

Исследование влияния материала нагревателя на критическую тепловую нагрузку при кипении жидкостей на поверхностях различных размеров

© Е.В. Анохина

Ростовская-на-Дону государственная академия сельскохозяйственного машиностроения,
344023 Ростов-на-Дону, Россия
e-mail: anohina@donpac.ru

(Поступило в Редакцию 20 мая 2009 г. В окончательной редакции 8 сентября 2009 г.)

Приводятся результаты исследования критических тепловых нагрузок q_{cr} при насыщенном и ненасыщенном кипении воды, этанола в большом объеме при атмосферном давлении. Опытным путем показано, что критическая тепловая нагрузка не всегда совпадает с тепловой нагрузкой, соответствующей пережогу нагревателя, и эти данные необходимо различать. Экспериментально найдены абсолютные величины q_{cr} при кипении воды, этанола на поверхностях из меди диаметром 65, 80, 100, 120 и 200 μm , вольфрама диаметром 100 μm и никрома диаметром 100 μm .

Введение

Охлаждение тепловыделяющих поверхностей кипящей жидкостью имеет место в ракетной, ядерной и криогенной технике, элементах радиооборудования, металлургии и т.д. [1–4]. В различных случаях широко изменяются размеры нагревателей, их материал, а также теплоносители, отводимые тепловые нагрузки и другие условия, при которых необходимо охлаждать поверхность нагрева.

Целью большинства работ по исследованию влияния размера поверхности нагрева на критическую тепловую нагрузку q_{cr} является определение зоны автономности кризиса теплоотдачи [3,5–7]. В опытах по исследованию кипения этот вопрос становится важным вследствие того, что в литературе имеется большой разброс данных по q_{cr} , полученных на поверхностях различных размеров [5–9].

Величиной критической тепловой нагрузки определяется безопасная работа теплонапряженной поверхности. Абсолютные величины q_{cr} при кипении на цилиндрических нагревателях значительно различаются. Так, к примеру, при ненасыщенном кипении (температура ядра жидкости составляла 23°C) на медном цилиндрическом нагревателе диаметром 100 μm автором настоящей работы получена величина $q_{cr} = 3.82 \text{ MW/m}^2$. Автор [10] в аналогичных условиях получил значение $q_{cr} = 15.81 \text{ MW/m}^2$ при поверхностном кипении на молибденовом цилиндрическом нагревателе диаметром 70 μm . Под ядром жидкости имеем в виду всю жидкость, в которую погружен нагреватель, исключая пристеночный слой жидкости, который находится в перегретом состоянии.

Проволочный нагреватель в нашей работе — это модель тепловыделяющего элемента ядерного реактора (ТВЭЛ) [11], поэтому очень важно знать и сопоставлять опыты по кризису кипения на модели и на натурном объекте. Есть необходимость соотносить критические

тепловые нагрузки на цилиндрических нагревателях и протяженных поверхностях нагрева различных форм, в частности, плоских поверхностях.

Существуют теории, с помощью которых можно предсказать величину q_{cr} при определенном диаметре [3,12–14]. Экспериментальные исследования [3,6,7,15–19] показывают, что на критическую тепловую нагрузку при кипении жидкостей в большом объеме определенное влияние оказывает материал и размер поверхности нагрева. Но данные эти далеко не полные, и их результаты недостаточны для построения обоснованных обобщений, а некоторые выводы противоречивы.

Цель работы — исследовать критические тепловые нагрузки при кипении жидкостей в зависимости от размера поверхностей нагрева, выполненных из различных материалов. Количество известных данных по величинам q_{cr} весьма ограничено, часто они имеют большой разброс.

Не всегда ясно, как фиксировать в экспериментах величину критической тепловой нагрузки, соответствующую так называемому феномену кризиса кипения. Поэтому будем исследовать вопрос о том, что понимают под критической тепловой нагрузкой и как ее регистрировать.

О понятии критической тепловой нагрузки

Здесь имеет смысл напомнить о свойствах так называемой кривой кипения $q = f(T)$, где q — тепловая нагрузка, T — температура поверхности нагрева. Кривая подобного рода представлена на рис. 1 в случае, когда температура ядра жидкости равна температуре насыщения или меньше ее. Отрезок AB соответствует теплообмену при естественной конвекции. Отрезок BC — это область пузырькового кипения. Участок CD отвечает переходному кипению, а DE — пленочному кипению.

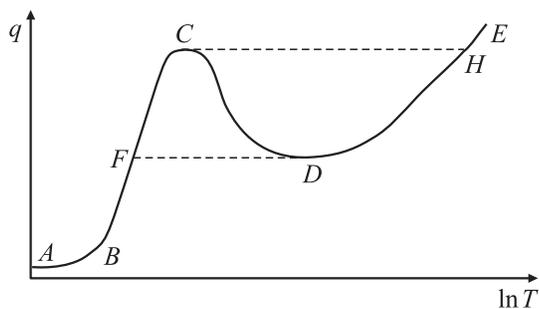


Рис. 1. Схематическое изображение кривой кипения жидкости.

Отметим, что величины q и T на отрезке BC , соответствующем кривой пузырькового кипения, представляют собой средние по времени значения плотности теплового потока и температуры стенки. В действительности эти величины в процессе кипения являются пульсирующими. Но поскольку в данной работе рассматривается процесс в целом, то будем иметь дело исключительно со средними значениями тепловых нагрузок и средними значениями температуры поверхности.

Теперь вернемся к теме критической тепловой нагрузки применительно к насыщенному и ненасыщенному кипению жидкостей в большом объеме при естественной конвекции. В современной отечественной и зарубежной литературе эту величину определяют следующим образом.

1. Чаще всего под критической тепловой нагрузкой понимают тепловую нагрузку, соответствующую точке C (рис. 1) [2,5,20–22]. А точка C приходится на максимум кривой кипения.

2. Иногда ее определяют как плотность теплового потока, небольшое увеличение которой вызывает переход от пузырькового кипения к пленочному. При смене режимов кипения происходит резкое увеличение температуры нагревателя. На схеме (рис. 1) это соответствует переходу от точки C к H , минуя отрезки CD и DH [14]. Другими словами, тепловая нагрузка, при которой режим пузырькового кипения переходит в пленочный, называется критической тепловой нагрузкой [1,22].

