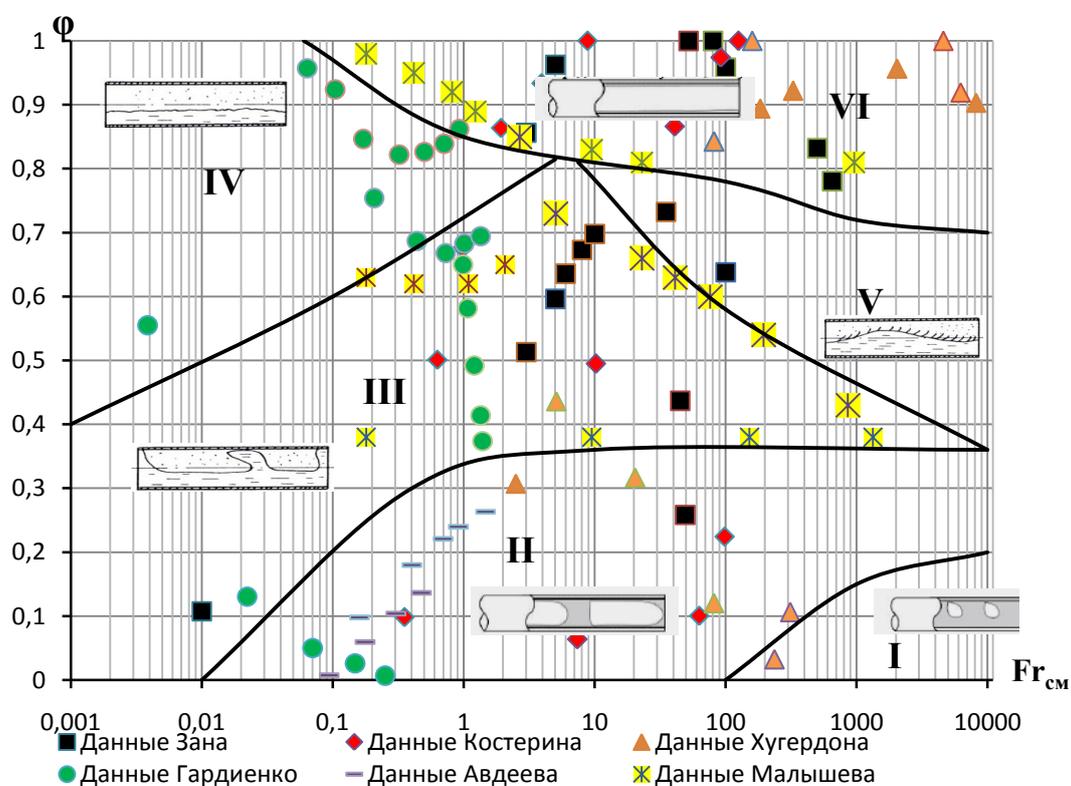


Рис. 3. Карта режимов кипения R134a, R12, R22, NH₃, водо-воздушных смесей и воды в каналах диаметром бмм
Режимы: I - пузырьковый, II – снарядный, III – волновой, IV – расслоенный, V – переходный, VI – кольцевой.

В рассмотренном диапазоне диаметров не было обнаружено влияния критерия Вебера. Можно предположить, что роль этого критерия проявляется в каналах малого диаметра, как свидетельствуют данные А.В. Бараненко, Д. Ховалыг [10,11] коэффициент поверхностного натяжения имеет решающее значение.

Список литературы

1. Sandra C.K. De Schepper, Geraldine J. Heynderickx, Guy B. Marin CFD modeling of all gas–liquid and vapor–liquid flow regimes predicted by the Baker chart.// Chemical Engineering Journal 138 (2008) 349–357

2. Hewitt, Geoffrey F. GAS-LIQUID FLOW.// A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat & Mass Transfer, and Fluids Engineering, 2015, DOI: 10.1615/AtoZ.g.gas-liquid_flow

3. Kim, S.-M., Mudawar, I. Universal approach to predicting saturated flow boiling heat transfer in mini/micro-channels – Part I. Dryout incipience quality.// International Journal of Heat and Mass Transfer 64 (2013) 1226–1238. Oj J. T., Pamitran A.S., Choi K.I., Hrnjak P. Experimental investigation on two-phase flow boiling heat-transfer of five refrigerants in horizontal small tubes of 0,5, 1,5 and 3 mm inner diameters. // International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 54 (9-10, 2011, pp. 2080 -2088. Two-Phase Flow Patterns. Chapter 12.//Engineering Data Book III, 2007, p. 12-34. *Абиев Р.Ш., Светлов С.Д.* Режимы течения газожидкостной смеси в каналах микрофлюидных устройств при использовании смесителей (диспергаторов) соосного и соосно-сферического типов.//Научное приборостроение, 2014, том 24, №4, с.59-66.

7. *Букин В.Г., Саид Ахмед эль Саид, Ахмед эль Рефаи Мохаммед Эмам* Результаты экспериментального исследования интенсификации теплообмена при кипении в трубах смесового хладагента. //ВЕСТНИК АГТУ. 2008. № 2 (43), с.179-184.

8. *Малышев А.А., Большакова А.С., Киссер К.В.* Исследования режимов течения двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Холодильная техника и кондиционирование - 2014. - № 3(16). - С. 61-70

9. *Малышев А.А., Данилова Г.Н. и др.* Влияние режимов течения дфухфазного потока хладагента R12 на теплоотдачу при кипении в горизонтальных трубах. // Холодильная техника. 1982. № 2.

10. *Ховалыг Д.М., Бараненко А.В.* Неустойчивости двухфазного течения веществ при кипении в микроканалах. // Холодильная техника. - 2013. – №10. – С.45-49

11. *Ховалыг Д.М., Бараненко А.В.* Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах. // Вестник Международной академии холода. - 2013. - №4. - С.3-12.

12. *Чинов Е.А., Кабов О.А.* Режимы двухфазного течения в плоском коротком микроканале.//Письма в ЖТФ, 2008, том 34, вып.16, с.41-47.

13. *Шуршев В.Ф., Умеров А.Н.* Идентификация режимов течения двухфазных потоков холодильных агентов и их смесей с использованием фазовых диаграмм. Вестник АГТУ, 2005, №2 (25), с.224-231.

Статья поступила в редакцию 25.11.2015 г.