

УДК 536.423.4.535.5

## Влияние краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении

И.И. Гогонин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: gogonin@itp.nsc.ru

Показана далеко не очевидная роль краевого угла смачивания на интенсивность теплообмена при кипении. Целенаправленные эксперименты позволят создать математическую модель, корректно описывающую результаты опытов по выяснению роли краевого угла смачивания, которая в одних случаях бесспорна, в других — неоднозначна.

**Ключевые слова:** теплоотдача при кипении, краевой угол смачивания, интенсификация теплоотдачи.

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] показано, что при кипении жидкости на твердой стенке работа образования парового пузыря объемом  $V$  с полной площадью поверхности  $F$ , часть  $f$  которой занята твердой поверхностью, равна

$$L = -\Delta PV + \sigma(F - f) + \sigma''f - \sigma'f. \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$ ,  $\sigma'$  и  $\sigma''$  — поверхностное натяжение между жидкостью и паром, между жидкостью и твердой стенкой, между паром и твердой стенкой соответственно. На рис. 1 видно, что для смачивания поверхности в точке  $A$  имеются

$$\sigma'' = \sigma' + \sigma \cos\Theta. \quad (2)$$

Тогда

$$L = -\Delta PV + \sigma F \left[ 1 - \frac{f}{F}(1 - \cos\Theta) \right]. \quad (3)$$

Таким образом, работа образования пузыря зависит от отношения  $f/F$  и от краевого угла смачивания. Необходимо отметить, что при изменении угла смачивания изменяется отношение площадей  $f/F$ .

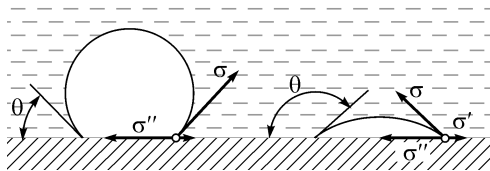


Рис. 1. Силы поверхностного натяжения на границе раздела фаз и краевой угол  $\theta$  на смачиваемой (1) и несмачиваемой (2) поверхностях [1].

Существующие физические модели зарождения паровых пузырей на твердой поверхности изложены в работе [2]. В этой же монографии приведены экспериментально определенные значения краевого угла смачивания для различных пар жидкость–охлаждаемая стенка.

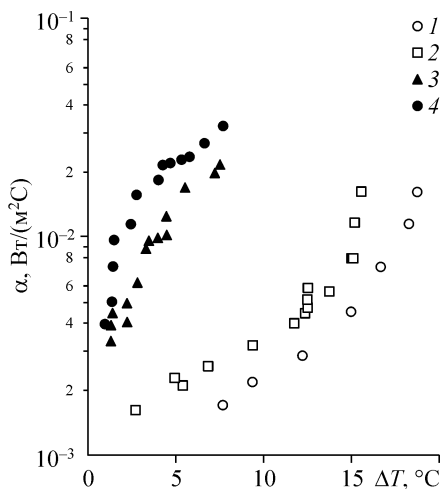
При кипении условия смачивания жидкостью твердой поверхности изменяются из-за образования накипи или оксидной пленки на охлаждаемой стенке или из-за нанесения специальных покрытий в виде точек или сплошной пленки [3–18].

Как правило, изменение условий смачивания приводит к интенсификации теплообмена при кипении. В работах [4, 5] показано, что при кипении воды на пластине из нержавеющей стали, покрытой оксидной пленкой, наблюдалась интенсификация теплоотдачи на 30 % по сравнению с опытами на пластине без пленки. В работах [3, 6] отмечается интенсификация теплоотдачи при кипении воды на алюминиевой стенке от 25 до 60% по сравнению с данными, полученными при кипении на стенке из других металлов. Окисная пленка приводит к существенному изменению краевого угла смачивания. Измеренные в [6, 7] краевые углы смачивания пары вода–алюминиевая стенка равнялись  $27^\circ$ , а пары вода–нержавеющая сталь —  $54^\circ$ . Авторы этих работ подчеркивают, что краевой угол смачивания водой пластинок из тантала, молибдена, никрома, бронзы и стали практически не меняется. Только при смачивании пластинок из алюминия и свинца, покрытых плотной оксидной пленкой, он существенно отличался.