3. Критическая тепловая нагрузка соответствует тепловой нагрузке при пережоге, перегорании, т.е. при разрушении нагревательного элемента [3,14,19]. Так, в [3] отмечается, что при кипении на тонкой проволоке пузыри обволакивают в месте своего возникновения весь нагреватель, чем резко ухудшают локальный теплообмен и вызывают пережог, отождествляемый с кризисом кипения. Кризис кипения приходится на тепловые нагрузки, соответствующие критическим. В работе [14] указывается, что в случае нагревания поверхности электрическим током при незначительном повышении значения тепловой нагрузки в точке C (рис. 1) температура поверхности скачком изменяется до значения в точке H . При этом некоторые поверхности не выдерживают дальнейшего увеличения тепловой нагрузки и

плавятся. По этой причине в [14] критическая тепловая нагрузка называется плотностью теплового потока при пережоге. Кризис кипения в опытах по кипению воды и этанола [19] на трубках из нержавеющей стали также фиксировался по пережогу опытной трубки.

Существует два вида кипящих систем — с контролируемой тепловой нагрузкой q (при электрическом нагреве теплоотдающей поверхности) и контролируемой температурой T (в случае, если источником тепла является конденсирующийся пар). Область, в которую процесс переходит из максимальной точки C , зависит именно от того, какая величина — q или T — является контролируемой независимой переменной. Если поверхность нагревается электрическим током, то при незначительном превышении тепловой нагрузки в точке C температура скачком изменяется до значения в точке H . Если же непрерывно возрастает температура, то из точки C с ростом температуры процесс развивается в области переходного кипения (кривая CD).

Из вышесказанного можно сделать вывод о том, что в действительности кризис теплоотдачи при пузырьковом кипении, приводящий к критической тепловой нагрузке, является сложным явлением и не имеет простого определения. Поэтому прежде чем проводить опыты по изучению зависимости критической тепловой нагрузки от диаметра нагревателя необходимо выработать методику экспериментального определения этой величины. В различных случаях необходимо отдельно исследовать вопрос о том, как регистрировать величину q_{cr} применительно к конкретным условиям опыта и какой из пунктов 1–3 подходит для определения абсолютного значения критической тепловой нагрузки.

Экспериментальная установка и методика проведения опытов

Для исследования кипения воды нами использовался метод электрически нагретой проволоки. Схема экспериментальной установки по исследованию кривой кипения жидкости при атмосферном давлении в большом объеме представлена на рис. 2. Электропитание опытного нагревателя осуществлялось от батареи аккумуляторов B_1 на-

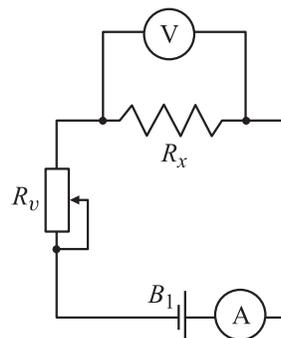


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для исследования кипения жидкостей.

пряжением 24 V. Ток на экспериментальном участке R_x изменялся с помощью переменного сопротивления R_p .

Напряжение и ток регистрировались одновременно двухканальным цифровым мультиметром типа АМ-1109. Абсолютная погрешность измерения напряжения и тока составила соответственно $\pm(0.0015U_m + 0.0001 \text{ V})$ и $\pm(0.003I_m + 0.001 \text{ A})$, где U_m, I_m — измеренные значения напряжения и тока. За счет одновременного измерения последних двух величин появляется дополнительная погрешность $\pm 0.0025 \text{ V}$ и $\pm 0.0025 \text{ A}$, которая суммируется с вышеуказанной. В итоге абсолютная погрешность измерения мультиметром напряжения и тока будет равна $\pm(0.0015U_m + 0.0025 \text{ V})$ и $\pm(0.003I_m + 0.0035 \text{ A})$ соответственно. К примеру, данный прибор зафиксировал показание $U_m = 1.0136 \text{ V}$ и $I_m = 3.7242 \text{ A}$ для медного нагревателя диаметром $100 \mu\text{m}$. Абсолютная и относительная погрешность измерения напряжения — $\Delta U_m = \pm 0.0041 \text{ V}$ и $\delta U = (\Delta U_m / U_m) \cdot 100\% = (0.0041 / 1.0136) \cdot 100\% = 0.1\%$, тока — $\Delta I_m = \pm 0.0147 \text{ A}$ и $\delta I = (\Delta I_m / I_m) \cdot 100\% = (0.0147 / 3.7242) \cdot 100\% = 0.39\%$. Результат можно записать в виде $U_m = 1.0136 \pm 0.0041 \text{ V}$ и $I_m = 3.7242 \pm 0.0147 \text{ A}$.

Тепловая нагрузка в ходе опытов определялась по следующей формуле:

$$q = \frac{UL}{S} = \frac{UL}{\pi dl},$$

где U — падение напряжения на цилиндрическом нагревателе, V; I — ток нагрева, A; S — площадь нагревателя, m^2 ; d — диаметр нагревателя, m; l — длина нагревателя, m.

Выполним оценку погрешности тепловой нагрузки по [23]. Мощность нагревателя при кипении жидкости в предыдущем примере $P = UI = 1.0136 \cdot 3.7242 = 3.7748 \text{ W}$ вычисляется с относительной погрешностью:

$$\begin{aligned} \delta P &= \sqrt{\left(\frac{\Delta U_m}{U_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_m}{I_m}\right)^2} \cdot 100\% \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.0041}{1.0136}\right)^2 + \left(\frac{0.0147}{3.7242}\right)^2} \cdot 100\% = 0.57\%. \end{aligned}$$

Относительная погрешность измерения площади поверхности нагревателя диаметром $100 \mu\text{m}$ и длиной 20 mm:

$$\begin{aligned} \delta S &= \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2} \cdot 100\% \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.5}{20}\right)^2 + \left(\frac{0.005}{100}\right)^2} \cdot 100\% = 2.50\%. \end{aligned}$$

Теловая нагрузка при кипении жидкостей $q = 601\,090 \text{ W/m}^2$ для вышеуказанного примера определя-

лась с относительной погрешностью

$$\begin{aligned} \delta q &= \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \cdot 100\% \\ &= \sqrt{\left(\frac{0.0215}{3.7748}\right)^2 + \left(\frac{50}{2000}\right)^2} \cdot 100\% = 2.56\%. \end{aligned}$$

Температуру тепловыделяющего элемента находим по градуировочной зависимости температуры от сопротивления. Сопротивление поверхности нагрева определялось с помощью мостовой схемы.

