

УДК 541.182

## ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Авраменко А.А., член-корреспондент НАН Украины, Ковецкая М.М., канд. техн. наук, Тыринов А.И., канд. техн. наук

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина

В роботі проаналізовано результати досліджень бульбашкового та плівкового режимів кипіння нанорідин. Результати експериментальних досліджень бульбашкового режиму кипіння нанорідин свідчать про підвищення критичного теплового потоку порівняно з чистою рідиною, при цьому спостерігається як збільшення, так і зменшення коефіцієнта тепловіддачі. В режимі плівкового кипіння нанорідини спостерігається значне прискорення процесу руйнування паровій плівки і переходу до бульбашкового режиму в експериментах з гартування металевих виробів.

В работе проанализированы результаты исследований пузырькового и пленочного режимов кипения наножидкостей. Результаты экспериментальных исследований пузырькового режима кипения наножидкостей свидетельствуют о повышении критического теплового потока по сравнению с чистой жидкостью, при этом наблюдается как увеличение, так и уменьшение коэффициента теплоотдачи. В режиме пленочного кипения наножидкости наблюдается существенное ускорение процесса разрушения паровой пленки и перехода к пузырьковому режиму в экспериментах по закалке металлических изделий.

The paper analyzes the results of research for nucleate and film boiling of nanofluids. The results of experimental studies of nucleate boiling nanofluids indicates increasing critical heat flux in comparison with the clean liquid, while there is both an increase and a decrease in the heat transfer coefficient. At film boiling nanofluids mode there is a significant acceleration of the process of destruction of the vapor film and the transition to nucleate regime for hardening metal products experiments.

Библ. 31, рис. 3.

**Ключевые слова:** кипение наножидкостей, теплообмен, критический тепловой поток.

КТП – критический тепловой поток;  
 $T$  – температура;  
 $c$  – теплоемкость;  
 $d^p$  – диаметр;  
 $f$  – частота отрыва пузырей;  
 $q$  – плотность теплового потока;  
 $n$  – плотность центров парообразования;  
 $r$  – теплота парообразования;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $t$  – время;  
 $\theta$  – угол смачивания;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\mu$  – молекулярная вязкость;

$\rho$  – плотность;  
 $\delta$  – толщина микрослоя;  
 $\sigma$  – поверхностное натяжение;  
 $\varphi$  – массовая концентрация.

**Индексы:**

$b$  – пузырек;  
 $f$  – наножидкость;  
 $v$  – пар;  
 $l$  – вода;  
 $p$  – наночастицы;  
 $w$  – стенка;  
 $\infty$  – значение на межфазной поверхности пар-жидкость.

**Введение**

Использование наножидкостей (суспензии наночастиц в базовой жидкости) является перспективным для улучшения теплопередачи во многих областях промышленности таких, как холодильная техника, микроэлектроника, ядерная энергетика, металлургия. Во многих промышленных процессах пузырьковое кипение наножидкости является предпочтительным благодаря высокой эффективности отвода теплоты. Однако не достаточное понимание механизмов, ответственных за кардинальные изменения теплопередачи в жидкостях с добавлением наночастиц и отсутствие моделей прогнозирования этих изменений препятствуют их широкому применению в промышленности.

Результаты исследований, посвященных теплообмену при пузырьковом кипении наножидкости, свидетельствуют об увеличении критического теплового потока в наножидкостях по сравнению с чистыми жидкостями,

при этом наблюдается как увеличение, так и уменьшение коэффициентов теплоотдачи [1-6]. Большинство исследователей связывают повышение критического теплового потока с изменением таких характеристик, как шероховатость и смачиваемость теплообменной поверхности, в результате осаждения наночастиц при кипении наножидкостей. Отмечается наличие большого количества нерешенных проблем, связанных с изучением механизмов кипения в наножидкостях.

*Пузырьковое кипение*

Для определения механизмов процесса кипения наножидкости очень важны экспериментальные данные, сопровождающиеся визуализацией процесса, которые позволяют оценить изменение внутренних характеристик кипения (отрывной диаметр тузурьков, частоту их отрыва, плотность центров парообразования), что необходимо для разработки математических моделей прогнозирования теплообмена.

В работе [7] представлены результаты экспериментальных исследований по определению критического теплового потока на плоской пластине, находящейся под слоем наножидкости. В качестве наножидкости использовалась суспензия этилового спирта с наночастицами  $Al_2O_3$  концентрацией 0,01 % по объему. Средний размер наночастиц составил 118,2 нм. Получено незначительное увеличение критического теплового потока: 530 кВт/м<sup>2</sup> для наножидкости и 480 кВт/м<sup>2</sup> для чистой жидкости. Зафиксированы отличия в процессе перехода к кризису теплообмена в результате повышения плотности теплового потока для наножидкости. В процессе перегрева наножидкости наблюдалось несколько участков локального перегрева, далеких от основного участка. Границы участков перегрева не регулярные с присутствием холодных пятен внутри и вокруг участка локального перегрева. В отличие от этого, участок локального перегрева в чистом этиловом спирте расширяется регулярно с гладкой эллиптической границей. В наножидкости процесс расширения участка локального перегрева полуволновой во времени: сначала участок локального перегрева расширяется, затем уменьшается и, наконец, снова расширяется, достигая максимального размера при критическом тепловом потоке.

Различие в поведении кривых кипения объясняется появлением слоя наночастиц на поверхности нагревателя, толщина которого достигала нескольких микронов. Этот слой может изменять угол смачиваемости поверхности и плотность образования зародышей пузырьков. Кроме того образование слоя наночастиц способствует увеличению радиальной теплопроводности обогреваемой поверхности.

