

УДК 621.7

Обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче и критическим тепловым потокам на микроструктурированных поверхностях при кипении различных жидкостей*

Р.А. Аксянов, Ю.С. Коханова, Е.С. Куимов, Р.А. Лэй, И.А. Попов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева – КАИ, Казань, 420111, Россия

e-mail: raaksyanov@kai.ru, yulkoh@yandex.ru, egor1997-08@mail.ru, regina.ulyanova.ley@gmail.com, popov-igor-alex@yandex.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-7-301-313

Поступила в редакцию 20.07.2020

После доработки 14.08.2020

Принята к публикации 19.08.2020

На основе имеющихся в литературных источниках экспериментальных данных по теплоотдаче и критическому тепловому потоку при кипении различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях, полученных методом деформирующего резания, предложены рекомендации по прогнозированию коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков. Микроструктурированные поверхности позволяют интенсифицировать теплообмен до 4–5 раз. Из-за переменной смачиваемости элементов микроструктурированных поверхностей критические тепловые потоки увеличиваются до 6 раз. Предложенные критериальные уравнения позволяют прогнозировать коэффициенты теплоотдачи с погрешностью 30% и критические тепловые потоки с погрешностью $\pm(30-35)\%$. С целью повышения точности прогнозирования показана возможность использования модели искусственной нейронной сети по обобщению коэффициентов теплоотдачи. Прогнозирование с использованием модели искусственной нейронной сети позволяет определить коэффициенты теплоотдачи с погрешностью $\pm 20\%$. Уравнения представляют интерес при проектировании систем охлаждения микроэлектронных устройств, тепломасообменных устройств, зон кипения тепловых труб и термосифонов и др.

Ключевые слова: кипение, теплоотдача, критические тепловые потоки, микроструктурированные поверхности, системы охлаждения.

Введение

Для охлаждения теплонагруженных элементов силового электрооборудования и микроэлектроники в настоящее время применяются жидкостные системы охлаждения. В таких системах кипение жидкости происходит непосредственно на электронных компонентах, для

чего последние помещают в жидкий теплоноситель. Для снятия значительных тепловых нагрузок необходима интенсификация теплоотдачи, а для повышения надежности систем охлаждения – повышение критических тепловых потоков.

Методы и способы интенсификации теплообмена при кипении традиционны [1]:

– воздействие на внутренние механизмы процесса (увеличение плотности центров парообразования, управление смачиваемостью, повышение притока жидкости в зону испарения микрослоя и др.);

* Научные исследования проводились при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках исполнения работ по выполнению обязательств по Соглашению 075-03-2020-051-3.

– увеличение/развитие теплообменной поверхности.

В настоящее время большинство работ сосредоточено на поиске и применении новых технологий структурирования поверхности и управления процессом кипения [1, 2]. Но основные результаты данных работ – демонстрация эффекта без детального описания исследуемого процесса для разных теплоносителей и условий проведения опытов.

Разработаны современные технологии структурирования поверхности, позволяющие управлять теплообменом при кипении, благодаря чему удается значительно снизить температурный напор начала кипения, увеличить значения критического теплового напора, интенсифицировать теплоотдачу.

Один из методов получения эффективных микроструктурированных поверхностей кипения – технология деформирующего резания [3–5], основанная на процессе частичного срезания припуска и целенаправленного пластического деформирования подрезанного поверхностного слоя. Образующаяся стружка не отделяется полностью от заготовки, сохраняя с ней связь по своей узкой стороне. Совокупность подрезанных поверхностных слоев, которые сохранили сплошность своего соединения с заготовкой, образует на обработанной поверхности детали развитый макрорельеф. Технология обладает высокой производительностью и широким диапазоном типоразмеров получаемого макрорельефа и может быть реализована как на специализированном, так и на унифицированном металлорежущем оборудовании. Технология позволяет получать макрорельеф в виде ребер, шипов, ячеек, выступов треугольного профиля на таких материалах как медь, алюминий и их сплавы, титан, стали, пластмассы и других пластичных материалах с возможностью увеличения площади поверхности после обработки до 12 раз. При этом на поверхности могут формироваться двумерные (микроребра), трехмерные (микроштырьковые), сетчатые, микрокотелковые структуры высотой от 40 мкм до 5 мм и шагом от 5 мкм.

Максимальные уровни интенсификации теплоотдачи при кипении дистиллированной воды (до 4–5 раз) свойственны поверхностям с трехмерным микроорегбрением с зазорами шириной $u = 120–180$ мкм при высоте ребер

$h = 340–570$ мкм и их продольном шаге $w = 240–400$ мкм [6, 7].

Подбор геометрических параметров микроструктурированных поверхностей позволяет управлять смачиваемостью поверхности и притоком жидкости в зону испарения. Краевой угол смачивания влияет на процесс образования парового пузыря [1, 8–14]. Увеличение краевого угла (ухудшение смачиваемости) позволяет уменьшить температурный напор, соответствующий началу кипения, интенсифицировать теплоотдачу. Установлено, что для трехмерных поверхностей характерно более раннее вскипание жидкости и значительные тепловые потоки отводятся при температурных напорах между стенкой и жидкостью до 5 раз меньших, чем для двумерной или гладкой поверхности [6, 7].

Улучшение смачиваемости способствует притоку жидкости в зону интенсивного испарения и увеличению критических тепловых потоков [15]. Комбинирование данных факторов позволяет достигать одновременно интенсификации теплоотдачи и повышения критических тепловых потоков. Повышение критических тепловых потоков на микроструктурированных поверхностях достигает до 6 раз [5–7].

Сегодня подобные поверхности, полученные методов деформирующего резания, применяются и исследуются в составе контурных тепловых труб [16], систем охлаждения микропроцессорной техники [17], в теплообменных аппаратах химической промышленности [18] и др.

На основе имеющихся в литературных источниках результатов экспериментальных исследований [2, 6, 7, 24–31] сформирована база данных по коэффициентам теплоотдачи на поверхностях, полученных методом деформирующего резания. База данных может быть определена как результат дробнофакторного эксперимента. На основе базы данных поставлена цель получить с использованием метода полиномиальной регрессии зависимости для прогнозирования коэффициентов теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении различных жидкостей. Данные зависимости позволят не только прогнозировать параметры кипения, но и провести в дальнейшем оптимизацию параметров элементов рельефа поверхностей с целью определения рациональных размеров микроструктуры поверхности кипения.

ния, получаемой методом деформирующего резания, для обеспечения максимальной теплоотдачи или максимальных критических тепловых потоков при использовании различных жидкостей.

Критериальные уравнения для коэффициента теплоотдачи

При обобщении данных по теплоотдаче при кипении жидкостей, нагретых до температуры насыщения, использовались только поверхности, полученные методом деформирующего резания. Все поверхности были разделены на две группы (рис. 1):

- поверхности с двумерным рельефом (микрорребра);
- поверхности с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры).

Геометрические и режимные параметры поверхностей кипения с двумерным рельефом (микрорребра), для которых проводилось обобщение экспериментальных данных, приведены в табл. 1 и на рис. 2. Материал поверхностей – нержавеющая сталь, медь, титан. Толщина поверхностей №1–16, 18–23, 30 составляет 0.2–0.3 мм.

Обобщение проводилось с использованием метода полиномиальной регрессии по модели:

$$\alpha/\alpha_0 = f_1(K_q, (\theta/90), (h/l_0), (\Delta/l_0), (\delta/l_0)),$$

где α – коэффициент теплоотдачи на микроструктурированной поверхности; α_0 – коэффициент теплоотдачи на гладкой поверхности; K_q – безразмерный критерий – масштаб осредненной скорости движения жидкости, обусловленной процессом парообразования $K_q = q \cdot l_0 / (r \cdot \rho'' \cdot v')$; $l_0 = \sqrt{\sigma / (g(\rho' - \rho''))}$ – постоянная Лапласа, пропорциональная отрывному диаметру пузырька; ρ' и ρ'' – плотность жидкости и пара; v' – кинематический коэффи-

циент вязкости жидкости; r – скрытая теплота парообразования; σ – коэффициент поверхностного натяжения; геометрические параметры – угол наклона элементов θ , их высота h , зазор между элементами Δ , средняя толщина элементов δ – показаны на рис. 2.