На рис. 3 представлена электрическая схема измерительного моста. Это мост одинарный, четырех-зжимная схема подключения для измерения сопротивлений от 10^{-4} до $10^2 \Omega$. Предельное допустимое (maximum admissible) значение приведенной погрешности измерений сопротивления данным мостом составляет $\delta R_{\text{max}} = 0.1\%$. Цилиндрический нагреватель R_x подсоединяется последовательно зажимами $T1, T2$, а также $n1, n2$. Сопротивления плеч отношения R_A, R_B составляют многие сотни ом, а сопротивления нагревателя R_x и плеча сравнения R_C около нескольких ом. Большая часть тока от источника идет через поверхность нагрева R_x и R_C , поэтому менее 1% от общей суммы тока проходит через плечи отношения. Определить величину измеряемого сопротивления R_x можно по следующей формуле:

$$R_x = NR_M,$$

где N — отношение сопротивлений плеч, R_M — величина сопротивления плеча сравнения, Ω ; $R_M = (R_C + R_0)$, здесь $R_0 = 0.015 \Omega$ — начальное сопротивление плеча сравнения.

Оценим значения абсолютных и относительных погрешностей измерения температуры. К примеру, нами получено при температуре $T_1 = 132^\circ\text{C}$ медного нагревателя диаметром $100 \mu\text{m}$ значение сопротивления $R_1 = 0.262 \Omega$. Абсолютное значение погрешности определяется следующим образом: $\Delta R = \pm \delta R_{\text{max}} R_{\text{nom}} / 100\% = \pm 0.1 \cdot 1 / 100\% = \pm 0.001 \Omega$,

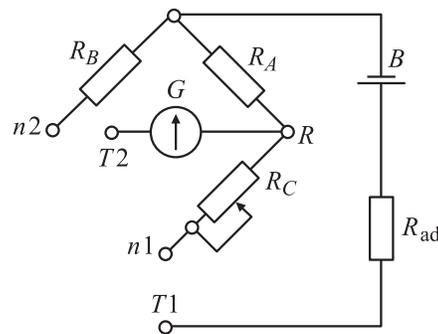


Рис. 3. Электрическая схема моста. Здесь R_A, R_B — плечи отношения; R_C — плечо сравнения; R_{ad} — добавочный резистор; B — батарея аккумуляторов; G — гальванометр; $T1, T2$ — токовые зажимы; $n1, n2$ — потенциальные зажимы.

здесь $R_{\text{ном}}$ — номинальное значение измеряемой величины. Окончательный результат можно оформить в виде $R_1 = 0.262 \pm 0.001 \Omega$. По градуировочной зависимости для медной проволоки диаметром $100 \mu\text{m}$ на каждые 0.001Ω приходится 1°C . Поэтому окончательный результат для температуры нагревателя из меди имеет вид $T_1 = 132 \pm 1^\circ\text{C}$. Относительная погрешность данного измерения $\delta T_1 = 1/132 \cdot 100\% = 0.7\%$.

Для вольфрамовой проволоки диаметром $100 \mu\text{m}$ температуре $T_2 = 140^\circ\text{C}$ соответствует сопротивление $R_2 = 0.304 \Omega$. Для этого $R_2 = 0.304 \pm 0.001 \Omega$, а $T_2 = 140 \pm 1^\circ\text{C}$.

Для нагревателя из нихрома диаметром $100 \mu\text{m}$ на температуру $T_3 = 126^\circ\text{C}$ приходится сопротивление $R_3 = 0.294 \Omega$. Результат измерения можно записать в виде $R_3 = 0.294 \pm 0.001 \Omega$. По градуировочной зависимости для нихромовой проволоки диаметром $100 \mu\text{m}$ на каждый 0.001Ω приходится 3°C . Поэтому окончательный результат для температуры нихромового нагревателя имеет вид $T_3 = 126 \pm 3^\circ\text{C}$. Относительная погрешность данного измерения составляет 2.3%.

Было исследовано насыщенное (температура ядра жидкости 100°C) и ненасыщенное кипение (температура ядра жидкости $23\text{--}30^\circ\text{C}$). Для поддержания температуры насыщения ядра жидкости подключался внешний подогреватель. В ходе одного опыта при ненасыщенном кипении, когда тепловая нагрузка возрастала от начальной до критической величины, температура ядра жидкости изменялась в пределах $1\text{--}5^\circ\text{C}$. Кипение воды происходило в большом объеме на цилиндрических нагревателях длиной 20 mm . Объем рабочего сосуда составлял 150 ml . Перед использованием нагревательного элемента он прокаливался на воздухе для кондиционирования. Эта процедура улучшала повторяемость опытов. Нагрев выделяющей поверхности осуществлялся постоянным током. В качестве цилиндрических нагревателей служила проволока из следующих материалов: медь (диаметры $65, 80, 100, 120$ и $200 \mu\text{m}$), манганин (диаметры 100 и $130 \mu\text{m}$), константан ($d = 100 \mu\text{m}$), нихром (диаметры 100 и $150 \mu\text{m}$), вольфрам (диаметр $100 \mu\text{m}$).

Время, необходимое для получения одной кривой кипения, составляло $1.5\text{--}2$ минуты. Все зависимости $q = f(T)$ получены при росте тепловой нагрузки. Каждая из кривых кипения заканчивалась пережогом нагревателя.

При насыщенном и ненасыщенном кипении удельный тепловой поток возрастал от начальной его величины до удельного теплового потока, соответствующего пережогу поверхности нагрева, через некоторый интервал времени. Для пузырькового режима при насыщенном кипении тепловая нагрузка изменялась через каждые $50\text{--}200 \text{ kW/m}^2$, при ненасыщенном кипении — через $200\text{--}300 \text{ kW/m}^2$. Для пленочного режима при насыщенном кипении величина q возрастала с интервалом $200\text{--}300 \text{ kW/m}^2$, при ненасыщенном — с интервалом 1 MW/m^2 .

В работе [24] получено, что кривая кипения жидкости демонстрирует случайный характер кипения. Также известно [25], что процесс кипения и, в частности кризис кипения, носит статистический характер. Математическая обработка опытов по определению абсолютной величины $q_{\text{кр}}$ подчиняется нормальному распределению [26]. Каждое значение критической тепловой нагрузки получалось усреднением из 24 опытов.

