

## Влияние материала поверхности нагрева на кривую кипения жидкостей

© Е.В. Анохина

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

(Поступило в Редакцию 28 октября 2008 г.)

Приведены результаты экспериментального исследования кривой насыщенного кипения воды в большом объеме при атмосферном давлении для различных материалов поверхности нагрева. В качестве твэла были использованы нагреватели из меди диаметром 65 и 100  $\mu\text{m}$ , вольфрама диаметром 90  $\mu\text{m}$ , нихрома диаметром 100 и 150  $\mu\text{m}$ . Получено, что момент разрушения нагревательного элемента не всегда соответствует кризису кипения. Количество тепла, передаваемое от металлической поверхности к кипящей воде при контролируемой тепловой нагрузке, увеличивается с ростом тепловой нагрузки.

PACS: 44.35.+c, 47.55.dp

### Введение

Увеличение абсолютного значения тепловой нагрузки, отводимой от поверхности нагрева испарителя, очень важно, поскольку способствует уменьшению размера испарителя при фиксированной мощности, а также уменьшает требуемое время производства пара. Как известно из работы Нукияма [1], скорость парообразования (т.е. количество пара, производимое в единицу времени с единицы поверхности), а следовательно и тепловая нагрузка, имеет максимум на кривой кипения  $q = f(\Delta T)$  (рис. 1), где  $q$  — тепловая нагрузка,  $\Delta T$  — температурный напор, т.е. разность между температурой насыщения  $T_b$  и температурой поверхности нагрева  $T$ . Определить это максимальное (критическое) значение тепловой нагрузки очень важно, особенно если нужно контролировать скорость парообразования. Настоящая работа представляет собой отчет об экспериментальном определении этой величины для различных материалов нагревателя.

Феномен пузырькового кипения очень сложен для теоретического описания и представляет множество загадок [2]. Это явление не поддается прямому численному моделированию, поскольку отсутствует замкнутое мате-

матическое описание вопроса вследствие неопределенности границы раздела фаз. Даже с помощью детального анализа размерностей экспериментальные данные по тепловым нагрузкам и коэффициентам теплоотдачи не всегда удовлетворительно совпадают с теоретическими.

### Анализ кривой кипения жидкости

На рис. 1 представлена кривая кипения жидкостей в виде схемы. На участке  $AB$  теплообмен происходит с помощью теплопроводности и конвекции, а пузырьки не образуются. С ростом температуры греющей поверхности при увеличении тепловой нагрузки на центрах парообразования начинается пузырьковое кипение (точка  $B$ ). При увеличении  $\Delta T$  активизируется все большее число центров парообразования и устанавливается развитое пузырьковое кипение (отрезок  $BC$ ). При этом коэффициент теплоотдачи резко увеличивается и достигает значения 8000  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  [1], что объясняет необходимость изучения данного явления для техники.

По мере роста тепловой нагрузки цепочки из паровых пузырьков сливаются в струи пара, а при значительном увеличении тепловой нагрузки поверхность раздела струй пар-жидкость становится неустойчивой. При этом приток жидкости к греющей стенке затрудняется, и создаются условия, при которых пар начинает растекаться над поверхностью нагрева (точка  $C$ ). В точке  $C$  пузырьковое кипение резко преобразуется, вследствие чего возникает кризис теплоотдачи и достигается предельная (максимальная), или критическая, тепловая нагрузка [3–5]. Точка  $C$  — так называемая „точка выгорания“ [6], иногда соответствующая критической плотности теплового потока. В данном исследовании термины „кризис теплоотдачи при кипении“ и „критическая тепловая нагрузка“ характеризуют одно и то же явление.

Как будет развиваться процесс после того, как будет достигнута точка  $C$ , зависит от того, какая величина

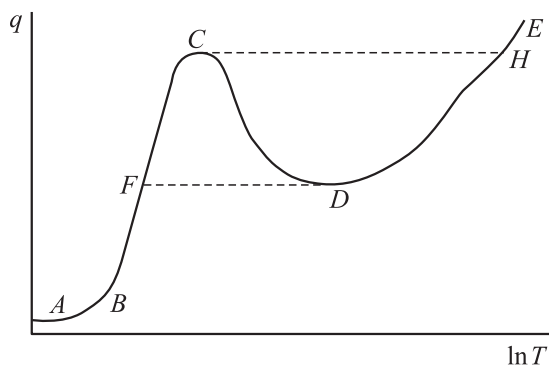


Рис. 1. Схема кривой кипения жидкости.

