

УДК 621.56

## Исследования режимов течения двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах

*Д-р техн. наук* Малышев А.А., Большакова А.С., Киссер К.В.

*Университет ИТМО*

*191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

*Представлены результаты экспериментальных исследований режимов течения двухфазных потоков хладагентов R12, R22, R134a в горизонтальных трубах внутренним диаметром 6 и 10 мм, при значениях температур кипения  $t_0 = -20 \div +20$  °С, скоростях циркуляции  $\omega_0 = 0,1 \div 0,5$  м/с.*

*Отмечается в целом неудовлетворительные согласования, что объясняется использованием авторами карт режимов расходных, а не истинных параметров, что при определенных условиях лишено физического смысла. Установлена зависимость границ режимов течения от паросодержания, скорости циркуляции, температуры кипения, диаметра труб.*

*Проведено сопоставление полученных экспериментальных данных с диаграммами Бэйкера (Шихта), Ховлы, Варма, Майдхейна, Ван дер Ягта. Установлено, что только 40-50% полученных опытных данных удовлетворительно согласуются с названными диаграммами.*

*Проведенные исследования помимо идентификации режимов, включали также исследования истинного объемного паросодержания методом отсечек.*

*Ключевые слова:* двухфазные потоки, режимы течения хладагентов, карты режимов течения.

---

## Research flow regimes of two-phase refrigerant flow in horizontal pipes

*D.Sc. Malyshev A.A., Bolshakova A.S., Kisser K.V.*

*University ITMO*

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

*The results of experimental studies of flow regimes of two-phase flow of refrigerant R12, R22, R134a in a horizontal pipe inner diameter of 6 mm and 10 mm, with boiling points  $t_0 = -20 \div +20$  °C, the rate of circulation  $\omega_0 = 0,1 \div 0,5$  m / s.*

*There is generally poor coordination, which can be explained by the authors using the card mode supplies, not the true parameters, which under certain conditions is physically meaningless. The dependence of the boundaries of the flow regime of steam quality, circulation rate, the boiling point, the diameter of the pipe. A comparison of the experimental data with charts Baker (Charge) Hovli, Varma, Maydheyne, Van der Yagta. Found that only 40-50% of the received experimental data are in good agreement with the above diagrams.*

*Studies in addition to the identification of modes also included the study of the true volume steam content by cutoffs.*

*Key words:* two-phase flow, regimes of flow a refrigerant, cards of flow regimes.

---

В настоящее время основным трендом развития термодинамики кипящих потоков в стесненном пространстве является реализация комплексного подхода к моделированию и разработке методологии расчета основных тепло-гидродинамических характеристик, а именно локальной теплоотдачи, режимов течения и скольжения фаз.

Актуальность комплексного подхода обусловлена в настоящее время все возрастающей необходимостью решения задач оптимизации и энергосбережения в области холодильной техники, тепловых насосов и систем кондиционирования воздуха.

Данная статья посвящена изучению режимов течения, кипящих в каналах потоков хладагентов. Исследование режимов рассматривается, как одна из составных частей комплексного метода расчета тепло-гидродинамических процессов в испарителях с внутритрубным кипением.

Вопросу прогнозирования режимов течения посвящено множество исследований. Одной из последних является работа астраханских ученых В.Ф.Шуршева и А.Н.Умерова [14]. Авторы рассматривают некоторые из наиболее известных исследований режимов течения хладагентов и приводят условия экспериментов, на основе которых получены карты режимов кипения.

К сожалению в [14] отсутствует сопоставления диаграмм и нет подробного анализа физического смысла, используемых величин. Это подтверждает мысль высказанную А.В.Бараненко и Д.Ховалыг [12] о том, что проблема прогнозирования режимов течения двухфазных потоков до настоящего времени остается открытой задачей теплофизики.

Работа [12] посвящена принципиально новому направлению аппаратостроения, использованию миниканальных технологий, где проблема режимов течения связана с уникальным для кипения в каналах явлением, именуемым риверсом потока. Потерей устойчивости исследованию режимов течений в миниканалах и определению границ устойчивости посвящена работа [12].