Способ фиксации кризиса кипения

Исследуем вопрос о способе фиксации кризиса кипения и соответствующей ему критической тепловой нагрузки. Для этого в каждом опыте была получена кривая кипения и по этим данным определялась абсолютная величина $q_{\text{кр}}$. Обозначим тепловую нагрузку, соответствующую пережогу (burnout) — q_b .

На рис. 4 и 5 представлены зависимости тепловой нагрузки от температуры нагревателя, полученные при атмосферном кипении воды на поверхностях нагрева из меди, вольфрама и нихрома. Диаметр нагревателей

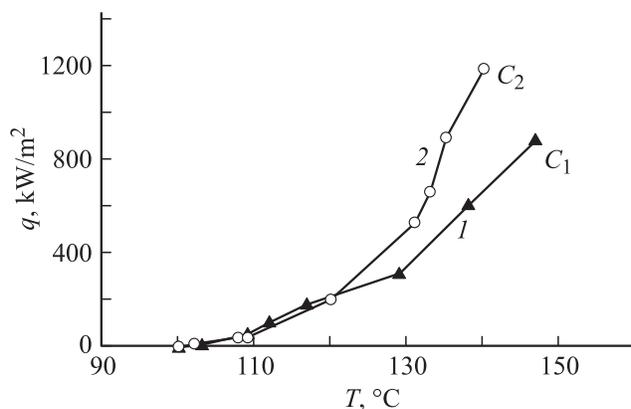


Рис. 4. Зависимость тепловой нагрузки от температуры нагревателя при насыщенном кипении воды (кривая кипения) на поверхности нагрева из медной (1) и вольфрамовой (2) проволоки, каждая диаметром $d = 100 \mu\text{m}$.

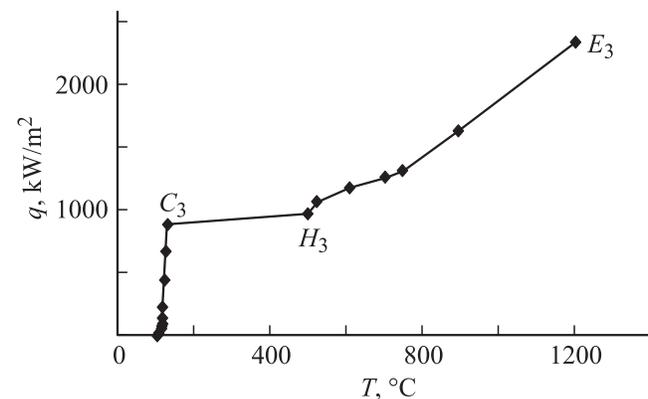


Рис. 5. Кривая насыщенного кипения воды на нихромовом нагревателе диаметром $d = 100 \mu\text{m}$.

был одинаков — $100 \mu\text{m}$. Кривые кипения получены при увеличении тепловой нагрузки и каждая из них заканчивалась пережогом тепловыделяющей поверхности, т.е. последняя точка на указанных графиках соответствует разрушению проволочного элемента.

Из рис. 4 видно, что медный нагреватель разрушился при тепловой нагрузке $q_b = 895 \text{ kW/m}^2$ и температуре $T = 147^\circ\text{C}$ в точке C_1 , а вольфрамовый — при $q_b = 1191 \text{ kW/m}^2$ и температуре $T = 140^\circ\text{C}$ в точке C_2 . В данном случае пережог произошел при максимальной возможной тепловой нагрузке и $q_b = q_{\text{cr}}$. Точки C_1 и C_2 соответствуют максимуму кривой на рис. 1, который обозначен точкой C . Таким образом, C_1 и C_2 приходятся на критическую тепловую нагрузку. В случае медных и вольфрамовых поверхностей нагрева абсолютная величина q_{cr} совпадает с максимальной величиной на кривой кипения (рис. 1) и пережогом нагревателя, т.е. $q_{\text{cr}} = q_b$. Для определения критической тепловой нагрузки при кипении на медном и вольфрамовом нагревателе необходимо руководствоваться пунктами 1 и 3 второго раздела статьи.

Рис. 5 иллюстрирует ход кривой кипения на нихромовом нагревателе диаметром $150 \mu\text{m}$ при температуре ядра жидкости 100°C . Разрушение тепловыделяющего элемента в данном случае произошло при тепловой нагрузке $q_b = 2323 \text{ kW/m}^2$ и температуре $T = 1202^\circ\text{C}$ в точке E_3 . Точка E_3 соответствует точке E на схеме кривой кипения (рис. 1). При электрическом нагреве контролируемой является тепловая нагрузка. В таких системах после достижения критической тепловой нагрузки q_{cr} (точка C на рис. 1) малейшее увеличение тепловой нагрузки ведет к скачкообразному росту температуры нагревателя до точки H . Так, на рис. 5 критической тепловой нагрузке $q_{\text{cr}} = 880 \text{ kW/m}^2$ (точка C_3) соответствует температура стенки $T = 128^\circ\text{C}$.

Если после достижения точки C_3 немного увеличить тепловую нагрузку (на 74 kW/m^2), то произойдет резкий скачок температуры нагревателя, и попадем в точку H_3 , которой соответствует тепловая нагрузка $q = 954 \text{ kW/m}^2$, температура поверхности нагрева $T = 495^\circ\text{C}$. Таким образом, произойдет резкая смена режима кипения — пузырькового на пленочной, минуя переходный режим. Отрезок CD на схематичной кривой кипения (рис. 1), отвечающий переходному кипению, отсутствует на экспериментальной кривой (рис. 5). Если далее увеличивать тепловую нагрузку, то температура нагревателя из нихрома будет возрастать до тех пор, пока он не разрушится в точке E_3 . Точке E_3 отвечают тепловая нагрузка, соответствующая пережогу $q_b = 2323 \text{ kW/m}^2$, и температура нагревателя $T = 1202^\circ\text{C}$.