является контролируемой независимой переменной — температура нагревателя или тепловая нагрузка. Если непрерывно возрастает температура поверхности нагрева (когда в качестве источника тепла используется, например, конденсирующийся пар), то после достижения критической плотности теплового потока будет развиваться режим переходного кипения (отрезок  $CD$ ). В области  $CD$  сосуществуют два режима кипения — пузырьковый и пленочный. В точке  $D$  наступает режим пленочного кипения. Высокая устойчивость пленки в этом режиме объясняется неспособностью жидкости смачивать поверхность нагрева из-за того, что жидкость паром отжимается от поверхности нагрева. На участке кривой кипения  $DE$  возрастает роль переноса теплоты излучением.

Если поверхность нагревать электрическим током, то независимой контролируемой переменной будет тепловая нагрузка  $q$ . В таких системах при незначительном превышении значения  $q$  в точке  $C$  температура скачком изменится от ее исходного значения до значения в точке  $H$ . Многие поверхности нагрева при этом не выдерживают дальнейшего увеличения температуры и плавятся. Таким образом, если температура греющей стенки не контролируется, возможна большая неустойчивость процесса кипения. Поэтому для повышения устойчивости режимов кипения следует стабилизировать не тепловую нагрузку, а температуру стенки. Часть кривой  $CD$  является неустойчивой и тяжело получается на практике.

При понижении тепловой нагрузки  $q$  (после сильного нагревания) — отрезок  $EDF$  — с достижением точки  $D$  температура будет быстро понижаться до значения, соответствующего точке  $F$ . Это так называемый гистерезис кипения — при нагревании теплоотдающей поверхности и при ее охлаждении ход кривой кипения не совпадает. Если тепловую нагрузку уменьшить, то кривая не возвращается из  $H$  в  $C$ , но идет вдоль  $HD$  и внезапно „прыгает“ из  $D$  в  $F$ . Будем называть отрезок  $HD$  областью сфероидального состояния жидкости, поскольку в этом случае жидкость не смачивает поверхность нагрева.

Предположим, что была достигнута точка  $C$ , тогда добавим небольшое количество тепла, в результате увеличится температура нагревателя. Каким образом будет развиваться с ростом тепловой нагрузки процесс кипения в зависимости от материала тепловыделяющего элемента? Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение этого вопроса. Вследствие больших значений тепловой нагрузки необходимо выбрать подходящий вид теплоотдающей поверхности. В данных опытах была использована тонкая металлическая проволока в качестве тепловыделяющего элемента. Проволочный нагреватель был помещен в большой объем воды и получал теплоту при пропускании электрического тока. Эксперименты проводились с поверхностями нагрева, изготовленными из различных металлов разных диаметров.

В данной работе будем иметь дело с кривыми кипения  $ABC$ ,  $ABCHE$ , где точка  $C$  соответствует критической плотности теплового потока или кризису пузырькового кипения. Перед началом опытов желательным было найти ответ на вопрос — можно ли считать точку перегорания поверхности нагрева кризисом кипения, в современной литературе ответ на него не был найден.

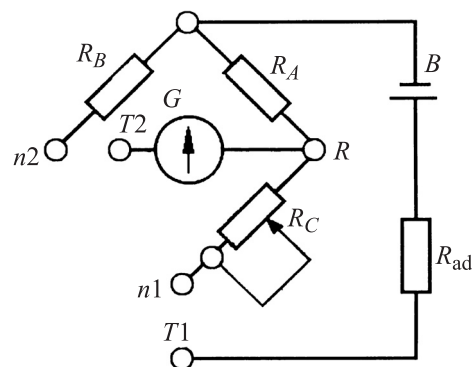
## Экспериментальная установка

В опытах использовался сосуд из стекла размером  $6 \times 6 \times 4$  см. Он был установлен в песочной бане и нагревался с помощью электроплиты, чтобы поддерживать воду при температуре кипения в условиях атмосферного давления. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода. Нагреватель — это металлическая проволока длиной 2 см. Были использованы цилиндрические тепловыделяющие элементы из меди, вольфрама, никрома различного диаметра. Температура ядра жидкости фиксировалась ртутным термометром по Бекману с ценой деления  $0.1^\circ\text{C}$ . Электропитание опытного нагревателя осуществлялось постоянным током от батареи аккумуляторов с напряжением 12 В. Ток на экспериментальном участке изменялся с помощью переменного сопротивления — ползункового реостата. Падение напряжения на опытном нагревателе и ток через него фиксировались самописцем типа Н3030. Скорость записи этих данных могла изменяться — в наших опытах она составляла 1 и 5 мм/с.

