

УДК 536.423.4.535.5

Зависимость критического теплового потока при кипении от физических свойств теплоносителя

И.И. Гогонин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, Новосибирск

E-mail: gogonin@itp.nsc.ru

Экспериментально установлено, что теплообмен при кипении является задачей с сопряженными граничными условиями. Теплообмен и критические тепловые потоки при кипении зависят как от физических свойств кипящей жидкости, так и от ряда характеристик теплоотдающей стенки.

Проанализированы различные экспериментальные данные задачи кипения жидкостей с различными физическими свойствами. Чтобы исключить или свести до минимума влияние свойств охлаждаемой стенки на величину критического теплового потока, рассмотрены опыты, полученные при кипении на толстостенной охлаждаемой стенке только из нержавеющей стали или нихрома. Для исключения влияния капиллярных сил характерный линейный размер теплоотдающей стенки соответствовал условию $\bar{D} \geq 2,0$.

Ключевые слова: кипение, критический тепловой поток, физические свойства теплоносителя.

ВВЕДЕНИЕ

Охлаждение различного технологического оборудования кипящей жидкостью должно обеспечивать его безаварийную работу и, следовательно, предполагает исключение кризиса при теплообмене. Разнообразие теплоносителей, форм, размеров и материала теплоотдающих стенок, давлений и скоростей жидкости делает задачу чрезвычайно сложной и многогранной [1–6]. Рассмотрение простейшего случая — кризиса кипения в большом объеме — актуально и необходимо для понимания механизмов его возникновения и основных закономерностей.

Экспериментально показано, что кризис — это явление, связанное с внезапным расширением сухого пятна на охлаждаемой стенке и ростом локальной температуры стенки в месте расширяющегося сухого пятна. Фотографии, приведенные в [7], четко фиксируют наличие сухих и смоченных жидкостью пятен теплоотдающей стенки в предкризисном режиме кипения (рис. 1). Опыты [7] выполнены при кипении н-гептана на стенке из кварца $\delta_w = 20$ мм, который являлся дном сосуда диаметром 200 мм. На стекло напылялось золото толщиной 10 нм (нанометров). Слой золота размещался между двумя слоями оксида висмута толщиной 45 нм и использовался как электрическое сопротивление. Коэффициенты преломления теплоотдающей поверхности и жидкости практически одинаковы, что позволило фиксировать

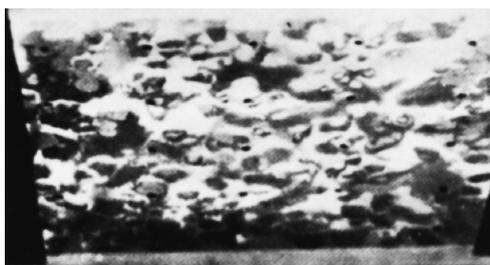


Рис. 1. Сухие и смоченные жидкостью пятна в предкризисном режиме на поверхности теплоотдающей стенки [7].

сухие пятна. Площадь, покрытая жидкостью, непрозрачна, и сухое пятно делается хорошо видимым. Каждая точка теплоотдающей стенки на какое-то мгновение может

оказаться сухой и в следующий момент времени вновь покрывается тонкой пленкой жидкости. Жидкость, орошающая охлаждаемую стенку, относительно координаты данной точки на стенке находится в постоянном движении в пространстве и во времени. Локальная температура стенки в предкризисном режиме постоянно пульсирует относительно некоторого среднего значения температуры стенки [8, 9].

В работе [10] изложена модель возникновения кризиса, как результат быстрого роста площади сухого пятна на стенке. На наш взгляд, модель содержит в себе два принципиальных недостатка. При описании кризиса рассматриваются только уравнения гидродинамики для жидкости и пара, но не рассматривается уравнение теплопроводности охлаждаемой стенки. Этот недостаток относится ко всем моделям, изложенным в [11–14, 10]. Во-вторых, в работе [10] нет ответа на один принципиальный вопрос: откуда и каким путем поступает жидкость, которая в виде тонкой пленки охлаждает теплоотдающую стенку. Ссылаясь на эксперименты, в работе [10] указывается, что на расстоянии 0,3–0,5 мм от обогреваемой поверхности истинное объемное паросодержание колеблется в пределах $\phi = 0,85 - 0,92$.

