

Теплофизические основы энергетических процессов

УДК 536.248

*Морару В.Н., канд. хим. наук**Институт газа НАН Украины, Киев**ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: vasily.moraru@gmail.com*

Механизм повышения и количественная оценка удельного теплового потока при кипении наножидкостей в условиях свободной конвекции

Результаты наших работ и ряда зарубежных исследований свидетельствуют о том, что резкое повышение параметров теплопереноса (удельного теплового потока и коэффициента теплоотдачи при кипении наножидкостей по сравнению с базовой жидкостью (водой) обусловлено не только и не столько увеличением теплопроводности наножидкостей, сколько интенсификацией процесса кипения, вызванной изменением состояния поверхности нагрева, ее топологических и химических свойств (пористости, шероховатости, смачиваемости). Последнее приводит к изменению внутренних характеристик процесса кипения и усредненной температуры перегретого слоя жидкости. Это обстоятельство позволяет на основании физических моделей кипения жидкостей и учета параметров состояния поверхности (температуры, давления) и свойств теплоносителя (плотности и теплоемкости жидкости, удельной теплоты парообразования и теплоемкости пара), а также внутренних характеристик процесса кипения жидкостей рассчитать величину удельного теплового потока. Изучено различие в механизмах теплопереноса при кипении однофазных (воды) и двухфазных наножидкостей и проведена количественная оценка величин удельного теплового потока при кипении наножидкостей, исходя из внутренних характеристик процесса кипения. Удовлетворительное согласие расчетных значений с экспериментальными данными служит подтверждением того, что ключевым фактором роста интенсивности теплоотдачи при кипении наножидкостей является изменение природы и микрорельефа поверхности нагрева. *Библ. 20, рис. 8, табл. 2.*

Ключевые слова: наножидкости, теплообмен, поверхность нагрева, расчет удельного теплового потока.

Способность повышать интенсивность теплопередачи является одним из наиболее примечательных свойств наножидкостей (НЖ) — теплоносителей нового поколения. Так как кипение жидкостей является одним из самых высокоинтенсивных способов отвода тепла, этому процессу всегда уделялось большое внимание. В последнее время количество публикаций, посвя-

щенных кипению, заметно увеличилось из-за нового направления в этой области — использования в качестве теплоносителей НЖ, которые характеризуются повышенной теплоотдачей.

За минувшие два десятилетия в ряде исследований было показано, что НЖ обладают повышенными (на 10–35 %) величинами теплопроводности по сравнению с таковыми для ба-

зовых жидкостей (вода, этиленгликоль) [1–4] и что использование НЖ в качестве теплоносителей при кипении позволяет достичь высоких значений удельного теплового потока (УТП) и коэффициента теплоотдачи (КТО) [5–13]. Тем не менее, отмеченный рост теплопроводности не может объяснить аномальное повышение (более 200 %) УТП (q) и КТО (α) при кипении НЖ по сравнению с водой. Это означает, что столь высокая теплоотдача при кипении НЖ обусловлена еще и другими механизмами, например, конвективным.

Величина УТП экспериментально определяется так:

$$q = I U / (\pi D L),$$

где I — сила тока, А; U — напряжение, В; $(\pi D L)$ — площадь внешней поверхности нагревателя (нихромовой проволоки), м².

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = q / (t_w - t_f),$$

где $(t_w - t_f)$ — разница между температурами стенки и кипящей жидкости.

Результаты зарубежных исследований [5–11] и наших работ [12–15] показывают, что повышенные величины q и α при кипении НЖ определяются в основном изменением состояния поверхности нагрева, ее топологическими и химическими свойствами. При этом ключевыми исходными параметрами, влияющими на характер кривых кипения, являются УТП, температурный напор (ΔT) и содержание определенных ингредиентов в теплоносителе. Величина УТП при кипении жидкостей и наножидкостей зависит от теплофизических свойств жидкости, пара и внутренних характеристик процесса кипения. К последним относятся плотность центров парообразования, усредненная температура перегретого слоя жидкости у поверхности нагрева,

частота отрыва паровых пузырей и отрывной диаметр паровых пузырей, от которого зависит объем отрывного пузыря.

Такая ситуация позволяет на основании физических моделей кипения жидкостей и учета параметров состояния поверхности (температуры, давления и свойств теплоносителя: плотности и теплоемкости жидкости, удельной теплоты парообразования и теплоемкости пара), а также внутренних характеристик процесса кипения жидкостей рассчитать величину УТП. При этом состояние теплообменной поверхности может меняться в процессе эксперимента от достаточно чистой до покрытой слоем осадка [14].

Выяснению механизма кипения НЖ и расчету интенсивности этого процесса посвящена данная работа.

Цель работы — сопоставить существующие механизмы теплопереноса при кипении однофазных жидкостей с новым предложенным механизмом для наножидкостей [14].

Материалы и установка

В качестве теплоносителей изучены дистиллированная вода (ДВ), водопроводная вода (ВВ) с удельной электропроводностью $1,0 \cdot 10^{-6}$ и $4,35 \cdot 10^{-4}$ См/см соответственно, а также различные наножидкости (табл.1).