Необходимо отметить, что согласно [32], в ходе использования метода полиномиальной регрессии при обобщении результатов дробно-факторного эксперимента могут быть получены расчетные зависимости, не описывающие физическую сущность явления. Особенно, если использовать как целевую функцию степенную зависимость с учетом взаимного влияния всех параметров друг на друга. Но в данной работе сделана попытка проанализировать влияние геометрии поверхности на теплоотдачу.

Существует несколько подходов по нормированию геометрических параметров в зависимостях для кипения. Например, предлагается в качестве определяющего размера выбирать начальный диаметр парового пузыря [15]. Однако анализ показал, что наиболее выгодно использовать l_0 . Это, в первую очередь, зависит от модели кипения – расчет через начальный диаметр парового пузыря в большей степени описывает увеличение плотности центров парообразования и их выход из элементов микроструктуры, а l_0 описывает управление смачиваемостью и повышение притока жидкости в зону испарения микрослоя.

Сравнительная оценка коэффициентов теплоотдачи на гладкой поверхности проводилась по известным формулам Д.А. Лабунцова [19], С.С. Кутателадзе [20], В.И. Толубинского [21], В.М. Боришанского [22], М.А. Михеева, В.В. Ягова [23]. Наименьшее расхождение расчетных и экспериментальных точек для всех исследован-

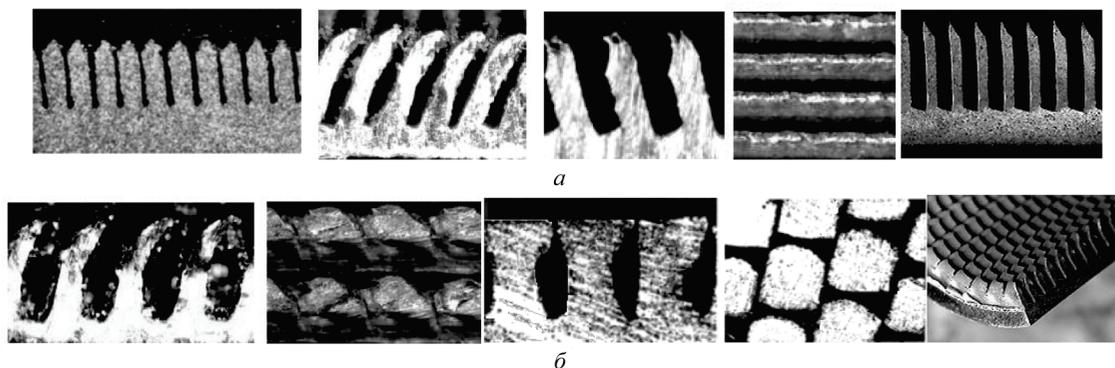


Рис. 1. Поверхности кипения, полученные методом деформирующего резания: а – с двумерным рельефом (микрорребра); б – с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры)

ных жидкостей при кипении на гладкой поверхности дали зависимости С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанского, Д.А. Лабунцова. В качестве нормирующего коэффициента теплоотдачи рекомендуется принимать зависимость В.М. Боришанского:

$$\alpha_0 = 872 P_{\text{крит}}^{1/3} / (T_{\text{крит}}^{5/6} M^{1/6}) (P/P_{\text{крит}})^{0.1} \times (1 + 4.64 (P/P_{\text{крит}})^{1.16} q^{2/3}),$$

где $P_{\text{крит}}$ и $T_{\text{крит}}$ – критическое давление и критическая температура теплоносителя; M – молекулярная масса теплоносителя.

В ходе обобщения более 730 экспериментальных точек получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды, этанола, 60%-ного водного раствора глицерина, фреонов R113 и R123, хладона

Noves 649 в большом объеме на поверхностях кипения с двухмерным рельефом (микроребра) (рис. 3):

$$\alpha/\alpha_0 = 6 K_q^{-0.2} (\theta/90)^{0.554} (h/l_0)^{0.190} \times (\Delta/l_0)^{0.201} (\delta/l_0)^{-0.394}. \tag{1}$$

Зависимость (1) описывает экспериментальные точки с отклонением $\pm 30\%$ при доверительной вероятности 0.95. Зависимость (1) справедлива в диапазоне $q = 3800\text{--}2.17 \cdot 10^6$ Вт/м², $K_q = 5\text{--}11500$, $\theta/90 = 0.72\text{--}1$ (угол наклона микроребра, нормированный к 90°, см. рис. 2), $h/l_0 = 0.09\text{--}1.45$ (относительная высота микроребер), $\Delta/l_0 = 0.002\text{--}1.29$ (относительный зазор между ребрами), $\delta/l_0 = 0.01\text{--}1$ (относительная толщина профиля микроребра), $Pr = 1.75\text{--}35.7$, $F/F_0 = 1.66\text{--}9.75$ (увеличение площади теплообмена).

Таблица 1. Геометрические параметры поверхности кипения с двухмерным рельефом (микроребра)

№	Рабочая жидкость	Геометрические параметры двухмерного рельефа				Режимные параметры	Публикация
		h, мкм	Δ, мкм	δ, мкм	θ, град.		
1	Дистиллированная вода	95	15	15	87	P=10 ⁵ Па, T=373 К	[6, 7, 24, 25]
2		310	63	97	87		
3		200	46	74	87		
4		230	35	55	87		
5		220	22	38	87		
6		150	50	110	90		
7		90	50	110	90		
8		200	50	110	90		
9		200	50	110	90		
10	Дистиллированная вода	300	44	26	83	P=10 ⁵ Па, T=373 К	[2]
11		300	110	140	90		
12		360	85	115	90		
13		500	200	200	80		
14		360	85	115	65		
15		200	35	65	83		
16		500	200	200	80		
17	Фреон R113	310	33	182	80	P=10 ⁵ Па, T=320 К	[26]
18	Этанол	90	50	110	90	P=10 ⁵ Па, T=351.5 К	[27, 28]
19		200	50	110	90		
20	60%-ный водный раствор глицерина	200	50	110	90	P=10 ⁵ Па, T=381 К	
21		90	50	110	90		
22	Дистиллированная вода	300	5	95	90	P=10 ⁵ Па, T=373 К	Авторы
23		300	5	75	90		
24	Дистиллированная вода	400	300	300	90	P=10 ⁵ Па, T=373 К	[29]
25		300	300	300	90		
26		200	300	300	90		
27	Хладон Noves 649	400,300	300	300	90	P=10 ⁵ Па, T=322 К	
28		200	300	300	90		
29	Фреон R123	1038	450	1050	90	P=10 ⁵ Па, T=300 К	[30]
30	60%-ный водный раствор глицерина	150	50	110	90	P=10 ⁵ Па, T=381 К	Авторы

Геометрические и режимные параметры поверхностей кипения с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры), для которых проводилось обобщение экспериментальных данных, приведены в табл. 2 и на рис. 2. Материал поверхностей – нержавеющая сталь, медь, титан. Толщина поверхностей №1–18 составляет 0.2–0.3 мм.