Совершенно очевидно, что жидкость, орошающая стенку, в виде тонкой пленки проникает туда между растущими агломератами паровых пузырей. Растущие агломераты пузырей являются естественными дозаторами жидкости, охлаждающей стенку. Если количество жидкости достаточно, то возникающие сухие пятна мгновенно замываются тонкой пленкой и кризис не наступает. Если количество проникающей к стенке жидкости оказывается меньше некоторого предела, то мгновенное расширение сухого пятна становится неизбежным. Возникает режим пленочного кипения. Кризис при кипении необходимо рассматривать как режим захлебывания в сечении над охлаждаемой стенкой, где наблюдается максимальное объемное паросодержание.

При описании кризиса теплообмена при кипении в работах [11, 12] использовалась скорость пара, которая легко вычисляется как отношение $U_{cr} = \frac{q_{cr}}{r\rho_V}$, и предполагалось, что $k = const$. Как показали дальнейшие исследования, такое приближение можно рассматривать как первое в той предельной ситуации, которая в общем случае несправедлива.

1. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В таблице представлены условия исследований, выполненные разными авторами и проанализированные в настоящей работе, а также показаны полученные в этих работах устойчивости при изменении физических свойств теплоносителя.

Таблица

Критические тепловые потоки при кипении в условиях свободной конвекции

Автор, год публикации	Вещество	Диапазон давлений $P/P_{ст}$	Материал теплоотдающей стенки	Характерный размер и толщина стенки	Ka	k
Бобрович Г.И., 1962 [19]	Вода Этиловый спирт Бутиловый спирт	$4,4 \cdot 10^{-3} +0,31$ $1,5 \cdot 10^{-2} +0,48$ $2 \cdot 10^{-2} +0,61$	Нихром	Лента на узкую грань $b = 6$ мм, $\delta_W = 0,5$ мм	$(3,3 \pm 12) \cdot 10^{12}$ $(0,9 \pm 9,3) \cdot 10^{10}$ $(6,0 \pm 5,4) \cdot 10^9$	$0,15 \pm 0,17$ $0,13 \pm 0,15$ $0,13 \pm 0,16$
Ночле J.C., 1963 [23]	Бензол Дифенил	$0,02 \pm 0,69$ $0,09 \pm 0,75$	Нерж.сталь Нерж.сталь	Труба $D = 9,5$ мм $\delta_W = 0,5$ мм	$(1,44 \pm 16,6) \cdot 10^{10}$ $(7 \pm 18) \cdot 10^{10}$	$0,1 \pm 0,125$ $0,11 \pm 0,14$
Бобрович Г.И., 1964 [20]	Вода Этиловый спирт	$4,4 \cdot 10^{-3} +0,05$ $1,5 \cdot 10^{-2} +0,17$	Нерж.сталь Нерж.сталь	Труба $D = 6,0$ мм	$(3,3 \pm 12) \cdot 10^{12}$ $(1 \pm 9,3) \cdot 10^{10}$	$0,15 \pm 0,17$ $0,13 \pm 0,15$
Сатте M., 1965 [28]	Ацетон Толуол Пропиловый спирт Бутиловый спирт	1 ата - - -	Нерж.сталь - - -	Стержень $D = 6,4$ мм	$15,7 \cdot 10^{10}$ $11,8 \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^{10}$ $1,2 \cdot 10^{10}$	0,125 0,133 0,112 0,113
Рагиони Г.В., 1965 [25]	Фреоны R113 R112	$0,03 \pm 0,72$ 1 ата	Нерж.сталь	Лента $\delta_W = 0,51$ мм	$(0,2 \pm 1,5) \cdot 10^{10}$ $0,5 \cdot 10^{10}$	$0,1 \pm 0,12$ 0,1
Морозов В.Г., 1965 [33]	Вода метиловый спирт изопропиловый Спирт	$4,4 \cdot 10^{-3} +0,16$ $0,02 \pm 0,69$ $0,02 \pm 0,85$	Нихром	Лента теплоизол. снизу $b = 3 \pm 10$ мм, $\delta_W = 0,5 \pm 1,0$ мм	$(3,3 \pm 12,9) \cdot 10^{12}$ $(6,2 \pm 31) \cdot 10^{10}$ $(1,0 \pm 2,1) \cdot 10^{10}$	$0,17 \pm 0,15$ $0,14 \pm 0,15$ $0,12 \pm 0,14$
Tachibana F., 1967 [27]	Вода	1 ата	Нерж.сталь	Пластины $b = 8$ мм, $\delta_W = 2,0$ мм	$3,3 \cdot 10^{12}$	$0,16 \pm 0,166$
Кутателадзе С.С., 1967 [21]	Вода Этиловый спирт Бензол	$4,4 \cdot 10^{-3} +0,31$ $1,5 \cdot 10^{-2} +0,8$ $2 \cdot 10^{-2} +0,22$	Нихром - -	Пластины $b = 6$ мм, $\delta_W = 0,5$ мм	$(3,3 \pm 12) \cdot 10^{12}$ $(6,9 \pm 9,3) \cdot 10^{10}$ $(13,0 \pm 15,5) \cdot 10^{10}$	$0,15 \pm 0,17$ $0,13 \pm 0,15$ $0,14 \pm 0,16$
Гогонин И.И., 1970 [22]	Фреон R21	$0,042 \pm 0,75$	Нерж.сталь	Трубка $D = 3$ мм, $\delta_W = 0,5$ мм	$(0,42 \pm 11) \cdot 10^{10}$	$0,12 \pm 0,15$
Кириченко Ю.А., 1974 [26]	Водород	$5,5 \cdot 10^{-3} +0,7$	мельхиор	Трубка $D = 7$ мм, $\delta_W = 0,35$ мм	$(0,24 \pm 2,1) \cdot 10^{12}$	$0,13 \pm 0,14$
Дудевич А.С., 1974 [31]	Азот	$0,03 \pm 0,9$	Нерж.сталь	Торец стержня $D = 10$ мм	$(0,19 \pm 15) \cdot 10^{10}$	$0,11 \pm 0,16$
Клименко А.В., 1975 [32]	Азот	1 ата	Нерж.сталь	Торец стержня $D = 12$ мм	$9,7 \cdot 10^{10}$	0,111
Андреев В.Г., 1976 [29]	Гелий	$0,1 \pm 0,85$	Нерж.сталь	Диск $D = 25$ мм, $\delta_W = 3$ мм	$(0,2 \pm 94) \cdot 10^{10}$	$0,091 \pm 0,178$
Гогонин И.И., 1977 [30]	Этиловый спирт	$1,5 \cdot 10^{-2} +0,8$	Нерж.сталь	Лента, теплоизолированная снизу $b = 5 \pm 50$ мм, $\delta_W = 0,5$ мм	$(0,9 \pm 9,3) \cdot 10^{10}$	$0,135 \pm 0,155$

