
Научная статья

УДК 536.423

<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-100-106>

EDN BLSEHP

Сопоставление карт режимов кипения с данными эксперимента по исследованию гидродинамики холодильного агента

**Петр Алексеевич Альбеков[✉], Владимир Григорьевич Букин,
Андрей Юрьевич Кузьмин**

Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, [albekov.p.a@list.ru[✉]](mailto:albekov.p.a@list.ru)

Аннотация. Рассмотрены существующие карты режимов течения двухфазного потока, кипящего в горизонтальной трубе, проведен анализ действующих карт режимов, отмечены их основные достоинства и недостатки. Представлены результаты экспериментальных исследований режимов течения двухфазных потоков хладагента в горизонтальных трубах внутренним диаметром 13 мм. Приведена схема вспомогательного и экспериментального контура стенда для определения картины течения, на котором проведено более 100 замеров, 40 из которых были нанесены на обобщенную карту режимов. Получены режимы течения для массовых скоростей в диапазоне от 50 до 400 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, давлением насыщения от 0,064 до 0,681 МПа и плотностью теплового потока от 1 до 15 kW/m^2 , получены все основные режимы течения (расслоенный, волновой, снарядный и кольцевой). Проведено сопоставление результатов эксперимента с картами, предложенными авторами Л. Войтаном, А. Ционсолини, Л. Гарбай, Р. Санта, получена обобщенная карта режимов. Отмечены недостатки полученной карты режимов течения. Осуществлено сопоставление полученной карты с опытными данными, выделена карта режимов, наиболее соответствующая результатам эксперимента. В целях получения единой карты режимов, которую возможно использовать в области холодильной техники, проведено построение границы перехода расслоенного и волнового режимов течения в критериях подобия: параметре Локхарта – Мартинелли и безразмерной скорости.

Ключевые слова: двухфазные потоки, режимы течения хладагентов, карты режимов течения, границы переходов режимов, критерии подобия, граница перехода в безразмерных параметрах

Для цитирования: Альбеков П. А., Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Сопоставление карт режимов кипения с данными эксперимента по исследованию гидродинамики холодильного агента // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2025. № 2. С. 100–106. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-100-106>. EDN BLSEHP.

Original article

Comparison of maps of boiling modes with data from an experiment on the study of the hydrodynamics of a refrigerating agent

Petr A. Albekov[✉], Vladimir G. Bukin, Andrey Yu. Kuzmin

Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, [albekov.p.a@list.ru[✉]](mailto:albekov.p.a@list.ru)

Abstract. The existing maps of the flow modes of a two-phase stream boiling in a horizontal pipe are considered, the analysis of the existing maps of modes is carried out, their main advantages and disadvantages are noted. The results of experimental studies of the flow modes of two-phase refrigerant flows in horizontal pipes with an internal diameter of 13 mm are presented. A diagram of the auxiliary and experimental contour of a stand for determining the flow pattern is presented, on which more than 100 measurements were carried out, 40 of which were plotted on a generalized mode map. Flow modes for mass velocities in the range from 50 to 400 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, saturation pressure from 0.064 to 0.681 MPa and heat flux density from 1 to 15 kW/m^2 are obtained, all basic flow modes (stratified, wave, shell and ring) are obtained. The experimental results were compared with the maps proposed by the authors L. Wojtan, A. Cioncolini, L. Garbai, R. Santa, and a generalized mode map was obtained. The disadvantages of the obtained flow

mode map are noted. The obtained map was compared with experimental data, and the mode map that best corresponds to the experimental results was selected. In order to obtain a unified mode map that can be used in the field of refrigeration technology, the boundary of the transition of layered and wave flow modes was constructed in terms of similarity criteria: the Lockhart – Martinelli parameter and the dimensionless velocity.