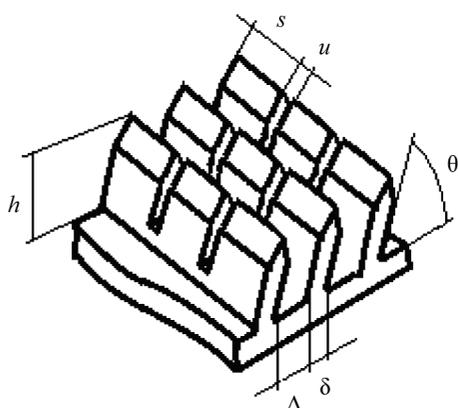


Рис. 2. Геометрические параметры микроструктуры поверхности кипения

Обобщение производилось с использованием метода полиномиальной регрессии по модели

$$\alpha/\alpha_0 = f_2(K_q, (\theta/90), (h/l_0), (\Delta/l_0), (\delta/l_0), (u/l_0), (s/l_0)).$$

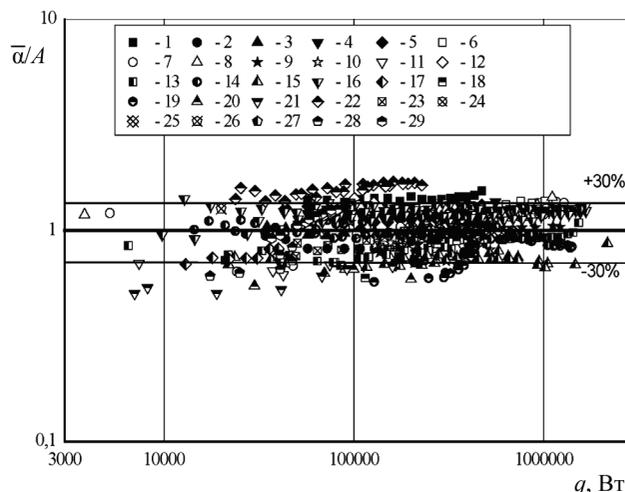


Рис. 3. Коэффициенты теплоотдачи при кипении в большом объеме на поверхностях с двухмерным рельефом (микроребра). Обозначения точек см. в табл. 1. $\bar{\alpha} = \alpha / \alpha_0$, $A = 6 K_q^{-0.2} (\theta/90)^{0.554} (h/l_0)^{0.190} (\Delta/l_0)^{0.201} (\delta/l_0)^{-0.394}$

Таблица 2. Геометрические параметры поверхности кипения с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры)

№ поверхности	Рабочая жидкость	Геометрические параметры трехмерного рельефа						Режимные параметры	Публикация
		h, мкм	Δ, мкм	δ, мкм	u, мкм	s, мкм	θ, °		
1	Дистиллированная вода	420	180	170	140	178	90	$P=10^5$ Па, $T=373$ К	[6, 7, 24, 25]
2		340	70	170	140	178	75		
3	Дистиллированная вода	420	205	145	120	200	70	$P=10^5$ Па, $T=373$ К	[2]
4		570	210	140	180	140	80		
5		480	135	105	120	200	70		
6		400	200	200	300	300	80		
7		400	200	200	300	300	83		
8	Дистиллированная вода	450	120	200	250	70	85	$P=10^5$ Па, $T=373$ К	Авторы
9		350	5	320	225	75	90		
10		320	5	320	225	75	90		
11		300	80	120	175	125	90		
12		220	80	220	250	50	85		
13		375	5	300	250	50	90		
14		500	350	150	275	50	85		
15	Этанол	420	180	170	140	178	90	$P=10^5$ Па, $T=351.5$ К	[27, 28]
16		340	70	170	140	178	75		
17	60%-ный водный раствор глицерина	340	70	170	140	178	75	$P=10^5$ Па, $T=381$ К	
18		420	180	170	140	178	90		
19	Фреон R11	540	250	365	250	460	90	$P=10^5$ Па, $T=297$ К	[31]
20	Фреон R123	540	250	365	250	460	90	$P=0.9 \cdot 10^5$ Па, $T=300$ К	
21	Фреон R134a	540	250	365	250	460	90	$P=3 \cdot 10^5$ Па, $T=277.5$ К	
22	Фреон R123	750	320	280	10	830	90	$P=0.9 \cdot 10^5$ Па, $T=300$ К	[30]

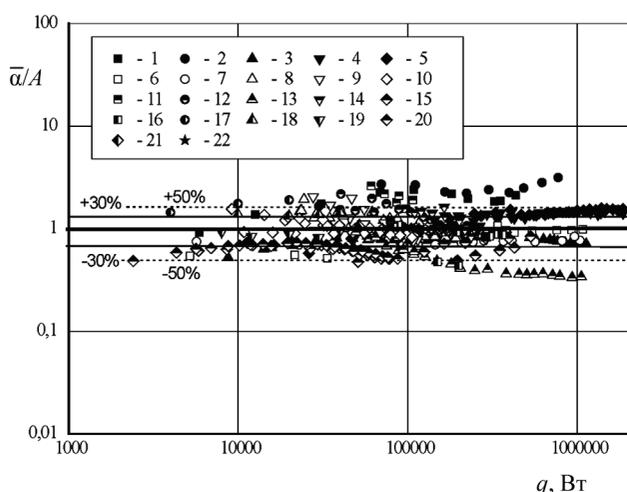


Рис. 4. Коэффициенты теплоотдачи при кипении в большом объеме на поверхностях с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры). Обозначения точек см. в табл. 2. $\bar{\alpha} = \alpha / \alpha_0$, $A = 3.2 K_q^{-0.2} (\theta/90)^{-1.64} (h/l_0)^{0.395} (\Delta/l_0)^{0.08} (\delta/l_0)^{0.18} (u/l_0)^{-0.47} (s/l_0)^{-0.47}$

В ходе обобщения более 500 экспериментальных точек получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды, этанола, 60%-ного водного раствора глицерина, фреонов R11, R113, R123, R134a в большом объеме на поверхностях кипения с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры) (рис. 4):

$$\alpha / \alpha_0 = 3.2 K_q^{-0.2} (\theta/90)^{-1.64} (h/l_0)^{0.395} (\Delta/l_0)^{0.08} \times (\delta/l_0)^{0.18} (u/l_0)^{-0.47} (s/l_0)^{-0.47}. \quad (2)$$

Зависимость (2) описывает экспериментальные точки с отклонением $\pm 30\%$ при доверительной вероятности 0.85. Зависимость (2) справедлива в диапазоне $q = 2400\text{--}3.5 \cdot 10^6$ Вт/м², $K_q = 8,7\text{--}22030$, $\theta/90 = 0.77\text{--}1$ (угол наклона микроштырька, нормированный к 90°, см. рис. 2), $h/l_0 = 0.09\text{--}0.71$ (относительная высота микроштырька), $\Delta/l_0 = 0.002\text{--}0.3$ (относительный поперечный зазор между микроштырьками), $\delta/l_0 = 0.042\text{--}0.42$ (относительная толщина поперечного профиля микроштырьков), $u/l_0 = 0.009\text{--}0.28$ (относительный продольный зазор между микроштырьками), $s/l_0 = 0.02\text{--}0.79$ (относительная толщина продольного профиля микроштырьков), $Pr = 1.75\text{--}7.35$, $F/F_0 = 2.23\text{--}4.8$ (увеличение площади теплообмена).

Анализ зависимостей (1) и (2) показывает, что в исследуемом диапазоне значений Δ/l_0 с увеличением относительного зазора между элементами рельефа Δ/l_0 коэффициенты теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях как с двухмерной, так и с трехмерной

структурой увеличиваются. Анализ моделей кипения на микроструктурированных поверхностях, приведенный в [32, 33], показывает, что отвод теплоты производится при кипении жидкости как на верхних площадках элементов рельефа микроструктур, так и на боковых. Увеличение Δ/l_0 позволяет улучшить отвод пара из зазоров и обеспечить повышение коэффициентов теплоотдачи, хотя с увеличением Δ/l_0 уменьшается влияние капиллярного эффекта на подвод новых порций жидкости в зазоры.

Увеличение относительной высоты элементов рельефа h/l_0 увеличивает поверхность кипения и, соответственно, количество отводимой теплоты.