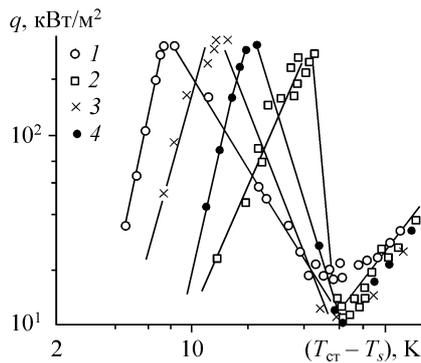


Рис. 2. Критический тепловой поток при кипении н-пентана на медных плитах различной шероховатости [15].

Поверхности: грубо обработанная (1), полированная (2), промежуточные значения шероховатости (3, 4).

В таблицу включены только те работы, в которых полно представлена методика проведения опытов, названа марка материала, из которого изготовлена теплоотдающая стенка, и полностью названы все геометрические характеристики охлаждаемой стенки.

Чтобы упростить анализ, в настоящей работе сознательно рассматривались опыты с нагревателями, расположенными только в горизонтальном положении и изготовленными из нержавеющей стали или нихрома.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что высыхание тонкой пленки, которое приводит к кризису теплообмена при кипении, является следствием количества жидкости, поступающей через самое узкое сечение между растущими агломератами пузырей. Такая точка зрения позволяет анализировать работы разных авторов и вычислять значения критерия устойчивости, при котором возник кризис кипения, в зависимости от изменения других параметров. Подтверждением сказанному могут служить результаты экспериментов в работе [15]. На рис. 2 представлены опыты из этой работы при кипении н-пентана. В экспериментах изменялся единственный параметр — шероховатость толстостенной медной плиты, являющейся теплоотдающей стенкой. Отчетливо видно, что критический тепловой поток оставался практически неизменным, а температура стенки, при которой возникал кризис, — переменной. Температурный напор $\Delta t = t_w - t_s$ в момент кризиса изменялся в несколько раз для поверхностей с разной шероховатостью. При кипении криогенных жидкостей на стенках разной шероховатости точно такой же результат был получен в работе [16]. Это означает, что определяющим параметром этой задачи является критическая скорость парообразования $U_{V, cr} = q_{cr} / r \rho_V$, при достижении которой возникал кризис теплообмена.