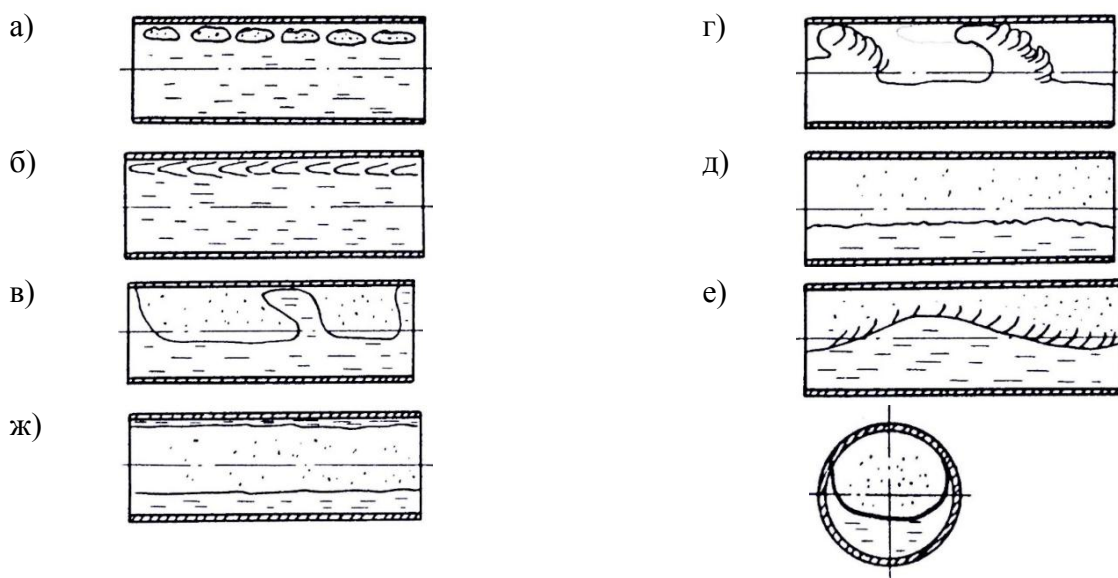
Обработка полученных [12] данных по режимам течения носит пока что лишь частный характер, но результаты представляют без сомнения значительный научный интерес и в первую очередь для создания общей модели режимов течения в каналах различного диаметра и формы. С этой точки зрения интересна работа В.Л.Кошелева [8] посвященная двухфазным потокам в капиллярах.

Необходимо отметить, что при исследовании режимов двухфазных потоков были использованы различные методы. Это метод визуализации в сочетании с измерением расходных, либо истинных параметров потока, резистивные методы, радиоизотонные, лазерные и др. В частности [8] приводятся данные по диэлектрической проницаемости различных жидкостей, что может быть использовано при реализации кондуктометрического метода исследования двухфазных сред.

Из всех известных, только метод визуализации совместной со скоростной киносъемкой, можно считать методикой прямого измерения. Все остальные являются косвенными и нуждаются в проверках.

Ниже приведены данные по экспериментальному исследованию режимов течения R12, R22, R134a в горизонтальных трубах диаметром  $6 \div 10$  мм при температурах  $-20 \div +20$  °С. Режимы течения определялись методом визуализации. При этом измерялось истинное объемное паросодержание  $\varphi$  (метод отсечек) при заданных значениях массовой скорости  $\omega_0$  и массового расходного паросодержания  $\varphi$ . Измерения  $\varphi$  и наблюдения за режимами проводились в адиабатных условиях.

На рис.1 представлены наблюдаемые режимы течения при течении двухфазного потока R134a.



**Рис. 1 Режимы течения R134a в горизонтальных трубах (визуальные наблюдения)**  
**а, б –снарядный; в, г- волновой; д –расслоенный; е –волновой-кольцевой (переходный);**  
**ж – кольцевой**

*Режим течения двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах.*

*Характеристика режимов*

Визуальные наблюдения за характером течения, анализ распределения температур стенки по периметру поперечного сечения трубы позволили выявить (в условиях проведенных экспериментов) шесть основных режимов течения и установить границы их существования. Далее приводится описание режимов в той последовательности, в которой они наблюдались при изменении  $x$  от 0,005 до 0,9.

*1. Снарядный режим*

Характеризовался наличием паровых снарядов в объеме жидкости вблизи верхней образующей трубы (рис.1а). При меньших значениях  $x$  снаряды имели длину порядка 10 мм и диаметр около 2 мм, с ростом  $x$  их длина увеличивалась до 30÷40 мм, а диаметр до 3÷4 мм. Внешний вид снарядного режима зависел от скорости циркуляции, так при  $\omega_0 = 0,03\div 0,16$  м/с снаряды хорошо различались в объеме жидкости и имели вполне определенную форму, а при  $\omega_0 = 0,3\div 0,4$  м/с они сливались между собой, образуя сплошные паровые вихри у верхней образующей трубы (рис.1б).

