

УДК 541.182

ОСОБЕННОСТИ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА НА ОБОГРЕВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ КИПЕНИИ НАНОЖИДКОСТИ

Ковецкая М.М., канд. техн. наук

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

В роботі проаналізовано результати досліджень кризи теплообміну при кипінні нанорідини. Визначено вплив концентрації наночастинок, шорсткості та змочуваності обігріваної поверхні на збільшення критичного теплового потоку.

В работе проанализированы результаты исследований кризиса теплообмена при кипении наножидкостей. Определено влияние концентрации наночастиц, шероховатости и смачиваемости обогреваемой поверхности на увеличение критического теплового потока.

The paper analyzes the research results of heat transfer crisis during boiling of nanofluids. The effect of the nanoparticle concentration, roughness and wettability of the heated surface on the increase in the critical heat flux is studied.

Библ. 34, рис. 5.

Ключевые слова: кипение наножидкости, теплообмен, критический тепловой поток.

КТП – критический тепловой поток;

 T – температура; c_p – теплоемкость; d – диаметр пузырька; f – частота отрыва пузырьков; q – плотность теплового потока; n – плотность центров парообразования; u – скорость; r – теплота парообразования; g – ускорение свободного падения; t – время; θ – угол смачивания; α – угол наклона поверхности; μ – молекулярная вязкость; ρ – плотность; δ – толщина микрослоя; σ – поверхностное натяжение; φ – концентрация наночастиц; Pr – число Прандтля St – число Стантона**Индексы:** kr – критический; b – пузырек; f – наножидкость; v – пар; l – вода; w – стенка.

Введение

Для охлаждения высокотемпературных обогреваемых поверхностей теплообменных аппаратов в различных отраслях промышленности используется кипение охлаждающей жидкости, которое характеризуется более высокими коэффициентами теплоотдачи по сравнению с однофазным теплообменом. При этом увеличение теплового потока в режиме кипения жидкости на обогреваемой поверхности ограничено развитием кризиса теплообмена, который характеризуется резким уменьшением коэффициента теплоотдачи и увеличением температуры теплоотдающей поверхности, что может привести к ее разрушению. Поэтому методам интенсификации теплообмена при кипении, приводящим к увеличению критического теплового потока на теплоотдающей поверхности уделяется большое внимание. Для обеспечения безопасной работы теплообменного оборудования в режимах кипения необходимо надежное прогнозирование условий возникновения кризиса теплообмена, развитие методов оценки критического теплового потока. Одним из способов повышения критического

теплового потока при кипении является использование наножидкостей в качестве охлаждающей жидкости.

Результаты экспериментальных исследований, посвященных теплообмену при пузырьковом кипении наножидкости, свидетельствуют об увеличении критического теплового потока даже при небольшом добавлении наночастиц к охлаждающей жидкости [1-7]. Во многих случаях увеличение критических тепловых потоков при кипении наножидкостей связан с изменением характеристик теплоотдающей поверхности, вызванным осаждением на ней наночастиц в процессе кипения.

В настоящее время усилия многих исследователей направлены на изучение внутренних характеристик двухфазного потока при кипении наножидкостей: отрывного диаметра пузырьков, частоты их отрыва от обогреваемой поверхности, плотности активных центров парообразования. Это необходимо для понимания физических механизмов процесса кипения, определения причин увеличения или снижения интегральных характеристик теплообмена при кипении наножидкостей и разработки математических моделей прогнозирования этих характеристик.

Влияние концентрации наночастиц на КТП

Большое количество исследований посвящено влиянию концентрации, размеров и свойств наночастиц на увеличение КТП при кипении наножидкостей [7]. Во многих экспериментальных исследованиях наблюдается увеличение КТП с увеличением концентрации наночастиц в жидкости, а также существование определенного предела концентрации наночастиц, выше которого дальнейшее увеличение критического теплового потока не наблюдается. Так в работе [7] показано, что влияние концентрации наночастиц на величину КТП при кипении наножидкости Al_2O_3 /вода на плоской (горизонтальной и вертикальной) обогреваемой поверхности в большом объеме характеризуется увеличением критического теплового потока при увеличении концентрации наночастиц до 1 % по объему. При дальнейшем

увеличении концентрации наночастиц в жидкости значение критического теплового потока на горизонтальной поверхности уменьшается, а на вертикальной не изменяется.