Как показывает зависимость (1), приближение угла θ к 90° повышает уровень теплоотдачи вследствие уменьшения удержания крупных пузырей пара в зазорах между элементами микроструктуры. При этом удержание микропузырей предусматривается наличием самой микроструктуры как основы организации большей плотности центров парообразования и интенсификации теплообмена. Для поверхностей с трехмерным рельефом влияние угла наклона элементов рельефа θ оказалось противоположным, что противоречит изложенной теории. Но на трехмерных рельефах отвод пара из зазоров упрощен самой структурой, и наклон элементов рельефа не должен оказывать подобного влияния, как на поверхностях с двухмерным рельефом. Полученное влияние может быть объяснено только корреляцией угла θ с другими параметрами и достижением лучших результатов обобщения данных.

Однако обращает на себя внимание различное влияние относительной толщины δ/l_0 структур (ребер, штырьков) в зависимостях (1) и (2) для поверхностей с двухмерными и трехмерными рельефами. Увеличение толщины элементов двухмерного рельефа δ/l_0 , так же как и на трехмерных рельефах увеличение значения корреляции δ/l_0 и s/l_0 (площади поперечного сечения $\delta \times s$), должно было бы приводить к увеличению площади теплообмена по внешним граням рельефа и увеличению эффективности микроструктуры как микрооребрения. Однако, судя по всему, на уровень теплоотдачи влияет больше плотность центров парообразования, чем увеличение поверхности теплообмена. С уменьшением значений δ/l_0 и s/l_0 возрас-

тает плотность центров парообразования на поверхности теплообмена.

Возможности использования модели искусственной нейронной сети

На сегодняшний день широкое применение нашел способ обобщения экспериментальных данных путем использования искусственной нейронной сети [36, 37]. Нейронная сеть – это математическая модель, имитирующая работу нейронов живого организма. Принцип работы одного нейрона: в нейроне R элементов входных значений функций p_1, p_2, \dots, p_R умножаются на весовые функции $w_{1,1}, w_{1,2}, \dots, w_{1,R}$, а затем суммируются со свободным членом b , образуя некоторую переменную n для активационной функции $f(n)$. Возможно использование всевозможных активационных функций, от линейной и синусоидной до более сложных. На выходе из нейрона дается некоторое значение a :

$$n = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R + b, \quad a = f(n).$$

Следует отметить, что весовая функция w и свободный член b являются изменяемыми параметрами нейрона. Принцип работы нейронных сетей заключается в том, что параметры можно изменять таким образом, чтобы нейронная сеть выдавала некоторое ожидаемое поведение. Два и более нейрона, описанных выше, могут быть объединены в нейронный слой, в свою очередь нейронная сеть может состоять из нескольких нейронных слоев. Нейронный слой состоит из S нейронов и R входящих параметров.

Здесь произведена разработка нейронной сети для обобщения экспериментальных данных

по кипению различных жидкостей на микроструктурированных двумерных поверхностях. В качестве входных параметров использовались следующие физические и геометрические характеристики: $K_g, (\theta/90), (h/l_0), (\Delta/l_0), (\delta/l_0)$ – для 565 экспериментальных точек. Модель искусственной нейронной сети реализована, используя программный комплекс MatLab. В качестве активационной функции используется функция $\log\text{-sigmoid}$.

Результаты работы скрытых слоев передаются на выходной результирующий слой, выдающий 565 значений отношения $(\alpha/\alpha_0)_{НС}$, где α – коэффициент теплоотдачи на микроструктурированной поверхности, α_0 – коэффициент теплоотдачи на гладкой поверхности. Также на результирующем слое происходит ренормализация значений $(\alpha/\alpha_0)_{НС}$.

Для создания нейронной сети необходимо провести разбиение экспериментальных данных на обучающую и тестовую выборку объемами 80% и 20% всех экспериментальных точек соответственно. Нейронная сеть проводит обучение модели по обучающей выборке и далее сравнивает значения с тестовой выборкой. В качестве модели обучения была выбрана модель «обратное распространение Байесовской регуляризации». Данная модель обучения проводит более точное обобщение небольшой выборки данных, чем стандартные модели обучения, но требует больше вычислительных и временных ресурсов. В качестве критерия качества обучающей модели выбрана среднеквадратичная ошибка. Наилучшее значение было достигнуто на 571-й эпохе обучения.

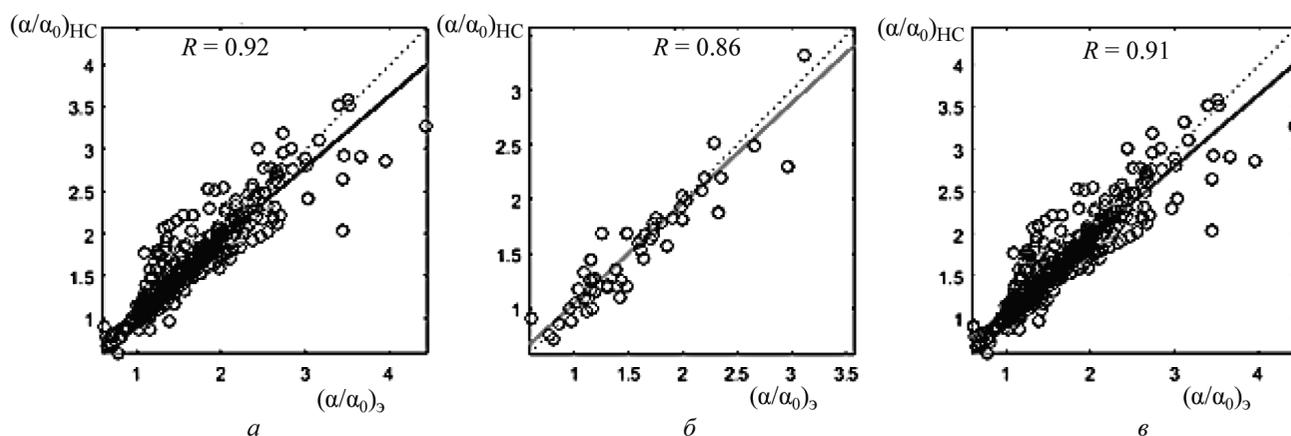


Рис. 5. Зависимости результатов моделирования с использованием искусственной нейронной сети $(\alpha/\alpha_0)_{НС}$ от экспериментальных данных $(\alpha/\alpha_0)_Э$: а – обучающая выборка; б – тестовая выборка; в – все данные. Обозначения: точки – $(\alpha/\alpha_0)_{НС} = f[(\alpha/\alpha_0)_Э]$, пунктирная линия – $(\alpha/\alpha_0)_{НС} = (\alpha/\alpha_0)_Э$, сплошная линия – средняя линия по результатам прогнозирования нейронной сети

Зависимость получаемых в результате работы нейронной сети значений $(\alpha/\alpha_0)_{НС}$ от экспериментальных данных $(\alpha/\alpha_0)_{Э}$ представлена на рис. 5. Видно, что коэффициент корреляции для обучающей выборки равен $R = 0.92$ и $R = 0.86$ – для тестовой. Для всех данных по итогам работы нейронной сети коэффициент корреляции равен $R = 0.915$.

Разработанная нейронная сеть, реализованная на базе пакета MatLab, позволяет прогнозировать коэффициенты теплоотдачи на двухмерных микроструктурированных поверхностях с погрешностью $\pm 20\%$ при доверительной вероятности 0.9 (рис. 6) и справедлива в диапазоне $q = 3800 - 2.17 \cdot 10^6$ Вт/м², $K_q = 5 - 11500$, $\theta/90 = 0.72 - 1$, $h/l_0 = 0.09 - 1.45$, $\Delta/l_0 = 0.002 - 1.29$, $\delta/l_0 = 0.01 - 1$, $Pr = 1.75 - 35.7$, $F/F_0 = 1.66 - 9.75$ (увеличение площади теплообмена). Меньшая погрешность определения коэффициентов теплоотдачи получается за счет нелинейности итоговой функциональной зависимости и учета взаимовлияния параметров геометрии рельефа поверхности кипения.