Keywords: two-phase flows, flow regimes of refrigerants, flow regime maps, regime transition boundaries, similarity criteria, transition boundary in dimensionless parameters

For citation: Albekov P. A., Bukin V. G., Kuzmin A. Yu. Comparison of maps of boiling modes with data from an experiment on the study of the hydrodynamics of a refrigerating agent. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies.* 2025;2:100-106. (In Russ.). <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2025-2-100-106>. EDN BLSEHP.

Введение

Процесс кипения при вынужденном движении парожидкостной смеси в трубе характеризуется изменениями гидродинамической картины по ходу течения холодильного агента. Данный процесс обусловлен постоянным увеличением пара, а также изменением скоростей паровой и жидкостной фаз. Значительную роль в данном теплообменном процессе играет площадь поверхности, омываемой жидкостью, непосредственно влияющая на общий коэффициент теплоотдачи. Соотношение паровой и жидкостной фаз, их движение друг относительно друга, а также интенсивность фазового перехода формируют картину кипения.

Определение картины течения является достаточно сложным процессом, т. к. на нее влияет значительное количество характеристик, таких как физические свойства холодильного агента, тепловая нагрузка, скорости паровой и жидкостной фаз, а также геометрические характеристики теплообменной поверхности. При проектировании теплообменных аппаратов такие параметры являются

ключевыми. От правильного определения режима течения парожидкостной смеси зависят массогабаритные и энергетические показатели, поэтому особенно важно знать границы переходов между различными режимами течения. Важность определения данного параметра способствует продолжающимся исследованиям в данной области, количества которых весьма значительно. При этом единая карта режимов, которую можно применять к различным рабочим веществам, а также условиям фазовых переходов, отсутствует.

Обзор карт режимов течения двухфазных потоков

В качестве осей построения карт режимов течения до конца XX в. использовали различные физические величины, а также их совокупности [1]. На рис. 1 продемонстрированы карты режимов течения таких авторов, как Дж. М. Мандхане, Г. А. Грегори, К. Азиз (1974 г.) [2], О. Бакер (1954 г.) [3], Ю. Таител и А. Е. Дуклер (1976 г.) [4], Дж. П. Брилл, Ш. Мукхерие (1999 г.) [5].