Можно сделать вывод, что при кипении на нихромовой поверхности нагрева критическая тепловая нагрузка не соответствует тепловой нагрузке при пережоге нагревателя $q_{\text{cr}} \neq q_b$, эти две величины необходимо различать. Для определения критической тепловой нагрузки при кипении на тепловыделяющем элементе из нихрома

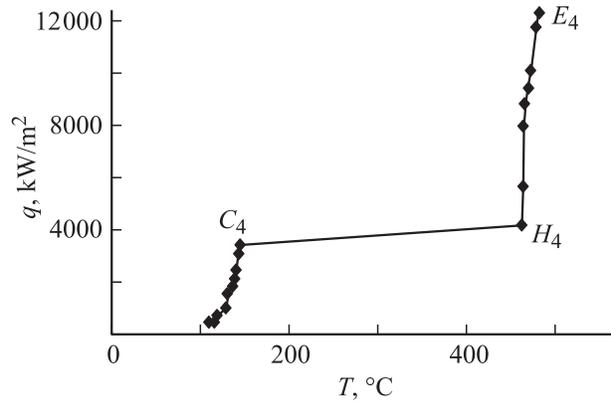


Рис. 6. Кривая ненасыщенного кипения воды на поверхности нагрева из нихрома диаметром $d = 100 \mu\text{m}$. Температура ядра жидкости 23°C .

необходимо руководствоваться только пунктом 2 второго раздела статьи.

На рис. 6 представлена кривая кипения воды на поверхности нагрева из нихрома диаметром $100 \mu\text{m}$ при температуре ядра жидкости 23°C . Пережог тепловыделяющего элемента произошел при тепловой нагрузке $q_b = 12408 \text{ kW/m}^2$ и температуре $T = 480^\circ\text{C}$ в точке E_4 , которая соответствует точке E на рис. 1. На рис. 6 критической тепловой нагрузке $q_{\text{cr}} = 3440 \text{ kW/m}^2$ (точка C_4) соответствует температура стенки $T = 143^\circ\text{C}$. Если в точке C_4 немного увеличить тепловую нагрузку, то температура скачкообразно увеличится до значения в точке H_4 , которой соответствует температура $T = 460^\circ\text{C}$ и тепловая нагрузка $q = 4235 \text{ kW/m}^2$. Таким образом, при ненасыщенном кипении на поверхности нагрева из нихрома получены результаты, аналогичные насыщенному кипению. Поэтому в данном случае критическую тепловую нагрузку и тепловую нагрузку при перегорании необходимо различать.

В настоящее время существует смешение понятий критической тепловой нагрузки и тепловой нагрузки при перегорании тепловыделяющего элемента [14], они не разделены. Поэтому данный вопрос нами был дополнительно изучен. Для этого определяли абсолютную величину q_{cr} при насыщенном и ненасыщенном кипении воды на цилиндрических нагревателях из меди, манганита, константана, нихрома, вольфрама различных диаметров. Результаты исследования представлены в табл. 1 и на рис. 7, 8.

В табл. 1 представлены тепловые нагрузки, которые получены при перегорании тепловыделяющих элементов из различных материалов при насыщенном q_b и ненасыщенном кипении q'_b воды. Температура ядра жидкости при ненасыщенном кипении была 23°C .

На рис. 7 и 8 представлены диаграммы, которые отражают зависимость тепловой нагрузки при пережоге для насыщенного q_b и ненасыщенного кипения q'_b в зависимости от материала поверхности нагрева. Столбцы этих диаграмм расположены в порядке возрастания

Таблица 1. Тепловые нагрузки, соответствующие перегоранию цилиндрических нагревателей из различных материалов при насыщенном q_b и ненасыщенном кипении воды q'_b

Материал твэла	Температура плавления материала, $T_{\text{мет}}, ^\circ\text{C}$ [27]	$d, \mu\text{m}$	$q_b, \text{kW/m}^2$	Разброс данных по $q_b, \text{kW/m}^2$	$\delta q_b, \%$	$q'_b, \text{kW/m}^2$	Разброс данных по $q'_b, \text{kW/m}^2$	$\delta q'_b, \%$
Медь	1083	65	1.18	0.86–1.51	27.5	3.96	3.06–4.78	21.7
		80	1.29	0.96–1.54	22.5	4.10	2.58–5.71	20.4
		100	1.32	1.01–1.69	19.5	3.83	3.26–4.53	16.6
		120	1.21	0.91–1.51	24.8	3.31	2.54–4.76	23.2
		200	1.41	0.93–1.67	26.2	3.55	2.88–4.96	22.8
Манганин	1030	100	1.71	1.48–1.98	14.6	5.21	4.95–6.05	10.6
		130	1.89	1.63–2.11	13.0	7.29	5.56–8.80	22.2
Константан	1260	100	2.09	1.88–2.41	13.0	10.07	8.80–10.27	7.3
Нихром	1390	100	2.55	2.14–2.88	15.0	13.18	12.91–15.20	8.7
		150	2.32	1.96–2.72	15.9	12.12	10.11–13.40	13.5
Вольфрам	3240	100	1.14	0.94–1.51	25.0	15.38	14.52–15.89	7.5

температуры плавления металла, из которого изготовлен тепловыделяющий элемент. Как правило, с ростом температуры плавления материала твэла абсолютная величина тепловой нагрузки при перегорании возрастает как при насыщенном, так и при ненасыщенном кипении.

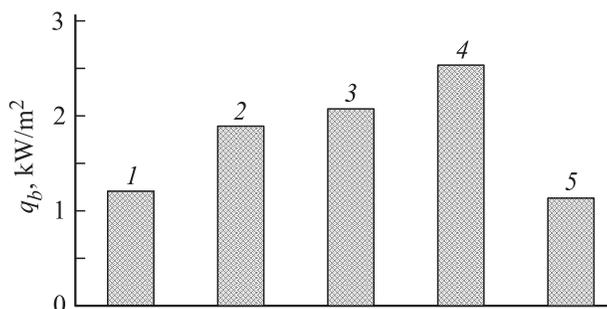


Рис. 7. Диаграмма зависимости тепловой нагрузки при перегорании при насыщенном кипении q_b от материала поверхности нагрева. Диаметр всех цилиндрических нагревателей $100 \mu\text{m}$. 1 — медь, 2 — манганин, 3 — константан, 4 — нихром, 5 — вольфрам.