Тепловая нагрузка в ходе опытов определялась по следующей формуле:

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

где  $U$  — падение напряжения на цилиндрическом нагревателе, В;  $I$  — ток нагрева, А;  $S$  — площадь нагревателя,  $\text{m}^2$ ;  $d$  — диаметр нагревателя, м;  $l$  — длина нагревателя, м.



**Рис. 2.** Принципиальная электрическая схема моста. Здесь  $R_A$ ,  $R_B$  — плечи отношения;  $R_C$  — плечо сравнения;  $R_{ad}$  — добавочный резистор;  $B$  — батарея аккумуляторов;  $G$  — гальванометр;  $T_1$ ,  $T_2$  — токовые зажимы;  $n_1$ ,  $n_2$  — потенциальные зажимы.

Температура тепловыделяющего элемента определяется по градуировочной зависимости температуры от сопротивления. На рис. 2 представлена электрическая схема измерительного моста, этот мост одинарный, четырехзажимная схема подключения для измерения сопротивления от  $10^{-4}$  до  $10^2 \Omega$ . Цилиндрический нагреватель подсоединяется 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 твэл  $R_x$  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 отношения,  $\Omega$ ;  $R_M$  — величина сопротивления плеча сравнения,  $\Omega$ ;  $R_M = (R_c + R_0)$ , здесь  $R_0 = 0.015 \Omega$  — начальное сопротивление плеча сравнения.

## Методика проведения экспериментов

Есть два момента, которые необходимо помнить при исследовании кривой кипения жидкости и получении абсолютных величин температуры и плотности теплового потока, их укажем ниже.

Существует так называемая проблема интегрирования при определении температуры и тепловой нагрузки при кипении жидкостей. Температура поверхности металлического нагревателя в среднем неравномерна. Это обусловлено неравномерностью, локальностью производства пара на поверхности нагрева. Некоторая часть поверхности контактирует с водой, а другая часть — с паром (к примеру, в местах образования паровых пузырьков). Поэтому температура поверхности никогда не будет всюду одинаковой и температура нагревателя, зафиксированная нами во время опытов, является только некоторым средним значением. Степень этой неравномерности является неопределенной [7]. В наших опытах используется некоторое усредненное значение температуры нагревателя.

Имеется некоторая разность между температурой проволоки на поверхности  $T_r$  и температурой в центре  $T_0$ . Это вносит ошибку в суммарную погрешность определения температуры. Учитывая этот факт, предположим, что электрический ток равномерен по всей проволоке и разность  $(T_0 - T_r)$  может быть рассчитана по следующему уравнению [1]:

$$T_0 - T_r = \frac{qr}{2\lambda},$$

где  $q$  — тепловая нагрузка;  $r$  — радиус нагревателя;  $\lambda$  — теплопроводность. Эта разность  $(T_0 - T_r)$  в пределах  $1^\circ\text{C}$  для нихромовой проволоки, а для медной и вольфрамовой — около  $0.5^\circ\text{C}$ .

**Таблица 1.** Геометрические размеры твэлов и число опытов

Металл	Диаметр нагревателя, $d, \mu\text{m}$	Длина нагревателя, $l, \text{mm}$	Число опытов
Медь	65	20	6
Медь	100	20	4
Нихром	100	20	12
Нихром	150	20	10
Вольфрам	90	20	8