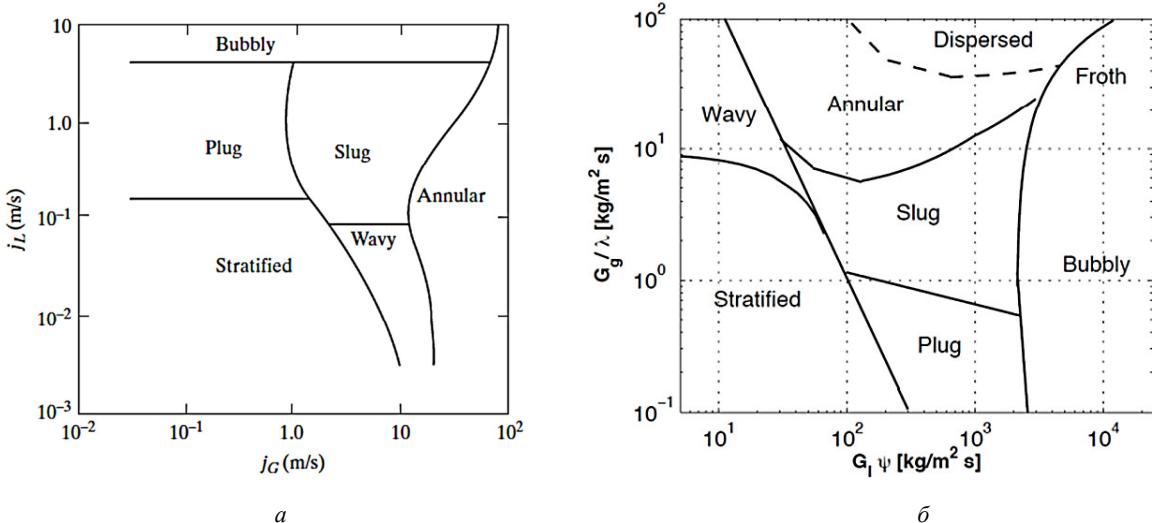
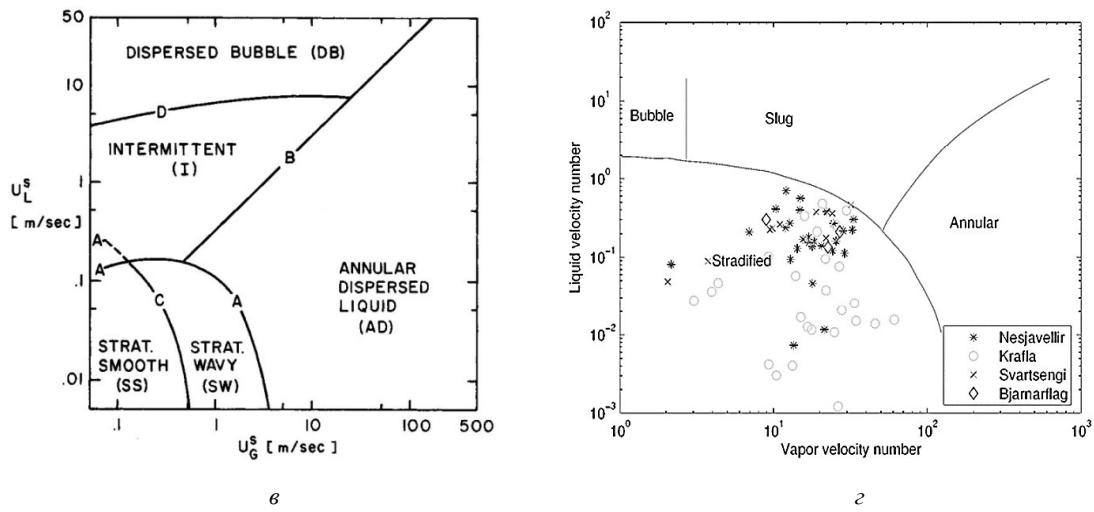


Рис. 1. Карты режимов течения (XX в.): *a* – Дж. М. Мандхане, Г. А. Грегори, Азиз К. (1974 г.) [2];
б – О. Бакер (1954 г.) [3]

Fig. 1. Flow mode maps (XX century): *a* – J. M. Mandhane, G. A. Gregory, K. Aziz (1974) [2]; *b* – O. Baker (1954) [3]

Альбеков П. А., Букин В. Г., Кузьмин А. Ю. Сопоставление карт режимов кипения с данными эксперимента по исследованию гидродинамики холодаильного агента



Окончание рис. 1. Карты режимов течения (XX в.): *а* – Ю. Таител, А. Е. Дуклер (1976 г.) [4];
б – Дж. П. Брилл, Ш. Мукхерjee (1999 г.) [5]

Ending of fig. 1. Flow mode maps (XX century): *a* – Yu. Taitel, A. E. Ducler (1976) [4];
b – J. P. Brill, H. Mukherjee (1999) [5]

Начиная с XXI в. авторы, исследующие режимы течения парожидкостной смеси, унифицировали оси построения карт режимов течения (массовая скорость по оси ординат и массовое паросодержание по оси абсцисс), при этом указанные физические величины в качестве осей построения карт до

настоящего времени используются как при изучении процессов кипения, так и конденсации (рис. 2). Следует отметить, что границы переходов различных режимов течения для более современных карт режимов двухфазного потока также имеют схожий вид, что значительно упрощает их использование.