В работе [8] представлены экспериментальные данные характеристик теплоотдачи при кипении наножидкости на проволоке NiCr диаметром 0,19 мм. В качестве наножидкости использовалась вода с наночастицами глинозема и окиси меди. Визуализация процесса кипения наножидкости с частицами глинозема концентрацией 0,1 г/л показала увеличение диаметра пузырьков по сравнению с чистой жидкостью при приближении плотности теплового потока к критическому значению 1407 кВт/м<sup>2</sup>. Средний диаметр пузырей составлял 0,382 мм, что на 0,084 мм больше, чем в чистой воде, при этом частота отрыва пузырей оставалась практически такой же, как в чистой воде. С увеличением плотности теплового потока увеличивался отрывной диаметр пузырей и уменьшалась их заселенность. Измерения шероховатости поверхности показали ее уменьшение от 0,33 мкм до 0,30 мкм, т.е. в результате испытаний поверхность стала более гладкой и количество центров парообразования уменьшилось.

Результаты экспериментов при кипении наножидкости CuO/вода при концентрации наночастиц 0,3 г/л также показали увеличение критического теплового потока на 30 % по сравнению с чистой водой. Средняя шероховатость поверхности уменьшилась с 0,33 мкм до 0,28 мкм. Установление предварительного режима кипения при мощности 700 кВт/м<sup>2</sup> в течение 15 и 30 мин в опытах по определению КТП показало увеличение

на 5,21 % и 6,77 % критического теплового потока по сравнению с режимами без предварительной выдержки. Длительная выдержка поверхности нагрева в кипящем режиме способствовала осаждению наночастиц на поверхности и более высокому перегреву поверхности при достижении критического теплового потока.

Если значения критического теплового потока при кипении наножидкости как правило больше чем в чистой жидкости, то коэффициенты теплоотдачи при кипении могут быть как больше, так и меньше в наножидкости по сравнению с чистой жидкостью [9]. В цилиндрическом сосуде диаметром 10 см, высотой 10 см исследовались коэффициенты теплоотдачи наножидкостей Au/вода,  $SiO_2$ /вода,  $SiO_2$ /этилен гликоль. Результаты исследований с наножидкостью Au/вода массовой концентрацией 0,0002 % и 0,001 % показали, что коэффициент теплоотдачи наножидкости выше, чем у чистой воды и увеличивается с увеличением концентрации золота. Однако для наножидкостей  $SiO_2$ /вода, и  $SiO_2$ /этилен гликоль коэффициент теплоотдачи ниже, чем у базовых жидкостей. Ухудшение теплоотдачи при кипении наблюдалось также для наножидкости CuO/вода по сравнению с чистой водой.

Исследовались характеристики кипения наножидкости с наночастицами  $Al_2O_3$  при атмосферном давлении на трубке диаметром 20 мм [10]. Отмечается, что наличие наночастиц увеличивает степень перегрева для данной тепловой нагрузки и уменьшает интенсивность кипения. Интенсивность кипения ухудшалась с увеличением концентрации наночастиц и шероховатости поверхности. С уменьшением диаметра трубки интенсивность кипения увеличивается, что связано с большей кривизной поверхности и лучшей эвакуацией пузырей.

В работе [11] представлены результаты исследования особенности теплоотдачи при кипении наножидкости  $Al_2O_3$ /вода на плоской поверхности. С увеличением концентрации наночастиц наблюдалось увеличение критического теплового потока на 32 % для горизонтальной и на 13 % для вертикальной поверхности. Коэффициент теплоотдачи наножидкости оказался ниже, чем в чистой жидкости, при этом наблюдался сдвиг кривой кипения вправо, в область более высоких перегревов. Для определения коэффициента теплоотдачи наножидкости предлагается использовать зависимость [12] с учетом изменения физических свойств жидкости и смачиваемости поверхности

$$\alpha = \frac{1}{C_{sf}} \left[ \frac{c_{pf} q}{r} \right] \left[ \frac{q}{\mu_f i_{fg}} \left( \frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right)^{1/2} \right]^{-n} \left[ \frac{c_f \mu}{k} \right]_f^{-(m+1)} \quad (1)$$

где  $C_{sf}$  – константа, характеризующая свойства поверхности. Изменением  $C_{sf}$  добивались согласования результатов расчета по формуле (1) с экспериментальными данными коэффициента теплоотдачи наножидкости с разной концентрацией наночастиц. В рассматриваемых экспериментах шероховатость поверхности нагревателя была меньше, чем размер наночастиц. Визуализация процесса кипения наножидкости оказалась возможной только при высоком тепловом потоке (более 500 кВт/м<sup>2</sup>) и низкой концентрации наночастиц (0,5 % по объему).

По результатам экспериментальных исследований шероховатость поверхности нагревателя увеличивалась с увеличением концентрации наночастиц. Уменьшение коэффициента теплоотдачи объясняется сокращением количества активных центров парообразования в результате изменения шероховатости поверхности. Для предсказания наблюдавшегося в экспериментах увеличения критического теплового потока в наножидкости с увеличением концентрации наночастиц используется зависимость для кипения в бассейне [13]

$$q_{CHF} = C_{CHF,f}(\theta) \rho_g r \left[ \frac{\sigma(\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4}, \quad (2)$$

$$C_{CHF,water}(\theta) = 0.034 + 0.0037(180 - \theta)^{0.656}$$

Повышение критического теплового потока в наножидкости также объясняется изменением шероховатости поверхности, формированием нанопористого покрытия, что приводит к менее активному зарождению пузырей и более позднему формированию паровой

пленки на поверхности нагревателя.