В ходе работы показана возможность использования моделей нейронных сетей для прогнозирования теплоотдачи при кипении на микроструктурированных поверхностях. Разработанная модель искусственной нейронной сети может быть использована как модуль программного кода для прогнозирования эволюции характеристик поверхности кипения, расчета теплообменных элементов или систем охлаждения. Полученная модель также позволяет провести оптимизацию с целью определения рациональ-

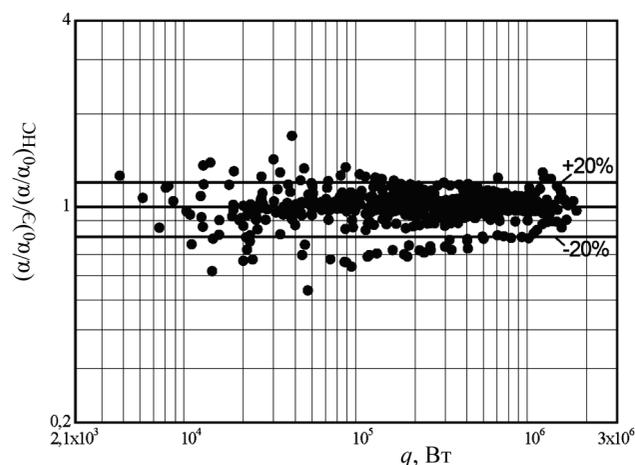


Рис. 6. Результаты прогнозирования по модели нейронной сети коэффициентов теплоотдачи при кипении в большом объеме на поверхностях с двухмерным рельефом (микрорребра)

ных размеров микроструктуры поверхности кипения, получаемой методом деформирующего резания, для обеспечения максимальной теплоотдачи или максимальных критических тепловых потоков при использовании различных жидкостей.

Критериальные уравнения для критических тепловых потоков

При обобщении данных по критическим тепловым потокам использовались данные для поверхностей, представленные в табл. 1 и 2.

Обобщение проводилось с использованием метода полиномиальной регрессии по моделям для двух- и трехмерной микроструктуры поверхности, соответственно:

$$q_{крит}/q_{крит0} = f_3((\theta/90), (h/l_0), (\Delta/l_0), (\delta/l_0), Pr),$$

$$q_{крит}/q_{крит0} = f_4((\theta/90), (h/l_0), (\Delta/l_0), (\delta/l_0), (u/l_0), (s/l_0), Pr),$$

где $q_{крит}$ – критический тепловой поток при кипении жидкости на микроструктурированной поверхности; $q_{крит0}$ – критический тепловой поток при кипении жидкости на гладкой поверхности. В качестве критического теплового потока при кипении жидкости на гладкой поверхности $q_{крит0}$ приняты значения, полученные экспериментально. Они могут быть оценены с использованием зависимости для критического теплового потока С.С. Кутателадзе $q_{крит0} = 0.13r \sqrt{\rho''^4 g \sigma (\rho' - \rho'')}$ с рекомендациями о внесении поправок на толщину тонкостенных поверхностей кипения И.И. Гогонина [35].

Следует отметить, что количество экспериментальных данных очень ограничено.

В ходе обобщения получена зависимость для расчета критических тепловых потоков при кипении воды, этанола, 60%-ного водного раствора глицерина, фреонов R113 и R123, хладона Novex 649 в большом объеме на поверхностях кипения с двухмерным рельефом (микрорребра) (рис. 7):

$$q_{крит}/q_{крит0} = 14.4 (\theta/90)^{1.36} (h/l_0)^{0.33} (\Delta/l_0)^{-0.26} (\delta/l_0)^{0.43} Pr^{-2/3}. \quad (3)$$

Зависимость (3) описывает экспериментальные точки с отклонением $\pm 35\%$ при доверительной вероятности 0.8. Зависимость (3) справедлива в диапазоне $\theta/90 = 0.72 - 1$, $h/l_0 = 0.09 - 1.45$, $\Delta/l_0 = 0.002 - 1.29$, $\delta/l_0 = 0.01 - 1$, $Pr = 1.75 - 35.7$, $F/F_0 = 1.66 - 9.75$.

В ходе обобщения получена зависимость для расчета критических тепловых потоков при кипении воды, этанола, 60%-ного водного раствора глицерина в большом объеме на поверхностях кипения с трехмерным рельефом (микроштырьковые структуры) (рис. 8):

$$q_{\text{крит}}/q_{\text{крит}0} = 11.2 (\theta/90)^{2.26} (h/l_0)^{0.35} (\Delta/l_0)^{-0.19} \times (\delta/l_0)^{-0.245} (u/l_0)^{-0.4} (s/l_0)^{0.82} \text{Pr}^{-2/3}. \quad (4)$$

Зависимость (4) описывает экспериментальные точки с отклонением $\pm 30\%$ при доверительной вероятности 1.0. Зависимость (4) справедлива в диапазоне $\theta/90 = 0.77-1$, $h/l_0 = 0.09-0.71$, $\Delta/l_0 = 0.002-0.3$, $\delta/l_0 = 0.042-0.42$, $u/l_0 = 0.009-0.28$, $s/l_0 = 0.02-0.79$, $\text{Pr} = 1.75-7.35$, $F/F_0 = 2.23-4.8$.

Анализ зависимостей (3) и (4) показывает, что в исследуемом диапазоне значений Δ/l_0 с увеличением относительного зазора между элементами рельефа критические тепловые потоки на микроструктурированных поверхностях как двумерной, так и трехмерной структуры уменьшаются, что связано с уменьшением капиллярного эффекта. Для трехмерной поверхности это относится и для относительного зазора u/l_0 . Именно приток жидкости под паровой пузырь по капиллярам микроканалов в структуре, формируемой деформирующим резанием, отодвигает образование сухих пятен и наступление кризиса кипения. Влияние геометрии структуры микрорельефов на угол смачивания на рассматриваемых поверхностях рассмотрен в [10].

Увеличение относительной высоты элементов рельефа h/l_0 также способствует лучшей смачиваемости поверхности [10]. Необходимо отметить, что для поверхностей с трехмерными рельефами угол смачивания значительно меньше, чем для поверхностей с двумерными поверхностями, т.е. обеспечивается быстрое растекание жидкости (затекание жидкости под паровой пузырь) [10].

Приближение угла θ к 90° повышает уровень критических тепловых потоков вследствие уменьшения удержания крупных пузырей пара в зазорах между элементами микроструктуры.

Однако обращает на себя внимание различное влияние относительной толщины δ/l_0 структур (ребер, штырьков) в зависимостях (3) и (4) для поверхностей с двумерными и трехмерными рельефами. Увеличение толщины элементов рельефа способствует увеличению пло-

щади поперечного сечения элементов микроструктур (ребер, штырьков) и тепловых потоков, так как увеличивается коэффициент эффективности работы ребер и штырьков, и передаче большего количества теплоты. Но для трехмерных рельефов площадь поперечного сечения обусловлена $\delta \times s$, т.е. взаимным влиянием параметров δ/l_0 и s/l_0 , и как видно из (4), влияние s/l_0 более сильное, и этот параметр имеет большие значения. Корреляция δ/l_0 и s/l_0 для трехмерных поверхностей кипения учтена как $(\delta/l_0)^{-0.245} (s/l_0)^{0.82}$, в то время как двумерных поверхностей как $(\delta/l_0)^{0.43}$, но в обоих случаях видно, что увеличение толщины элементов рельефа повышает количество переносимой теплоты.