*2. Волновой режим*

При дальнейшем увеличении массового паросодержания паровые снаряды увеличивались в размерах, и паровая фаза начинала непосредственно соприкасаться со стенкой трубы в верхней ее части.

Об этом свидетельствовали, как визуальные наблюдения, так и показания термопар у верхней образующей. Непосредственный контакт пара со стенкой являлся основной отличительной характеристикой волнового режима. В начальной стадии режим представлял собой сочетание жидкостных пробок, захватывающих в некоторых случаях все сечение трубы и участков расслоенного режима длиной до 100 мм с гладкой поверхностью раздела (рис 1в). С ростом  $x$  или  $\omega_0$  жидкостные пробки сменялись гребнями волн, поверхность раздела начинала резко колебаться, появлялись

пульсации (толчки) (рис 1г). При дальнейшем увеличении  $x$  поверхность раздела смещалась ниже оси трубы, пульсации уменьшались, амплитуда волн также уменьшалась, а длина увеличивалась до  $150 \div 180$  мм.

### 3. Расслоенный режим

При малых скоростях циркуляции ( $\omega_0 < 0,07$  м/с) и значениях  $x > 0,2 \div 0,5$  (в зависимости от величины  $\omega_0$ ) волновой режим переходил в расслоенный, который представлял собой отдельное течение фаз с гладкой поверхностью раздела.

### 4. Волновой-кольцевой (переходный) режим

В проведенных экспериментах существенную протяженность по  $x$  ( $x = 0,1 \div 0,5$ ) занимала зона перехода от волнового (либо расслоенного) к кольцевому, которая имела признаки обеих форм течения. При меньших  $x$  на поверхности раздела сохранялись волны, а признаком кольцевого являлось наличие жидкой пленки на стенках трубы в виде полукольца (рис.1е). При больших  $x$  волн на поверхности раздела не было, а кольцо жидкости периодически смыкалось у верхней образующей.

### 5. Кольцевой режим

Кольцевой режим имел место при тех же значениях  $x$ , что и расслоенный, но его существование ограничивалось условием  $\omega_0 \geq 0,1$  м/с.

Эта форма течения характеризовалась наличием парового потока в центре трубы и кольца жидкости по периметру (рис.1ж). Основным признаком наступления кольцевого режима в экспериментах являлось постоянное омывание жидкостью всей поверхности трубы, что определялось показаниями термопар стенки.

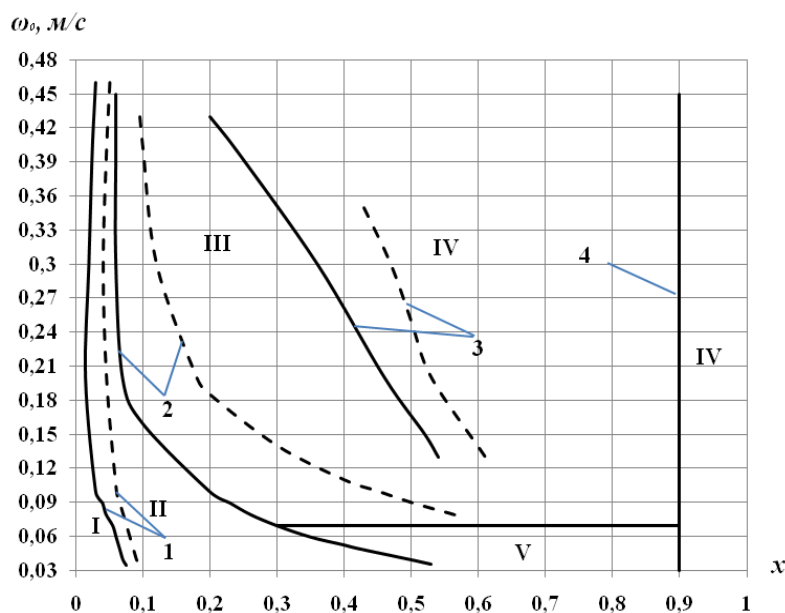
### 6. Эмульсионный режим

При значениях  $x = 0,8 \div 0,9$ , в результате межфазового взаимодействия жидкость отделялась от стенок трубы и уносилась в паровое ядро в виде отдельных капель. Вся поверхность трубы начинала контактировать с паром. Визуальным способом трудно было определить наступление эмульсионного режима и о переходе к нему можно было судить лишь по показаниям термопар стенки трубы.