#### 1. СТЕНКА, ПОКРЫТАЯ ПЯТНАМИ ФТОРОПЛАСТА

В работе [8] представлены результаты измерений теплоотдачи при кипении воды на стенке, покрытой пятнами материала с плохой смачиваемостью. Поверхность металла делалась шероховатой с помощью грубой наждачной бумаги. Затем она обрабатывалась двумя разными способами: поливалась тетрафторэтиленовой смолой (вид фторопласта), тщательно протиралась, а оставшаяся во впадинах смола полимеризовалась, или же покрывалась каплями смолы из пульверизатора, а затем полимеризовалась.

Вода перед каждым опытом пропусклась через катионные и анионные фильтры и дегазировалась продолжительным кипячением. Измерения проводились на теплоизолированной снизу нержавеющей ленте размером  $140 \times 30 \times 0,25$  мм. Лучшие результаты дали поверхности, обработанные из пульверизатора. Для интенсификации процесса кипения в диапазоне  $q = 9,4 \cdot 10^3 \div 9,4 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> достаточно было 30–60 центров парообразования на 1 см<sup>2</sup>. Размер пятна смолы не превышал в диаметре 0,25 мм. На рис. 2 представлены результаты измерений. Видно, что на покрытой пятнами смолы поверхности кипение происходит существенно интенсивнее и начинается при меньших  $\Delta T$ . Как следует из данных, показанных на рис. 2, к интенсификации теплоотдачи



на рис. 2, к интенсификации теплоотдачи

Рис. 2. Зависимости коэффициентов теплоотдачи от температурных напоров на поверхностях, покрытых пятнами фторопласта, и на чистых металлических поверхностях разной шероховатости [8].

Поверхности: гладкая стальная (1), стальная, покрытая раковинами (2), гладкая стальная, покрытая тефлоновыми пятнами (3), стальная, покрытая раковинами и тефлоновыми пятнами (4).

при кипении приводят не только изменение контактного угла смачивания, но и увеличение шероховатости теплоотдающей стенки.

Покрытие работало эффективно спустя несколько недель и измерения воспроизводились. Центры парообразования наблюдались на границе раздела смола–металл. Общая площадь, занятая смолой, не превышала 1 % от теплоотдающей площади.

## 2. СТЕНКА, ПОКРЫТАЯ СПЛОШНОЙ ПЛЕНКОЙ ФТОРОПЛАСТА

В работе [9] исследовался теплообмен при кипении на поверхности, которая полностью покрывалась тефлоновым покрытием разной толщины. Опыты проводились на ленте из нержавеющей стали 117×25,4×0,89 мм, на которую наносили тефлоновое покрытие толщинами 7,6  $\mu\text{м}$ , 30,5 и 35,6  $\mu\text{м}$ . Толщина покрытия колебалась в пределах 0,25  $\mu\text{м}$ . Покрытие толщиной 7,6  $\mu\text{м}$  осуществлялось серой тефлоновой эмалью 850–201, выпускаемой фирмой DuPont (США), а покрытие толщинами 30,5 и 35,6  $\mu\text{м}$  осуществлялось эмалью 851–214 той же фирмы. С помощью микроскопа можно было обнаружить очень маленькие вмятины на поверхности. Опыты для сравнения выполнялись на стальной поверхности без покрытия, которая имела среднеквадратичное отклонение по профилометру 0,084  $\mu\text{м}$ . ( $R_z \cong 0,6 \mu\text{м}$  или  $\overline{R_z} \cong 0,03$ .) Результаты измерений в координатах  $q-\Delta T$  представлены на рис. 3.