Результаты исследования теплообмена при кипении на плоской обогреваемой поверхности в бассейне с наножидкостью Al_2O_3 /вода с концентрацией наночастиц от 0 до 0,05 г/л показали, что критический тепловой поток в наножидкости больше, чем в чистой воде и возрастает при увеличении концентрации наночастиц от 0,001 до 0,025 г/л [8]. При дальнейшем увеличении концентрации наночастиц в жидкости критический тепловой поток практически не изменяется (рис. 1). При этом коэффициенты теплоотдачи для наножидкости и воды были одинаковыми.

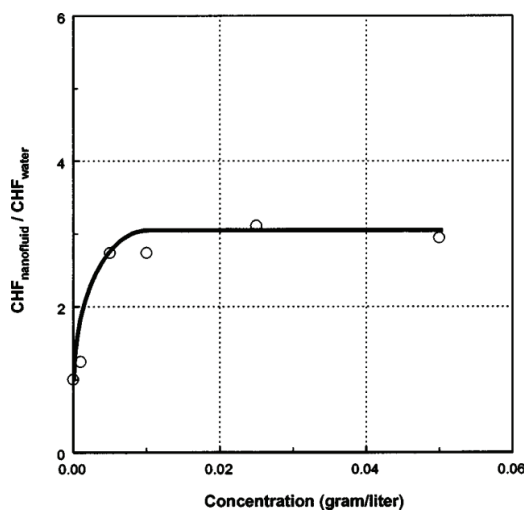


Рис. 1. Зависимость относительного значения критического теплового потока от концентрации наночастиц в жидкости [8].

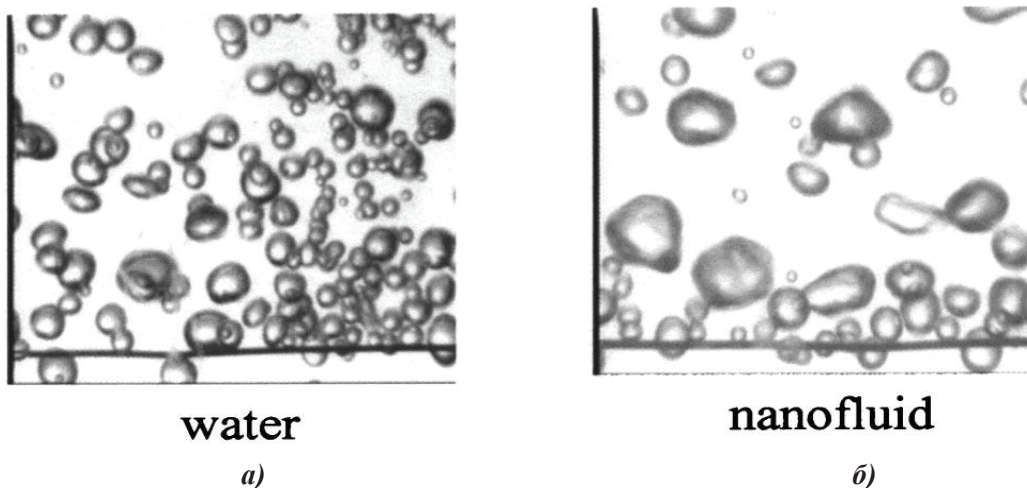


Рис. 2. Визуализация процесса кипения при $q = 300 \text{ кВт/м}^2$: а – чистая вода; б – наножидкость [8].

На рис. 2 представлена визуализация процесса кипения чистой воды и наножидкости. Добавление наночастиц к жидкости приводит к увеличению отрывных диаметров пузырей и уменьшению частоты их отрыва от обогреваемой поверхности. Такое изменение структуры двухфазного потока при пузырьковом кипении наножидкостей наблюдается и в других экспериментальных исследованиях [7,9,10]. Однако, с увеличением концентрации наночастиц в жидкости визуализация процесса кипения становится проблематичной.