Для построения кривых кипения проводились теплотехнические эксперименты на специально созданном автоматизированном стенде, работающем на постоянном токе, с применением компьютерной программы, которая позволяла фиксировать с помощью ПК в режиме реального времени все необходимые тепловые параметры. В связи с этим нами была разработана методика проведения исследований теплообмена при кипении наножидкостей в условиях свободной конвекции с достижением критических тепловых потоков [13].

Таблица 1. Физико-химические характеристики при кипении воды и НЖ

Теплоносители на водной основе	d_{cp} , нм	C_p , % (мас.)	$k = l/d$	pH	σ , мН/м	ζ , мВ	$q_{cr} \times 10^{-6}$, Вт/м ²	α_{max} , Вт/(м ² ·К)
Дистиллированная вода (ДВ)	–	0	–	6,0	72,8	–	0,70	25000
Водопроводная вода (ВВ)	–	0	–	5,6	72,5	–	1,40	26000
ДВ + Гидрослюда AlSi-6)	50–400	0,5	10–30	5,4	72,6	–25,7	1,45	26500
ДВ + TiO ₂ (rutile) НЖ-8	70–300	0,5	2–5	6,0	71,8	–39,5	1,55	35000
ДВ + Аттапулыгит (AlSi-5)	100–500	0,5	200–400	5,8	71,5	–18,0	1,65	36000
ДВ + Аттапулыгит +Монтмориллонит (AlSi-7)	50–500	0,5	200–500	5,9	72,6	–19,8	2,42	38000
ДВ + Аттапулыгит + Монтмориллонит + Carbon Nanotube (0,2 %) (AlSi-7 + CNTs)	70–3000	0,5	500–750	6,5	71,9	–11,5	3,50	52000

Примечание. d_{cp} — средний размер частиц; C_p — концентрация частиц; k — коэффициент анизотрии частиц; σ — поверхностное натяжение при 20 °С; ζ — электрокинетический потенциал; q_{cr} — критический тепловой поток; α_{max} — максимальный коэффициент теплоотдачи.

Методика предусматривает кипение жидкости на поверхности электронагревателя, который выполнен в виде нихромовой проволоки диаметром 0,31 мм и длиной 140–145 мм [13].

Результаты и их обсуждение

Кривая кипения, полученная для дистиллированной воды (рис.1), наиболее точно соответствует классической кривой кипения [16]. То есть после конвективного теплообмена без изменения агрегатного состояния имеет место кипение недогретой жидкости и по достижении необходимого температурного напора ($\Delta t = t_{ст} - t_{ж}$) начинается пузырьковое кипение, которое прекращается при наступлении кризиса и достижении критического теплового потока ($q_{кр} = 0,7 \text{ МВт/м}^2$). Кризис кипения дистиллированной воды (рис.2) возникает из-за образования сплошной паровой пленки вокруг поверхности нагрева, которая изолирует ее от кипящей жидкости и приводит к существенному повышению температуры нагревателя и его разру-

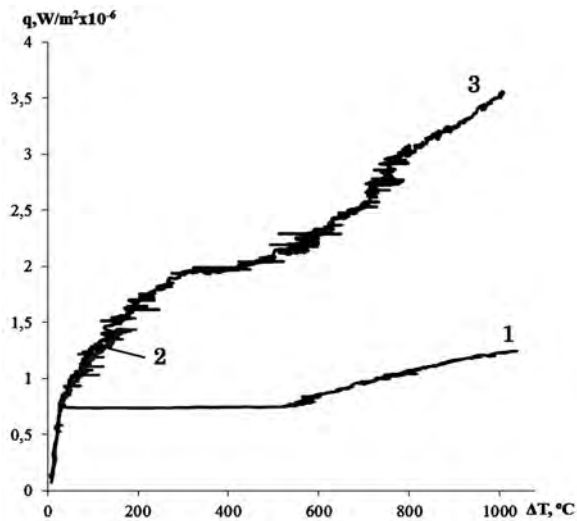


Рис.1. Типичные кривые кипения дистиллированной воды (1), водопроводной воды (2) и водной НЖ ALSi-7a (3).
Рис.2. Кризис кипения дистиллированной воды при $q_{кр} = 0,7 \text{ МВт/м}^2$.

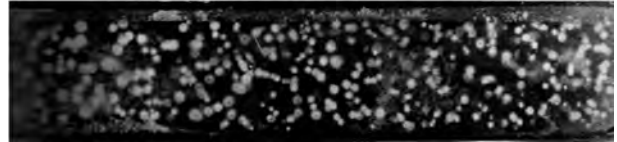


Рис.3. Отложение осадка накипи на поверхности нагрева в процессе кипения водопроводной воды [17].

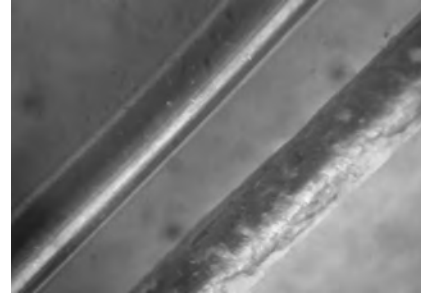


Рис.4. Изображения нагревателя ($d = 0,31 \text{ мм}$) после кипения дистиллированной воды и после кипения наножидкости ALSi-7 [13].