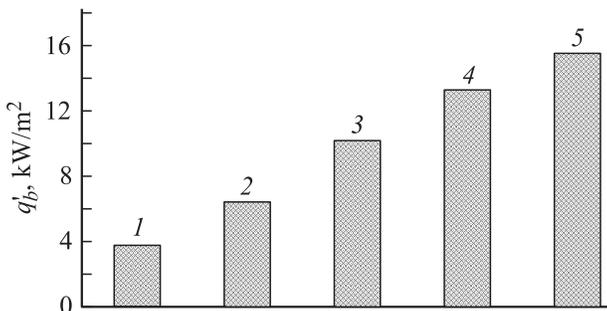


Рис. 8. То же, что и на рис. 7, для случая ненасыщенного кипения.

В учебнике [28] приводится абсолютное значение критической тепловой нагрузки при насыщенном кипении воды, находящейся при атмосферном давлении в условиях естественной конвекции $q_{\text{cr}} = 1000 \text{ kW/m}^2$. Автор [29] указывает, что $q_{\text{cr}} = 1160 \text{ kW/m}^2$. Из табл. 1 и рис. 7 видно, что тепловые нагрузки, полученные при перегорании нагревателей из меди и вольфрама, наиболее близки к общепринятым значениям критической тепловой нагрузки в данных условиях. Поэтому в наших опытах можно считать, что при кипении на медных и вольфрамовых нагревателях $q_{\text{cr}} = q_b$.

Если рассмотреть тепловую нагрузку при перегорании q_b для насыщенного кипения на поверхностях нагрева из манганина, константана и нихрома, то, по данным табл. 1 и рис. 7, величина q_b превосходит q_{cr} в 1.6, 1.7 и в 2 раза соответственно. Можно сделать вывод, что тепловая нагрузка, полученная при перегорании нагревателей из манганина, константана и нихрома, не соответствует критической тепловой нагрузке при насыщенном кипении, $q_{\text{cr}} \neq q_b$.

В работе [30] приводятся данные для критической тепловой нагрузки, полученной при ненасыщенном кипении воды при атмосферном давлении в условиях естественной конвекции q'_{cr} . При температуре ядра жидкости 23°C отношение $q'_{\text{cr}}/q_{\text{cr}} = 4$. Поэтому можно считать, что $q'_{\text{cr}} = 4000 \text{ kW/m}^2$. Из табл. 1 и рис. 8 видно, что это указанное отношение выполняется только при ненасыщенном кипении воды на медных нагревателях. Таким образом, для тепловыделяющих нагревателей из меди критическая тепловая нагрузка равна тепловой нагрузке при перегорании, $q_{\text{cr}} = q_b$.

При ненасыщенном кипении на поверхностях нагрева из манганина, константана, нихрома и вольфрама отношение $q'_{\text{cr}}/q_{\text{cr}}$ равно 5.3, 8.4, 10.8 и 12.8 соответственно. Можно сделать вывод, что при ненасыщенном кипении на поверхностях из манганина, константана, нихрома и

вольфрама тепловая нагрузка при пережоге не соответствует критической тепловой нагрузке, $q'_{cr} \neq q'_b$.

На рис. 7 и 8 диаграммы показывают зависимость тепловой нагрузки, фиксируемой при пережоге, от материала поверхности нагрева. Видно, что эти точки выгорания зависят от материала поверхности нагрева как при насыщенном, так и при ненасыщенном кипении. При насыщенном кипении у меди и вольфрама точка выгорания совпадает с кризисом пузырькового кипения, а у марганца, константана и никрома повышенное значение максимально возможной тепловой нагрузки объясняется тем, что на этих материалах можно наблюдать все три режима кипения. При ненасыщенном кипении тепловая нагрузка при пережоге совпадает с критической тепловой нагрузкой только у медных нагревателей. А на твэлах из марганца, константана, никрома и вольфрама при контролируемой тепловой нагрузке можно наблюдать как пузырьковое, так и пленочное кипение.

Для того чтобы получить критическую тепловую нагрузку при насыщенном кипении на цилиндрических нагревателях из меди и вольфрама, необходимо руководствоваться пунктами 1 и 3 второго раздела статьи. Таким образом, в данном случае величина q_{cr} приходится на тепловую нагрузку, соответствующую пережогу нагревателя и одновременно максимуму кривой кипения. Аналогично можно определить рассматриваемую величину при ненасыщенном кипении на поверхности нагрева из меди.

Чтобы зафиксировать критическую тепловую нагрузку при насыщенном кипении на тепловыделяющем элементе из никрома, необходимо руководствоваться пунктом 2 второго раздела статьи. В этих условиях величину q_{cr} регистрируют как тепловую нагрузку, при которой режим пузырькового кипения резко сменяется пленочным. Точно так же ее находят при ненасыщенном кипении на поверхностях из никрома и вольфрама.

Таким образом, тепловая нагрузка, полученная при пережоге тепловыделяющего элемента, не может всегда считаться равной критической тепловой нагрузке. Для регистрации правильных данных по критической тепловой нагрузке нужно получать кривую кипения жидкости для конкретной обстановки опытов, что делается далеко не во всех работах по изучению кризиса кипения. Далее, в каждом определенном случае необходимо исследовать вопрос о фиксации величины q_{cr} и установить, какой из пунктов 1–3 второго раздела статьи следует применить в данных условиях проведения опытов.

Результаты опытов и обсуждение

На рис. 9–11 приведены экспериментальные данные по критической тепловой нагрузке при насыщенном и ненасыщенном кипении в зависимости от диаметра. Нами получены абсолютные величины критической тепловой нагрузки для малых размеров нагревателей, так

как в литературе данные для этих тепловыделяющих элементов наиболее противоречивы. При этом были использованы следующие значения диаметра твэлов из меди: 65, 80, 100, 120 и 200 μm . Для медных нагревателей можно считать, что критическая тепловая нагрузка равна тепловой нагрузке при пережоге.

Пунктиром обозначен разброс значений q_{cr} . Полученные нами результаты на этих графиках — результат среднего арифметического критической тепловой нагрузки из 24 проделанных опытов для данного диаметра. Для выявления обсуждаемого эффекта необходима ста-

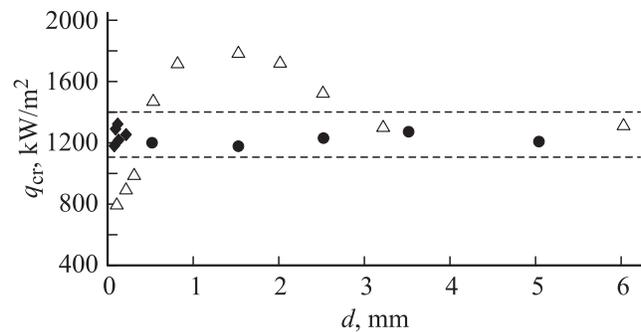


Рис. 9. Зависимость критической тепловой нагрузки при насыщенном кипении воды от размера цилиндрических нагревателей. Треугольник — экспериментальные данные [7], круг — экспериментальные данные [31], ромб — экспериментальные данные автора.