**Таблица 2.** Экспериментальные результаты для опыта № 1, полученного на проволоке из меди диаметром  $100 \mu\text{m}$

№	$U, \text{V}$	$I, \text{A}$	$q, \text{W/m}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{W/}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$
1	0.0566	0.5934	5 348	103	1 782
2	0.0991	1.0385	16 388	105	3 278
3	0.1415	1.4835	33 449	110	3 345
4	0.2325	2.4181	89 523	113	6 886
5	0.3039	3.1283	151 383	115	10 092
6	0.4036	4.0611	260 990	123	11 347
7	0.4938	4.8710	383 009	131	12 355
8	0.5776	5.5741	511 746	132	15 992
9	0.6985	6.5070	723 748	141	17 652
10	0.7869	7.1210	892 279	148	18 589

**Таблица 3.** Экспериментальные результаты для опыта № 8, полученного на проволоке из вольфрама диаметром  $90 \mu\text{m}$

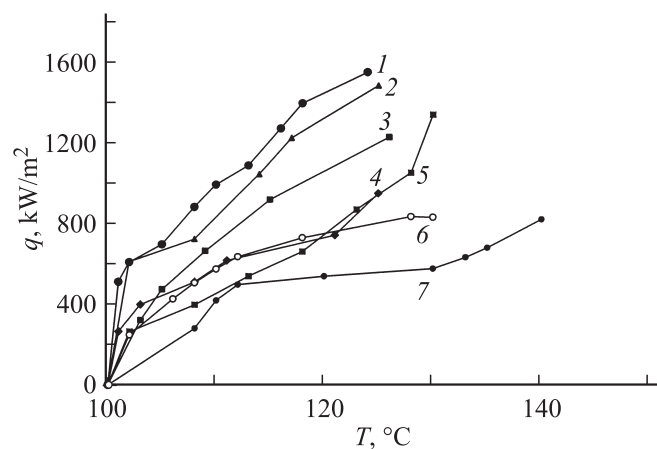
№	$U, \text{V}$	$I, \text{A}$	$q, \text{W/m}^2$	$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{W/}^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$
1	0.1060	0.3624	6 797	103	2 266
2	0.2118	0.7248	27 161	106	4 527
3	0.2542	0.8698	39 118	108	4 890
4	0.2966	1.0147	53 249	110	5 325
5	0.4237	1.4496	150 464	121	7 165
6	0.4517	1.7734	196 238	124	8 177
7	0.6069	2.0534	305 294	127	11 307
8	0.7474	2.5189	461 202	130	15 373
9	0.8027	2.6992	530 781	131	17 122
10	0.9002	3.0168	665 292	133	20 160
11	0.9341	3.2467	742 955	134	21 852
12	1.0493	3.4932	897 946	136	24 942
13	1.1384	3.8060	1 061 428	137	28 687
14	1.2164	4	1 191 965	140	29 799
15	1.3173	4.3970	1 418 954	142	33 785

В представленных экспериментах никогда не пренебрегалось корректировками, сделанными выше, из-за несовершенной повторяемости результатов эксперимента. Хотя эти уточнения легко были сделаны, это не могло безусловно улучшить окончательный результат.

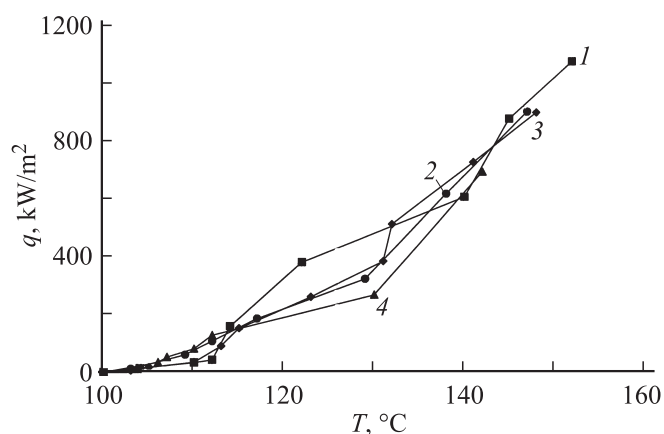
Опыты были проведены с нагревателями из меди, нихрома, вольфрама различных диаметров. Размеры проволоки, сорт металла и число опытов сведены в табл. 1.