В работе [10] представлены результаты экспериментального исследования характеристик двухфазного потока при кипении наножидкостей Al_2O_3 /вода и

CuO /вода на гладком проводе NiCr. Эксперименты по определению критического теплового потока в наножидкости CuO /вода при концентрации наночастиц 0,3 г/л показали повышение КТП на 30 % по сравнению с чистой водой. На рис. 3 представлена зависимость критического теплового потока от концентрации наночастиц в наножидкости CuO /вода. Получено неоднозначное влияние концентрации наночастиц на КТП. При малых концентрациях до 0,2 г/л наблюдается увеличение КТП с увеличением концентрации. При дальнейшем увеличении концентрации наночастиц наблюдается стабилизация КТП, затем его уменьшение и снова увеличение.

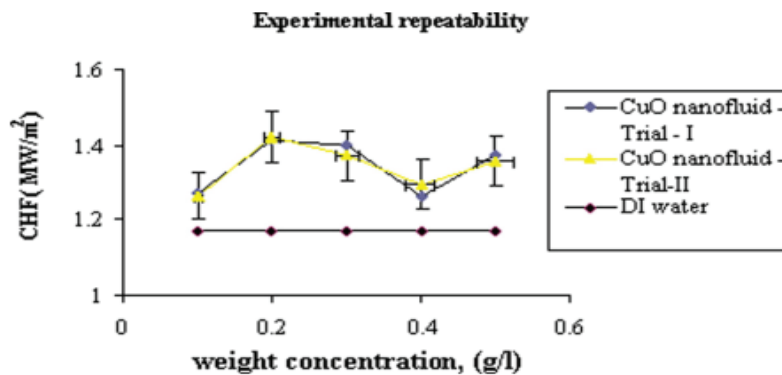


Рис. 3. Зависимость критического теплового потока от концентрации наночастиц CuO для чистой воды и наножидкости [10].

Визуализация процесса кипения при увеличении теплового потока показала образование массивных паровых пузырей и горячих сухих пятен на поверхности нагрева при значениях теплового потока, близких к критическим. Если эти сухие пятна после отрыва пузырей не смачиваются, то температура провода резко возрастает, что приводит к его выгоранию.

Экспериментальные данные [10] свидетельствуют об увеличении отрывного диаметра пузырьков и уменьшении частоты их отрыва в наножидкости по сравнению с чистой жидкостью. При критическом тепловом потоке, равном 1407 кВт/м^2 , размер пузырьков в наножидкости был на $0,084 \text{ мм}$ больше, чем в чистой воде. Как для наножидкости, так и для чистой жидкости наблюдалась постоянная частота отрыва пузырей, которая описывалась формулой

$$f d_b = 0,59 \left[\frac{\sigma g (\rho_f - \rho_v)}{\rho_f^2} \right]^{1/2}.$$

Авторы [10] считают, что увеличению критического теплового потока при кипении наножидкости способствует, прежде всего, формирование слоя наночастиц на обогреваемой поверхности, что подтверждается исследованием ее шероховатости. В процессе кипения наножидкости средняя шероховатость поверхности уменьшилась с $0,33 \text{ мкм}$ до $0,30 \text{ мкм}$.

Исследовалось влияние длительности процесса кипения на увеличение КТП в наножидкости с концен-

трацией наночастиц CuO $0,1 \text{ г/л}$. Длительность кипения составляла 15 мин и 30 мин при постоянном тепловом потоке 700 кВт/м^2 . Затем тепловой поток увеличивали до критического значения. В результате предварительного кипения критический тепловой поток увеличивался на $5,21 \%$ и на $6,77 \%$ соответственно по сравнению с режимом без предварительного кипения. Возможно, предварительное кипение способствовало дополнительному осаждению наночастиц на поверхности нагрева и увеличению толщины нанослоя.