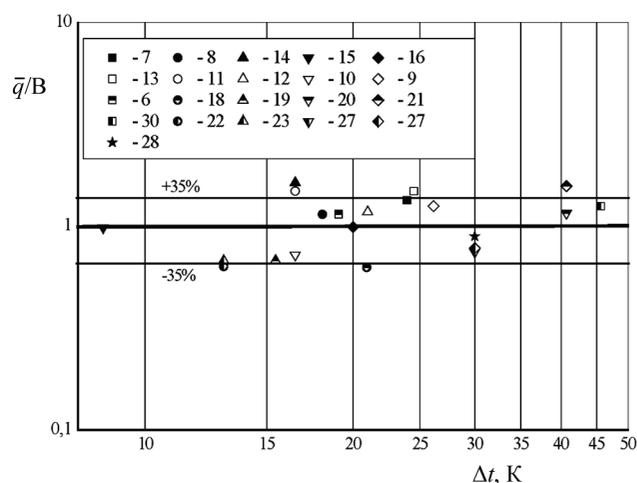


Рис. 7. Критические тепловые потоки при кипении в большом объеме на поверхностях с двумерным рельефом (микроребра). Обозначения точек см. в табл. 1. $\bar{q} = q_{\text{крит}} / q_{\text{крит}0}$, $B = 14.4 (\theta/90)^{1.36} (h/l_0)^{0.33} (\Delta/l_0)^{-0.26} (\delta/l_0)^{0.43} \text{Pr}^{-2/3}$

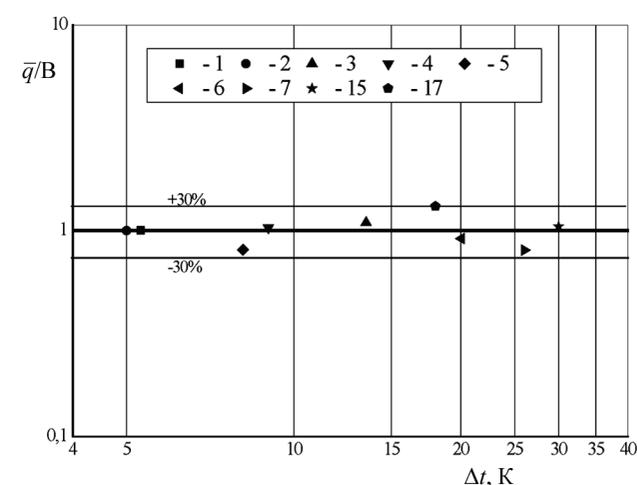


Рис. 8. Критические тепловые потоки при кипении в большом объеме на поверхностях с трехмерным рельефом (микроштырьковая структура). Обозначения точек см. в табл. 2. $\bar{q} = q_{\text{крит}} / q_{\text{крит}0}$, $B = 11.2 (\theta/90)^{2.26} (h/l_0)^{0.35} (\Delta/l_0)^{-0.19} (\delta/l_0)^{-0.245} \times (u/l_0)^{-0.4} (s/l_0)^{0.82} \text{Pr}^{-2/3}$

Заключение

На основе имеющихся в литературных источниках результатов экспериментальных исследований сформирована база данных по коэффициентам теплоотдачи на поверхностях, полученных методом деформирующего резания, для которых получены обобщающие зависимости для оценки коэффициентов теплоотдачи и критическим тепловым потокам при кипении различных жидкостей на микроструктурных поверхностях, полученных методом деформирующего резания и имеющих различную структуру. Показано, что данные микроструктурные поверхности позволяют интенсифицировать теплоотдачу до 4–5 раз.

Из-за изменения смачиваемости элементов микроструктурных поверхностей критические тепловые потоки увеличиваются до 6 раз. Предложенные критериальные уравнения для расчета критических тепловых потоков позволяют прогнозировать коэффициенты теплоотдачи с погрешностью 30% и критические тепловые потоки с погрешностью $\pm(30-35)\%$.

С целью повышения точности прогнозирования показана возможность использования модели искусственной нейронной сети по обобщению коэффициентов теплоотдачи. Прогнозирование с использованием модели искусственной нейронной сети позволяют определить коэффициенты теплоотдачи с погрешностью $\pm 20\%$. Разработанная модель искусственной нейронной сети может быть использована как модуль программного кода для расчета теплообменных элементов или систем охлаждения на основе кипения различных жидкостей.

Полученные зависимости и модель нейронной сети позволяют провести оптимизацию с целью определения рациональных размеров микроструктуры поверхности кипения, получаемой методом деформирующего резания, для обеспечения максимальной теплоотдачи или максимальных критических тепловых потоков при использовании различных жидкостей.

Уравнения представляют интерес при проектировании систем охлаждения микроэлектронных устройств, теплообменных устройств, зон кипения тепловых труб и термосифонов и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18–54.
2. Popov I.A., Shchelchkov A.V., Gortyshov Yu.F., Zubkov N.N. Heat transfer enhancement and critical heat fluxes in boiling of microfinned surfaces // High Temperature. 2017. V. 55. N 4. P. 524–534.
3. Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибкой поверхностных слоев // Новости теплоснабжения. 2005. № 4. С. 51–53.
4. Зубков Н.Н., Трофимович А.С., Овчинников А.И., Цфасман Г.Ю., Городников В.В. Получение штырьковых структур для кипения азота // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 1. С. 100–109.
5. Зубков Н.Н. Получение подповерхностных полостей деформирующим резанием для интенсификации пузырькового кипения // Вестник машиностроения. 2014. № 11. С. 75–79.
6. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Зубков Н.Н., Касков С.И., Щелчков А.В. Кипение воды на микроструктурированных поверхностях // Труды Академэнерго. 2012. № 1. С. 14–31.
7. Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Kas'kov S.I. Heat transfer during the boiling of liquid on microstructured surfaces. Part 1: Heat transfer during the boiling of water // Thermal Engineering. 2013. V. 60. N 3. P. 157–165.
8. Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. Интенсификация теплообмена при кипении на микро- и наномасштабах // Альтернативная и интеллектуальная энергетика. Материалы Международной научно-практической конференции. 2018. С. 63–64.
9. Шустов М.В., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. Покрытие микроканала наночастицами – эффективный метод повышения критической тепловой нагрузки // Теплоэнергетика. 2017. № 4. С. 72–78.
10. Аксянов Р.А., Коханова Ю.С. Влияние параметров шероховатости и смачиваемости микроструктурированных поверхностей на теплоотдачу и критические тепловые потоки // Сборник докладов Международной молодежной научной конференции «XXIV ТУПОЛЕВСКИЕ ЧТЕНИЯ (школа молодых ученых)». 2019. Т. 2. С. 160–166.
11. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н., Лиу М., Туманов В.В., Селищев Д.С., Козлов Д.В. Влияние свойств смачивания на микрохарактеристики и теплообмен при кипении жидкости // Труды седьмой российской национальной конференции по теплообмену. 2018. Т. 2. С. 410–413.
12. Сердюков В.С., Суртаев А.С., Павленко А.Н., Чернявский А.Н. Исследование локального теплообмена в окрестности контактной линии под паровыми пузырями при кипении жидкостей // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 4. С. 571–579.
13. Марчук И.В., Чеведа В.В., Стрижак П.А., Кабов О.А. Определение поверхностного натяжения и контактного угла смачивания по форме поверхности осесимметричных пузырей и капель // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22. № 3. С. 311–317.
14. Зайцев Д.В., Кириченко Д.П., Кабов О.А. Влияние смачиваемости подложки на разрыв локально нагреваемой пленки жидкости // Письма в Журнал технической физики. 2015. Т. 41. № 11. С. 79–85.
15. Сукомел Л.А., Ягов В.В. Возможности повышения критических тепловых потоков при кипении на поверхностях с пористыми покрытиями (обзор) // Вестник МЭИ. 2017. № 4. С. 55–67.