Экспериментально исследовали кипение наножидкости  $Al_2O_3$ /вода в бассейне при концентрации наночастиц, изменяющейся от 0 до 0,05 г/л [14]. Обнаружили увеличение критического теплового потока в наножидкости почти в 3 раза по сравнению с чистой водой, при этом коэффициенты теплоотдачи для наножидкости и воды были практически одинаковы. Визуализация процесса кипения показала увеличение отрывного диаметра пузырьков и уменьшение частоты их отрыва с увеличением концентрации наночастиц. Экспериментальные данные критического теплового потока удовлетворительно описывались зависимостью [15]

$$q_{CHF} = 0,131 \rho_v^{1/2} r [\sigma g(\rho_l - \rho_v)]^{1/4}. \quad (3)$$

Формирование тонкого пористого слоя наночастиц на поверхности нагревателя в процессе кипения наблюдается в большинстве экспериментальных исследований. На рис. 1 показан механизм осаждения наночастиц в микрослое при кипении [16].

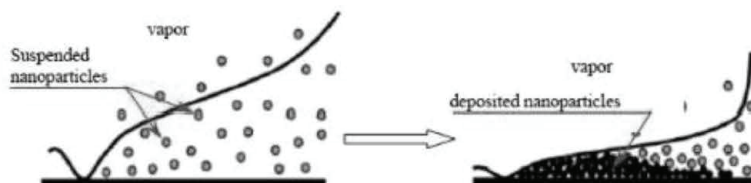


Рис. 1. Механизм осаждения наночастиц в микрослое испарения [16].

Тонкий слой наночастиц значительно улучшает смачиваемость поверхности и может быть основным фактором, вызывающим увеличение критического теплового потока. С другой стороны, осаждение наночастиц может увеличить или уменьшить шероховатость поверхности, в зависимости от начальной шероховатости поверхности и размера наночастиц, что в свою очередь может увеличить или уменьшить плотность активных центров парообразования. Эти факторы, работающие вместе, приводят к улучшению или ухудшению теплоотдачи при кипении наножидкости.

Кроме того, при кипении толщина нанослоя может изменяться во времени, вызывая непрерывное изменение микроструктуры поверхности нагрева. В работе [17] дается следующая зависимость изменения во времени толщины нанослоя  $\delta_n$  в зависимости от параметров пузырькового кипения и объемной концентрации наночастиц  $\varphi$

$$\frac{d\delta_n}{dt} \sim \delta_m \frac{\pi}{4} d_b^2 \varphi n f, \quad (4)$$

$\delta_m$  – толщина микрослоя жидкости. Результаты экспериментов при кипении наножидкостей на водной основе с наночастицами  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$  с концентрацией 0,01 % по объему свидетельствуют об увеличении критического теплового потока при уменьшении угла смачиваемости поверхности. Так при уменьшении угла  $\theta$  от  $\pi/2$  до  $\pi/4$  наблюдалось увеличение КТП в 1,4 раза, а при уменьшении угла до  $\pi/8$  в 1,8 раза [17].

С другой стороны, есть экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что при полном покрытии слоем наночастиц поверхности нагревателя, теплоотдача не изменяется несмотря на то, что осаждение частиц продолжается. По данным [18] время переходного начального этапа было примерно 20 мин. Авторы считают, что для практических приложений переходным процессом осаждения частиц можно пренебречь и считать пузырьковое кипение наножидкости квазистационарным процессом.

На изменение структуры обогреваемой поверхности при кипении наножидкости влияет много факторов, включая исходное состояние поверхности, размер, распределение и концентрация наночастиц, тепловой поток. К сожалению трехмерных данных о микроструктуре поверхности крайне мало, а использование одномерного параметра шероховатости, который представляет собой среднюю глубину полостей на поверхности, не дает хороших результатов [19].

Слой наночастиц имеет наиболее существенное влияние на плотность активных центров парообразования. Важно, чтобы в зависимостях, описывающих коэффициенты теплоотдачи при кипении и критический тепловой поток учитывалось влияние угла смачиваемости поверхности. В работе [20] предлагается учитывать влияние угла смачивания на плотность активных центров парообразования согласно зависимости

$$n = 1.206 \times 10^4 (1 - R \cos \theta) \Delta T_{sup}^{2.06}, \quad (5)$$

где  $\Delta T_{\text{sup}}$  – недогрев жидкости до температуры насыщения,  $\Theta$  – угол смачивания гладкой поверхности и  $R$  – фактор шероховатости, который определяется отношением эффективных площадей контакта шероховатой поверхности к площади контакта гладкой поверхности. Использование уравнения (5) позволило получить удовлетворительные результаты при определении температуры стенки как для чистой воды, так и для наножидкости.