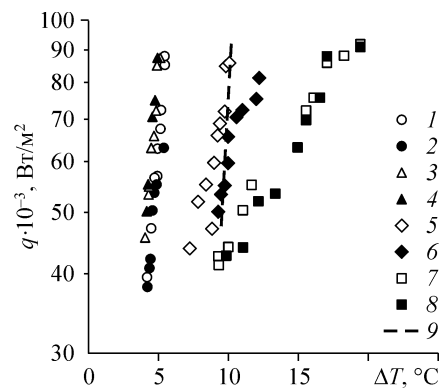
Интенсивность теплоотдачи существенно зависит от толщины покрытия и уменьшается с ростом толщины. Авторы отмечают, что при использовании покрытий 7,6  $\mu\text{м}$  теплообмен существенно интенсивнее, чем на стальной стенке без покрытия, но заметно хуже, чем в опытах [8] с точечным покрытием. Можно отметить, что имеет место заметный разброс данных в разных сериях опытов с одинаковым покрытием. Авторы подчеркивают, что здесь имеют место два эффекта: изменение краевого угла пузыря и теплоизоляция стали пленкой эмали. Внешний вид тефлонового покрытия оставался неизменным во времени. В процессе опытов температура покрытия не превышала 150 °С, в то время как тефлон выдерживает температуру до 400 °С. По мнению авторов [8], тонкое покрытие может быть рекомендовано для промышленных испытаний, т. к. помимо интенсификации теплоотдачи покрытие из фторопласта предотвращает коррозию стенок трубы.

## 3. ПОКРЫТИЕ ТЕПЛОТДАЮЩЕЙ СТЕНКИ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЛЕНКОЙ ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

В работах [10, 12, 14, 16] отмечается, что одним из эффективнейших способов интенсификации теплоотдачи при кипении жидкости в области низких давлений (менее атмосферного) является покрытие теплоотдающей стенки перфорированной пленкой полимерного материала. При кипении воды в вакууме процесс парообразования затруднен, и при  $q \leq 10^5 \text{ Вт/м}^2$  наблюдаются значительные колебания температуры стенки.

Рис. 3. Зависимость теплового потока от температурного напора на поверхности со сплошным тефлоновым покрытием [9].

$\delta = 0,0076 \text{ мм}$  (образцы 1–4), 0,0305 мм (образцы 5–6), 0,0356 мм (образцы 7, 8), сталь без покрытия (9).



Для стабилизации процесса кипения в [16] использовалась сетка из фторопласта толщиной 0,1–0,3 мм с отверстиями 0,6–2,5 мм. Площадь отверстий составляла 25–35 % всей поверхности. В этом случае процесс кипения в вакууме не отличался от кипения при атмосферном давлении и процесс теплоотдачи интенсифицировался в 4–6 раз. Очень важно, что эффект интенсификации теплоотдачи обнаруживается в случае, когда перфорированная пленка фторопласта плохо смачивается водой ( $\Theta > 90^\circ$ ), и в случае, когда хорошо смачивают фторопласт жидкости, такие как фреоны R11, R12, R22 [10], ацетон [11] и даже гелий [13]. Угол смачивания фторопластовой поверхности этиловым спиртом  $\Theta = 27^\circ$  [14], ацетоном —  $\Theta = 25^\circ$  и криогенными жидкостями —  $\Theta > 10^\circ$  [15]. В работе [10] представлена серия экспериментов, выполненная автором этой публикации. В первом опыте сравнивались интенсивность теплоотдачи при кипении воды на поверхности, покрытой лавсановой сеткой, пропитанной парафином (угол смачивания  $105^\circ$ ), и результаты опытов на лавсановой сетке, на которую напылялся слой серебра ( $\Theta = 63^\circ$ ). Во втором опыте сравнивались экспериментальные данные на покрытиях из перфорированной фторопластовой пленки с диаметром отверстий 0,45 мм,  $\Theta = 112^\circ$ , и той же пленки, подвергшейся специальной химической обработке натрий-нафталиновым комплексом для придания ей хорошей смачиваемости ( $\Theta < 90^\circ$ ). Результаты измерений теплоотдачи, представленные в координатах  $\alpha$ – $q$ , показали, что в пределах погрешности измерений во всех опытах точки при  $q = \text{idem}$  воспроизводятся. По мнению автора [10], угол смачивания на теплообмен при кипении на поверхностях с перфорированными покрытиями влияет очень слабо. В его статье высказана гипотеза, объясняющая результаты опытов. Все исследованные полимерные покрытия обладают низкой теплопроводностью, т.е. являются теплоизоляторами. Благодаря этому свойству происходит перераспределение удельных тепловых потоков на поверхности нагрева и их концентрация в тех местах, где имеются отверстия в покрытии. Плотность теплового потока в каждом отверстии перфорированной пленки выше средней, вычисленной по всей поверхности. За счет концентрации теплового потока в области отверстий стабильное пузырьковое кипение при пониженных давлениях начинается при значительно более низких, осредненных по поверхности тепловых нагрузках, чем при отсутствии перфорированной пленки. По мнению автора [10], выполненные им измерения и ссылки на литературные источники подтверждают высказанное выше предположение.