шению в зависимости от температуры плавления применяемого металла.

Кипение обычной воды (водопроводной, бюветной, питьевой) сопровождается вначале образованием на поверхности нагрева прерывистого слоя накипи вокруг центров парообразования, который постепенно уплотняется (рис.3).

Осадок образуется вследствие термического разложения и конденсации на поверхности нагрева молекул растворимых солей жесткости (гидрокарбонатов), имеющих в большом количестве в обычных водах:



где Me — обычно ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} .

Отложившиеся в начале кипения частицы нерастворимых карбонатов повышают шероховатость поверхности нагрева, создавая новые центры парообразования. Это временно усиливает пузырьковое кипение, обеспечивая более высокий УТП, чем у ДВ. Однако при дальнейшем кипении ВВ слой накипи резко уплотняется, и термическое сопротивление нагревателя растет, как в многослойной стенке, где коэффициент теплопроводности $\lambda_{ос}$ внешнего слоя меньше теплопроводности металлической стенки $\lambda_{ст}$ примерно в 10 раз. Все это приводит к резкому скачку температуры и пережогу нагревателя при фиксированных значениях теплового потока.

Совершенно иной характер отложений и изменения УТП наблюдается при кипении НЖ (см. рис.2 и 4).

В отличие от ВВ, при кипении которой отложения на нагревателе возникают в ре-

зультате конденсации молекул карбонатов, процесс кипения НЖ сопровождается отложением наночастиц и их агрегатов с образованием ажурной пористой или гелеобразной структуры, пронизанной порами макро-, микро- и наноразмеров, обеспечивающих устойчивый пузырьковый режим кипения. Благодаря этому происходит резкая интенсификация теплообмена, увеличиваются УТП и коэффициент теплоотдачи [14].

В основу рассмотрения процесса кипения однофазных жидкостей положена следующая физическая модель [18]: тепло от греющей поверхности к жидкости передается периодически каждым пузырьком вследствие перемещения перегретой пристенной жидкости в слой жидкости, отдаленные от поверхности, а также испарением в пузырьки, которые возникают на поверхности нагрева; к месту отрыва пузырька подтекает менее подогретая («свежая») жидкость из объема, где она перегревается и испаряется.

Отличие физической модели кипения наножидкостей от рассматриваемой модели для однокомпонентной жидкости связано с присутствием наночастиц в наножидкостях. При низких содержаниях эти частицы не столько меняют теплофизические и физико-химические свойства НЖ по сравнению с базовыми жидкостями,

сколько влияют на состояние поверхности нагревателя, образуя на этой поверхности рыхлый слой с повышенными шероховатостью, пористостью и смачиваемостью (рис.4). Это приводит к изменению внутренних характеристик процесса и к интенсификации пузырькового кипения наножидкостей.

В [14, 15] показано, что ключевым фактором роста интенсивности теплоотдачи при кипении наножидкостей является изменение природы и микрорельефа поверхности нагрева в результате отложения на ней слоя наночастиц (рис.5), служащих генераторами образования пузырьков.

Так как феномен отложения наночастиц на поверхности нагрева при кипении НЖ связан с местным перегревом и испарением жидкости в местах образования пузырьков, то при постепенном увеличении тепловой нагрузки это приводит к увеличению толщины и плотности этого слоя. В пористом слое наночастиц постепенно нарушается циркуляция жидкости и пара. Пар, количество которого увеличивается, начинает постепенно, ища выход, вытеснять «холодную» жидкость, которая двигалась ей навстречу, поступая из объема из-за пределов перегретой жидкости (рис.6).

Когда количество каналов, в которых вместо воды начал перемещаться пар, возрастет настолько, что слой наночастиц из-за увеличения температуры начинает перекристаллизовываться, часть этого слоя, приближенного к греющей поверхности, «оплавляясь», приобретает свойства

твердого тела со сравнительно низким коэффициентом теплопроводности. Закономерным результатом таких изменений является увеличение суммарного термического сопротивления отложенного слоя наночастиц, резкий скачок температуры и пережог нагревателя.

На основе рассмотренной физической модели можно представить математическую зависимость удельного теплового потока от теплофизических свойств жидкостей, внутренних харак-