Увеличению КТП способствует также уменьшение угла контакта пузырька с поверхностью нагрева при кипении наножидкости. В наножидкости Al_2O_3 /вода средний угол контакта пузырька 33° по сравнению с 71° в чистой воде при достижении критического теплового потока. Для оценки влияния смачиваемости поверхности нагрева на критический тепловой поток предлагается использовать следующую зависимость

$$q_{кр} = k^{-1/2} \rho_v r \left[\frac{\sigma g (\rho_f - \rho_v)}{\rho_f^2} \right]^{1/4}, \quad (1)$$

где коэффициент k – характеризует влияние угла смачиваемости обогреваемой поверхности, который согласно работе [18] определяется по формуле

$$k = \left(1 - \frac{\sin \theta}{2} - \frac{\pi/2 - \theta}{2 \cos \theta} \right)^{-1/2}. \quad (2)$$

В большинстве экспериментальных исследований

предлагаются эмпирические формулы для коэффициентов теплоотдачи и критического теплового потока, которые удовлетворительно описывают собственные экспериментальные данные авторов. Для определения коэффициентов теплоотдачи и КТП при кипении наножидкости как правило используются известные корреляции для чистой жидкости с введением поправочных коэффициентов, которые обеспечивают должное совпадение с полученными экспериментальными результатами. Примером такого подхода служит работа [11], в которой представлены результаты сравнения имеющихся в литературе экспериментальных данных для теплового потока при кипении в большом объеме наножидкостей

на водной основе с классической корреляцией Rohsenow [12].

$$q = \left(\frac{1}{C_{sf}}\right)^{1/n} \mu_l r \left(\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}\right)^{1/2} Pr^{-s/n} \left(\frac{c_{pl} \Delta T_{sup}}{r}\right)^{1/n} \quad (3)$$

Здесь C_{sf} – коэффициент, характеризующий состояние обогреваемой поверхности, $s = 1,7$ и $n = 0,33$. Изменением значения C_{sf} в пределах от 0,0065 до 0,018 можно получить удовлетворительное описание формулой (3) экспериментальных данных, о чем свидетельствует рис. 4 [11]. Однако в каждом конкретном случае предлагается коэффициент C_{sf} определять из эксперимента.

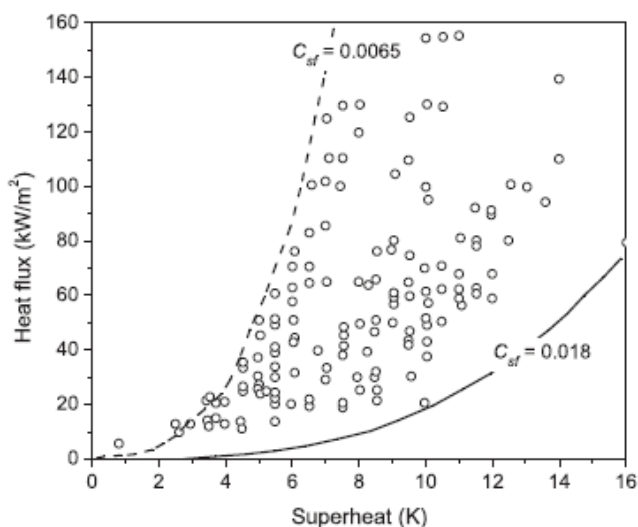


Рис. 4. Сравнение результатов расчета по зависимости (3) с экспериментальными данными.

Влияние смачиваемости и шероховатости обогреваемой поверхности на КТП

На изменение структуры обогреваемой поверхности при кипении наножидкости влияет много факторов, включая исходное состояние поверхности, размер, распределение и концентрация наночастиц, величина теплового потока [13,14]. Слой осаждения наночастиц на обогреваемой поверхности имеет наиболее существенное влияние на плотность активных центров парообразования. В работе [15] предлагается учитывать влияние угла смачивания и шероховатости поверхности на плотность активных центров парообразования согласно зависимости

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

где ΔT_{sup} – недогрев жидкости до температуры насыщения, $\cos\theta^* = R \cos\theta$, R – фактор шероховатости, который определяется отношением эффективных площадей контакта жидкости с шероховатой поверхностью к площади контакта жидкости с гладкой поверхностью. Использование уравнения (4) позволило получить удовлетворительные результаты при определении температуры стенки, как для чистой воды, так и для наножидкости.