#### 4. СТАЛЬНАЯ ТРУБА, ПОКРЫТАЯ СЛОЕМ ДРУГОГО МЕТАЛЛА

В работе [16] представлены результаты опытов при кипении воды на горизонтальных трубах из нержавеющей стали, на которые наносились гальваническим способом пленки из меди, цинка, олова, хрома, никеля или кадмия. Толщина покрытия равнялась 0,127 мм. На рис. 4 приведены  $q$ – $\Delta T$  зависимости, полученные в опытах на стальной трубе и трубах, покрытых пленками из других металлов. Видно, что при кипении на трубе с медным покрытием, коэффициент теплоотдачи возрастает примерно в 2,5 раза, а на поверхности, покрытой цинком, снижается в 3 раза по сравнению со стальной трубой.

Трубы имели следующие параметры: диаметр 25,4 мм, толщину стенки 0,89 мм и длину 660 мм. Объяснения полученных результатов авторы не приводят. Можно лишь предполагать, что на поверхности, покрытой медью, образуется плотная оксидная пленка, существенно меняется угол смачивания и, следовательно, количество центров парообразования. Неясным остается вопрос о форме

Рис. 4. Теплообмен при кипении воды на стальной трубе, покрытой тонким слоем из разных металлов [16].

Поверхности: из нержавеющей стали без покрытия (1), с медным покрытием (2), с покрытием хромом (3), с покрытием никелем (4), с покрытием кадмием (5), с покрытием титаном (6), с покрытием цинком (7).

активных впадин после гальванического покрытия каждым из названных металлов. Активные впадины должны иметь острые кромки, а после гальванического покрытия впадины сглаживаются.

### 5. ПОВЕРХНОСТЬ, ПОКРЫТАЯ ДИОКСИДОМ ТИТАНА

В работе [17] приведены исследования теплообмена при кипении воды на торце медного стержня диаметром 17 мм. Приведены сопоставления ряда экспериментов при кипении воды под атмосферным давлением и температуре насыщения, когда изменялись условия смачиваемости на теплоотдающей стенке. В этих экспериментах использовались два метода покрытия поверхности диоксидом титана. В первом случае медная плита полировалась тонкой наждачной бумагой, промывалась спиртом, а потом погружалась в суспензию с  $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$  содержанием 20 весовых процентов  $\text{SiO}_2$ . Во втором методе использовалось напыление  $\text{TiO}_2$  с применением RF магнетрона. За 8 часов напылялся слой в 250 нм. Постоянное значение контактного угла достигалось только после напыления  $\text{SiO}_2$  на слой  $\text{TiO}_2$ . Слой  $\text{SiO}_2$  достигал величины 1–20 нм. После напыления поверхность подвергалась ультрафиолетовому облучению. Постоянное значение контактного угла после облучения изменялось в диапазоне 4–13°. Контактный угол на чистой полированной медной поверхности при комнатной температуре в опытах авторов изменялся в диапазоне 4–13°. На рис. 5 показаны измеренные значения контактного угла в разных сериях опытов, а на рис. 6 приведены зависимости  $q-\Delta T$  при кипении воды на стенке при разных методах ее обработки.