Таблицы 2 и 3 иллюстрируют некоторые опытные данные по кривым кипения. Таблица 2 составлена для

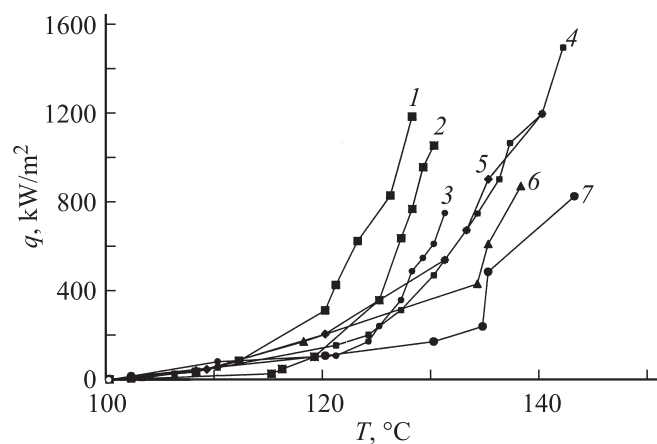
опыта № 1 с медной проволокой диаметром  $100\ \mu\text{m}$ , а таблица 3 — для опыта № 8 с вольфрамовой проволокой диаметром  $90\ \mu\text{m}$ . В них показаны экспериментально



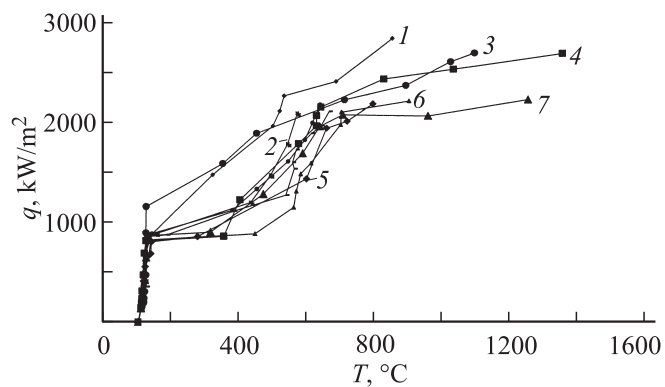
**Рис. 3.** Кривая насыщенного кипения воды, полученная на медном нагревателе диаметром  $65\ \mu\text{m}$  при атмосферном давлении, 1–7 — номер опыта.



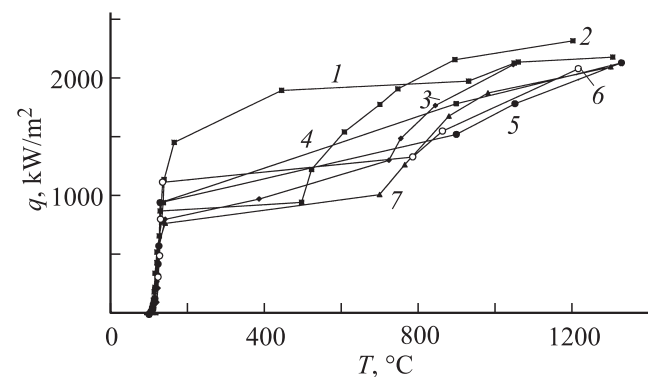
**Рис. 4.** Кривая кипения воды, полученная на медном нагревателе диаметром  $100\ \mu\text{m}$ .



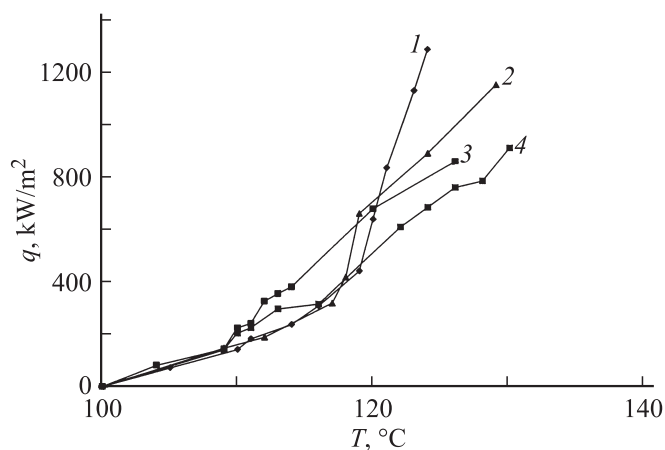
**Рис. 5.** Кривая кипения воды на вольфрамовом нагревателе диаметром  $90\ \mu\text{m}$ .



