

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ СТЕНКИ НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ.

АННОТАЦИЯ

Как следует из анализа литературных источников теплообмен при кипении существенно зависит от теплофизических свойств теплоотдающей стенки, ее шероховатости и толщины. Однако, корректно оценить влияние шероховатости и толщины теплоотдающей стенки пока не удается. В докладе рассматривается частная задача и представлено обобщение экспериментальных данных по теплообмену при кипении фреонов и азота на толстостенных трубах, имеющих разные теплофизические характеристики и шероховатость.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Различные аспекты теплообмена при кипении наиболее подробно рассмотрены в монографиях /1÷8/. Авторы монографий очень неоднозначно трактуют влияние теплофизических характеристик охлаждаемой стенки на механизм и интенсивность теплообмена при кипении. В /2/ исследователи представили неоспоримые результаты своих экспериментов при кипении криогенных жидкостей и показали, что теплообмен при кипении при прочих равных условиях существенно зависит от теплофизических характеристик стенки и ее толщины. Однако авторы /6/ считают, что при кипении обычных жидкостей на стенке из меди, латуни, мельхиора и нержавеющей стали устанавливается одинаковое значение коэффициента теплоотдачи.

Задачей данной публикации является выяснение влияния теплофизических свойств теплоотдающей стенки на интенсивность теплообмена при кипении обычных жидкостей. Анализ экспериментальных данных разных авторов выполнен на основании модифицированного критериального уравнения Д.А. Лабунцова /9;10/ предложенного для описания теплообмена при кипении в условиях свободной конвекции.

2. ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.

Из большого числа экспериментальных работ, например /11÷17/, где при выполнении измерений строго соблюдались условия свободной конвекции в экспериментальном объеме жидкости следует, что показатель степени при числе Re_* необходимо принять равным 0,8. Тогда критериальную зависимость Лабунцова можно представить в виде:

$$Nu^* / Re_*^{0,8} Pr^{1/3} b = f(K_t) \quad (1)$$

В координатах (1) достаточно хорошо описываются результаты опытов при кипении разных жидкостей в широком диапазоне изменения давлений и

тепловых потоков, если они выполнены на толстостенных нагревателях из одного и того же материала и одинаковой шероховатости.

На рисунке 1 показаны результаты обработки опытов /14; 18÷23/ при кипении различных фреонов на толстостенных медных трубах и опытов /11; 17; 22/ при кипении на толстостенных трубах из нержавеющей стали. Это публикации, где приведены полные характеристики теплообменной поверхности, позволяющие оценить значение δ_w / h_{CP} .

При $K_t = idem$ теплообмен на медных трубах оказывается примерно в 1,8 раза интенсивнее, чем при охлаждении труб из нержавеющей стали.

Принципиальным недостатком зависимости следует считать полное отсутствие каких либо характеристик теплообменной поверхности в критериях подобия. Проведенный в /2; 5/ анализ механизма теплообмена при кипении позволяет критериальную зависимость Лабунцова дополнить безразмерными параметрами, характеризующими теплоотдающую стенку.

Число Нуссельта тогда будет функцией следующих критериев:

$$Nu^* = f(Re_*; Pr; K_t; b; \overline{R}_z; \delta_w / h_{CP}; [(\lambda C_p) / (\lambda_w C_w \rho_w)]^{0,5}) \quad (2)$$

Можно сразу отметить, что один из критериев δ_w / h_{CP} в (2) в настоящее время вычислить практически невозможно. Глубина захолаживания h_{CP} зависит от динамического угла смачивания θ_D .

В /2/ она определена как:

$$h_{CP} = 1,56 R_0 \sin \theta_D \sqrt{a_w n \tau_p} \quad (3)$$

Как отмечают авторы монографии /2/ динамический угол смачивания θ_D один из наименее исследованных параметров роста паровых пузырей на твердой поверхности. Зависимости для его вычисления отсутствуют. Число действующих центров парообразования в /2/ рекомендуется определять по формуле:

$$n = C_n^2 [r \rho^* \Delta T / \sigma T_s (1 + 2m / A)]^2 \quad (4)$$

Здесь $A = R_0 / \sqrt{\tau_p}$; и $m = \lambda' \sqrt{1,5 \pi a_w} / \lambda_w \alpha' \sin \theta_D$

Число центров парообразования при отсутствии экспериментальных данных не вычисляется. В выражении (4) коэффициент пропорциональности C_n^2 не является константой и может изменяться в не-