Главным достижением работы [17] авторы считают рост критического теплового потока, который в некоторых опытах достигал 2,2 раз по сравнению с расчетом по формуле Кутателадзе–Зубера. При развитом пузырьковом кипении в некоторых опытах имела место значительная интенсификация теплоотдачи. Вызывают некоторое удивление высокие значения удельных тепловых потоков и относительно низкие значения температурных напоров, при которых начинается кипение. В статье отсутствует внятное объяснение причин, почему на покрытой  $\text{TiO}_2$  поверхности (см. рис. 6, опыты № 3) произошло ухудшение теплоотдачи во всем

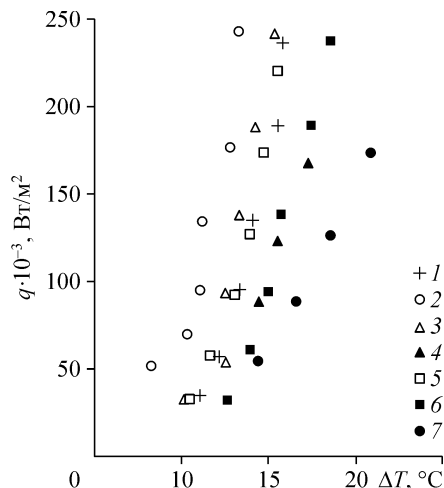
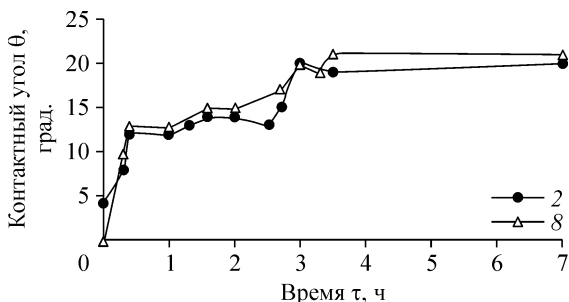


Рис. 5. Изменение угла смачивания во времени на медной поверхности, покрытой диоксидом титана [17].

Опыты: № 2 (2), № 8 (8).

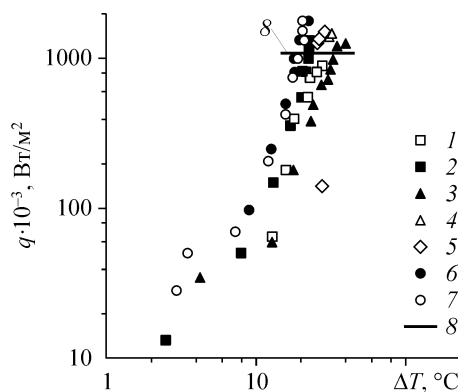


Рис. 6. Теплообмен при кипении воды на медных стенках, покрытых диоксидом титана при различной методике покрытия поверхности [17].

Непокрытая поверхность (1, 2), покрытие методом погружения (3, 4), напыление  $\text{TiO}_2$  (5, 6), напыление  $\text{SiO}_2$  на поверхность, покрытую  $\text{TiO}_2$  (7), расчет критического теплового потока по формуле Кутателадзе–Зубера (8).

диапазоне изменения нагрузки. К сожалению, авторы не приводят количественных значений шероховатости поверхности до и после напыления диоксида титана. Продолжением этой работы можно считать результаты опытов, опубликованные в [18]. Скорость испарения капли воды на поверхности с напылением  $\text{TiO}_2$  ультрафиолетового облучения была значительно выше, чем на металлической поверхности.

### ВЫВОДЫ

Во-первых, экспериментальные исследования позволяют утверждать, что изменения условий смачивания на границе раздела металл–кипящая жидкость приводят к существенному снижению температурного напора, при котором начинается кипение. Интенсификация теплоотдачи, вызванная изменением условий смачивания или перераспределением теплового потока на охлаждаемой стенке, особенно эффективна при кипении жидкостей в области низких давлений.