**Рис. 6.** Кривая кипения воды на твэле из нихрома диаметром  $100\ \mu\text{m}$ .



**Рис. 7.** Кривая кипения воды на поверхности нагрева из нихрома диаметром  $150\ \mu\text{m}$ .



**Рис. 8.** Кривая кипения воды на твэле из нихрома диаметром  $100\ \mu\text{m}$  до резкого скачка температуры.

полученные числовые данные и рассчитанные по ним тепловые нагрузки  $q$  и коэффициенты теплоотдачи  $\alpha$ . Числа в последних строках таблиц 2 и 3 являются значениями для момента, когда металлическая проволока расплавилась.

Рис. 3–9 представляют собой графики зависимости тепловой нагрузки  $q$  от температуры проволоки  $T$  для

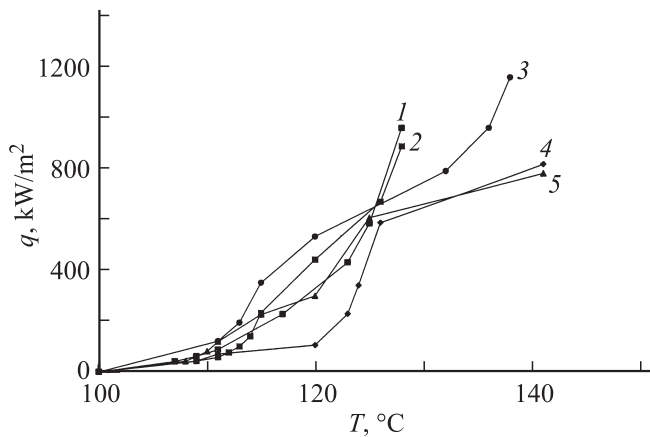


Рис. 9. Кривая кипения воды на поверхности нагрева из нихрома диаметром  $150\ \mu\text{m}$  до резкого скачка температуры.

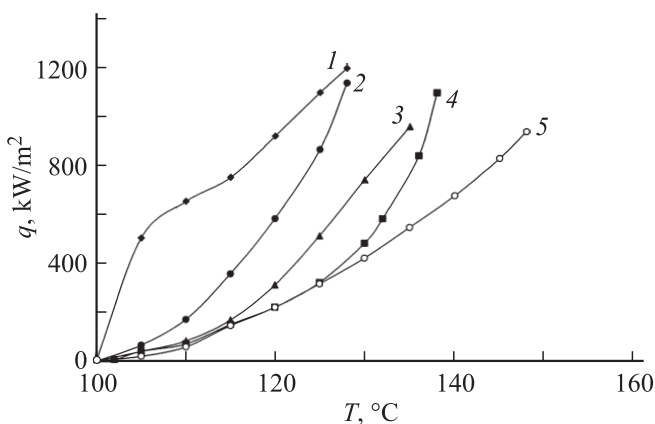


Рис. 10. Усредненные кривые кипения воды для поверхностей нагрева из меди диаметром  $65\ \mu\text{m}$  (1) и  $100\ \mu\text{m}$  (5), вольфрама диаметром  $90\ \mu\text{m}$  (4), нихрома диаметром  $100\ \mu\text{m}$  (2) и  $150\ \mu\text{m}$  (3).

экспериментов с различными металлическими проволоками. Кривые были получены следующим образом: прямая линия соединяла собой каждые две соседние опытные точки. Температура воды во всех опытах была  $100^\circ\text{C}$  для всех экспериментов и последняя точка на каждом графике (рис. 3–7) соответствует моменту, в который нагреватель перегорел. Как показывают опыты, существует некоторый статистический разброс среди каждой серии данных для твэлов одинакового диаметра и материала поверхности нагрева.

На рис. 10 представлены кривые кипения на твэлах из различных материалов, построенные по усредненным данным для тепловых нагрузок, соответствующих одной температуре нагревателя.

## Обсуждение результатов

На рис. 3–10 представлены результаты экспериментов по определению параметров кривых кипения на различных металлических нагревателях. В различных

опытах при одинаковом материале поверхности нагрева кривые кипения могут иметь разные положения кривых  $BC$  (рис. 1) из-за изменения температуры поверхности нагрева от точки к точке. По достижении в эксперименте точки  $C$  металлическая проволока перегорает. Но из опытов было установлено, что некоторые проволоки перегорали после достижения ими точки  $C$  — в точке  $E$ . Этот экспериментальный факт иллюстрируют рис. 3–10.