Слой осаждения наночастиц влияет на отрывной диаметр пузыря: с уменьшением угла смачивания отрывной диаметр пузыря увеличивается. Увеличение отрывного диаметра пузырька с уменьшением угла смачивания может быть описано зависимостью, полученной на основании экспериментальных данных [21]

$$d_b = c_{bw} \frac{2 + 3 \cos \theta^* - \cos^3 \theta^*}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (6)$$

Эта зависимость не согласуется с формулой из работы [22], которая свидетельствует о возрастании отрывного диаметра пузыря с увеличением  $\theta$

$$d_b = 0,0208\theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (7)$$

Ниже представлены результаты теоретического анализа теплофизических процессов при пузырьковом кипении наножидкости. С использованием приближенной аналитической модели теплообмена в двухфазном потоке исследованы процессы переноса импульса, теплоты и массы при кипении наножидкости на горизонтальной обогреваемой пластине в большом объеме. Получена

следующая зависимость для определения коэффициента теплоотдачи при кипении

$$\alpha = \frac{r \rho_v}{\Delta T} \frac{2\beta \lambda_f \vartheta}{d_b c_{pf} \rho_f} \quad (8)$$

$$\vartheta = 1 + \frac{\gamma}{\beta} Ja + \frac{\gamma}{\beta} \sqrt{2\beta Ja + (\gamma Ja)^2},$$

$$Ja = \frac{c_{pf} \Delta T \rho_f}{r \rho_v},$$

$\beta = 6, \gamma = 0,3, \Delta T = T_w - T_p, d_b$  – отрывной диаметр пузырька.

Для определения  $d_b$  использовали зависимости (6) или (7), в которых угол смачивания определен путем проведения вычислительного эксперимента, сравнивая результаты расчета с экспериментальными данными работы [23] для наножидкости  $Al_2O_3$ /вода в диапазоне изменения массовых концентраций от 0,5 до 3 %. В результате получена зависимость угла смачивания  $\theta$  от массовой концентрации наночастиц  $\varphi$

$$\Theta = \arccos(1 - 0,1\varphi) \quad (9)$$

Результаты расчета теплофизических параметров процесса кипения наножидкости с использованием зависимостей (6) и (7) показали, что лучшее совпадение с экспериментальными данными коэффициента теплоотдачи получено при использовании зависимости (7). На рис.2 представлено сравнение результатов расчета относительного коэффициента теплоотдачи наножидкости в сравнении с чистой жидкостью от концентрации наночастиц с экспериментальными данными работы [23].

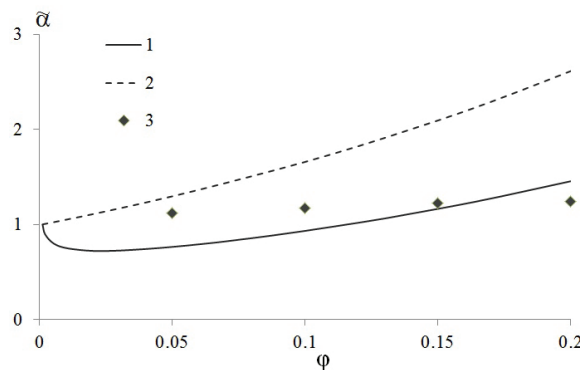


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи от концентрации наночастиц: 1 – с использованием (7), 2 – с использованием (6), 3 – экспериментальные данные работы [23].

Интересные результаты исследования интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с покрытием из наночастиц карбида кремния и окиси алюминия представлены в работе [24]. В качестве рабочих участков использовалась горизонтальная стальная трубка диаметром 1,2 мм и медная пластина размером 15x3 мм, помещенные в большой объем воды при атмосферном давлении. Размеры частиц в слое покрытия на поверхности трубки составляли в среднем 100 нм. В результате установлено, что при кипении воды на поверхности трубки с покрытием наночастицами ок-

сида алюминия наблюдалось как увеличение, так и уменьшение коэффициента теплоотдачи по сравнению с поверхностью без покрытия. При большой начальной шероховатости поверхности (средняя высота выступов 0,16...2,5мкм) отложения наночастиц уменьшают теплоотдачу, при малой начальной шероховатости (0,05...0,1мкм) отложения наночастиц увеличивают теплоотдачу. Видеосъемка показала, что уменьшение теплоотдачи связано со снижением количества центров парообразования. В случае покрытия поверхности наночастицами карбида кремния коэффициент теплоот-

дачи увеличивается по сравнению с коэффициентом теплоотдачи поверхности без покрытия. Угол смачивания для поверхности с покрытием меньше, чем для поверхности без покрытия. Критический тепловой поток увеличивается с уменьшением угла смачивания. Полученные результаты согласуются с формулой, описывающей зависимость критического теплового потока от угла смачивания для горизонтального нагревателя

$$q_{кр} = \rho_r^{1/2} r \left( \frac{1 + \cos\theta}{16} \right) \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos\theta) \cos\phi \right]^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4} \quad (10)$$

Экспериментальные исследования убедительно показывают, что тонкий слой осаждающихся наночастиц при пузырьковом кипении наножидкости существенно меняет структуру обогреваемой поверхности, улучшает ее смачиваемость. Это приводит к изменению размеров пузырей и частоты их отрыва на поверхностях с нанопокрывтием по сравнению с этими параметрами на чистых поверхностях.

#### Пленочное кипение

Устойчивое пленочное кипение жидкостей характеризуется тем, что поверхность нагрева отделена от массы кипящей жидкости пленкой пара. Существенное влияние на интенсивность теплообмена при пленочном кипении оказывают физические свойства кипящей среды, геометрические размеры и ориентация поверхности в поле массовых сил, давление и недогрев жидкости до температуры насыщения и другие факторы [25]. Для промышленной термообработки металла закалочная среда должна быть достаточно теплопроводной, чтобы металл охлаждался со скоростью, позволяющей получить желаемую микроструктуру. Использование наножидкостей при закалке позволяет значительно ускорить

процесс путем дестабилизации пленочного кипения из-за осаждения на охлаждаемой поверхности наночастиц [4]. Отмечается, что при закалке в наножидкостях улучшаются увлажняющие характеристики поверхности по сравнению с закалкой в чистой жидкости [26].