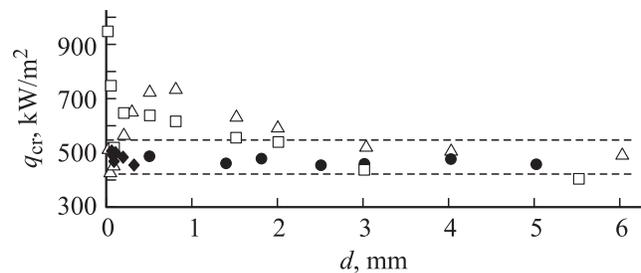


Рис. 10. Зависимость критической тепловой нагрузки при насыщенном кипении этанола от размера цилиндрических нагревателей. Треугольник — экспериментальные данные [7], квадрат — экспериментальные данные [6], круг — экспериментальные данные [31], ромб — экспериментальные данные автора.

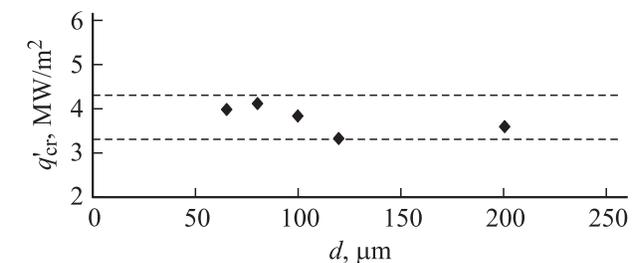


Рис. 11. Влияние диаметра медного тепловыделяющего элемента на критическую нагрузку при ненасыщенном кипении воды.

Таблица 2. Характеристики тепловыделяющих элементов в работах различных авторов по исследованию зависимости $q_{cr} = f(d)$

Автор	Характерный размер, mm	Материал
Кутателадзе, Гогонин [3,7]	0.008; 0.025	Вольфрам
	0.05; 0.1	Платина
	0.3; 0.5; 0.8	Нихром
	1.0; 1.2; 1.5; 2.0; 2.7; 3.0; 3.2;	Нержавеющая сталь
	4.0; 5.0; 6.0	
Григорьев [6]	0.02	Медь
Толубинский [31]	0.05; 0.07; 0.1; 0.2; 0.5	Нихром
	0.75; 1.5; 2.0; 3.0; 6.0	Нержавеющая сталь 1X18H9T
Автор данной работы	0.5; 1.5; 2.5; 3.5; 5	То же
	0.065; 0.08; 0.1; 0.12; 0.2	Медь

статистическая обработка большого числа опытных данных, так как процесс кипения носит случайный характер. Согласно [1], погрешность определения данных по q_{cr} , измеренных различными авторами, лежит в диапазоне 10–30% при тщательном контроле условий эксперимента. По данным табл. 1, разброс измерений критической тепловой нагрузки находится в пределах 7.3–27.5%. Чаще всего его значение составляет 12% [15]. Из рис. 9–11 видно, что все точки лежат внутри статистического разброса данных (12%), поэтому можно утверждать, что критическая тепловая нагрузка не зависит от диаметра нагревателя и находится около некоторой средней величины для насыщенного кипения воды $q_{cr} = 1.25 \text{ MW/m}^2$, этанола $q_{cr} = 0.48 \text{ MW/m}^2$ и ненасыщенного кипения воды $q'_{cr} = 3.75 \text{ MW/m}^2$.

На рис. 9 и 10 видно, что при малых диаметрах цилиндрического нагревателя критическая тепловая нагрузка при насыщенном кипении воды и этанола по данным различных авторов имеет значительный разброс. Это связано с тем, что при фиксации кризиса кипения не учитывалось влияние материала поверхности нагрева на величину тепловой нагрузки при пережоге, а также не регистрировалась температура тепловыделяющего элемента. Так, в работе [7] отмечалось, что при достижении критического теплового потока в опытах на воде рабочие участки с $d \leq 1.5 \text{ mm}$, как правило, перегорали, а на поверхностях нагрева с $d \geq 2 \text{ mm}$ значение q_{cr} определялось по покраснению рабочего участка.

В [6] на поверхностях нагрева диаметром до 0.2 mm кризис определялся визуально по местному покраснению, а на диаметрах выше 0.2 mm — по появлению на том или ином участке поверхности „гребешковидной“ прозрачной пленки пара, которая при дальнейшем увеличении нагрузки распространялась на всю поверхность нагрева. Таким образом, в указанных работах кризис кипения фиксировался визуально, без измерения температуры — по точке выгорания или наступлению пленочного кипения. Это вносит значительную неточность при фиксации величины критической тепловой нагрузки.

Из табл. 2 и рис. 9, 10 можно сделать заключение, что наибольший разброс величины критической тепловой

нагрузки при малых значениях диаметра нагревателя существует в опытах [3,6,7], выполненных на тепловыделяющих элементах из различных материалов — вольфрама, платины, меди, никрома, нержавеющей стали. Фиксация критической тепловой нагрузки в этих опытах проводилась в основном по тепловой нагрузке, соответствующей пережогу нагревателя. Пережог нагревателя, как было показано выше, не всегда приходится на критическую тепловую нагрузку, а может происходить уже при пленочном кипении. Поэтому такая методика регистрации кризиса кипения может приводить к ошибкам.

Аналогичные результаты приводятся в [15]. В этой работе были использованы образцы диаметром от 8 до 35 mm, изготовленные из различных металлов — меди, никеля, нержавеющей стали. Получена следующая зависимость критической тепловой нагрузки при кипении азота от диаметра горизонтального нагревателя: с увеличением диаметра нагревателя q_{cr} сначала уменьшается, а начиная с величины $d = 28 \text{ mm}$ наблюдается тенденция к автомодельности параметра q_{cr} . Для любых значений диаметров нагревателя до 28 mm полученная зависимость описывается соотношением

$$q_{cr} = d^{-0.5}.$$

По поводу фиксации критической тепловой нагрузки в [15] ничего не сказано, поэтому судить о точности данных по q_{cr} трудно.