На рис. 3–5 представлены опытные кривые кипения, полученные на медных проволоках диаметром  $65$  и  $100\ \mu\text{m}$  а также на вольфрамовой проволоке диаметром  $90\ \mu\text{m}$ . Каждый опыт, представленный на этих графиках, заканчивался пережогом нагревателя в точке  $C$  (рис. 1) при сравнительно низких температурах  $124$ – $152^\circ\text{C}$ , далеких от температуры плавления меди  $T_m$  ( $1083^\circ\text{C}$ ) и вольфрама ( $3420^\circ\text{C}$ ). Каждая кривая кипения сопровождалась максимальной тепловой нагрузкой, лежащей в пределах  $820$ – $1541\ \text{kW/m}^2$ .

На рис. 6 и 7 представлены опытные графики, полученные на нихромовых поверхностях нагрева диаметром  $100$  и  $150\ \mu\text{m}$ . Процесс кипения на этих нагревателях продолжается до момента, соответствующего точке  $E$ , в которой происходило расплавление металлической проволоки. Для поверхности нагрева из нихрома диаметром  $150\ \mu\text{m}$  (рис. 7) пережог происходил при температуре  $1216$ – $1330^\circ\text{C}$ , близкой к температуре плавления нихрома ( $1390^\circ\text{C}$ ) и тепловых нагрузках, лежащих в интервале  $2087$ – $2323\ \text{kW/m}^2$ . Расплав проволоки из нихрома диаметром  $100\ \mu\text{m}$  (рис. 6) имел место и при более низких температурах по сравнению с температурой плавления металла  $T_m$ , но большая часть опытов завершалась при температуре, близкой к  $T_m$  и тепловых нагрузках в пределах  $2080$ – $2834\ \text{kW/m}^2$ . Важно заметить, что на кривых кипения (рис. 6 и 7) отсутствует отрезок  $CD$ . Процесс кипения с ростом тепловой нагрузки развивается от точки  $C$  к точке  $H$  и далее до  $E$ . При достижении точки  $C$  малейшее увеличение плотности теплового потока ведет к резкому, скачкообразному возрастанию температуры поверхности нагрева вплоть до точки  $H$ , а иногда и до  $E$ . Так, авторы [8,9] отождествляют пережог тонкого цилиндрического нагревателя с кризисом кипения (см. рис. 1, точка  $C$ ). Результаты опытов на нихромовых нагревателях (рис. 6 и 7) показывают, что разрушение элемента происходит не в точке  $C$ , а в точке  $H$  или, скорее, в  $E$ . Таким образом, отождествление кризиса кипения и разрушения нагревательного элемента может привести к неверным результатам.

Теперь рассмотрим опыты, полученные до описанного выше скачка температуры нагревателя. На рис. 8 и 9 представлены экспериментальные данные для проволок из нихрома диаметром  $100$ , и  $150\ \mu\text{m}$  для пузырькового кипения, соответствующие части кривой кипения  $AC$  (рис. 1), рисунки построены в более крупном масштабе, чем рис. 6 и 7. Точке  $C$  при кипении на поверхности нагрева из нихрома диаметром  $100\ \mu\text{m}$  соответствуют тепловые нагрузки  $779$ – $1282\ \text{kW/m}^2$  и температура нагревателя  $121$ – $141^\circ\text{C}$ . При кипении на поверхности нагрева из нихрома диаметром  $150\ \mu\text{m}$  на

точку  $C$  приходятся тепловые нагрузки  $773\text{--}1147\text{ kW/m}^2$  и температура нагревателя  $128\text{--}141^\circ\text{C}$ . Эти данные, соответствующие максимуму на кривой кипения на рис. 1, для нагревателей из нихрома (рис. 8 и 9) примерно совпадают с аналогичными данными по температуре поверхности нагрева и тепловым нагрузкам, полученными на проволоках из меди и вольфрама (рис. 3–5).