Результаты экспериментального исследования характеристик теплопередачи при кипении наножидкостей Ag/вода и TiO<sub>2</sub>/вода на серебряной сфере представлены в [28]. Серебряную сферу диаметром 10 мм и начальной температурой 700 °С охлаждали в наножидкостях с концентрациями наночастиц от 4 % до 0,5 % при температуре наножидкости 90 °С. Результаты показали значительное снижение тепловых потоков в наножидкостях по сравнению с чистой водой. В экспериментах с малой концентрацией наночастиц режим пленочного кипения не наблюдался, охлаждение происходило более быстро в режиме пузырькового кипения. Предполагается, что тонкий слой наночастиц на поверхности сферы предотвращает образование вокруг нее паровой пленки и в результате происходит быстрое резкое охлаждение горячей сферы.

В работе [27] представлены результаты исследования процесса закалки стальных и циркалоевых сфер в воде и наножидкости с наночастицами алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), кремния (SiO<sub>2</sub>) и алмаза (C). Экспериментально получены зависимости изменения температуры поверхности сфер во времени для сфер диаметром 1 см при низких концентрациях наночастиц (0,1 % по объему), начальной температуре 1000 °С в условиях недогрева охлаждающей жидкости до температуры насыщения 70 °С и при температуре насыщения. В каждом режиме проводилось по семь испытаний. На рис. 3 представлены значения теплового потока при пленочном кипении чистой воды и наножидкости, где затемненные символы характеризуют данные первого испытания, а светлые с второго по седьмое испытаний.

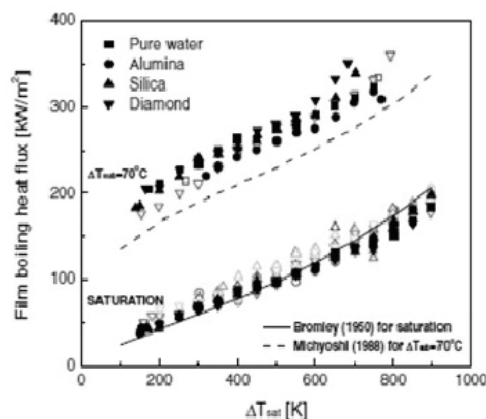


Рис. 3. Зависимость теплового потока от температуры при пленочном кипении в чистой воде и в наножидкостях с концентрацией наночастиц 0,1 % по объему при температуре насыщения и недогреве 70 °С [27].

Представленные в работе графики изменения температуры стенки свидетельствуют о зависимости скорости процесса закалки от числа испытаний. Так при пер-

вом испытании процесс в наножидкости протекает так же, как в чистой воде. В последующих испытаниях процесс перехода от пленочного кипения к пузырьковому

ускоряется с каждым следующим испытанием для наножидкостей  $Al_2O_3$ /вода и  $SiO_2$ /вода. В тоже время для наножидкости  $C$ /вода процесс меняется незначительно во всех испытаниях (графики изменения температуры стенки практически одинаковые).

Было обнаружено, что с увеличением числа испытаний наночастицы аккумулируются на поверхности сферы, это приводит к дестабилизации паровой пленки и значительно ускоряет процесс закалики. Анализ кривых кипения показал, что осаждение на поверхности наночастиц окиси алюминия и кремнезема увеличивает критический тепловой поток, в то время как осаждение наночастиц алмаза имеет минимальное воздействие на кривую кипения. Высказывается предположение, что увеличение шероховатости поверхности и повышение ее смачиваемости ответственно за более ранний переход от пленочного режима кипения к пузырьковому и ускорение процесса закалики. Отмечается сильное влияние недогрева наножидкости на скорость закалики. В недогретой жидкости пленка пара тоньше и переход от пленочного режима кипения к пузырьковому режиму происходит быстрее.

Более детально механизм пленочного кипения в процессе закалики рассматривается в работе [29]. В ней представлены результаты исследования особенностей процесса закалики сфер и стержней из нержавеющей стали в чистой воде и в наножидкости с наночастицами  $Al_2O_3$  концентрацией 0,1 % по объему. Эксперименты проводились при атмосферном давлении для разных условий недогрева жидкости до температуры насыщения. Диаметр сферы 9,5 мм, диаметр стержней 4,8 мм и 7,9 мм. Особое внимание уделено механизмам пленочного кипения наножидкости как на чистой поверхности, так и на поверхностях, загрязненных наночастицами в результате их осаждения на поверхности при многократном повторении процесса закалики. Результаты экспериментов показали, что протекание процесса закалики чистых сфер и стержней в воде и наножидкости практически идентичное. При повторных испытаниях в наножидкости на поверхности тел образуется слой наночастиц, в результате чего процесс перехода от пленочного режима кипения к пузырьковому значительно ускоряется и наблюдается при более высокой температуре перегрева стенки. Показано, что ответственным за ускорение процесса закалики является увеличение смачиваемости и шероховатости поверхности в результате осаждения наночастиц, а не наличие наночастиц в жидкости. При малой концентрации наночастиц в жидкости теплофизические свойства наножидкости не отличались от свойств чистой воды.