## ***Влияние отдельных параметров на изменение границ режимов течения***

На рис.2 в качестве примера представлены границы режимов в зависимости от  $\omega_0$  и  $x$  для  $t_0 = +20^\circ\text{C}$  и  $d_0 = 6$  и  $10$  мм.

Из анализа представленных данных следует, что значения  $x$ , соответствующие переходу от снарядного режима к волновому практически не зависят от  $\omega_0$ . Границы между волновым и волновым-кольцевым, волновым и расслоенным, а также между волновым-кольцевым и кольцевым режимами с увеличением  $\omega_0$  смещаются в сторону меньших значений  $x$ . Граница между снарядным и волновым режимами практически одинакова для труб обоих диаметров. Переход от волнового к волновому-кольцевому и от волнового-кольцевого к кольцевому режиму на трубах большего диаметра происходит при больших  $x$ . Существование расслоенного режима не зависит от диаметра труб и ограничивается условием  $\omega_0 \leq 0,07$  м/с.

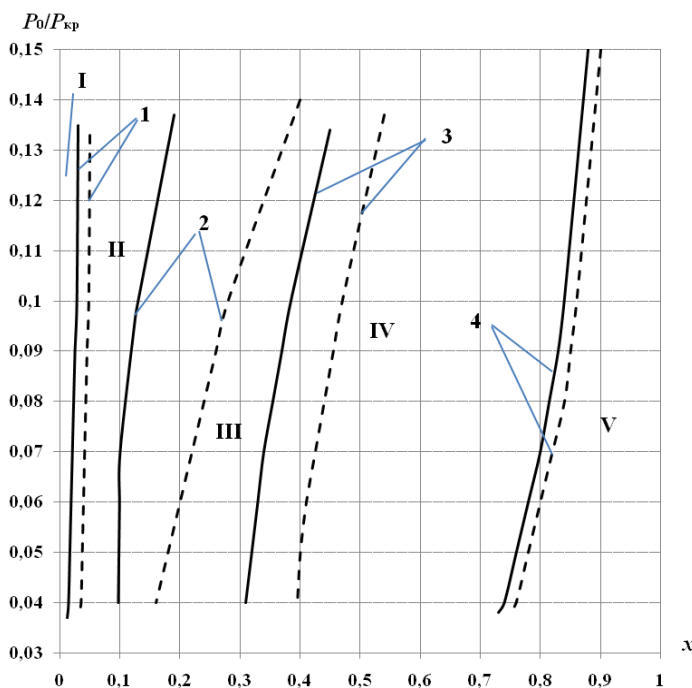


**Рис.2** Зависимость границ режимов течения от скорости циркуляции при  $t_0 = +20^\circ\text{C}$ ,  
 -  $d_0=6$  мм, -  $d_0=10$  мм.

*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 (расслоенный-эмульсионный).

Переход к эмульсионному течению происходит при  $x=0,9$  независимо от прочих условий. На рис. 3 представлены границы режимов в зависимости от  $P_0/P_{кр}$  и  $x$  при  $\omega_0 = \text{const}$ .



**Рис. 3** Зависимость границ режимов течения от  $P_0/P_{кр}$  при  $\omega_0 = 0,17$  м/с  
 -  $d_0=6$  мм, -  $d_0=10$  мм.

Режимы: I – снарядный; II – волновой; III – волновой-кольцевой (переходный); IV – кольцевой; V – эмульсионный.

Из рассмотренного рисунка следует, что граница между снарядным и волновым режимами практически не зависит от  $P_0/P_{кр}$ .

Переход от волнового к волновому-кольцевому и от волнового-кольцевого к кольцевому режиму с понижением  $P_0/P_{кр}$  смещается в область меньших значений  $x$ . Граница между кольцевым и эмульсионным режимами с понижением  $P_0/P_{кр}$  также перемещается в сторону меньших  $x$ .

Это объясняется тем, что с уменьшением давления возрастает объемы и скорости пара, что способствует наступлению кольцевого режима при меньших значениях массового паросодержания. Увеличение скорости парового потока, связанное с уменьшением  $P_0/P_{кр}$  влечет за собой возрастание сил межфазового трения, вследствие чего эмульсионный режим также наступает при меньших значениях  $x$ .