Во-вторых, физические причины, приводящие к началу более раннего парообразования на охлаждаемой стенке при изменении условий смачивания, к настоящему времени однозначно не определены.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галин Н.М., Кириллов П.Л. Тепломассообмен (в ядерной энергетике). М.: Энергоатомиздат, 1987. 375 с.
2. Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. Киев: Наукова Думка. 1987. 240 с.
3. Bernath L. A theory of local-boiling burnout and its application existing date.// Chem. Engng. Progress Symp. 1960. Ser. No. 56 (30). P. 95–116.
4. Tachibana F., Akyama M., Kawamura H. Non-Hydrodynamic aspects of pool boiling burnout // J. of Nuclear Science and Technology. 1967. Vol. 4, No. 3. P. 121–130.
5. Морозов В.Г. Исследование прекращения пузырькового кипения на погруженной поверхности // Л.: Тр. ЦКТИ. Котлотурбостроение. 1965. Вып. 58. С. 64–77.
6. Аладьев И.Т., Яшинов В.И. Влияние смачиваемости на кризис кипения // Конвективная теплопередача в двухфазном и однофазном потоках. М-Л.: Энергия, 1964. 448 с.
7. Арефьева Е.И., Аладьев И.Т. О влиянии смачиваемости на теплообмен при кипении // Инженерно-физический журнал. 1958. Т. 1, № 7. С. 18–23.
8. Young R.K., Hummel R.L. Improved nucleate boiling heat transfer // Chemical Engng. Progress. 1964. Vol. 60, No. 7. P. 53–58.
9. Vachon R.I., Nix G.E. Pool boiling heat transfer from Teflon-Coated Stainless steel // Trans. ASME. Ser. C. 1969. No. 3. P. 73–83.
10. Антоненко В.А. О причинах интенсификации теплоотдачи при кипении на поверхностях с полимерными перфорированными покрытиями // ИФЖ. 1988. Т. 54, № 3. С. 573–575.
11. Каширский В.Г., Печенегов Ю.Я., Серов Ю.И. Теплообмен при кипении ацетона и этилового спирта в термосифоне с капиллярно-пористыми структурами на теплоотдающем торце // Промышленная теплотехника. 1983. Т. 5, № 2. С. 43–46.

12. **Городов А.К., Лабундов Д.А., Ягов В.В.** Поверхность для охлаждения сред. А. с. 273219, 1.01.1970. СССР. МКИ F28F 13/14.
13. **Butler A.P., Jamess G.B., Maddock B.J., Norries W.T.** Improved pool boiling heat transfer to helirim from treated surfaces and its application to superconducting magnets // *Inter. J. Heat Mass Transfer*. 1970. Vol. 13, No. 3. P. 105–115.
14. **Ягов В.В., Лабунцов Д.А.** Интенсификация теплообмена и стабилизация процесса кипения в области весьма низких давлений // *Инженерно-физический журнал*. 1971. Т. 20, № 6. С. 973–981.
15. **Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.** Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия. 1977. 317 с.
16. **Bliss F.E., Hsu S.T., Crawford M.** An investigation into the effects of various platings on the film coefficient during nucleate boiling from horizontal tubes I. // *J. Heat Mass Transfer*. 1969. Vol. 12, No. 9. P. 1061–1072.
17. **Takata Y., Hidaka S., Cao J.M., Nakamura T., Yamamoto H, Masuda M., Ito T.** Effect of surface wettability on boiling and evaporation // *Energy*. 2005. Vol. 30. P. 209–220.
18. **Deendarlianto, Takata Y., Hidaka S., Kohno M.** The Effect of Contact Angle on the Evaporetion of Water Droplet on Heated Solid Surface // *Heat 2008. Fifth Inter. Conf. on Transport Phenomena in Multiphase Systems*. June 30-July 3, 2008. Bialystok, Poland. P. 103.

*Статья поступила в редакцию 1 декабря 2009 г.*