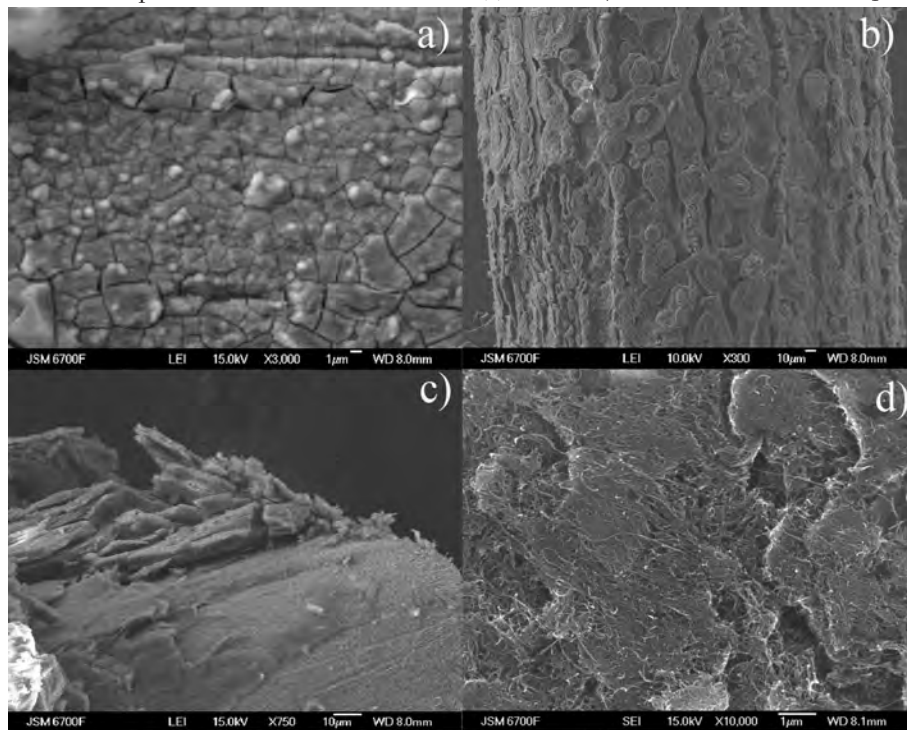


Рис.5. ESM-изображения отложений на поверхности нагрева после кипения водных наножидкостей на основе гидрослюда (а), TiO_2 (б), природной смеси аттапулгита и монтмориллонита (с) и этой же смеси с добавкой углеродных нанотрубок (д) [14, 15].

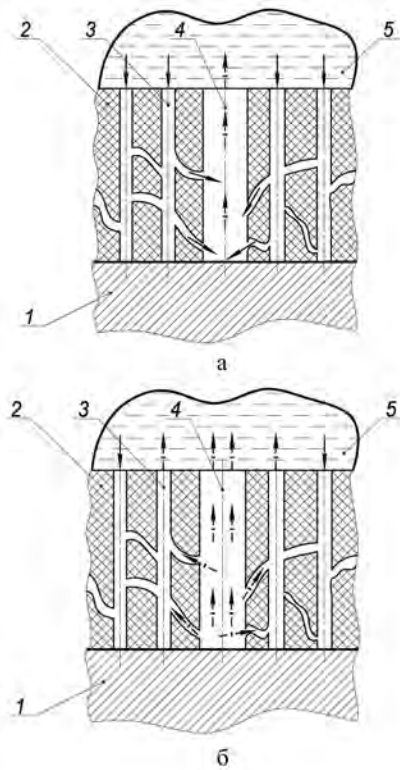


Рис.6. Схема циркуляции пара и «охлаждающей» жидкости в пористом слое наночастиц на поверхности нагрева до (а) и после (б) его перекристаллизации: 1 – нагреватель; 2 – пористый слой наночастиц; 3 – жидкостный канал; 4 – паровой канал; 5 – наножидкость.

теристик процесса кипения и шероховатости поверхности нагрева [18]:

$$Q = N V f [\beta \rho_{ж} C_{ж} \Delta t_v + \rho_{п}], \quad (1)$$

где Q – удельный тепловой поток, Вт/м²; N – плотность центров парообразования, 1/м²; V – объем отрывного пузырька, м³; f – частота отрыва паровых пузырьков, 1/с; β – отношение объема перегретой перемещенной жидкости к объему отрывного пузырька; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости в ядре потока, кг/м³; $C_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкости при постоянном давлении, Дж/(кг·К); Δt_v – разница усредненной температуры перегретой пристенной жидкости

$T_{прист}$ и температуры кипения жидкости, К, $\Delta t_v = T_{прист} - T_{ж}$; $\rho_{п}$ – удельная теплота парообразования, Дж/кг; $\rho_{п}$ – плотность пара, кг/м³.

Форма пузырька принимается сферической, а величина отрывного диаметра парового пузырька определяется из следующего уравнения [19]:

$$D_{отр} = C_2 (\rho_{ж} C_{ж} T_{ж} / \rho_{п} r)^{3/4} \times [\sigma / (g (\rho_{ж} - \rho_{п}))]^{1/2}, \quad (2)$$

где C_2 – коэффициент, который определяется по экспериментальным данным; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; g – ускорение свободного падения, м/с².

Связь между отрывным диаметром парового пузырька и частотой отрыва представлена в уравнении для произведения этих величин [19]:

$$f D_{отр} = C_3 (\rho_{ж} C_{ж} T_{ж} / \rho_{п} r) \times [\sigma (\rho_{ж} - \rho_{п}) / \rho_{ж}^2]^{1/4}, \quad (3)$$

где C_3 – коэффициент, который определяется по экспериментальным данным.

Вероятное значение коэффициента $\beta = 1,42$ (доверительный интервал от 1,36 до 1,48 при коэффициенте надежности 0,95).

Плотность центров парообразования (1/м²) рассчитывается так:

$$N = (2/C_1) [0,4986 - \Phi_0 \cdot 2 \sigma T_s / (r \rho_{п} \Delta T N_{ск})], \quad (4)$$

где Φ_0 – табулированная функция Лапласа; $N_{ск}$ – среднеквадратичное отклонение размеров неровностей на поверхности нагрева, которое связано с пористостью отложенного слоя наночастиц (табл.2).