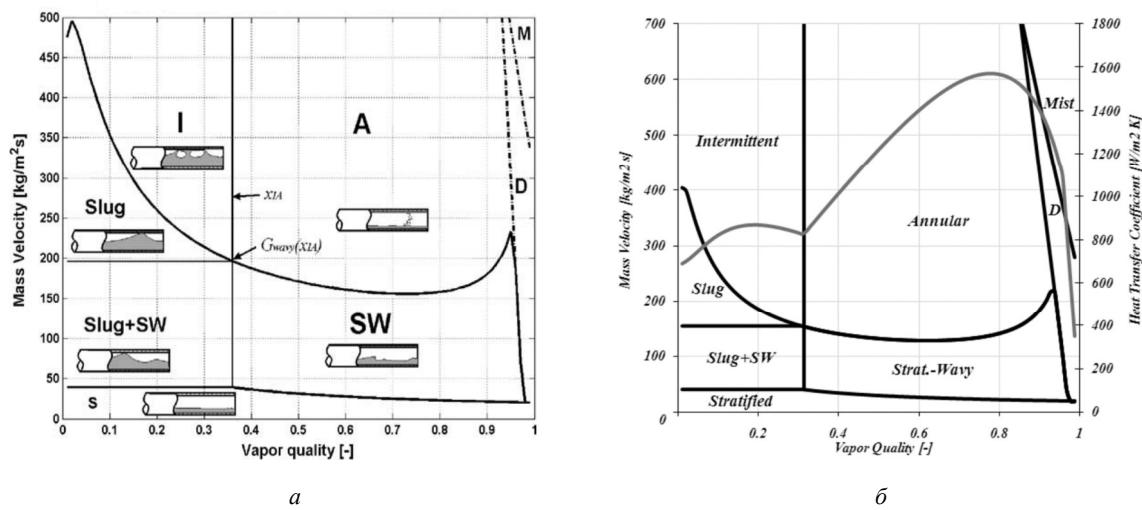


Рис. 2. Карты режимов течения (XXI в.): *а* – Л. Войтан, Т. Урсенбачер, Дж. Р. Том (2005 г.) [6];
б – Л. Гарбай, Р. Санта (2002 г.) [7]

Fig. 2. Flow mode maps (XXI century): *a* – L. Wojtan, T. Ursenbacher, J. R. Thome (2005) [6];
b – L. Garbai, R. Santa (2002) [7]

Описание эксперимента по изучению гидродинамики двухфазного потока

В целях сравнения вышеуказанных карт режимов течения с экспериментальными данными, изу-

чения гидродинамики двухфазного потока кипящей жидкости спроектирован экспериментальный стенд (экспериментальные данные получены при следующих условиях: холодильный агент R22; массовая

скорость – 50–400 кг/(м²·с); диаметр трубопровода – 13 мм; тепловой поток – 1 000–15 000 Вт/м²; давление кипения – 0,064–0,681 МПа). Стенд состоит из вспомогательного и экспериментального контуров (рис. 3). Холодильный агент находится в ресивере 15 экспериментального контура, из которого перекачивается насосом 16 в держатель уровня 7, а в дальнейшем в экспериментальную трубу 12.

Экспериментальная труба выполнена из нержавеющей стали (диаметр – 13 мм; толщина стенки – 1 мм; длина – 3 000 мм), на входе и выходе которой для наблюдения картины кипения имеются смотровые стеклянные трубы. Нагрев кипящего в трубе холодильного агента осуществляется посредством подвода к трубе тока низкого напряжения. Измерение температуры рабочего вещества

и температуры стенки осуществляется на равных участках длины в пяти сечениях при помощи термопар. Для измерения кипящего потока используются находящиеся в трубе термогильзы.

После экспериментальной трубы парожидкостная смесь разделяется на жидкостную и паровую фазу в мерной емкости 8, далее пар перемещается в конденсатор-испаритель 9, а жидкость – обратно в ресивер 15. Также в данном стенде присутствуют следующие элементы: 1 – промежуточный сосуд; 2, 17 – компрессоры низкого и высокого давления; 3 – конденсатор; 4, 6 – регулирующие вентили; 5, 13 – мерные сосуды; 10 – участок визуального наблюдения; 11 – дроссельный вентиль, 14 – предварительный нагреватель.