Слой осаждения наночастиц влияет на отрывной

диаметр пузыря. Согласно данным работы [16] с уменьшением угла смачивания отрывной диаметр пузыря увеличивается

$$d_b = C_{bw} \frac{2+3\cos\theta^* - \cos^3\theta^*}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (5)$$

Однако эта зависимость не учитывает влияние теплового потока и температуры стенки на отрывной диаметр пузыря.

Авторы работы [17] считают, что 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 наножидкости толщина носового слоя на поверхности может изменяться во времени, вызывая непрерывное изменение микроструктуры поверхности нагрева. В работе [18] дается следующая

зависимость изменения во времени толщины нанослоя δn при кипении наножидкости в зависимости от объемной концентрации наночастиц φ

$$\frac{d\delta n}{dt} \sim \delta_m \frac{\pi}{4} d_b^2 \varphi n f$$

где δ_m – толщина микрослоя жидкости. Результаты экспериментов [18] при кипении наножидкостей на водной основе с наночастицами SiO_2 , Al_2O_3 и ZrO_2 концентрацией 0,01 % по объему свидетельствуют об увеличении критического теплового потока при уменьшении угла смачиваемости поверхности. Так при уменьшении θ от $\pi/2$ до $\pi/4$ наблюдалось увеличение КТП в 1,4 раза, а при уменьшении θ до $\pi/8$ в 1,8 раза

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 наночастиц продолжается [19].

В работе [20] представлены результаты исследований влияния нанопокрывания обогреваемой поверхности на теплоотдачу и критический тепловой поток при кипении воды. Исследовались поверхности с покрытием из наночастиц Al_2O_3 и SiC , полученным в результате кипения соответствующих наножидкостей. На поверхностях

с покрытием из наночастиц получено увеличение КТП на 30...50 % по сравнению с исходной гладкой поверхностью. Рост КТП связывают с уменьшением контактного угла смачивания на поверхностях с нанопокрыванием по сравнению с гладкой поверхностью. Полученные результаты согласуются с расчетами критического теплового потока по формуле Кандликара [21]

$$q_{\text{кр}} = \rho_v^{1/2} r \left(\frac{1 + \cos\theta}{16} \right) \left[\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos\theta) \cos\alpha \right]^{1/2} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{1/4}, \quad (6)$$

где $\alpha = 0$ для горизонтальной поверхности. На рис. 5 представлены зависимости КТП от угла смачивания θ , рассчитанные по формулам (1) и (6). Здесь приведены значения критического теплового потока, отнесены к значениям КТП для поверхности из нержавеющей стали с углом смачивания $\theta = 80^\circ$.

Приведенные данные показывают, что увеличение критического теплового потока с уменьшением угла смачивания может достигать 160 %, что согласуется с экспериментальными данными при кипении наножидкостей [22].

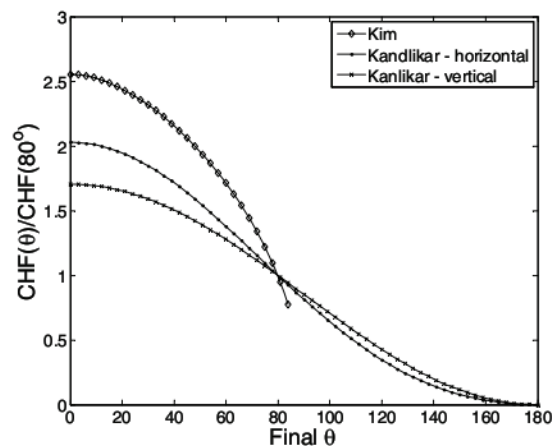


Рис. 5. Зависимость критического теплового потока от угла смачивания θ [20].

Осаждение слоя наночастиц на обогреваемой поверхности приводит к изменению не только угла смачивания, но и всей топографии поверхности. Хорошо известно, что нанесение пористых покрытий на обогреваемую поверхность существенно интенсифицирует теплоотдачу при кипении охлаждающей жидкости [23–25]. Нанопористый слой способствует капиллярному увлажнению поверхности в результате проникновения жидкости по микроканалам и порам по поверхности паровых пузырей на поверхности нагревателя. Авторы работы [24] утверждают о перерождении (трансформации) кипения на пористых обогреваемых поверхностях, где передача теплоты осуществляется теплопроводностью через жидкую пленку с последующим испарением с поверхности раздела фаз.