1.1. Влияние физических свойств жидкости на критический тепловой поток

На рис. 3 представлена обработка экспериментальных данных разных авторов в координатах

$$k = f(\text{Ka}). \quad (1)$$

Известно, что число Капицы является отношением двух внутренних линейных масштабов при кипении жидкости

$$\text{Ka} = \left(\frac{l_\sigma}{l_v} \right)^6 = \frac{\sigma^3}{v^4 \rho_L^2 (\rho_L - \rho_V) g}.$$

Здесь $l_\sigma = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_V)}}$ — капиллярная постоянная жидкости. Диаметр отрывающихся пузырей при кипении пропорционален этому параметру.

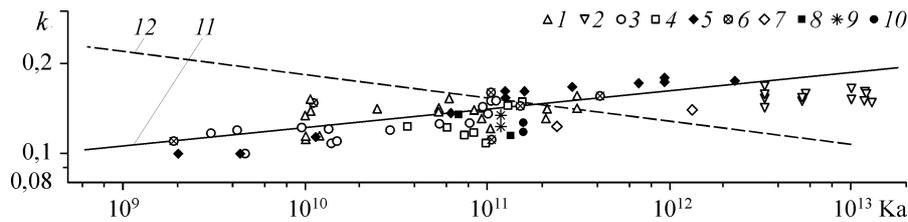


Рис. 3. Зависимость критерия устойчивости от числа Капицы.

1 — спирты (метилловый, этиловый, бутиловый, пропиловый, изопропиловый) [19–21, 27, 28, 33], 2 — вода [19–21, 27], 3 — фреоны R21, R112, R113 [22, 25], 4 — бензол [21, 23], 5 — гелий [29], 6 — азот [31, 32], 7 — водород [26], 8 — дифенил [23], 9 — толуол [28], 10 — ацетон [28], 11 — по зависимости (5), 12 — по (6) [35].

$$l_v = \left[\frac{v^2}{g(1 - (\rho_v / \rho_L))} \right]^{1/3} \text{ — вязкогравитационная постоянная величина, опреде-}$$

ляющая толщину микрослоя под растущим пузырьком пара [17, 18].

В координатах (1) обработаны экспериментальные данные [19–22, 16, 23–26, 27, 28–30, 31, 32, 33]. Опыты выполнены при кипении 14 разных жидкостей на стенках из нержавеющей стали или нихрома при $\delta_w / h_{cr} > 1,0$, имеющих безразмерный линейный параметр $\bar{D} \geq 2,0$. В основе этой обработки лежат эксперименты коллектива исследователей, с участием автора статьи, по определению q_{cr} выполненные в разные годы при кипении дистиллированной воды, этилового и бутилового спиртов, бензола и фреона R21 [19–22, 30]. Опыты выполнены по единой методике на горизонтальных цилиндрах из нержавеющей стали или пластинах из нихрома длиной 60–120 мм. При кипении воды опыты проводились на трубах $D(4 \div 6) \times 0,5$ мм, а при кипении других жидкостей — на трубах $D(3 \div 4) \times 0,5$ мм или нихромовых лентах шириной 6 или 10 мм, установленных на узкую грань. В работе [30] представлены результаты опытов при кипении этилового спирта на горизонтально расположенных нержавеющей лентах $\delta_w = 0,5$ мм, теплоизолированных снизу. Ширина ленты изменялась от 5 до 50 мм. Перед измерением критического теплового потока каждый экспериментальный участок находился под нагрузкой $q \cong 0,5 q_{cr}$ не менее двух часов. Контрольная серия опытов при давлении 1 или 11 бар по определению q_{cr} выполнялась при кипении воды на горизонтальных стержнях $D = 6$ мм и при кипении бензола на стержне $D = 4,0$ мм.