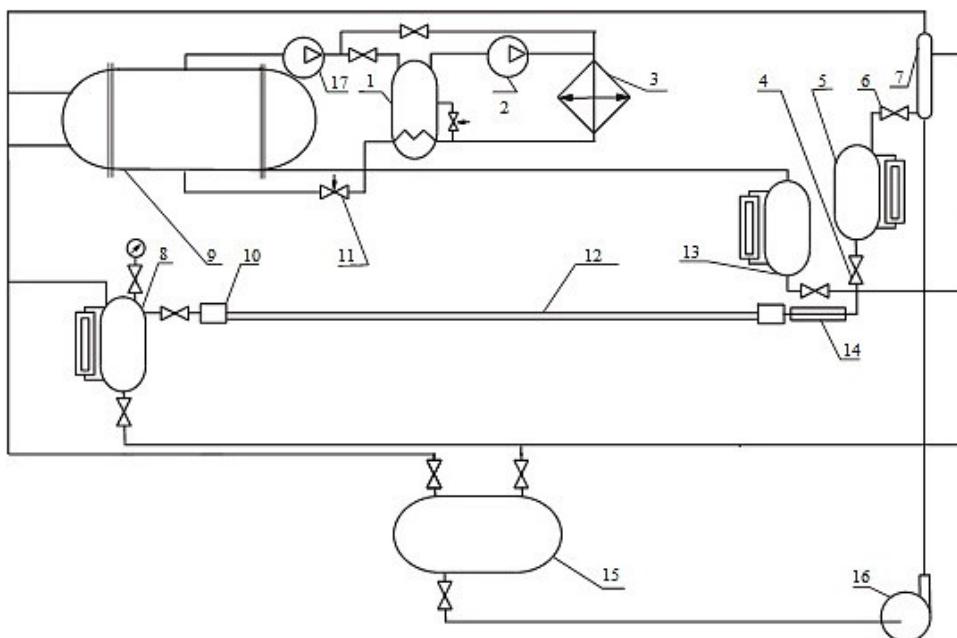


Рис. 3. Вспомогательный и экспериментальный контуры стенда для определения картины течения

Fig. 3. Auxiliary and experimental contours of the stand for determining the flow pattern

Всего на данном стенде проведено более 100 замеров, 40 из которых нанесены на обобщенную карту режимов. В рамках смоделированных в экспериментальной трубе условий удалось получить все основные режимы течения (расслоенный, волновой, снарядный и кольцевой).

Получение обобщенной карты режимов течения

С целью получения обобщенной карты режимов течения, а также сопоставления карт режимов с полученными результатами эксперимента прове-

дено сравнение работ Л. Войтана, Т. Урсенбачера, Дж. Р. Тома (2005 г.) [6] (карта получена для следующих условий: холодильный агент R22; массовая скорость – 100 кг/(м²·с); диаметр трубопровода – 13,84 мм; тепловой поток – 2 100 Вт/м²; температура кипения: 5 °С), Л. Гарбай, Р. Санта (2002 г.) [7] (карта получена для следующих условий: холодильный агент R134a; массовая скорость – 100 кг/(м²·с); диаметр трубопровода – 6 мм; тепловой поток – 3 000 Вт/м²; температура кипения: 5 °С) и А. Цинонсолини (2015 г.) [8] (карта получена для следующих условий: холодильный агент R22; массовая

скорость – 100 кг/(м²·с); диаметр трубопровода – 13,84 мм; тепловой поток – 2 100 Вт/м²; температура кипения: 5 °С).

После графического сопоставления указанных

карт режимов течения проведено сопоставление полученной графической зависимости с результатами эксперимента по исследованию гидродинамики двухфазного потока кипящей жидкости (рис. 4).