В работе [25] представлены результаты эксперимен-

тальных исследований влияния шероховатости, смачиваемости и нанопористости обогреваемой поверхности на теплообмен при пленочном кипении жидкости. Показано, что наибольшее влияние на процесс теплообмена оказывает нанопористость поверхности. Пузырьки пара более легко зарождаются на нанопористой поверхности и очень быстро растут в сильно недогретой жидкости. Нанопористость является одним из важнейших условий повышения критического теплового потока, так как препятствует образованию стабильной паровой пленки на обогреваемой поверхности. Капиллярное увлажнение совместно с эффектом смачиваемости поверхности способствует уменьшению сухих пятен на обогреваемой поверхности в предкризисных режимах, что способствует росту КТП.

Несмотря на то, что обзоры, посвященные тепло-

обмену при кипении наножидкостей насчитывают сотни работ, теоретическое описание механизмов процесса кипения наножидкостей, способное прогнозировать условия возникновения кризиса теплообмена на обогреваемой поверхности, встречается крайне редко.

В настоящее время успешно используется модель CFD (Computational Fluid Dynamics) для описания процессов пузырькового кипения воды, хладагентов, криогенных жидкостей [26-30]. Это двухжидкостные модели, в которых процессы тепломассопереноса на поверхности нагревателя моделируются путем разделения теплового потока на три составляющие [30,31]

$$q = q_e + q_q + q_c, \quad (7)$$

где q_e – тепловой поток, который расходуется на испарение, q_q – на теплообмен после отрыва пузырька и до зарождения нового на том же месте, q_c – на конвективный теплообмен между стенкой и наножидкостью. Для составляющих теплового потока используются следующие зависимости [31]:

$$q_e = \frac{\pi}{6} d_{bw}^3 \rho_w \nu f n r, \quad (8)$$

$$q_q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} f A_q \sqrt{t_w \lambda_l \rho_l c_{pl}} (T_w - T_l), \quad (9)$$

$$q_c = A_c St \rho_l c_{pl} u_l (T_w - T_l), \quad (10)$$

где t_w – время ожидания зародыша пузырька, A_q – часть площади обогреваемой поверхности после отрыва пузырька, A_c – часть площади обогреваемой поверхности с конвективным теплообменом.

Для моделирования процесса кипения наножидкости необходимо задание внутренних характеристик двухфазного потока, таких как отрывной диаметр пузырьков d_{bw} , частота их отрыва, плотность активных центров парообразования. Большинство экспериментальных данных по кипению наножидкостей направлено на определение этих параметров, однако полученные данные имеют узкий диапазон применения, ограниченный условиями проведения эксперимента. Как отмечалось выше, визуализация процессов кипения наножидкости с увеличением концентрации наночастиц становится затруднительной, поэтому получить данные о внутренней структуре двухфазного потока в широком диапазоне изменения параметров сложно.

Показано, что классическая модель разделения тепловых потоков (7) – (10) дает хорошую точность определения параметров теплообмена для пузырькового кипения чистой воды, но в значительной степени завышает данные для наножидкости [31]. Для точного прогнозирования теплоотдачи при кипении наножидкости нужны данные о характеристиках слоя осаждения наночастиц на обогреваемой поверхности, от которого в основном зависят условия возникновения и развития процесса кипения.

В работах [32-34] представлены результаты теоретического анализа теплофизических процессов при кипении наножидкости. Математическая модель течения

и теплообмена при кипении наножидкости на плоской обогреваемой поверхности учитывает броуновскую и термофоретическую диффузии, влияние концентрации наночастиц в жидкости. Показано, что увеличение теплопроводности и концентрации наночастиц способствует увеличению коэффициента теплоотдачи в режимах пузырькового и пленочного кипения наножидкости на плоской обогреваемой поверхности.