Из анализа данных, представленных на рис.3 также следует, что влияние  $P_0/P_{кр}$  на изменение границ режимов в трубах обоих диаметров практически одинаково.

### *Сопоставление экспериментальных данных по режимам течения с существующими диаграммами*

На рис. 4 представлено сопоставление полученных в данной работе экспериментальных данных с диаграммами Бэйкера, модифицированными Скоттом [4] (пунктирные линии) и Шихтом (сплошные линии) [3]. Кроме данных настоящей работы по R134a на диаграммы нанесены опытные данные Хавлы [1] и Варма [5], полученные при условиях, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

**Условия проведения экспериментов по исследованию режимов в работах [1, 5]**

Автор	Лит. источник	Хладагент	$d_0$	$t_0$	$P_0$	$\omega\rho$
			мм	°C	МПа	кг/(м <sup>2</sup> с)
Хавла	[12]	R11	14, 10, 6	5	0,49	15 ÷ 130
Варма	[13]	R22	8	4,5	6,03	154 ÷ 620

Из рассмотрения представленных данных следует, что, примерно, 40% опытных точек, полученных при кольцевом режиме, расположены в области волнового на диаграмме Шихта. Опытные данные по снарядному режиму хорошо согласуются с диаграммой, а по волновому - частично расположены в области снарядного и пробкового течения. Значительно хуже согласуются с диаграммой Шихта данные по расслоенному режиму: лишь 30% опытных точек располагаются в соответствующей области.

Согласование с диаграммой Скотта (пунктирные линии) несколько лучше. Удовлетворительно согласуются кольцевой, расслоенный и снарядный режимы. Волновой режим, как и в диаграмме Шихта, располагается в области снарядного и пробкового течения. Область переходного течения не выделялась авторами этих диаграмм и опытные данные по этому режиму, в основном, расположены в области волнового.