Для определения разницы температур Δt_v пристенной жидкости и температуры кипения жидкости необходимо знать кривую распределения температур в пристенном перегретом слое (рис.7, 8). Характер таких кривых изображен на рис.8 в декартовых и логарифмических координатах. Соответственно, зависимость $\Delta t = f(x)$ может быть представлена в виде показа-

Таблица 2. Характеристики наноструктурированных покрытий после кипения наножидкостей

Наножидкости	Удельная поверхность, м ² /г	Средний радиус микропор, нм	Объем микропор, см ³ /г	УТП, q, МВт/м ²	КТО, α, Вт/(м ² ·К)
Наножидкости на основе: монтмориллонита	85,0	4,2	0,2	1,2	28000
смеси аттапульгит + монтмориллонит (1:1)	375	3,0	0,54	2,5	37000
смеси аттапульгит + монтмориллонит + углеродные нанотрубки (0,2 %)	420	2,3	0,62	3,5	52000

тельной функции, в частности, $\Delta t = C_0 x^{-k}$. Подставляя это уравнение в уравнение (5) [20]

$$\Delta t_v = t_v - t_\infty = \frac{D_{i\delta\delta} \int_0^{D_{i\delta\delta}} (xD_{i\delta\delta} - x^2) [\Delta t(x_1c) + t_\infty] dx}{D_{i\delta\delta}^3} - t_\infty \quad (5)$$

и проинтегрировав его, получаем выражение для определения перегрева объема пристенной жидкости в ядре потока отрывающихся пузырьков:

$$\Delta t_v = \frac{D_{i\delta\delta} \int_0^{D_{i\delta\delta}} (xD_{i\delta\delta} - x^2) (C_0 x^{-k} + t_\infty) dx}{D_{i\delta\delta}^3} - t_\infty = \frac{6 C_0}{D_{i\delta\delta}^k (2-k)(3-k)} \quad (6)$$

Для определения Δt_v отрывной диаметр парового пузырька рассчитывали по уравнению (2), а коэффициенты k и C_0 находили на основании экспериментальных кривых распределения температур в пристенном перегретом слое [18].

На основе полученных экспериментальных данных в рамках представленной физической модели процесса кипения (рис.6–9), табличных значений теплофизических свойств жидкостей, экспериментальных констант C_0, C_1, C_2, C_3, k и характеристик шероховатости поверхности $H_{ск}$ (см. табл.1, 2) по уравнению (1) были рассчитаны значения УТП (рис.9,а) для четырех участков кривой кипения. Для каждого участка использованы экспериментально полученные константы. Сопоставление расчетных данных с классической и экспериментально полученной кривой (ис.9,б) указывает на их удовлетворительное согласие, то есть данная математическая модель процесса кипения является адекватной полученным экспериментальным данным.

Из сравнения данных табл.2 следует, что величина достигаемого УТП тем выше, чем больше объем и чем меньше диаметр микропор отложенного пористого слоя. Поскольку приток жидкости в зону интенсивного испарения осуществляется градиентом капиллярного давления

$$dP_L/dr = -2 d/dr (\sigma H)$$

(где H – средняя кривизна жидкой пленочной поверхности), то становится понятным, почему значение УТП повышается с уменьшением диаметра микропор отложенного осадка на поверхности нагрева.

Как видно из рис.4,б, при кипении НЖ на основе диоксида титана отложенный осадок об-

ладает иерархической пористой структурой. Очевидно, что такой пористый слой обеспечивает подвод к нагревателю по микропорам относительно «холодной» (100 °С) кипящей жидкости из объема экспериментального сосуда и отвод паровой фазы (пузырьков) в сосуд по микроканалам большего диаметра. Возможно также, что подобный осадок препятствует образованию паровой рубашки, являющейся характерным признаком пленочного кипения.

В то же время осадки, отложившиеся при кипении наножидкостей AlSi-7 и AlSi-7 + УНТ (рис.4,с,д), имеют гелеобразную подвижную

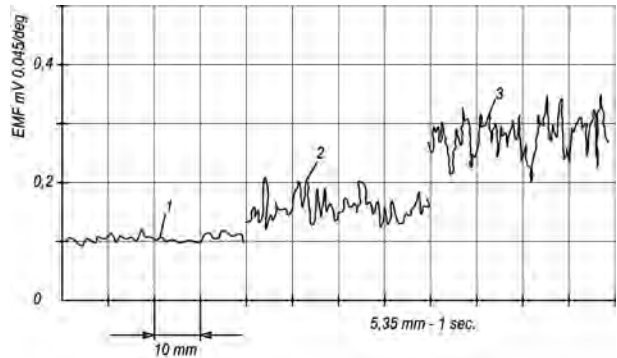


Рис.7. Пульсации температур по толщине перегретого пористого слоя при расстоянии от поверхности нагрева, мм: 1 – 1,39; 2 – 0,24; 3 – 0,06 [18].