Были проведены специальные испытания, чтобы проанализировать влияние смачиваемости поверхности на процесс дестабилизации и разрушения пленки пара при закалике сферы в наножидкости. Предварительное формирование слоя осаждения наночастиц  $SiO_2$  привело к увеличению смачиваемости поверхности с углом контакта менее  $10^\circ$  и очень небольшой шероховатостью (менее 0,016 мкм). Закалика сфер в чистой воде и наножидкости для трех значений температуры недогрева

0, 20 и 70 К показала, что тонкий гидрофильный слой покрытия приводит к значительному увеличению температуры Лейденфроста и скорости закалики. С увеличением недогрева этот эффект увеличивается. В результате авторы пришли к выводу, что осажденные наночастицы на поверхности увеличивают ее смачиваемость и это приводит к увеличению продолжительности и области локального контакта жидкости с поверхностью тела при пленочном кипении, дестабилизирует пленку пара при более высоких температурах стенки. Это способствует более быстрому разрушению пленки пара и ускорению процесса закалики. Отмечается, что традиционные модели, описывающие теплообменные процессы при закалике в чистой жидкости не согласуются с полученными экспериментальными данными для повторных испытаний загрязненных наночастицами поверхностей тел, однако близки в опытах по закалике тел с чистой поверхностью как в чистой воде, так и в наножидкости (первое испытание).

Однако остается без ответа вопрос почему результаты, полученные в работе [27] для наножидкости с наночастицами алмаза кардинально отличаются от результатов для наножидкостей с наночастицами  $Al_2O_3$  и  $SiO_2$  несмотря на то, что при повторных закаликах сферы в алмазной наножидкости также наблюдалось увеличение смачиваемости поверхности. По мнению авторов это свидетельствует о том, что возможно существует неизвестный пока механизм разрушения пленки пара.

Выполнены теоретические исследования процессов теплопередачи при пленочном кипении наножидкости на плоской вертикальной обогреваемой стенке [30,31]. Задача решена в предположении, что толщина пленки пара на стенке мала по сравнению с высотой стенки. Температура обогреваемой поверхности постоянная  $T_w$ , а температура межфазной поверхности пар-жидкость  $T_\infty$  равна температуре насыщения наножидкости при заданном давлении. Трение на межфазной поверхности пар-жидкость не учитывают. Получена зависимость числа Нуссельта с учетом влияния концентрации наночастиц на теплофизические свойства наножидкости в виде

$$Nu = \frac{h\delta_0}{k_f} \left[ FK(K, \varphi) \left( \frac{d\theta}{dy} \right)_{y=0} \right]^{3/4} [FG(A, K, \varphi_\infty, m, R_{pv}, R_{pf})]^{1/4}, \quad (11)$$

$$G = \frac{g\delta^3 \rho_f \rho_v ((1 - \varphi_\infty) + \varphi_\infty R_{pf})}{\mu_v} \int_0^1 U[(1 - \varphi) + \varphi R_{pv}] dy,$$

$$\delta_0 = \sqrt[4]{\frac{4k_v \mu_v \Delta T}{gT \rho_f \rho_v}},$$

где  $G$  – расход в пленке пара с наночастицами,  $\delta$  – толщина пленки пара,  $U$  – профиль скорости в пленке,  $\mu$  – вязкость наножидкости

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_w - T_\infty} = \frac{T - T_\infty}{\Delta T}, \quad R_{pv} = \frac{\rho_p}{\rho_v}, \quad K = \frac{k_p}{k_v},$$

$$\mu = \frac{\mu_v}{(1 - \varphi)^m}, \quad m = 2,5,$$

$$A = \frac{D_t \Delta T}{D_b T_\infty}, \quad FK(K, \varphi) = 1 + \frac{3(K-1)\varphi}{K+2}.$$

Коэффициент теплопроводности наножидкости

$$k = k_v \left[ \frac{k_p + 2k_v + 2\varphi(k_p - k_v)}{k_p + 2k_v - \varphi(k_p - k_v)} \right].$$

Коэффициент теплоотдачи, определяемый уравнением (11), учитывает влияние шести параметров на теплообмен при пленочном кипении: параметр А характеризует отношение коэффициентов броуновской и термофоретической диффузии наночастиц,  $\varphi_\infty$  – концентрацию наночастиц в жидкости,  $R_{pv}$  и  $R_{pf}$  – нормализованные удельные веса наночастиц,  $K$  – относительную теплопроводность наночастиц,  $m$  – вязкость наножидкости. Увеличение каждого из этих параметров приводит к увеличению теплопередачи в пленке пара с наночастицами. Анализ влияния этих параметров свидетельствует о том, что термофоретическая диффузия наночастиц способствует увеличению теплопередачи, а броуновская – уменьшению. Увеличение концентрации наночастиц в паре более способствует увеличению теплопередачи, чем увеличение концентрации наночастиц в жидкости, так как величина параметра  $K$  для пленки пара значительно больше, чем для наножидкости из-за низкой теплопроводности пара по сравнению с теплопроводностью жидкости.

### Выводы

Успешное использование кипящих наножидкостей для охлаждения высокотемпературных тел требует разработки экспериментально обоснованных математических моделей, позволяющих прогнозировать характеристики теплообмена и значения критического теплового потока в зависимости от типа, размеров, концентрации наночастиц в базовой жидкости, их влияние на изменение структуры теплоотдающей поверхности.

Дальнейшие исследования должны быть направлены в первую очередь на изучение механизмов кипения наножидкостей, включающих:

- исследования процесса осаждения наночастиц на обогреваемой поверхности, микроструктуру и свойства нанослоя;

- определение параметров наножидкостей и режимов кипения, при которых возникают отложения наночастиц на поверхности и при которых эти отложения не возникают;

- определение влияния изменения структуры теплоотдающей поверхности в результате осаждения наночастиц на характеристики кипения;

- исследование структуры двухфазных потоков при разных режимах кипения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Wang X.Q., Mujumdar A.S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review// International Journal of Thermal Sciences. – 2007. – 46. – P.1–19
2. Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E. Heat Transfer in Nanofluids – A Review//Heat Transfer Engineering. –2008.