Практическое равенство измеренных значений q_{cr} на стержне и трубе с толщиной стенки $\delta_w = 0,5$ мм при прочих равных условиях позволило считать трубы из нержавеющей стали с $\delta_w = 0,5$ мм толстостенными. На одном участке при кипении органических жидкостей и фреона фиксировалось не более 5–10 значений критического теплового потока. В опытах с водой экспериментальные участки при достижении кризиса, как правило, перегорали.

Все эксперименты проводились при изменении давлений в широких пределах, а в опытах при кипении этилового спирта и фреона R21 значение P/P_{cr} достигало 0,8.

Глубина захлаживания при кризисе определена в работах [5, 34]. Решение задачи о теплообмене между теплоотдающей стенкой и кипящей на ней жидкостью в работах [5, 34] заменено решением задачи об испарении пленки жидкости

с поверхности полуограниченного твердого тела, имеющего постоянную начальную температуру.

Решение последней задачи позволяет вычислить глубину захлаживания из выражения

$$h_{cr} = 1,245\sqrt{a_w\tau_p}. \quad (2)$$

Здесь τ_p [с] — время роста агломерата пузырей при кризисе

$$\tau_p = 2,14\sqrt{\frac{\sigma}{g^3(\rho_L - \rho_V)}}\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_V}}, \quad (3)$$

или

$$h_{cr} = 1,8\sqrt{a_w}\left(\frac{\sigma}{g^3(\rho_L - \rho_V)}\right)^{1/8}\left(\frac{\rho_L}{\rho_L - \rho_V}\right)^{1/4}. \quad (4)$$

Последний член в уравнении (4) необходимо учитывать при обработке опытов с $P/P_{cr} \geq 0,5$. В таблице и на графиках показаны экспериментальные точки при условии $\delta_w/h_{cr} \geq 1,0$.

Как следует из представленных данных, критерий устойчивости слабо зависит от числа Капицы. Аппроксимационная зависимость имеет вид

$$k = C\text{Ka}^{0,05}, \quad (5)$$

где $C = 0,04$.

Число Капицы в перечисленных экспериментах изменялось на четыре порядка. Из рис. 3 следует, что при уменьшении числа Капицы критерий устойчивости монотонно снижается от 0,18 до 0,1.

Необходимо отметить, что в координатах (1) экспериментальные данные ранее были обработаны в работе [35]. Однако автор работы не располагал достаточно большим количеством достоверных данных и вынужден был ввести подгоночный множитель, позволяющий описать результаты измерений единой зависимостью. В соотношении вида (1) был получен отрицательный показатель степени.

Аппроксимационная зависимость в работе [35] имеет вид

$$k = 0,8\text{Ka}^{-0,0625}. \quad (6)$$

При обработке опытов теплофизические свойства жидкостей принимались по справочникам [5, 36–39], а физические свойства металлов по [40–42]. Физические свойства теплоносителя приняты при температуре насыщения.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты позволяют утверждать, что критерий устойчивости при исследовании критических тепловых потоков при кипении является величиной переменной, слабо зависящей от числа Капицы.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

α_w — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$,	λ_w, λ — теплопроводности металла и жидкости, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{гр}$,
C — константа,	q_{cr} — критический тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$,
C_p, C_w — теплоемкости жидкости и стенки, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{гр}$,	U_{Vcr} — критическая скорость пара, $\text{м}/\text{с}$,
D, b — диаметр охлаждаемого цилиндра (диска), ширина пластины, м ,	σ — поверхностное натяжение, $\text{н}/\text{м}$,
g — ускорение свободного падения, $\text{м}^2/\text{с}$,	r — скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$,
	δ_w — толщина охлаждаемой стенки, м ,
	ν — кинетическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$,

h_{cr} — глубина захлаживания, вычисленная по (11), м,
 ρ_W, ρ_L, ρ_V — плотности металла, жидкости, пара, кг/м³,
 τ_p — время роста агломерата пузырей, с,
 t_W, t_S — температуры стенки и насыщения, град,
 φ — объемное паросодержание,
 $\Delta t = t_W - t_S$ — температурный напор, град.

БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

$$k = \frac{U_V \sqrt{\rho_V}}{\sqrt[4]{\sigma g (\rho_L - \rho_V)}} = \frac{q_{cr}}{r \sqrt{\rho_V} \sqrt[4]{\sigma g (\rho_L - \rho_V)}} \quad \bar{D} = \frac{D}{\sqrt{\sigma / (g (\rho_L - \rho_V))}} \quad \text{— безразмерный диаметр,}$$

— критерий устойчивости двухфазного потока, $Ka = \frac{\sigma^3}{v^4 \rho_L^2 (\rho_L - \rho_V) g}$ — число Капицы.