Выводы

Анализ работ по исследованию кризиса теплообмена на обогреваемой поверхности при кипении наножидкости в большом объеме показал:

- величина критического теплового потока увеличивается с увеличением концентрации наночастиц в жидкости и длительности процесса кипения;
- существует предельное значение концентрации наночастиц в жидкости, выше которой дальнейшее увеличение критического теплового потока не наблюдается;
- увеличение КТП при кипении наножидкости связывают с формированием слоя осаждения наночастиц на обогреваемой поверхности, который способствует изменению микрохарактеристик процесса кипения, уменьшению угла смачиваемости поверхности;
- формирование на теплоотдающей поверхности пористого нанослоя способствует также более эффективному увлажнению сухих пятен в предкризисных режимах, что влияет на повышение КТП;
- недостаточное исследование микрохарактеристик процесса кипения наножидкостей мешает разработке надежных методов прогнозирования условий возникновения кризисных явлений и получению интегральных характеристик теплоотдачи и критического теплового потока.

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. Суртаев А.С., Сердюков В.С., Павленко А.Н. Нанотехнологии в теплофизике: теплообмен и кризисные явления при кипении// Российские нанотехнологии. – 2016. – т.11, №11–12. – С. 18–22
6. 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, № 1. – P.340–351

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. –P.2407–2419

8. *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. –№ 16. –P.3374–3376

9. *Bang I.C., Chang S.H., Baek W.P.* Visualization of a Principle Mechanism of Critical Heat Flux in Pool Boiling// *Int. J. Heat Mass Transfer.* –2005. –v.48(25–26). –P.5371–5385

10. *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, № 5. –P.1–16

11. *Taylor R.A., Phelan P.E.* Pool boiling of nanofluids: comprehensive review of existing data and limited new data// *Int. J. Heat Mass Transfer.* –2009. –52. –P.5339–5347

12. *Rohsenow W.M.* A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids// *Trans. FSME.* – 1952. –74. –P.969–976

13. *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

14. *Pirol L.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

15. *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

16. *Phan H.T., Caney N., Marty P., Colasson S., Gavillet J.* Surface wettability control by nanocoating : the effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism // *Int. J. Heat Mass Transf.* –2009. –52. – P.5459–5471

17. *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

18. *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

19. *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

20. *Шустов М.В.* Исследование кипения в микроканале с покрытием из наночастиц/ Диссертация... канд. техн. наук. – Москва: МЭИ, 2015. –119 с.

21. *Kandlikar S.G.* A Theoretical Model to Predict

Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle Orientation// *J. Heat Transfer.* –2001. –v.123. –№6. – P.1071–1079

22. *Kim H., Kim M.* Experimental study of the Characteristics and Mechanism of Pool Boiling CHF Enhancement Using Nanofluids// *J. Heat Mass Transfer, Special Issutr.* –2009. –45. –P.991–998

23. *Толубинский В.И.* Теплообмен при кипении. – Киев: Наукова Думка. –1980. –316 с.

24. *Зейгарник Ю.А.* Переродившееся кипение и интенсификация теплоотдачи// *Теплофизика высоких температур.* –2001. –т.39, №3. –С.479–487

25. *Kim H., Truond B., Buongiorno J., Hu L.W.* On the effect of surface roughness height, wettability, and nanoporosity on Leidenfrost phenomena// *Applied Physics Letters.* –2011. –98. –083121

26. *Tu J.Y., Yeoh G.H.* On numerical modeling of low-pressure subcooled boiling flows// *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2002. –45. – P.1197–1209

27. *Yeoh G.H., Tu J.Y.* Population balance modeling for bubbly flows with heat and mass transfer// *Chem. Eng. Sci.* – 2004. –59. – P.3125–3139

28. *Li X.D., Wei W., Wang R.S., Shi J.M.* Numerical and experimental investigation of heat transfer on heating surface during subcooled boiling flow of liquid nitrogen// *Int. J. Heat Mass Transf.* –2009. –52. – P.1510–1516

29. *Yeoh G.H., Cheung S.C.P., Tu J.Y., Ho M.K.M.* Fundamental consideration of wall heat partition of vertical subcooled boiling flows// *Int. J. Heat Mass Transf.* –2008. – 51. – P.3840–3853

30. *Basu N., Warriar G.R., Dhir V.K.* Wall heat flux partitioning during subcooled flow boiling: part 1// *J. Heat Transf.* –2005. –127. –P.131–140

31. *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

32. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Blinov D.G.* Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface// *Int. Journal of Thermal Sciences.* –2015. – 92. –P.106–118

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

34. *Авраменко А.А., Ковецкая М.М., Тыринов А.И.* Особенности теплообмена при кипении наножидкости// *Промышленная теплотехника.* –2017. –т.39, №3. – С.25–34

FEATURES OF HEAT TRANSFER CRISIS ON HEATING SURFACE DURING BOILING OF NANOFLUIDS

Kovetskaya M.M.