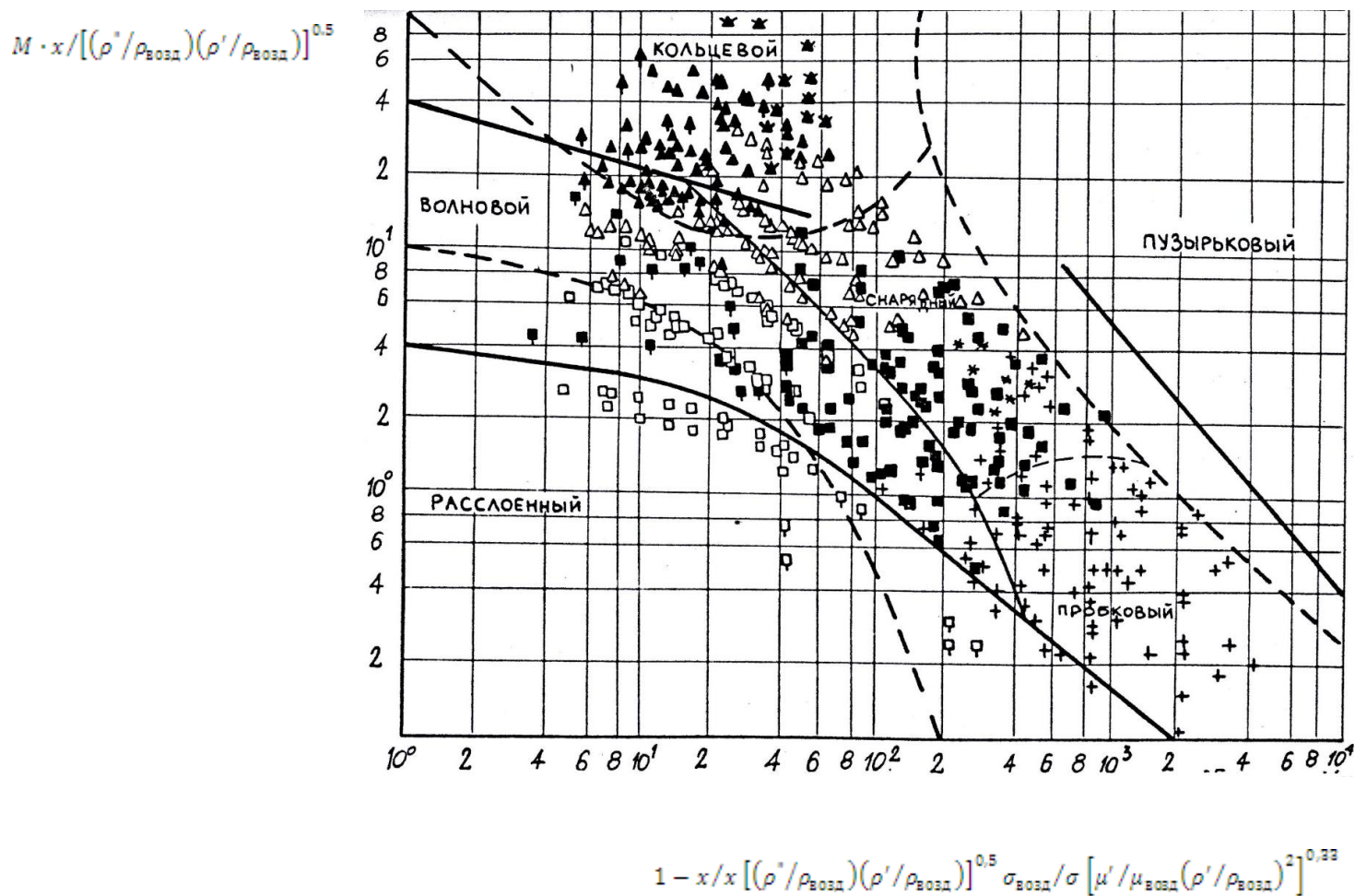


Рис. 4 Сопоставление опытных данных с диаграммами Скотта [4], Шихта [3]

▲ - кольцевой, △- переходный, ■ - волновой, □- расслоенный, + - снарядный.

Здесь:  $M$  – массовый расход, кг/с;  $\rho''/\rho_{\text{возд}}$  – отношение плотностей насыщенного пара и воздуха;  $\rho'/\rho_{\text{возд}}$  – отношение плотностей насыщенной жидкости и воздуха;  $\mu'/\mu_{\text{возд}}$  – отношение коэффициентов динамической вязкости насыщенной жидкости и воздуха.

На рис. 5 представлено сопоставление опытных данных с диаграммой Мандхейна [2]. Из рассмотрения рисунка следует, что данные по расслоенному режиму хорошо согласуются с диаграммой, а для снарядного режима согласуются лишь 50% опытных данных. Переход к кольцевому режиму происходит при значительно меньших значениях приведенной скорости пара  $\omega_0$ , чем предусмотрено диаграммой.

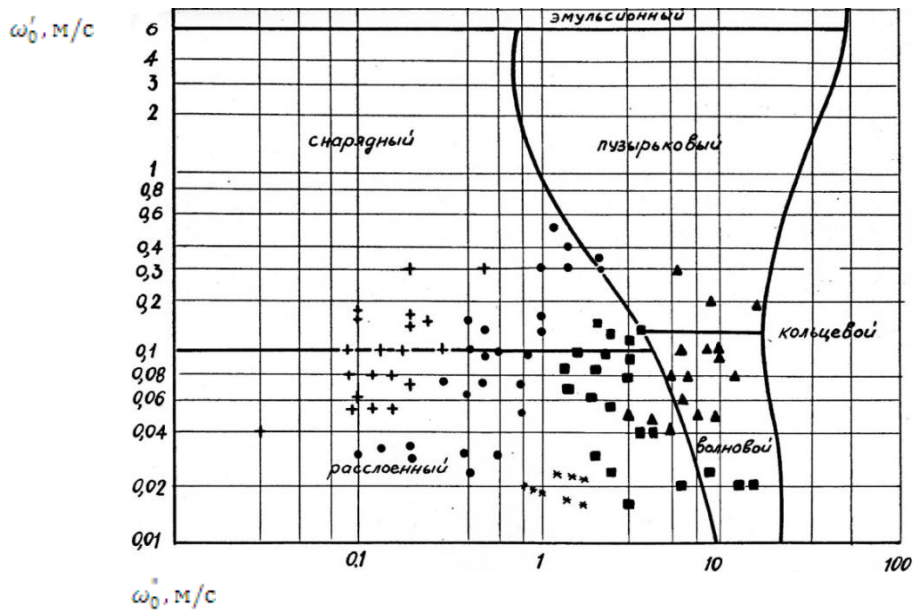


Рис. 5 Сопоставление опытных данных диссертанта с диаграммой Мандхейна [2]

▲ - кольцевой; ■ - переходный; ● - волновой; \* - расслоенный; +- снарядный

Здесь  $\omega''_0, \omega'_0$  – приведенные скорости пара и жидкости соответственно.