сколько раз в зависимости от сочетания металла теплоотдающей стенки и кипящей на ней жидкости /2/.

$$\tau_p = r\rho''R_o^2 / \beta\lambda'\Delta T \quad (5)$$

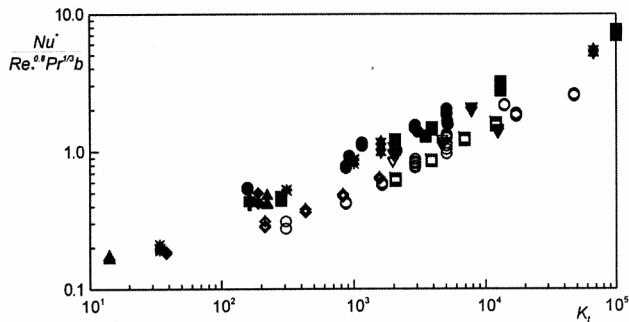


Рис. 1. Теплообмен при кипении фреонов на толстостенных поверхностях из меди и нержавеющей стали
Медь: R12 1-● [18,20,23]; R22 2-■ [14,20,23]; R11 3-▲ [23]; пропан 4- * [14]; R114 5 - * [19]; R113 6 - + [24]; R123 7-♦ [23]; R134^a 8 - ▼ [23].
Нержавеющая сталь: R12 9-○ [11,17,21]; R113 10-▽ [21]; R22 11-□ [11]; R142 12-◇ [11]

Коэффициент пропорциональности β в зависимости Лабунцова (5) может быть определен только после обработки экспериментальных данных.

По данным Даниловой /25/ при кипении фреонов среднее значение $\beta = 11,3$. Обобщение большого числа экспериментальных данных по отрывному диаметру пузыря, опубликованное в /26/ позволяет определить радиус пузыря для любых давлений. Аппроксимационная зависимость, приведенная в /26/, имеет вид:

$$\bar{D} = 0,25\sqrt{1+10^5 K} \quad (6)$$

где $K = (Ja/Pr)^2 / Ka$

Если предполагать, что динамический краевой угол смачивания θ_D при кипении фреонов и азота одинаковы, то используя зависимости (4÷6) можно приблизительно вычислить значение h_{CP} по (3). Угол между образующей конической поверхности микрослоя и поверхностью нагрева α' оценивался по /27/. Значение коэффициента пропорциональности C_n^2 в формуле (5) принималось равным $2,4 \cdot 10^{-9}$.

При принятых предположениях вычисление глубины захлаживания можно рассматривать как параметр, определенный по порядку величин. Поэтому, только при условии $\delta_w / h_{CP} > 10$ теплоотдающая стенка рассматривалась как "толстостенная". Точки, представленные на рисунке 1 и последующих рисунках, соответствуют оговоренному условию.

Измерения показывают, что среднеквадратичная шероховатость не является универсальной характеристикой поверхности. При одинаковом значении среднеквадратичной шероховатости при за-

данном тепловом потоке в /29/ получены разные значения температурного напора для различных технологий получения шероховатости. Поэтому в нашем докладе рассматриваются только работы, где шероховатость поверхности получена механическим способом. Шероховатость поверхности в соответствии с ГОСТ 2729-73 характеризуется высотой неровностей R_z . Это пока единственная количественная характеристика шероховатости поверхностей, которая приводится в работах по теплообмену при кипении.

Систематические исследования теплообмена при кипении холодильных агентов R12 и R113 на медных и стальных трубах различной шероховатости приведены в /12/. В этом исследовании шероховатость характеризуется высотой неровностей R_z , которая изменялась в диапазоне $0,3 \leq R_z \leq 58 \mu\text{м}$.

Основными результатами опытов, по мнению авторов, следует считать: при одинаковом $q \text{ вт} / \text{м}^2$ на шероховатой стенке увеличивается число действующих центров парообразования, уменьшается температурный напор стенка-жидкость и растет коэффициент теплоотдачи.