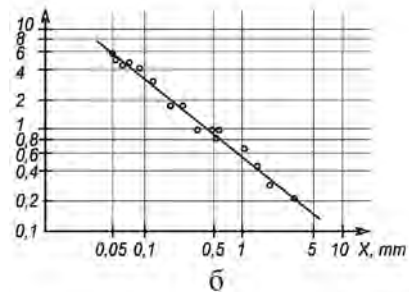
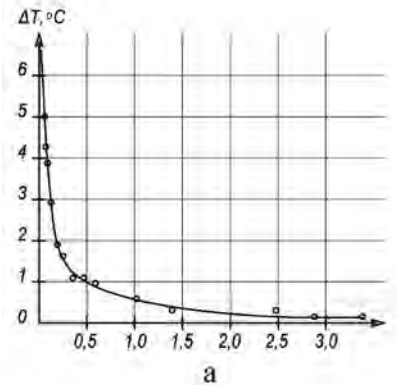


Рис.8. Усредненные профили температур в пристенном перегретом слое в декартовых (а) и логарифмических (б) координатах [18].

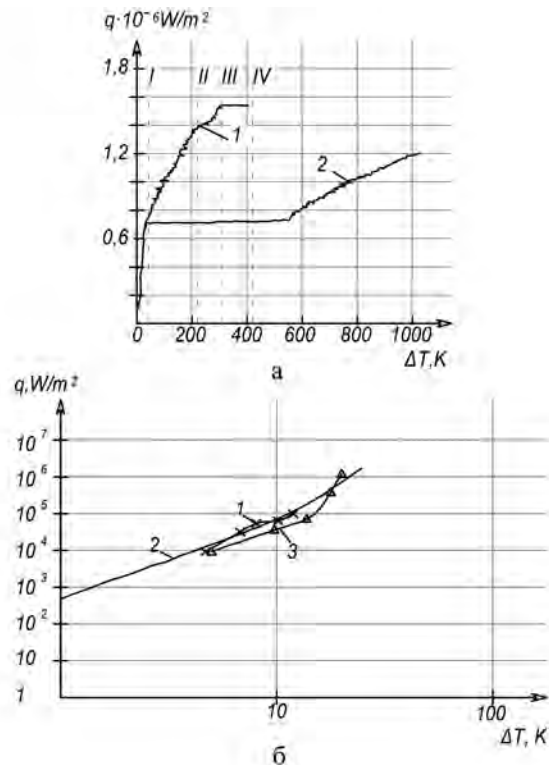


Рис.9. Зависимость УТП от температурного напора ΔT (а) для наножидкости гидрослюды (1) и дистиллированной воды (2) и проверка адекватности модели на основе полученных результатов (б).

структуру, а тепловые параметры q и α достигают еще более высоких значений. В этих случаях осадок обратим, по крайней мере его верхние слои, и механизм теплопереноса иной. Вероятно, что на поверхности кипения существует подвижная нестационарная структура, которая обеспечивает подвод неперегретой жидкости к нагревателю и отвод перегретого пара от него.

Интенсивность теплообмена поддерживается до тех пор, пока существует данная гидродинамическая система. Решающим фактором при этом является ее неустойчивость. Это позволяет центрам кипения перемещаться по поверхности нагревателя и препятствовать расширению «горячих» и «сухих» пятен на кипящей поверхности, что отодвигает кризис кипения, характерный для дистиллированной воды.

Выводы

На величину УТП наибольшее влияние оказывает плотность центров парообразования, зависящая от шероховатости поверхности нагрева, которая, в свою очередь, зависит от природы НЖ, формы и анизотропии наночастиц.

Максимально достижимый УТП при кипении НЖ значительно больше, чем для воды, из-за отложения слоя наночастиц, который, уменьшая отрывной диаметр пузырьков, существенно увеличивает частоту их отрыва, а также повышает плотность центров парообразования.

Выявлен механизм кипения НЖ и рассчитана интенсивность этого процесса. Сопоставлены известные механизмы переноса тепла при кипении однофазных жидкостей с новым модифицированным механизмом для НЖ.

Список литературы

1. Nan C.-W., Birringer R., Clarke D.R., Gleiter H. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance // *Journal of Applied Physics*. — 1997. — Vol. 81, № 10. — P. 6692–6699.
2. Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thompson L.J. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles // *Applied Physics Letters*. — 2001. — Vol. 78. — P. 718–720.
3. Keblinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids) // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2002. — Vol. 45. — P. 855–863.
4. Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements // *Heat Transfer Engineering*. — 2008. — Vol. 29, № 5. — P. 432–460.
5. Das, S.K., Putra, N., Roetzel, W. Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2003. — Vol. 46. — P. 851–862.
6. Milanova, D., Kumar, R. Role of Ions in Pool Boiling Heat Transfer of Pure and Silica Nanofluids // *Applied Physics Letters*. — 2005. — Vol. 87. — P. 233107.
7. Bang I.C., Chang, S.H. Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al_2O_3 -water NanoFluids From a Plain Surface in a Pool // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2005. — Vol. 48. — P. 2407–2419.
8. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids // *Applied Physics*. — 2006. — Vol. 89. — P. 153107-1-3.
9. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Study of Pool Boiling and Critical Heat flux Enhancement in Nanofluids, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences // Technical Sciences*. — 2007. — Vol. 55, № 2. — P. 211–216.
10. Kim, S.J., Bang, I.C., Buongiorno, J., and Hu, L.W. Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat

- Flux // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 2007. — Vol. 50. — P. 4105–4116.
11. Jo, B., Jeon, P.S., Yoo, J., Kim, H. J. Wide Range Parametric Study for the Pool Boiling of Nano-Fluids With a Circular Plate Heater // Journal of Visualization. — 2009. — Vol. 12. — P. 37–46.
 12. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I., Snigur A.V. Some peculiarities of heat exchange at pool boiling of aluminosilicates–water based nanofluids // Proceedings of the 8th International Symposium on Heat Transfer (ISHT8–04–05,) Beijing, China, Oct. 21–24, 2012, . — P. 181–190.
 13. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Plienko B.K., Khovavko A.I., Komysh D.V., Panov E.M., Sydorenko S.V., Snigur O.V. Study of a heat transfer mechanism and critical heat flux at nanofluids boiling // International Journal of Energy for a Clean Environment. — 2013. — Vol. 14, № 2–3. — P. 151–168.
 14. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I. Nanostructured Architectures on the Heater Surface at Nanofluids Boiling and Their Role in the Intensification of Heat Transfer // Nanoscience and Nanoengineering. — 2016. — Vol. 4, № 1. — P. 12–22.
 15. Морару В.Н., Комыш Д.В., Ховавко А.И., Снигур А.В., Гудков Н.Н., Сидоренко Н.А. Влияние состояния поверхности нагрева на интенсивность теплоотдачи при кипении наножидкостей // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2015. — № 2. — С. 25–33.
 16. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. — М. : Атомиздат, 1979/ — 416 с.
 17. Пат. 42594 Укр., МПК G 01 N 25/00. Спосіб визначення щільності центрів пароутворення при кипінні рідин на зовнішніх поверхнях нагрівання / С.В.Сидоренко, Н.В.Середюк. — Опубл. 10.07.2009, Бюлл. № 13.
 18. Chernobylsky I.I., Pavlishchev M.I., Sidorenko S.V. Investigation of the mechanism of heat transfer in boiling liquids // Digest of Chemical Engineering. — 1973. — № 18. — P. 80–87.
 19. Толубинский В.И., Островский Ю.Н. Механизм парообразования и интенсивность теплообмена при кипении бинарных смесей. Теплоотдача при изменении агрегатного состояния вещества. — Киев : Наук. думка, 1966. — 256 с.
 20. Павлицев М.И. Некоторые соображения по теории кипения // Труды КПИ. Сб. науч. работ асп. механ. фак — 1962. — Т. 37. — С. 173–189.

Поступила в редакцию 20.07.17

Морару В.Н., канд. хім. наук

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: vasily.moraru@gmail.com

Механізм підвищення та кількісна оцінка питомого теплового потоку при кипінні нанорідин в умовах вільної конвекції

Результати наших робіт та ряду зарубіжних досліджень свідчать про те, що різке підвищення параметрів теплопереносу (питомого теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі) при кипінні нанорідин у порівнянні з базовою рідиною (водою) обумовлено не тільки та не стільки збільшенням теплопровідності нанорідин, скільки інтенсифікацією процесу кипіння, спричиненою зміною стану поверхні нагрівання, її топологічних та хімічних властивостей (пористості, жорсткості, змочування). Останнє призводить до зміни внутрішніх характеристик процесу кипіння та усередненої температури перегрітого шару рідини. Ця обставина дає змогу на підставі фізичних моделей кипіння рідин та обліку параметрів стану поверхні (температури, тиску) та властивостей теплоносія (щільності та теплоємності рідини, питомої теплоти пароутворення та теплоємності пари), а також внутрішніх характеристик процесу кипіння рідин, розрахувати величину питомого теплового потоку. Вивчено відмінність у механізмах теплопереносу при кипінні однофазних (води) та двофазних нанорідин та проведено кількісну оцінку величин питомого теплового потоку при кипінні нанорідин, виходячи з внутрішніх характеристик процесу кипіння. Задовільна узгодженість розрахункових значень з експериментальними даними підтверджує те, що ключовим фактором зростання інтенсивності тепловіддачі при кипінні нанорідин є зміна природи і мікрорельєфу поверхні нагрівання. *Бібл. 20, рис. 9, табл. 2.*

Ключові слова: нанорідини, теплообмін, поверхня нагріву, розрахунок питомого теплового потоку.