На рис. 6 представлено сопоставление опытных данных настоящей работы, а также данных [3,1] с диаграммой Ван дер Ягта. Кольцевой режим хорошо согласуется с этой диаграммой, волновой режим частично расположен в соответствующей области, а частично в области волнового с перемычками. Лишь 40% опытных точек по расслоенному, а также снарядному режимам согласуется с диаграммой.

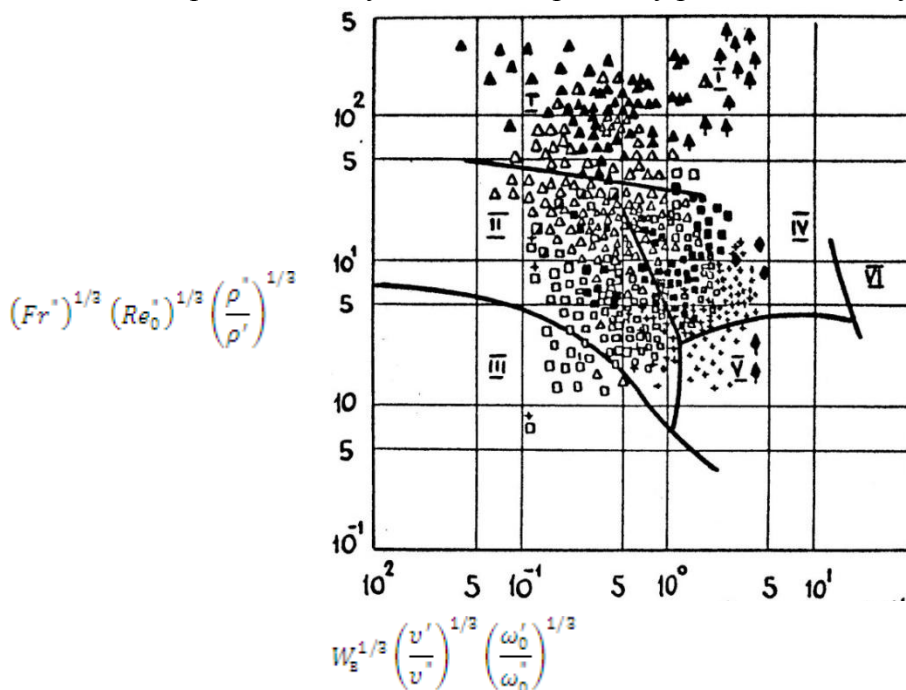


Рис. 6 Сопоставление экспериментальных данных по режимам течения с диаграммой Ван дер Ягта [3]

Режимы: I – кольцевой, II – волновой, III – расслоенный, IV – волновой с перемычками, V – пробковый, VI – пузырьковый.

Опыты:▲ - кольцевой,△ - переходный,■ - волновой, □ - расслоенный, + - снарядный.



## Заключение

Из всего сказанного следует, что определение границ режимов при помощи диаграмм не является точным.

Наиболее вероятная причина неточности диаграмм заключается в том, что во всех известных картах режимов в качестве координат были использованы расходные параметры, которые при определенных значениях скорости циркуляции, диаметров труб, температур повышения и физических свойств теряют физический смысл, что приводит к значительным погрешностям.

Исходя из сказанного, важнейшим направлением дальнейших исследований является наиболее универсальные карты режимов течения на основе обобщения накопленного опыта с использованием истинных параметров фаз.