Наименьший разброс величины q_{cr} в зависимости от диаметра ($\pm 12\%$) виден в опытах [31] и автора настоящей работы. Это связано, прежде всего, с тем, что все эксперименты по определению критической тепловой нагрузки проведены на одинаковом материале тепловыделяющего элемента и нахождение величины q_{cr} проводилось единым образом. В [31] — это нержавеющая сталь, а в настоящей работе проделаны опыты по определению зависимости $q_{cr} = f(d)$ только на поверхностях нагрева из меди. Кризис кипения фиксировался в одинаковых условиях, и данные на графиках $q_{cr} = f(d)$ для воды и этанола (рис. 9–11) совпадают по абсолютной величине в наших опытах и экспериментах [31] с разбросом $\pm 12\%$.

Зависимость $q_{cr} = f(d)$ на рис. 11 для ненасыщенного кипения подобна результатам работы [32], в которых критическая тепловая нагрузка не зависит от диаметра цилиндрического нагревателя.

Заключение

Тепловая нагрузка, получаемая при пережоге (перегревании элемента), зависит от материала цилиндрического нагревателя при насыщенном и ненасыщенном кипении. Особенно эта зависимость выражена при ненасыщенном кипении. Опыты показали, что для цилиндрических нагревателей из меди и вольфрама критическая тепловая нагрузка совпадает с тепловой нагрузкой при пережоге. Для поверхностей нагрева из константана, манганита, никрома критическую тепловую нагрузку необходимо отличать от тепловой нагрузки при пережоге, эти величины не совпадают. При проведении экспериментов по кризису кипения должна всегда определяться температура поверхности нагрева во избежание ошибочной фиксации критической тепловой нагрузки.

Разброс данных в литературе по критической тепловой нагрузке на зависимости $q_{cr} = f(d)$, по всей видимости, связан с тем, что опыты по кризису кипения сравнивались для различных материалов поверхностей нагрева. При этом методика фиксации критической тепловой нагрузки не всегда включала измерение температуры нагревателя, а в качестве величины q_{cr} использовалась тепловая нагрузка при пережоге q_b . Значение q_b не всегда совпадает с q_{cr} , что приводит к ошибочным результатам при регистрации величины q_{cr} .

Список литературы

- [1] Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высш. шк., 1986. 446 с.
- [2] Веркин Б.И., Кириченко Ю.А., Русанов К.В. Теплообмен при кипении криогенных жидкостей. Киев: Наук. думка, 1987. 264 с.
- [3] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- [4] Жданок С.А. // Тез. докл. и сообщений VI Минского Междунар. форума по тепло- и массообмену. Минск, 2008. Т. 1. С. 3–5.
- [5] Толубинский В.И. Теплообмен при кипении. Киев: Наук. думка, 1980. 316 с.
- [6] Григорьев Л.Н. Теплообмен при кипении смесей. Дис. д-ра техн. наук. Казань: КХТИ, 1970. 269 с.
- [7] Гогонин И.И. Экспериментальное исследование влияния гидродинамических и геометрических параметров на теплообмен при пленочной конденсации пара и на кризис кипения в условиях свободной конвекции. Дис. д-ра техн. наук. Новосибирск: АН СССР СО, 1983. 346 с.
- [8] Гогонин И.И., Кутателадзе С.С. // ИФЖ. 1977. Т. 23. № 5. С. 802–806.
- [9] Кутателадзе С.С., Валукина Н.В., Гогонин И.И. // Теплофизика высоких температур. 1967. Т. 5. С. 841–848.

- [10] Lykov E.V. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1972. Vol. 15. P. 1603–1614.
- [11] Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. Новосибирск: Наука, 1986. 295 с.
- [12] Линард Д.Х., Дир В.К. // Тр. амер. об-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача. 1973. № 2. С. 1–9.
- [13] Sun K.H., Lienhard J.H. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1970. Vol. 13. P. 1425–1436.
- [14] Двайер О. Теплообмен при кипении жидких металлов. М.: Мир, 1980. 516 с.
- [15] Григорьев В.А., Клименко В.В., Павлов Ю.М., Потехин С.А. // Тр. МЭИ. Низкотемпературные процессы и криогенные системы. 1977. Вып. 347. С. 53–62.
- [16] Tschibana F., Akiyama M., Katamura H. // J. of Nuclear Science and Technology. 1967. Vol. 4. N 3. P. 121–130.
- [17] Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 288 с.
- [18] Бобрович Г.И., Гогонин И.И., Кутателадзе С.С. // Журнал прикл. механики и техн. физики. 1964. № 4. С. 137–142.
- [19] Головин В.С., Кольчугин Б.А., Лабунцов Д.А. // Тр. ЦКТИ. Т. 58. Кризис кипения и температурный режим испарительных поверхностей. Л., 1965. С. 35–46.
- [20] Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. М.: Энергия, 1977. 288 с.
- [21] Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 342 с.
- [22] Аметистов Е.В. Основы теории теплообмена. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 247 с.
- [23] Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 107 с.
- [24] Ермаков Г.В., Перминов С.А., Кротов Л.Н. Статистические исследования кривой кипения. Первые результаты Деп. В ВИНТИ 9.2.95. № 358-В95. Екатеринбург: Ин-т теплофизики УРО РАН, 1995. 59 с.
- [25] Анохина Е.В. Особенности кризиса кипения бинарных смесей жидкостей. Дис. канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 1999. 173 с.
- [26] Лыков Е.В., Анохина Е.В. // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 1995. № 3. С. 67–70.
- [27] Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [28] Нацокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высш. шк., 1975. 496 с.
- [29] Кружилин Г.Н. // Изв. АН СССР. ОТН. 1948. № 7. С. 967–980.
- [30] Кутателадзе С.С., Шнейдерман Л.Л. // Вопросы теплоотдачи при изменении агрегатного состояния вещества. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. С. 102–107.
- [31] Толубинский В.И., Островский Ю.Н., Писарев В.Е. // Теплофизика и теплотехника. 1975. Вып. 29. С. 16–18.
- [32] Лыков Е.В. Теплофизические аспекты критической тепловой нагрузки при кипении жидкостей. Автореферат дис. докт. техн. наук. Ашхабад, 1990. 48 с.