На рис. 10 представлены кривые кипения (отрезок  $AC$  на рис. 1), полученные усреднением абсолютных величин тепловых нагрузок при одинаковой температуре нагревателя для различных материалов проволок. Графики для нагревателей из нихрома диаметром  $100$  и  $150\ \mu\text{m}$  не заканчивались его разрушением, а остальные в последней точке перегорали. Видно, что результаты отчасти зависят от используемого материала. Так, для медной проволоки диаметром  $65\ \mu\text{m}$  область конвективной теплоотдачи  $AB$  приходится на более высокие тепловые нагрузки. Аналогичный результат для очень тонких цилиндрических нагревателей обнаружен у автора [8]. Если рассмотреть диаметр  $100\ \mu\text{m}$  медной проволоки, то тепловые нагрузки при конвективном теплообмене на этом нагревателе будут практически такими же, как и на протяженных поверхностях нагрева. Однако если взять в расчет возможность исключить экспериментальные ошибки и присущий феномену кипения статистический разброс, то можно предположить, что окончательный вид кривой кипения на цилиндрических нагревателях диаметром  $90\text{--}150\ \mu\text{m}$  не зависит от используемого материала.

## Заключение

Количество тепла, передаваемое от металлической поверхности к кипящей воде при контролируемой тепловой нагрузке, увеличивается в росте температуры нагревателя.

Материал поверхности нагрева оказывает значительное влияние на форму кривой кипения. Так, для тепловыделяющего элемента из меди (диаметр  $65$  и  $100\ \mu\text{m}$ ) и вольфрама (диаметр  $90\ \mu\text{m}$ ) режим пузырькового кипения (отрезок  $BC$  на рис. 1) при росте тепловой нагрузки заканчивается перегоранием при низких значениях температуры, составляющих  $124\text{--}152^\circ\text{C}$ , и критической тепловой нагрузке, равной в среднем около  $1\text{ MW/m}^2$ . А для поверхности нагрева из нихрома (диаметром  $100$  и  $150\ \mu\text{m}$ ) режим пузырькового кипения при малом увеличении плотности теплового потока резко сменяется пленочным (из точки  $C$  и  $H$ ), что сопровождается большим увеличением температуры. Расплавление тепловыделяющего элемента в этом случае происходит при температуре  $1216\text{--}1330^\circ\text{C}$  и тепловой нагрузке  $2080\text{--}2834\text{ kW/m}^2$  (точка  $E$ ).

Момент разрушения нагревательного элемента не всегда соответствует кризису кипения. Для этого необходимо знать температуру поверхности нагрева. В точке  $C$ , приходящейся на максимум кривой кипения, происходит локальный пережог в целом „холодного“

( $T = 124\text{--}152^\circ\text{C}$ ) нагревателя из медной и вольфрамовой проволоки. Для тепловыделяющих элементов из нихрома в точке  $E$  происходит плавление в целом „горячего“ (при температуре, близкой к температуре плавления металла  $T = 1216\text{--}1330^\circ\text{C}$ ) нагревателя.

Для атмосферного давления при контролируемой тепловой нагрузке существует некоторое критическое (максимальное) значение тепловой нагрузки  $q_{\text{cr}}$  для кривой кипения. Абсолютная величина  $q_{\text{cr}}$  для всех размеров и материалов тепловыделяющего элемента определяется экспериментально и приходится на интервал  $779\text{--}1541\text{ kW/m}^2$ . Этим значениям критической тепловой нагрузки соответствует температурный промежуток  $124\text{--}152^\circ\text{C}$ .

## Список литературы

- [1] *Nukiyama S.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1984. Vol. 27. N 7. P. 959–970.
- [2] *Ягов В.В.* // Тез. докл. и сообщений 6-го Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. Минск, 2008. С. 426–427.
- [3] *Кружилин Г.Н., Лыков Е.В.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 2. С. 16–19.
- [4] *Анохина Е.В.* // ИФЖ. 2008. Т. 81. № 2. С. 59–63.
- [5] *Анохина Е.В.* // Тез. докл. и сообщений 6-го Минского междунар. форума по тепло- и массообмену. Минск, 2008. С. 8–9.
- [6] *Эккерт Э., Дрейк Р.* Теория тепло- и массообмена. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. 680 с.
- [7] *Jakob M.* Heat Transfer. NY: Wiley, 1949. 643 p.
- [8] *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- [9] *Лабунцов Д.А.* // Тр. ЦКТИ „Котлотурбостроение“. Л., 1965. Вып. 58. С. 35–46.