ИНДЕКСЫ

W — стенка, cr — критический, L — жидкости,
 S — насыщения, V — пара.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Adamov E.O., Kuznetsov Yu.N. Nuclear power: overall strategy and Contribution to District Heating // Proc. of the Baltic Heat Transfer Conf. 19-21 September 2007, St. Peterburg. — Publishing house of Polytechnical University, 2007. — Vol. 1. — P. 10–17.
2. Sulatski A.A., Cherny O.D., Efimov V.K., Granovski V.S. Boiling Crisis at the outer surface of VVER Vessel // Proc. of Inter. Symp. on the Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation and 11-th Inter. School-Seminar of Young Scientists and Specialists, 21-24 May 1997, Moscow, Russia. — M.: Printing House “Shanse”, 1997. — P. 263–268.
3. Деев В.И., Куценко К.В., Лаврухин А.А., Харитонов В.С. Нестационарный кризис кипения жидкостей // V Минский межд. форум по тепло- и массообмену, 24-28 мая 2004 г., Минск 2004. — Ин-т тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАНБ. — Т. 2. — С. 36–37.
4. Bergles A. Enhancement of Boiling Heat Transfer // Proc. of the Baltic Heat Transfer Conf. 19-21 September, 2007, St. Peterburg. — Publishing house of Polytechnical University, 2007. — Vol. 1. — P. 73–95.
5. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. — М.: Энергия, 1977. — 289 с.
6. Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов. — М.: Мир, 1980. — 516 с.
7. Van Ooverkerk H.J. Burnout in pool boiling the stability of boiling mechanisms I // J. Heat Mass Transfer. — 1972. — Vol. 15. — P. 25–34.
8. Efferson K.R. Heat transfer from cylindrical surfaces to liquid helium I // J. of Applied Physics. — 1969. — Vol. 40, No. 5. — P. 1995–2000.
9. Ishigai S, Kuno T. Experimental study of transition boiling on a vertical wall open vessel // Bulletin of J.S.M.E. — 1966. — Vol. 9, No. 5. — P. 361–368.
10. Ягов В.В. Механизм кризиса кипения в большом объеме // Теплоэнергетика. — 2003. — № 3. — С. 2–10.
11. Кутателадзе С.С. Гидродинамическая модель кризиса теплообмена в кипящей жидкости при свободной конвекции // Журнал технической физики. — 1950. — Т. 20, № 11. — С. 1389–1392.
12. Кутателадзе С.С. Гидродинамическая теория изменения режима кипения жидкости при свободной конвекции // Известия АН СССР. Отд-ние техн. наук. — 1951. — № 4. — С. 529–536.
13. Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer // AEC Report, AECU-4439. — Los Angeles, 1959. — P. 1–20.
14. Лабунцов Д.А. Обобщенные зависимости для критических тепловых нагрузок для кипения жидкостей в условиях свободного движения // Теплоэнергетика. — 1960. — № 7. — С. 76–80.
15. Berenson P.J. Experiments on pool boiling heat transfer I // J. Heat Mass Transfer. — 1962. — Vol. 5. — P. 985–999.
16. Клименко В.В. Исследование переходного и пленочного кипения криогенных жидкостей. — Автореф. дисс. ... к.т.н. — М.: МЭИ, 1975. — С. 1–30.
17. Nusselt W. Die Oberflächen Kondensationubes Wasserdampfes // Z. derVDI. — 1916. — Teil 1, No. 27. — S. 541.
18. Nusselt W. Die Oberflächen Kondensationubes Wasserdampfes // Z. derVDI. — 1916. — Tail 2, No. 28. — S. 569.
19. Бобрович Г.И., Гогонин И.И., Кутателадзе С.С., Москвичева В.Н. Критические тепловые потоки при кипении бинарных смесей // Журнал прикладной механики и технической физики. — 1962. — № 4. — С. 108–111.