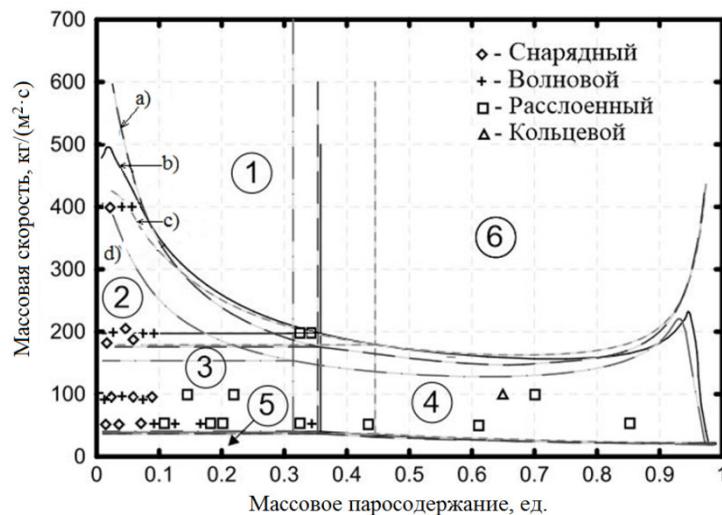


Рис. 4. Обобщенная карта режимов с наложенными данными эксперимента: 1 – пузырьковый; 2 – снарядный; 3 – снарядный и волновой; 4 – волновой; 5 – расслоенный; 6 – кольцевой; полученная при сопоставлении результатов работ [6–8]: *a, c* – Л. Войтан, Т. Урсенбачер, Дж. Р. Том (2005 г.); *b* – А. Ционсолини (2015 г.); *d* – Л. Гарбай, Р. Санта (2002 г.)

Fig. 4. Generalized mode map with the superimposed experimental data:
 1 – bubble flow mode; 2 – shell; 3 – shell and wave; 4 – wave; 5 – layered; 6 – ring;
 obtained by comparing the results of [6-8]: *a*, *c* – L. Wojtan, T. Ursenbacher, J. R. Thome (2005);
b – A. Cioncolini (2015); *d* – L. Garbai, R. Santa (2002)

Анализ результатов эксперимента

Анализ распределения экспериментальных данных свидетельствует о том, что области карты режимов течения с конкретной картиной двухфазного потока соответствуют режимам течения, полученным в ходе эксперимента, в частности во второй области распределены экспериментальные данные со снарядным и волновым режимами течения, в третьей – расслоенного, волнового и снарядного, а в четвертой – только расслоенного. Таким образом, третья область является переходной от снарядного режима течения двухфазного потока к расслоенному. При этом наиболее точно результаты проведенного эксперимента по исследованию теплоотдачи и гидродинамики кипящих холодильных агентов описываются картой режимов, предложенной авторами Л. Гарбай, Р. Санта (2002 г.) [7].

Несмотря на то, что полученная карта режимов течения хорошо согласуется с экспериментальными данными, у нее имеются недостатки. В частности, имеются несоответствия физическим представлениям картины кипения парожидкостной смеси в гладкой трубе. Так, при движении парожидкостной смеси с массовыми скоростями выше

200 кг/(м²·с) в диапазоне значений массового паросодержания от 0,31 до 0,44 наблюдается переход от пузырькового к кольцевому режиму течения. Кроме этого, при аналогичных массовых скоростях в диапазоне значений массового паросодержания от 0 до 0,31–0,44 наблюдается переход от снарядного к пузырьковому режиму течения, что не соответствует ранее проведенным различными авторами визуальным наблюдениям гидродинамики двухфазных потоков в горизонтальных трубах, а также общепринятой последовательности сменяемости картин течения.

Также следует отметить, что данные карты имеют значительный недостаток в части отсутствия линии перехода от снарядного и пробкового к волновому и расслоенному режимам течения. Согласно результатам проведенного эксперимента данная линия перехода находится при значениях $x > 0,1$.