16. **Зубков Н.Н., Битюцкая Ю.Л.** Влияние параметров теплообменных штырьковых структур на их эксплуатационные характеристики // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2017. № 2 (113). С. 108–120.
17. **Абросимов А.И., Сысоев В.К., Верлан А.А., Зубков Н.Н., Булкин Ю.Н.** Продольные капиллярные каналы для тепловых труб // Прикладная физика. 2010. № 1. С. 123–125.
18. **Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N.** Surface microstructures for boiling and evaporation enhancement in falling films of low-viscosity fluids // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. V. 155. P. 119722.
19. **Лабунцов Д.А.** Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике. М.: Издательство МЭИ, 2000. 388 с.
20. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. Новосибирск: Наука, 1970. 660 с.
21. **Толубинский В.И.** Теплообмен при кипении в условиях свободной конвекции // Труды ин-та теплоэнергетики. 1950. № 2. С. 19–29.
22. **Боришанский В.М., Шлейфер В.А.** Обобщенная формула для расчета теплоотдачи при пузырьковом кипении различных жидкостей // Тепло- и массоперенос при фазовых превращениях: материалы IV Всесоюз. конф. по теплообмену и гидродинамике при движении двухфаз. потока в элементах энергет. машин и аппаратов. Ин-т тепло- и массообмена АН БССР. Минск, 1974. Ч. 1. С. 202–210.
23. **Лабунцов Д.А., Ягов В.В.** Механика двухфазных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 374 с.
24. **Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Kas'kov S.I.** Heat transfer during the boiling of liquid on microstructured surfaces. Part 2: Visualization of boiling and critical heat fluxes // Thermal Engineering. 2013. V. 60. N 4. P. 285–294.
25. **Shchelchkov A.V., Popov I.A., Zubkov N.N.** Boiling of a liquid on microstructured surfaces under free-convection conditions // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. V. 89. N 5. P.1152–1160.
26. **Passos J.C., Reinaldo R.F.** Analysis of pool boiling within smooth and grooved tubes // Experimental Thermal and Fluid Science. 2000. V. 22. P. 35–44.
27. **Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Lei R.A., Gortyshov Y.F.** Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces // Russian Aeronautics. 2014. V. 57. N 4. P. 395–401.
28. **Popov I.A., Shchelchkov A.V.** Boiling of various liquids on microstructured surfaces // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. T. 87. № 6. С. 1420–1432.
29. **Kaniowski R., Pastuszko R., Nowakowski L.** Effect of geometrical parameters of open microchannel surfaces on pool boiling heat transfer // EPJ Web of Conferences. 2017. V. 143. P.02049.
30. **Kedziersci M.A.** Calorimetric and Visual Measurements of R123 Pool Boiling on Four Enhanced Surfaces. NISTIR 5732. 1995. 59 p.
31. **Kim Nae-H., Kim J.-W., Kim T.-H.** Effect of pore size on the nucleate pool boiling of structured enhanced tubes // J. of Thermal Science. 2000. V. 9. N 3. P.230–235.
32. **Ravigururajan T.S., Bergles A.E.** Development and verification of general correlations for pressure drop and heat transfer in single-phase turbulent flow in enhanced tubes // Experimental Thermal and Fluid Science. 1996. V. 13. N 1. P. 55–70.
33. **Webb R.L., Kim Nae-H.** Principles of Enhanced Heat Transfer. CRC Press. 818 p.
34. **Poniewsky M.P., Thome J.R.** Nucleate Boiling on Micro-Structure Surfaces. Heat Transfer Research. E-book. 2008. 376 p.
35. **Гогонин И.И.** Теплообмен при пузырьковом кипении. Новосибирск: Изд-во Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 2018. 225 с.
36. **MacKay D.J.C.** Bayesian interpolation // Neural computation. 1992. V. 4. N 3. P. 415–447.
37. **Foresee F.D., Hagan M.T.** Gauss-Newton approximation to Bayesian learning // Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'97), Houston, TX, USA, 1997. V. 3. P. 1930–1935.

Generalization of experimental data on heat transfer and critical heat fluxes on microstructured surfaces during boiling of various liquids

R.A. Aksianov, Yu.S. Kokhanova, E.S. Kuimov, R.A. Ley, I.A. Popov

*Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, 420111, Russia
e-mail: raaksyanov@kai.ru, yulkoh@yandex.ru, egor1997-08@mail.ru,
regina.ulyanova.ley@gmail.com, popov-igor-alex@yandex.ru*

In the work, on available in the literature sources of experimental data on heat transfer and critical heat flux at boiling of various liquids on the microstructured surfaces made by the deforming cutting method, recommendations for prediction of heat transfer coefficients and critical heat fluxes are received. Microstructured surfaces allow to intensify the heat transfer is 1.1 to 6 times. Due to the variable wettability of microstructured surfaces elements, critical heat fluxes increase before 4 times. The proposed criteria equations allow predicting heat transfer coefficients with an error of 30%, and critical heat fluxes with an error of $\pm(30...35)\%$. In order to improve the accuracy of forecasting, the possibility of using an artificial neural network model for generalizing heat transfer coefficients is shown. Forecasting using an artificial neural network model allows you to determine the heat transfer coefficients with an error of $\pm 20\%$. The

equations are of interest for designing cooling systems for microelectronic devices, heat and mass transfer devices, boiling zones of heat pipes and thermosyphons, etc.

Keywords: boiling, heat transfer, critical heat fluxes, microstructured surfaces, cooling systems.