Moraru V.N., Candidate of Chemical Sciences
The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
 39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: vasily.moraru@gmail.com

The Mechanism of Raising And Quantification of Specific Heat Flux at Boiling of Nanofluids in Free Convection Conditions

The results of our work and a number of foreign studies indicate that the sharp increase in the heat transfer parameters (specific heat flux q and heat transfer coefficient α) at the boiling of nanofluids as compared to the base liquid (water) is due not only and not so much to the increase of the thermal conductivity of the nanofluids, but an intensification of the boiling process caused by a change in the state of the heating surface, its topological and chemical properties (porosity, roughness, wettability). The latter leads to a change in the internal characteristics of the boiling process and the average temperature of the superheated liquid layer. This circumstance makes it possible, on the basis of physical models of the liquids boiling and taking into account the parameters of the surface state (temperature, pressure) and properties of the coolant (the density and heat capacity of the liquid, the specific heat of vaporization and the heat capacity of the vapor), and also the internal characteristics of the boiling of liquids, to calculate the value of specific heat flux q . In this paper, the difference in the mechanisms of heat transfer during the boiling of single-phase (water) and two-phase nanofluids has been studied and a quantitative estimate of the q values for the boiling of the nanofluid is carried out based on the internal characteristics of the boiling process. The satisfactory agreement of the calculated values with the experimental data is a confirmation that the key factor in the growth of the heat transfer intensity at the boiling of nanofluids is indeed a change in the nature and microrelief of the heating surface. *Bibl. 20, Fig. 9, Tab. 2.*

Key words: nanofluids, heat transfer, heating surface, calculation of specific heat flux.

References

1. Nan C.-W., Birringer R., Clarke D.R., Gleiter H. Effective thermal conductivity of particulate composites with interfacial thermal resistance, *Journal of Applied Physics*, 1997, 81 (10), pp. 6692–6699.
2. Eastman J.A., Choi S.U.S., Li S., Yu W., Thompson L.J. Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 2001, 78, pp. 718–720.
3. Koblinski P., Phillpot S.R., Choi S.U.S., Eastman J.A. Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002, 45, pp. 855–863.
4. Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements, *Heat Transfer Engineering*, 2008, 29 (5), pp. 432–460.
5. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool Boiling Characteristics of Nano-Fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, 46, pp. 851–862.
6. Milanova, D., Kumar, R. Role of Ions in Pool Boiling Heat Transfer of Pure and Silica Nanofluids, *Applied Physics Letters*, 2005, 87, pp. 233107.
7. Bang, I.C., Chang, S.H. Boiling Heat Transfer Performance and Phenomena of Al₂O₃-water Nanofluids From a Plain Surface in a Pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48, pp. 2407–2419.
8. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Effects of nanoparticle deposition on surface wettability influencing boiling heat transfer in nanofluids, *Applied Physics*, 2006, 89, pp. 153107–1–3.
9. Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W. Study of Pool Boiling and Critical Heat flux Enhancement in Nanofluids, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, 2007, 55 (2), pp. 211–216.
10. Kim, S.J., Bang, I.C., Buongiorno, J., Hu, L.W. Surface Wettability Change During Pool Boiling of Nanofluids and Its Effect on Critical Heat Flux, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50, pp. 4105–4116.
11. Jo, B., Jeon, P.S., Yoo, J., Kim, H. J. Wide Range Parametric Study for the Pool Boiling of Nano-Fluids With a Circular Plate Heater, *Journal of Visualization*, 2009, 12, pp. 37–46.
12. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I., Snigur A.V. Some peculiarities of heat exchange at pool boiling of aluminosilicates-water based nanofluids, *Proceedings of the 8th International Symposium on Heat Transfer (ISHT8-04-05)*, Beijing, China, Oct. 21–24, 2012, pp. 181–190.

13. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Ilienکو B.K., Khovavko A.I., Komysh D.V., Panov E.M., Sydorenko S.V., Snigur O.V. Study of a heat transfer mechanism and critical heat flux at nanofluids boiling, *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2013, 14 (2–3), pp. 151–168.
14. Bondarenko B.I., Moraru V.N., Sydorenko S.V., Komysh D.V., Khovavko A.I. Nanostructured Architectures on the Heater Surface at NanoFluids Boiling and Their Role in the Intensification of Heat Transfer, *Nanoscience and Nanoengineering*, 2016, 4 (1), pp. 12–22.
15. Moraru V.N., Komysh D.V., Khovavko A.I., Snigur O.V., Gudkov N.N., Sydorenko N.A. [Influence of Heat Surface Properties on Intensity of Heat Exchange at Nanofluids Boiling], *Energotehnologii i Resursosberezhene, [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2015, (2), pp. 25–33. (Rus.)
16. Kutateladze S.S. [Fundamentals of the theory of heat transfer], Moscow : Atomizdat, 1979, 416 p. (Rus.)
17. Pat. 42594 UA, MPK G 01 N 25/00. [Method for determination of boiling centers density at boiling of liquids on outer heating surfaces], S.V.Sydorenko, N.V.Serediyuk, Publ. 10.07.2009, Bul. 13. (Ukr.)
18. Chernobytsky I.I., Pavlishchev M.I., Sidorenko S.V. Investigation of the mechanism of heat transfer in boiling liquids, *Digest of Chemical Engineering*, 1973, (18), pp. 80–87. (Rus.)
19. Tolubinsky V.I., Ostrovsky Yu.N. [The mechanism of vaporization and the intensity of heat exchange during the boiling of binary mixtures. Heat transfer at the changes of aggregate state of a substance], Kiev : Naukova Dumka, 1966, 256 p. (Rus.)
20. Pavlishchev M.I. [Some considerations on the theory of boiling], *Proceedings of the KPI, Collection of scientific works of post-graduate students of the Faculty of Mechanics*, 1962, 37, pp. 173–189. (Rus.)

Received July 20, 2017