–27(10). – P.3–19

3. Cheng L., Filho E.P.B., Thome J.R. Nanofluid Two-Phase Flow and Thermal Physics: A New Research Frontier of Nanotechnology and Its Challenges// Journal of Nanoscience and Nanotechnology. – 2008. – v.8, N 8. – P.1–18

4. Ramesh G., Prabhu N.K. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment//Nanoscale Research Letters. – 2011. – 6:334. – P.1–15

5. Li X., Cheung S.C.P., Tu J. Nucleate boiling of dilute nanofluids – Mechanism exploring and modeling// Int. J. of Thermal Sciences. – 2014. – 84. – p.323–334

6. Karac S., Pramuanjaroenkij F. Analysis of convective heat transfer enhancement by nanofluids: single-phase and two-phase treatments// Инженерно-физический журнал. – 2016. – т.89, №3. – С.752–788

7. Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W., Wang H. Measurement of Key Pool Boiling Parameters in Nanofluids for Nuclear Applications//Journal of Power and Energy Systems. – 2008. – v.2, N 1. – P.340–351

8. Hegde R.N., Rao S.S., Reddy R.P. Flow Visualization, Critical Heat Flux Enhancement, and Transient Characteristics in Pool Boiling Using Nanofluids// Journal of ASTM international. – 2012. – v.9, N5. – p.1–16

9. Wang X.Q., Mujumdar A.S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review// International Journal of Thermal Sciences. – 2007. – 46. –P.1–19

10. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids//Intern. Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – 46(5). – p.851–862

11. 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. – 48. – P.2407–2419

12. Rhosenow W.M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids// Transactions of ASME. – 1952. –74. – P.969–979

13. ElGenk M.S., Guo A. Transient Boiling from inclined and downward facing surfaces in a saturated pool// Int. J. Refrig. – 1993. – № 6. – p.414–422

14. You S.M., Kim J.H., Kim K.H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer//Applied Physics Letters. – 2003. – 83, N16. – P.3374–3376

15. Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer.FTC Reh. AECU–4439. –1959

16. Kwark S.M., Kumar R., Moreno G., Yoo J., You S.M. Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids// Int. J. Heat Mass Transf. – 2010. – 53. – P.972–981

17. 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// Int. J. Heat Mass Transf. – 2007. –50. – P.4105–4116

18. Okawa T., Takamura M., Kamiya T. Boiling time effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids// Int. J. Heat Mass Transf. –2012. –55. – P.2719–2725

19. Piro I.L., Rohsenow W.M., Doerffer S.S. Nucleate

- pool-boiling heat transfer. 1 review of parametric effects of boiling surface// *Int. J. Heat Fluid Flow.* – 2004. – 47. – P.5033–5044
20. *Li X.D., Li K., Tu J.Y., Buongiorno J.* On two-fluid modeling of nucleate boiling of dilute nanofluids// *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2014. – 69. – P.443–450
21. *Phan H.T., Caney N., Marty P., Colasson S., Gavillet J.* How does surface wettability influence nucleate boiling // *C.R. Mtc.* – 2009. – 337. – P.251–259
22. *Fritz W., Ende W.* End of the evaporation process to cinematographic recordings of stem bubbles// *Phys.Z.* – 1935. – v.37. – P.391–401
23. *Lia X., Cheunga S.C.P., Tu J.* Nucleate boiling of dilute nanofluids – Mechanism exploring and modeling// *International Journal of Thermal Sciences.* – 2014. – v.84. – P.323–334
24. *Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Шустов М.В., Чурсин П.С., Чистякова А.В., Звонарев Ю.А., Жуков В.М., Васильева Л.Т.* Исследование интенсификации теплообмена при кипении воды на поверхности с микро- и нанорельефом// *Теплоэнергетика.* – 2014. – №3. – С.35–38
25. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении. Киев: Наук.Думка. – 1980. – 316 с.
26. *Prabhu K.N., Fernandes P.* Nanoquenchant for Industrial Heat Treatment//*Journal of Materials Engineering and Performance.* – 2008. – v.17(1). – P.101–103
27. *Kim H., DeWitt G., McKrell T., Buongiorno J., Hu L.W.* On the quenching of steel and zircaloy spheres in water- based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles// *International Journal of Multiphase Flow.* – 2009. – 35. – P.427–438
28. *Lotfi H., Shafii M.B.* Boiling heat transfer on a high temperature silver sphere in nanofluid// *International Journal of Thermal Sciences.* – 2009. – 48. – P.2215–2220
29. *Kim H., Buongiorno J., Hu L.W., McKrell T.* Nanoparticle deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based alumina nanofluids//*International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2010. – 53. – P.1542–1553
30. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I.* Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface // *International Journal of Thermal Sciences.* – 2015. – 92. – P. 106 – 118
31. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinov D.G., Harmandd S., Tyrinov A.I.* Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach// *Journal of Molecular Liquids.* – 2016. – 223. – P. 156 – 164.



## FEATURES OF HEAT TRANSFER DURING BOILING OF NANOFLUIDS

Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova 2a, Kiev, 03680, Ukraine.