Считается, что рост пузыря происходит за счет испарения жидкости с поверхности перегретого микрослоя, толщина которого не меняется во времени. Последнее означает, что микрослой обновляется за счет подтекающей под растущий пузырек жидкостью. Если предполагать, что течение пленки под пузырем ламинарное, то внутренним масштабом такого течения является вязко-гравитационная постоянная жидкости $\ell_v = [v^2 / g(1 - \rho'' / \rho')]^{1/3} / 30$. Естественным масштабом относительной шероховатости будет отношение

$$Rz / \ell_v = \bar{Rz}$$

На рисунке 2 показана обработка экспериментальных данных /12/ при кипении фреонов R12 и R113 на поверхностях, изготовленных из стали разной шероховатости. Обработка выполнена в координатах:

$$Nu * / Re^{0.8} Pr^{1/3} b K_i^{0.4} = f(\bar{Rz}) \quad (7)$$

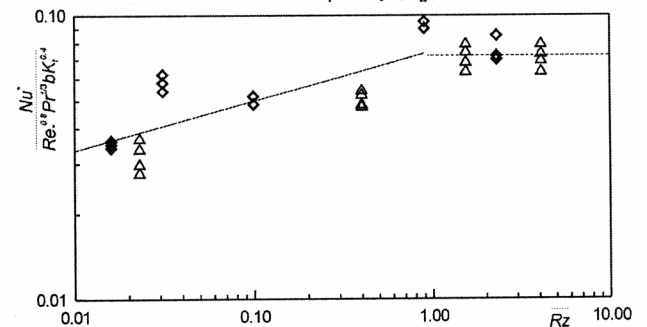


Рис. 2. Обработка экспериментальных данных [12] при кипении фреонов R12 и R113 на стальных трубах различной шероховатости: 1 - Δ - R12; 2 - ◇ - R113.

Необходимо иметь в виду, что начиная с не-

которого предельного значения \overline{Rz} , теплообмен при кипении становится независимым от безразмерного критерия шероховатости. Так, при кипении азота в /2/, этот предел зафиксирован при $\overline{Rz} = 0,64$, а при кипении R113 при $\overline{Rz} = 0,9$ /12/. Из опытов, показанных на рисунке 2 следует, что при $\overline{Rz} < 0,9$ теплообмен интенсифицируется с ростом шероховатости и

$$Nu^* \sim (\overline{Rz})^{0,2} \quad (8)$$

При $\overline{Rz} > 0,9$ теплообмен можно считать независимым от этого параметра.

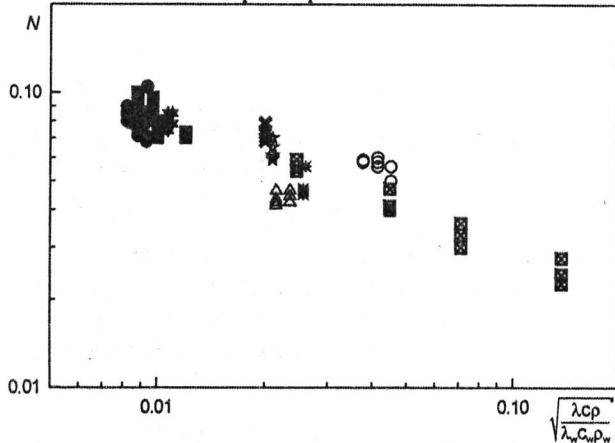


Рис. 3. Обобщение экспериментальных данных при кипении фреонов и азота на теплоотдающих поверхностях из различных материалов и разной шероховатости

Медь: \blacklozenge - R114 [19]; \bullet - R12 [18,20]; \blacksquare - R22 [20,14]; $*$ - пропан [14];

Сталь 10: \star - R12 [12]; \times - R113 [12];

Сталь 35: Δ - R12 [22]; $*$ - R11 [22];

Нержавеющая сталь: \circ - R12 [17];

\boxtimes - азот (медь, латунь, бронза, никель, нержавеющая сталь) [2].

Данные, где указана шероховатость теплообменной поверхности можно представить в виде:

$$Nu^* / Re_s^{0,8} Pr^{1/3} b K_z^{0,4} \overline{Rz}^{0,2} \equiv N = f(\sqrt{\lambda C_p / \lambda_w C_w \rho_w}) \quad (9)$$

На рисунке 3 приведена обработка экспериментальных данных в координатах (9). Результаты экспериментов по теплообмену при кипении разных фреонов на толстостенных трубах при разных давлениях удовлетворительно обобщаются единой зависимостью. Здесь же показаны все опыты, представленные на рисунке 2 и выполненные при кипении на трубах, шероховатость которых менялась от $0,3 \leq R_z \leq 58 \mu\text{км}$. На этом же рисунке нанесены данные /2/ при кипении азота на толстостенных цилиндрах из материалов, имеющих различные теплофизические свойства, которые в координатах (9) удовлетворительно совпали с опытными данными при кипении фреонов.