Получение обобщенной карты режимов течения в безразмерных параметрах

Принимая во внимание изложенный материал, ввиду существенных недостатков рассматриваемых карт, в целях получения универсальной карты,

учитывающей наибольшее количество факторов, влияющих на границы переходов режимов, имеется целесообразность перехода к описанию режимов течения с помощью методов теории подобия, в частности посредством комплекса безразмерных параметров (критериев подобия), учитывающих физические параметры, характеризующие режимы и границы переходов между ними.

Следует также учесть тот фактор, что массовая скорость движения холодильного агента в промышленных испарителях находится в диапазоне от 30 до 140 кг/(м²·с), а для конденсаторов этот диапазон составляет 50–500 кг/(м²·с). Следовательно, для испарителей жидкость внутри труб изменяется в диапазоне от 0,02 до 0,13 м/с, а скорость пара –

от 0,46 до 2,15 м/с. Для конденсаторов значение скорости жидкости составляет 0,05–0,5 м/с, скорости пара – 0,8–7,93 м/с. Таким образом, можно предположить, что в теплообменных аппаратах холодильных машин с внутритрубным кипением существует только волновой или расслоенный режим течения двухфазного потока холодильного агента, поэтому целесообразно определение границ течения именно этих режимов.

Проведено сопоставление в единой системе безразмерных параметров, в частности параметров Локхарта – Мартинелли, и безразмерной скорости границ расслоенного и волнового режимов течения для вышеуказанных карт и режимных параметров. Результаты представлены на рис. 5.

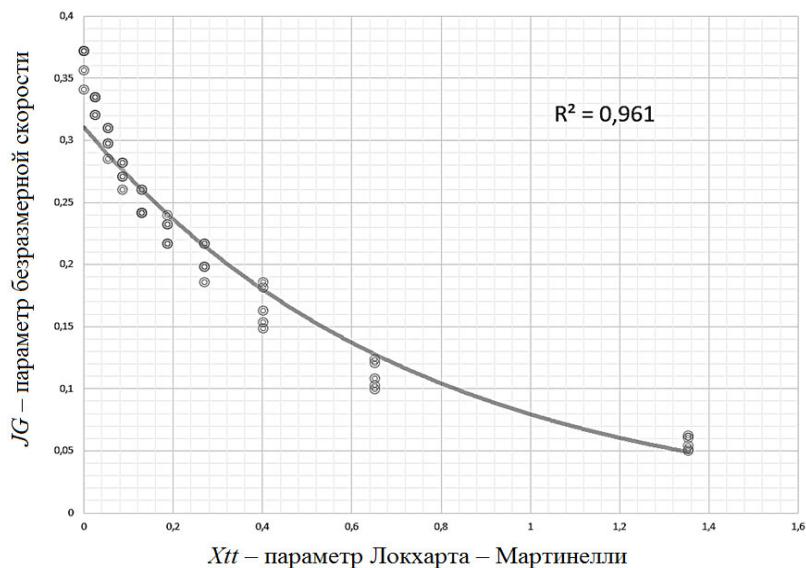


Рис. 5. Граница перехода расслоенного и волнового режимов течения

Fig. 5. Boundary of transition between stratified and wave flow modes

Полученная линия тренда является границей перехода расслоенного и волнового режимов течения для условий проведения эксперимента, хорошо согласуется с рассмотренными картами режимов течения, а также экспериментальными данными, имеет высокий показатель достоверности аппроксимации.

Заключение

Результаты проведенного анализа карт режимов течения, а также их сопоставления с экспериментальными данными позволили выделить наиболее

унифицированные современные карты режимов течения. Определена карта режимов кипения при движении парожидкостной смеси в горизонтальной трубе, наилучшим образом согласующаяся с данными эксперимента. Получена граница перехода расслоенного и волнового режимов течения для условий проведения эксперимента, которую можно использовать при проектировании теплообменных аппаратов холодильной техники, а также расчета их массогабаритных и энергетических показателей.