REFERENCES

1. **Dedov A.V.** Review of modern methods for enhancing nucleate boiling heat transfer. *Thermal engineering*, 2019, vol. 66, no. 12, pp. 881–915.
2. **Popov I.A., Shchelchkov A.V., Gortyshov Yu.F., Zubkov N.N.** Heat transfer enhancement and critical heat fluxes in boiling of microfinned surfaces. *High Temperature*, 2017, vol. 55, no. 4, pp. 524–534.
3. **Zoubkov N.N.** Orebrenie trub teploobmennykh apparatov podrezaniem i otgibkoj poverkhnostnykh sloev [Finning of heat exchanger tubes by cutting and bending the surface layers]. *Novosti teplosnabzheniya – Heat supply news*, 2005, no. 4, pp. 51–53. In Russ.
4. **Zoubkov N.N., Trofimovich A.S., Ovchinnikov A.I., Tsfasman G.Yu., Gorodnikov V.V.** Poluchenie shtyr'kovykh struktur dlya kipeniya azota [Making of pin fin structures for boiling of nitrogen]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie – Herald of the Bauman Moscow state technical university. Series mechanical engineering*, 2013, no. 1, pp. 100–109. In Russ.
5. **Zoubkov N.N.** Poluchenie podpoverkhnostnykh polostej deformiruyushhim rezaniem dlya intensivatsii puzyr'kovogo kipeniya [Obtaining of subsurface cavities by deforming cutting to intensify bubble boiling]. *Vestnik mashinostroeniya – Mechanical Engineering Bulletin*, 2014, no. 11, pp. 75–79. In Russ.
6. **Gortyshov Yu.F., Popov I.A., Zoubkov N.N., Kaskov S.I., Shchelchkov A.V.** Kipenie vody na mikrostrukturirovannykh poverkhnostyakh [Pool boiling of water on microstructured surfaces]. *Trudy Akademenergo – Academenergo Proceedings*, 2012, no. 1, pp. 14–31. In Russ.
7. **Popov I.A., Shchelchkov A.V., Zubkov N.N., Kaskov S.I.** Heat transfer during the boiling of liquid on microstructured surfaces. Part 1: Heat transfer during the boiling of water. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no. 3, pp. 157–165.
8. **Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V.** Boiling heat transfer enhancement on micro- and nanoscales. *Proceedings of 2018 International Theoretical and Practical Conference on Alternative and Smart Energy (TPCASE 2018)*, 2018, pp. 159–164.
9. **Shustov M.V., Kuzma-Kichta Y.A., Lavrikov A.V.** Nanoparticle coating of a microchannel surface is an effective method for increasing the critical heat flux. *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 4, pp. 301–306.
10. **Aksyanov R.A., Kokhanova Yu.S.** Vliyanie parametrov sherokhovatosti i smachivaemosti mikrostrukturirovannykh poverkhnostej na teplootdachu i kriticheskie teplovye potoki [Influence of roughness and wettability parameters of microstructured surfaces on heat transfer and critical heat flows]. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferentsii «XXIV TUPOLEVSKIE CHTENIYA (shkola molodykh uchenykh)» – Proceedings of XXIV Tupolev readings (school of young scientists), Kazan*. 2019, vol. 2, pp. 160–166. In Russ.
11. **Surtaev A.S., Serdyukov V.S., Pavlenko A.N., Liu M., Tumanov V.V., Selishchev D.S., Kozlov D.V.** Vliyanie svoystv smachivaniya na mikrokharakteristiki i teploobmen pri kipenii zhidkosti [Influence of wetting properties on microcharacteristics and heat exchange during liquid boiling]. *Trudy sed'moj rossijskoj natsional'noj konferentsii po teploobmenu* [Proceedings of the Seventh Russian National Conference on Heat Exchange]. Moscow, 2018, vol. 2, pp. 410–413. In Russ.
12. **Serdyukov V.S., Surtaev A.S., Pavlenko A.N., Chernyavskiy A.N.** Study on local heat transfer in the vicinity of the contact line under vapor bubbles at pool boiling. *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 546–552.
13. **Marchuk I.V., Cheverda V.V., Kabov O.A., Strizhak P.A.** Determination of surface tension and contact angle by the axisymmetric bubble and droplet shape analysis. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, vol. 22, no. 3, pp. 297–303.
14. **Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Kabov O.A.** The effect of substrate wettability on the breakdown of a locally heated fluid film. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 6, pp. 551–553.
15. **Sukomel L.A., Yagov V.V.** Vozmozhnosti povysheniya kriticheskikh teplovykh potokov pri kipenii na poverkhnostyakh s poristymi pokrytiyami (obzor) [The possibilities of increasing critical heat fluxes for boiling on surfaces with porous coatings (a review)]. *Vestnik Moskovskogo ehnergeticheskogo instituta – Bulletin of the Moscow power Engineering Institute*, 2017, no. 4, pp. 55–67. In Russ. DOI: 10.24160/1993-6982-2017-4-55-67
16. **Zubkov N.N., Bityutskaya Yu.L.** Vliyanie parametrov teploobmennykh shtyr'kovykh struktur na ikh ekspluatatsionnye kharakteristiki [Effect of heat-exchange pin-fin structure parameters on its performance characteristics]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie – Herald of the Bauman Moscow state technical university. Series mechanical engineering*, 2017, no. 2 (113), pp. 108–120. In Russ. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-108-120
17. **Abrosimov A.I., Sysoev V.K., Verlan A.A., Zoubkov N.N., Bulkin Yu.N.** Prodol'nye kapillyarnye kanaly dlya teplovykh trub [Longitudinal capillary channels for heat pipes]. *Prikladnaya Fizika*, 2010, no. 1, pp. 123–125. In Russ.
18. **Volodin O., Pecherkin N., Pavlenko A., Zubkov N.** Surface microstructures for boiling and evaporation enhancement in falling films of low-viscosity fluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, vol. 155, p. 119722.
19. **Labuntsov D.A.** *Fizicheskie osnovy ehnergetiki. Izbrannye trudy po teploobmenu, gidrodinamike, termodinamike* [Physical bases of power engineering. selected works on heat exchange, hydrodynamics, thermodynamics]. Moscow: Publishing House of Moscow Power Engineering Institute, 2000. 388 p. In Russ.
20. **Kutateladze S.S.** *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Novosibirsk: Nauka, 1970. 660 p. In Russ.
21. **Tolubinsky V.I.** Teploobmen pri kipenii v usloviyakh svobodnoj konveksii [Heat exchange at boiling under free convection]. *Trudy in-ta teploehnergetiki – Proc. Institute of Power Engineering*, 1950, no. 2, pp. 19–29. In Russ.
22. **Borishansky V.M., Shleifer V.A.** Obobshchennaya formula dlya rascheta teplootdachi pri puzyr'kovom kipenii razlichnykh zhidkostej [Generalized equation for bubble boiling

- heat transfer of various fluids]. *Teplo- i massoperenos pri fazovykh prevrashheniyakh: materialy IV Vsesoyuz. konf. po teploobmenu i gidrodinamike pri dvizhenii dvukhfaz. potoka v elementakh energet. mashin i apparatov. In-t teplo- i mas-soobmena AN BSSR. Minsk, 1974* [Heat and mass exchange at phase transition: Materials IV Soviet Union Conf. on heat exchange and hydrodynamics in two-phase motion in the element of power machines and equipments. Institute of heat and mass exchange, Academy of Science of Belarus Republic – Minsk], 1974, part 1, pp. 202–210. In Russ.
23. **Labuntsov D.A., Yagov V.V.** *Mekhanika dvukhfaznykh sistem* [Mechanics of two-phase systems]. Moscow: Publishing house of Moscow Power Engineering Institute, 2000. 374 p. In Russ.
 24. **Popov I.A., Shchelchikov A.V., Zubkov N.N., Kas'kov S.I.** Heat transfer during the boiling of liquid on microstructured surfaces. Part 2: Visualization of boiling and critical heat fluxes. *Thermal Engineering*, 2013, vol. 60, no. 4, pp. 285–294.
 25. **Shchelchikov A.V., Popov I.A., Zubkov N.N.** Boiling of a liquid on microstructured surfaces under free-convection conditions. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 5, pp. 1152–1160. DOI: 10.1007/s10891-016-1478-5
 26. **Passos J.C., Reinaldo R.F.** Analysis of pool boiling within smooth and grooved tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2000, vol. 22, pp. 35–44 [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(00\)00008-X](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(00)00008-X)
 27. **Popov I.A., Shchelchikov A.V., Zubkov N.N., Lei R.A., Gortyshov Y.F.** Boiling heat transfer of different liquids on microstructured surfaces. *Russian Aeronautics*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 395–401. <https://doi.org/10.3103/S1068799814040138>
 28. **Popov I.A., Shchelchikov A.V.** Boiling of various liquids on microstructured surfaces. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 6, pp. 1420–1432. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1146-6>
 29. **Kaniowski R., Pastuszko R., Nowakowski L.** Effect of geometrical parameters of open microchannel surfaces on pool boiling heat transfer. *EPJ Web of Conferences*, 2017, vol. 143, p. 02049. DOI: 10.1051/epjconf/201714302049
 30. **Kedziersci M.A.** *Calorimetric and Visual Measurements of R123 Pool Boiling on Four Enhanced Surfaces*. NIST Interagency/Internal Report (NISTIR) 5732, 1995. 59 p. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.5732>
 31. **Kim Nae-H., Kim J.-W., Kim T.-H.** Effect of pore size on the nucleate pool boiling of structured enhanced tubes. *J. of Thermal Science*, 2000, vol. 9, no.3, pp. 230–235
 32. **Ravigururajan T.S., Bergles A.E.** Development and verification of general correlations for pressure drop and heat transfer in single-phase turbulent flow in enhanced tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996, vol. 13, no. 1, pp. 55–70. [https://doi.org/10.1016/0894-1777\(96\)00014-3](https://doi.org/10.1016/0894-1777(96)00014-3)
 33. **Webb R.L., Kim Nae-H.** *Principles of Enhanced Heat Transfer*. CRC Press. 818 p.
 34. **Poniewsky M.P., Thome J.R.** *Nucleate Boiling on Micro-Structure Surfaces*. Heat Transfer Research. E-book, 2008. 376 p.
 35. **Gogonin I.I.** *Teploobmen pri puzyr'kovom kipenii* [Heat Transfer at Bubble Boiling]. Novosibirsk: Publishing House of the Russian Academy of Sciences, 2018. 225 p. In Russ.
 36. **MacKay D.J.C.** Bayesian interpolation. *Neural computation*, 1992, vol. 4, no. 3, pp. 415–447. DOI: 10.1162/neco.1992.4.3.415
 37. **Foresee F.D., Hagan M.T.** Gauss-Newton approximation to Bayesian learning. *Proceedings of International Conference on Neural Networks (ICNN'97)*, Houston, TX, USA, 1997, pp. 1930–1935 vol. 3. DOI: 10.1109/ICNN.1997.614194.