При обработке опытов теплофизические свойства фреонов принимались по справочнику /31/, свойства азота по /32/, а физические свойства металлов по /33; 34/.

Представленные результаты подтверждают, что роль материала теплоотдающей стенки на интенсивность теплообмена при кипении является общей закономерностью при кипении различных жидкостей.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ.

α [вт/м²град] - коэффициент теплоотдачи при кипении
 A [м/сек^{1/2}] - модуль роста парового пузыря в зависимости (4)

α_w [м²/с] - коэффициент температуропроводности металла
 C_p, C_w [Дж/кг гр] - теплоемкость жидкости и металла теплоотдающей стенки

C_n^2 - коэффициент пропорциональности в зависимости (4)

$D; D_0; R_0$ [м] - диаметр цилиндра, отрывной диаметр и радиус пузыря

g [м²/с] - ускорение свободного падения

h_{CP} [м] - глубина захлаживания, вычисленная по (3)

m [м/сек^{1/2}] - параметр в зависимости (4)

n [1/м²] - плотность центров парообразования по (4)

$\rho'; \rho''; \rho_w$ [кг/м³] - плотность жидкости, пара и металла

R_z [μкм] - высота неровностей теплоотдающей поверхности

r [Дж/кг] - скрытая теплота парообразования

q [Вт/м²] - удельный тепловой поток

$\lambda; \lambda_w$ [Вт/м гр] - теплопроводность жидкости и металла

t_s [°C] T_s [K] - температура насыщения

δ_w [м] - толщина теплоотдающей стенки

σ [Н/м] - поверхностное натяжение

ν [м²/с] - кинематическая вязкость

Индексы

' и '' - для жидкости и пара

w - характеристика теплообменной поверхности

* - критерии, построенные по капиллярной постоянной

p - при постоянном давлении

0 - размер в момент отрыва

ср - осредненное значение

s - при температуре насыщения

Безразмерные параметры

$Nu^* = \alpha \cdot \delta / \lambda$ - число Нуссельта

$Re_s = q \cdot \delta / r \rho'' \nu$ - число Рейнольдса

$Pr = \nu / a$ - число Прандтля

$K_t = (r \rho'')^2 \cdot \delta / C_p T_s \rho' \sigma$ - критерий теплового подобия