Список источников

1. Кузьмин А. Ю., Букин А. В. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении на гладкой трубе в условиях свободной конвекции альтернативных хладагентов R407c и R410a // ЮГ России: экология, разви-
тие. 2010. № 4. С. 121–124.
2. Mandhane J. M., Gregory G. A., Aziz K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes // International Journal of Multiphase Flow. 1974. V. 1. P. 537–553.

3. Baker O. Simultaneous flow of oil and gas // Oil and Gas Journal. 1954. N. 53. P. 185–195.
4. Taitel Y., Ducler A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near-horizontal flow // American Institute of Chemical Engineering Journal. 1976. V. 22. P. 47–55.
5. Brill J. P., Mukherjee H. Multiphase Flow in Wells // Society of Petroleum Engineers. 1999. URL: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=947648> (дата обращения: 01.03.2025).
6. Wojtan L., Ursenbacher T., Thome J. R. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I – A new dia-batic two-phase flow pattern map // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2005. N. 48. P. 2955–2969.

7. Garbai L., Sánta R. Flow Pattern Map for In Tube Evaporation and Condensation. Budapest University of Technology and Economics, Hungary, 2002. 6 p.

8. Cioncolini A. Two-Phase Flow Pattern Maps for Macrochannels / Research Gate. URL: <https://www.researchgate.net/publication/300569658> (дата обращения: 01.03.2025).

References

1. Kuz'min A. Iu., Bukin A. V. Eksperimental'noe issledovanie teplootdachi pri kipenii na gladkoi trube v usloviakh svobodnoi konvektsii al'ternativnykh khladagentov R407c i R410a [Experimental study of heat transfer during boiling on a smooth pipe under conditions of free convection of alternative refrigerants R407c and R410a]. *Iug Rossii: ekologiya, razvitiye*, 2010, no. 4, pp. 121–124.
2. Mandhane J. M., Gregory G. A., Aziz K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1974, vol. 1, pp. 537–553.
3. Baker O. Simultaneous flow of oil and gas. *Oil and Gas Journal*, 1954, no. 53, pp. 185–195.
4. Taitel Y., Ducler A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near-horizontal flow. *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 1976, vol. 22, pp. 47–55.
5. Brill J. P., Mukherjee H. Multiphase Flow in Wells. Society of Petroleum Engineers, 1999. Available at: <https://www.scirp.org/reference/ReferencesPapers?ReferenceID=947648> (accessed: 01.03.2025).
6. Wojtan L., Ursenbacher T., Thome J. R. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I – A new dia-batic two-phase flow pattern map. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, no. 48, pp. 2955–2969.
7. Garbai L., Sánta R. Flow Pattern Map for In Tube Evaporation and Condensation. Budapest University of Technology and Economics, Hungary, 2002. 6 p.
8. Cioncolini A. Two-Phase Flow Pattern Maps for Macrochannels. Research Gate. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/300569658> (accessed: 01.03.2025).

Статья поступила в редакцию 08.04.2025; одобрена после рецензирования 29.04.2025; принята к публикации 17.05.2025
The article was submitted 08.04.2025; approved after reviewing 29.04.2025; accepted for publication 17.05.2025

Информация об авторах / Information about the authors

Петр Алексеевич Альбеков – аспирант кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; albekov.p.a@list.ru

Владимир Григорьевич Букин – доктор технических наук, профессор; профессор кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; bukinvvg@mail.ru

Андрей Юрьевич Кузьмин – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры теплоэнергетики и холодильных машин; Астраханский государственный технический университет; kuzmin-astu@yandex.ru

Petr A. Albekov – Postgraduate Student of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; Astrakhan State Technical University; albekov.p.a@list.ru

Vladimir G. Bukin – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; Astrakhan State Technical University; bukinvvg@mail.ru

Andrey Yu. Kuzmin – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Refrigeration Machines; Astrakhan State Technical University; kuzmin-astu@yandex.ru