Due to the high cooling capacity of nanofluids it becomes relevant their using in industry for cooling high-temperature bodies. The paper analyzes the results of research for nucleate and film boiling of nanofluids. The results of experimental studies of nucleate boiling nanofluids indicates increasing critical heat flux in comparison with the clean liquid, while there is both an increase and a decrease in the heat transfer coefficient. This behavior of heat transfer coefficient connects to the change in the structure of the cooling surface because of deposition of nanoparticles during nucleate boiling nanofluids. Analysis of the research of film boiling modes of nanofluids during quenching metal products represents a significant acceleration of the process in comparison with quenching in clean fluids, especially when it is repeated many times. Deposition of nanoparticles on a cooled surface accelerates the process of destruction of the vapor film and the transition to nucleate boiling regime. References 31, fig.3

**Key words:** nanofluids boiling, heat transfer, critical heat flux.

1. Wang X.Q., Mujumdar A.S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. 46.P.1–19

2. Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E. Heat Transfer in Nanofluids. A Review. *Heat Transfer Engineering*. 2008. 27(10). P.3–19

3. Cheng L., Filho E.P.B., Thome J.R. Nanofluid Two-Phase Flow and Thermal Physics: A New Research Frontier of Nanotechnology and Its Challenges. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2008. v.8, N 8. P.1–18

4. Ramesh G., Prabhu N.K. Review of thermo-physical properties, wetting and heat transfer characteristics of nanofluids and their applicability in industrial quench heat treatment. *Nanoscale Research Letters*. 2011. 6:334. P.1–15

5. Li X., Cheung S.C.P., Tu J. Nucleate boiling of dilute nanofluids – Mechanism exploring and modeling. *Int. J. of Thermal Sciences*. 2014. 84. P.323–334

6. Karac S., Pramuanjaroenkij F. Analysis of convective heat transfer enhancement by nanofluids: single-phase and two-phase treatments. *Инженерно-физический журнал*. 2016. т.89, №3. С.752–788

7. Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W., Wang H. Measurement of Key Pool Boiling Parameters in Nanofluids for Nuclear Applications. *Journal of Power and Energy Systems*. 2008. v.2, N 1. P.340–351

8. Hegde R.N., Rao S.S., Reddy R.P. Flow Visualization, Critical Heat Flux Enhancement, and Transient Characteristics in Pool Boiling Using Nanofluids. *Journal of ASTM international*. 2012. v.9, N5. P.1–16

9. Wang X.Q., Mujumdar A.S. Heat transfer

characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*. 2007. 46. P.1–19

10. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids. *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. 46(5). P.851–862

11. 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. 48. P.2407–2419

12. Rhosenow W.M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids. *Transactions of ASME*. 1952. 74. P.969–979

13. ElGenk M.S., Guo A. Transient Boiling from inclined and downward facing surfaces in a saturated pool. *Int. J. Refrig.* 1993. № 6. P.414–422

14. You S.M., Kim J.H., Kim K.H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. *Applied Physics Letters*. 2003. 83, N 16. P.3374–3376

15. Zuber N. Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer. *FTC Reh. AECU-4439*. –1959

16. Kwark S.M., Kumar R., Moreno G., Yoo J., You S.M. Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2010. 53. P.972–981

17. 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. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2007. 50. P.4105–4116

18. Okawa T., Takamura M., Kamiya T. Boiling time effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2012. 55. P.2719–2725

19. Pioro I.L., Rohsenow W.M., Doerffer S.S. Nucleate pool-boiling heat transfer. 1 review of parametric effects of boiling surface. *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2004. –47. P.5033–5044

20. Li X.D., Li K., Tu J.Y., Buongiorno J. On two-fluid modeling of nucleate boiling of dilute nanofluids. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2014. 69. P.443–450

21. Phan H.T., Caney N., Marty P., Colasson S., Gavillet J. How does surface wettability influence nucleate boiling. *C.R. Mtc*. 2009. 337. P.251–259

22. Fritz W., Ende W. End of the evaporation process to cinematographic recordings of stem bubbles. *Phys.Z.* 1935. v.37. P.391–401

23. Lia X., Cheunga S.C.P., Tu J. Nucleate boiling of dilute nanofluids – Mechanism exploring and modeling. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. v.84. P.323–334

24. Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Shustov M.V., Chursin P.S., Chictakova A.V., Zvonarev Yu.A., Zhukov V.M., Vasileva L.T. The research of transfer enhancement at boiling water at the surface with micro- and nanorelief// *Теплоэнергетика*. 2014. №3. P.35–38 (Rus.)

25. Tolubinskiy V.I. Boiling heat transfer. Kiev: Naukova Dumka. 1980. 316 p.(Rus.)

26. Prabhu K.N., Fernandes P. Nanoquenchant for Industrial Heat Treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2008. v.17(1). P.101–103

27. Kim H., DeWitt G., McKrell T., Buongiorno J., Hu L.W. On the quenching of steel and zircaloy spheres in

water-based nanofluids with alumina, silica and diamond nanoparticles. *International Journal of Multiphase Flow*. 2009. 35. P.427–438

28. *Lotfi H., Shafii M.B.* Boiling heat transfer on a high temperature silver sphere in nanofluid. *International Journal of Thermal Sciences*. 2009. 48. P.2215–2220

29. *Kim H., Buongiorno J., Hu L.W., McKrell T.* Nanoparticle deposition effects on the minimum heat flux point and quench front speed during quenching in water-based alumina nanofluids. *International Journal of Heat and*

*Mass Transfer*. 2010. 53. P.1542–1553

30. *Avramenko A.A., Tyrinov A.I.* Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015. 92. P. 106 – 118

31. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinov D.G., Harmandd S., Tyrinov A.I.* Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. *Journal of Molecular Liquids*. 2016. 223. P. 156 – 164.

*Получено 07.02.2017*  
*Received 07.02.2017*