$b = [1 + 10(\rho'' / (\rho' - \rho''))^{2/3}]$ - безразмерный комплекс

$\overline{R_z} = R_z / l_v$ - безразмерная шероховатость поверхности

$\sqrt{\lambda C_p \rho' / \lambda_w C_w \rho_w}$ - безразмерный комплекс

δ_w / h_{CP} - безразмерное значение толщины стенки

β - коэффициент пропорциональности в (5)
 $\bar{D} = D_0 / \delta$ - безразмерный диаметр отрывного пузыря
 $Ja = (C_p \cdot \Delta T \rho') / (r \cdot \rho'')$ - число Якоба
 $Ka = \sqrt{\sigma^3 / (\nu^4 \rho^3 g)}$ - число Капицы
 K - безразмерный параметр в (6)
 N - безразмерный параметр в (9)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979, 415 с.
2. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977, 289 с.
3. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен (в ядерной энергетике) М.: Энергоатомиздат, 1987, 375 с.
4. Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов. М.: Мир, 1980.
5. Присяжков В.Ф. Кипение. Киев. Наукова думка, 1988, 240 с.
6. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986, 447 с.
7. Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении в полях массовых сил различной интенсивности. Киев. Наукова думка, 1988, 254 с.
8. Кошкин В.К., Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А.. Нестационарный теплообмен. М.: Машиностроение, 1973, 327 с.
9. Лабунцов Д.А. Приближенная теория теплообмена при развитии пузырькового кипения. Известия АН СССР, ОТН Энергетика и транспорт, 1963, №1, с.58-71.
10. Лабунцов Д.А. Вопросы теплообмена при пузырьковом кипении жидкостей. Теплоэнергетика, 1979, №9, с.14-19.
11. Данилова Г.Н. Влияние давления и температуры насыщения на теплообмен при кипении фреонов. Труды ЦКТИ: Котлотурбостроение. Л., 1965, вып.57, с.69-80.
12. Данилова Г.Н., Бельский В.К. Исследование теплоотдачи при кипении фреонов 113 и 12 на трубках различной шероховатости. Холодильная техника, 1970, №3, с. 24-28.
13. Gorenflo D. Zur Druckabhängigkeit des Wärmübergangs an Siedende Kältemittel bei freier Konvektion. Chemil Ing. Techn., 1968, 40, Jahrg, Heft 15, S.757-762.
14. Gorenflo D., Sokol P., Caplanis S. Zum Wärmübergang beim Blussensieden von Kohlenwasserstoffen und Halogen-Kältemitteln an einem Glattrohr und einem Hochleistungs-Rippenrohr. Wärme-und Stoffübergang 1991, v.26, s.273-281.
15. Гогонин И.И. Теплообмен при кипении фреона 21 в условиях свободной конвекции. Холодильная техника, 1970, №3, с.24-28.
16. Гогонин И.И. О показателе степени при тепловом потоке в опытах по теплообмену в кипящей жидкости ИФЖ, 1971, т.2, №2, с.349-350.
17. Бельский В.К. Исследование теплообмена при кипении фреона-12 на пучке трубок и одиночных очехленных трубках. Холодильная техника, 1970, №2, с.40-44.
18. Дюондин В.А. Исследование теплообмена при кипении фреона 12 на гладкой и ребристых трубках. Холодильная техника. 1969, №11, с.16-21.
19. Henrici H., Hesse G. Untersuchungen über den Wärmeübergang beim Verdampfen von R114 und R114-Öl-Gemischen an einem Horizontalen Glattrohr. Kältetechnik-Klimatisierung 1971, Heft 2, 23 Jahrgang. S.54-58.
20. Heimbach P. Wärmübergangskoeffizienten für die Verdampfung von Kältemittel-Öl-Gemischen an einem Überfluteten Glattrohr-Bündel. Kältetechnik-Klimatisierung 1972, 24, s.287-295.
21. Ратиани Г.В., Авалиани Д.И. Теплообмен и критические тепловые нагрузки при кипении фреонов. Холодильная техника, 1965, №3, с.23-27.
22. Schroth H.H. Ein Beitrag Zur Verdampfung an überfluteten Glatt und Rippenrohren Luft-und Kältetechnik, 1968, N5, s.212-218.
23. Webb R.L., Pais Ch. Nucleate pool boiling date for five refrigerants on plain, integral-fin and enhanced tube geometries. J.J.Heat Mass Transfer, 1992, v.35, N8. p.1893-1904.
24. Ayub Z.H., Bergles A.E. Nucleate pool Boiling Curve Hysteresis for Gewa-T Surfaces in Saturated R113. Experimental Thermal and Fluid Science, 1990, N3, p.249-255.
25. Данилова Г.Н. Теплообмен при кипении фреонов. Автореферат на соискание степени д.т.н. Ленинград, ЛХТИ, 1968, с.1-39.
26. Кутателадзе С.С., Гогонин И.И. Скорость роста и отрывной диаметр парового пузыря при кипении насыщенной жидкости в условиях свободной конвекции. ТВТ, 1979, т.17, №4, с.792-799.
27. Соловьев С.Л. Теплообмен при развитии пузырькового кипении жидкости. Теплофизика и аэромеханика, 1999, т.6, №4, с 509-517.
28. Berenson P.J. Experiments on pool-boiling Heat Transfer. J.J.Heat Mass Transfer, 1962, v.2, p.985-999.
29. Vachon R.I., Tanger G.E., Davis D.L., Nix G.H. Pool Boiling on Polished and Chemically, Etched Stainless Steel Surfaces. Trans ASME, ser C, 1968, N2, p.52-61.
30. Nusselt W. Die Oberflächen kondensationubes Wasserdampfes. Z.derVDI, 1916, Teil 1, N.27, с.541-546, teil 2, N.28, s.569-576.
31. Б.Н. Максимов, В.Г. Барабанов, И.П. Серушкин и др. Промышленные фтор-органические продукты. Справочное издание. Л.: Химия, 1990, 464с.
32. Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. Киев, Наукова думка, 1987, 240с.
33. Новицкий Л.А., Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах. Справочник. М.: Машиностроение, 1975, 215с.
34. Марочник сталей и сплавов под ред. А.С. Зубченко. М. Машиностроение, 2003г