## Список литературы

1. Chawla J. Wärmeübergang und Druck abfall in Wagerechten Röhren bei der Strömung von Verdampfen Kältemitteln – VDJ Forschungsheft, 1967, s.525-530
2. Mandhame J.M. , Gregory G.A., Aziz K. A flow pattern map for-liquid flow in horizontal pipes. Int. J. Multiphase flow, 1974, №1, p.537-557.
3. Schicht H.H. Flow patterns for an adiabatic liquid flow of water and air within a horizontal tube. Verfahrenstechnik, 1969, №3 (4), p. 153-161
4. Scott D.S. Properties of current gas-liquid flow. Chem. Engng., 1963, №4, p. 199-277
5. Varma N.K., Mehrotra R.K. Flow Regimes in Refrigerant-22 Two-Phase Flow During Evaporation in Horizontal Tube. The Second National Symposium on Refrigeration and Air Conditioning. 1973 March 15, p.81-86
6. *Арефьев К.М., Мулев Ю.В.* Обобщение данных по диэлектрической проницаемости воды, аммиака и хладагентов R134a и R152a // Вестник Международной академии холода, 2013, №3
7. *Емельянов А.Л., Кожевникова Е.В.* Проектирование теплообменников транспортных кондиционеров // Вестник Международной академии холода, 2012, №1, с.19-22
8. *Кошелев В.Л., Ейденюс А.И.*, Расчет капиллярных трубок по безразмерным уравнениям // Вестник Международной академии холода. 2013. №4.
9. *Малышев А.А., Мамченко В.О., Мизин В.М., Потанина А.В., Прошин С.И., Девятов Т.И.* Перспективные типы испарителей холодильных машин // Вестник Международной академии холода. 2013. №2
10. *Сухих А.А., Антаненкова И.С.* Методика сравнения термодинамической эффективности циклов холодильных и теплонасосных установок // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. с.21-25.
11. *Троценко А.В., Поддубная М.В.* Восстановление термодинамической работоспособности теплообменника в цикле высокого давления путем варьирования технических потерь от необратимости // Вестник Международной академии холода, 2012, №3, с.39-44
12. *Ховалыг Д., Бараненко А.В.* Методы расчета градиента давления двухфазного потока при течении в малых каналах // Вестник Международной академии холода. 2012. №1. с.3-10
13. *Цой А.П., Филатов А.С.* Замена хладагента R22 на альтернативные в регионах с высокой температурой окружающей среды // Вестник Международной академии холода. 2012. №2. с.13-18
14. *Шуришев 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.

## References

1. Chawla J. Wärmeübergang und Druck abfall in Wagerechten Röhren bei der Strömung von Verdampfen Kältemitteln – VDJ Forschungsheft, 1967, s.525-530
2. Mandhame J.M. , Gregory G.A., Aziz K. A flow pattern map for-liquid flow in horizontal pipes. Int. J. Multiphase flow, 1974, №1, p.537-557.
3. Schicht H.H. Flow patterns for an adiabatic liquid flow of water and air within a horizontal tube. Verfahrenstechnik, 1969, №3 (4), p. 153-161
4. Scott D.S. Properties of current gas-liquid flow. Chem. Engng., 1963, №4, p. 199-277
5. Varma N.K., Mehrotra R.K. Flow Regimes in Refrigerant-22 Two-Phase Flow During Evaporation in Horizontal Tube. The Second National Symposium on Refrigeration and Air Conditioning. 1973 March 15, p.81-86
6. Aref'ev K.M., Mulev Yu.V. Obobshchenie dannykh po dielektricheskoi pronitsaemosti vody, ammiaka i khladagentov R134a i R152a // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 2013, №3
7. Emel'yanov A.L., Kozhevnikova E.V. Proektirovanie teploobmennikov transportnykh konditsionerov // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 2012, №1, s.19-22
8. Koshelev V.L., Eidenyus A.I., Raschet kapillyarnykh trubok po bezrazmernym uravneniyam // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. №4.
9. Malyshev A.A., Mamchenko V.O., Mizin V.M., Potanina A.V., Proshin S.I., Devyatov T.I. Perspektivnye tipy isparitelei kholodil'nykh mashin // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2013. №2
10. Sukhikh A.A., Antanenkova I.S. Metodika sravneniya termodinamicheskoi effektivnosti tsiklov kholodil'nykh i teplonasosnykh ustanovok // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. № 4. s.21-25.
11. Trotsenko A.V., Poddubnaya M.V. Vosstanovlenie termodinamicheskoi rabotosposobnosti teploobmennika v tsikle vysokogo davleniya putem var'irovaniya tekhnicheskikh poter' ot neobratimosti // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*, 2012, №3, s.39-44
12. Khovalyg D., Baranenko A.V. Metody rascheta gradienta davleniya dvukhfaznogo potoka pri techenii v malykh kanalakh // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. №1. s.3-10
13. Tsoi A.P., Filatov A.S. Zamena khladagenta R22 na al'ternativnye v regionakh s vysokoi temperaturoi okruzhayushchei sredy // *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. №2. s.13-18
14. Shurshev V.F., Umerov A.N. Identifikatsiya rezhimov techeniya dvukhfaznykh potokov kholodil'nykh agentov i ikh smesei s ispol'zovaniem fazovykh diagramm. *Vestnik AGTU*, 2005, №2 (25), s.224-231.