20. **Бобрович Г.И., Гогонин И.И., Кутателадзе С.С.** Влияние размера поверхности нагрева на критический тепловой поток при кипении в большом объеме жидкости // Журнал прикладной механики и технической физики. — 1964. — № 4. — С. 137–138.
21. **Кутателадзе С.С., Валунина Н.В., Гогонин И.И.** Зависимость критического теплового потока от размера нагревателя при кипении насыщенной жидкости в условиях свободной конвекции // Инженерно-физический журнал. — 1967. — Т. 12, № 5. — С. 569–575.
22. **Гогонин И.И.** Теплообмен и критические тепловые потоки при кипении фреона-21 в условиях свободной конвекции // Холодильная техника. — 1970. — № 3. — С. 24–28.
23. **Hoehne J.C., Huber D.A.** Pool boiling of benzene, biphenyl and benzene-diphenyl mixtures under pressure // Trans ASME. Ser C. — 1963. — Vol. 85, No. 3. — P. 31–38.
24. **Leahard J.H., Dhir V.K., Rihard D.M.** Peak pool boiling heat flux measurements on finite horizontal flat plates // Trans of the ASME. Ser C. — 1973. — No. 4. — P. 49–56.
25. **Ратиани Г.В., Авалиани Д.И.** Теплообмен и критические тепловые нагрузки при кипении фреонов // Холодильная техника. — 1965. — № 3. — С. 23–27.
26. **Кириченко Ю.А., Козлов С.М., Левченко Н.М.** Экспериментальное исследование кризисов кипения водорода и азота // Вопросы гидродинамики и теплообмена в криогенных системах. — Харьков: ФТИНТ АН УССР. — 1974. — Вып. 4. — С. 62–66.
27. **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.
28. **Carne M.** Some Effects of Test Section Geometry in Saturated Pool Boiling on the Critical Heat Flux for Some Organic Liquids and Liquid Mixtures // Chem. Engng. Prog. Sympos. Series. — 1965. — Vol. 61, No. 59. — P. 281–289.
29. **Андреев В.К., Деев В.И., Петровичев В.И.** Влияние ориентации поверхности нагрева и давление на критический тепловой поток при кипении гелия в большом объеме // Теплофизика высоких температур. — Деп. № 858-76. — М.: ВИНТИ, 1976. — С. 1–13.
30. **Гогонин И.И., Кутателадзе С.С.** К зависимости критического теплового потока от размера нагревателя при кипении жидкости в большом объеме // Инженерно-физический журнал. — 1977. — Т. 33, № 5. — С. 802–806.
31. **Дудкевич А.С., Ахмедов Ф.Д.** Экспериментальное исследование влияния теплофизических свойств поверхности нагрева при кипении азота при повышенных давлениях // Тепло- и массообменные процессы и аппараты. — М.: Труды МЭИ, 1974. — Вып. 198. — С. 41–47.
32. **Клименко А.В.** Экспериментальное и теоретическое исследование влияния некоторых факторов на теплообмен при кипении криогенных жидкостей. — Автореф. дисс. ... к.т.н. — М.: МЭИ, 1975. — 32 с.
33. **Морозов В.Г.** Исследование прекращения пузырькового кипения на погруженной поверхности // Труды ЦКТИ “Котлотурбостроение”. — Л.: Издание ЦКТИ, 1965. — Вып. 58. — С. 64–77.
34. **Григорьев В.А., Клименко В.В., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В.** К теории кризиса пузырькового кипения в большом объеме // Теплоэнергетика. — 1978. — № 2. — С. 7–9.
35. **Боришанский В.М.** О критериальной формуле для обобщения опытных данных по прекращению пузырькового кипения в большом объеме // Журнал технической физики. — 1956. — Т. XXVI, Вып. 2. — С. 452–456.
36. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей // М.: Наука, 1972. — 720 с.
37. **Максимов Б.Н., Барабанов В.Г., Серушкин И.П. и др.** Промышленные фторорганические продукты / Справочное издание. — Л.: Химия, 1990. — 464 с.
38. **Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В.** Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. — Киев.: Наукова Думка, 1987. — 240 с.
39. **Справочник по теплообменникам.** — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 2. — 352 с.
40. **Новицкий Л.А., Кожевников И.Г.** Теплофизические свойства материалов при низких температурах / Справочник. — М.: Машиностроение, 1975. — 215 с.
41. **Марочник сталей и сплавов /** Под ред. А.С. Зубченко. — М.: Машиностроение, 2003. — 536 с.
42. **Справочник по физико-техническим основам криогеники /** Под ред. М.П. Малкова. — М.: Энергия, 1973. — 392 с.

Статья поступила в редакцию 11 сентября 2008 г.