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

The results of studies of the heat transfer crisis during boiling nanofluids in large volume are analyzed. The effect of the nanoparticle concentration, roughness and wettability of the heated surface on the increasing critical heat flux is determined. The main influence on the increase in the critical heat flux is caused by the formation of deposition layer of nanoparticles on the heated surface. The formation of porous nanolayer contributes to more efficient moistening of dry spots in pre-crisis conditions and prevents formation of stable vapor film on the heated surface.

References 34, figures 5

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. Surtaev A.S., Serdyukov V.S., Pavlenko A.N. Nanotehnologii v teplofizike: teploobmen i krizisnyie yavleniya pri kipenii. [Nanotechnologies in thermophysics: heat transfer and crisis phenomena during boiling]. *Rossiyskie nanotehnologii [Russian nanotechnologies]*, 2016, №11–12, P. 18–22 (Rus.)
6. 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, № 1, P.340–351
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, P.2407–2419
8. 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, № 16, P.3374–3376
9. Bang I.C., Chang S.H., Baek W.P. Visualization of a Principle Mechanism of Critical Heat Flux in Pool Boiling. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2005, v.48(25–26), P.5371–5385
10. 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, № 5, P.1–16

11. Taylor R.A., Phelan P.E. Pool boiling of nanofluids: comprehensive review of existing data and limited new data. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2009, 52, P.5339–5347
12. Rohsenow W.M. A method of correlating heat transfer data for surface boiling liquids. *Trans. FSME*, 1952, 74, P.969–976
13. 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
14. Piore I.L., Rohsenow W.M., Doerffer S.S. Nucleate pool-boiling heat transfer. I review of parametric effects of boiling surface. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2004, 47, P.5033–5044
15. 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
16. Phan H.T., Caney N., Marty P., Colasson S., Gavillet J. Surface wettability control by nanocoating : the effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2009, 52, P.5459–5471
17. 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
18. 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
19. 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
20. Shustov M.V. Issledovanie kipeniya v mikrokanale s pokrytiem iz nanochastits. [The study of boiling in a microchannel coated with nanoparticles] , Moscow, 2015, 119P. (Rus.)
21. Kandlikar S.G. A Theoretical Model to Predict Pool Boiling CHF Incorporating Effects of Contact Angle Orientation. *J. Heat Transfer*, 2001, v.123, №6, P.1071–1079
22. Kim H., Kim M. Experimental study of the Characteristics and Mechanism of Pool Boiling CHF Enhancement Using Nanofluids. *J. Heat Mass Transfer, Special Issutr*, 2009, 45, P.991–998
23. Tolubinskiy V.I. Teploobmen pri kipenii [Heat transfer at boiling point]. Kiev, Naukova dumka [Kyiv, scientific thought], 1980, 316P. (Rus.)
24. Zeygarnik Yu.A. Pererodivsheesya kipenie i intensivatsiya teplootdachi [Revived boiling and intensification of heat transfer]. *Teplofizika vyisokih temperatur [Thermal physics of high temperatures]*, 2001, V. 39, №3, P.479–487. (Rus.)
25. Kim H., Truond B., Buongiorno J., Hu L.W. On the effect of surface roughness height, wettability, and nanoporosity on Leidenfrost phenomena. *Applied Physics Letters*, 2011, 98, 083121
26. Tu J.Y., Yeoh G.H. On numerical modeling of low-pressure subcooled boiling flows. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2002, 45, P.1197–1209

27. *Yeoh G.H., Tu J.Y.* Population balance modeling for bubbly flows with heat and mass transfer. *Chem. Eng. Sci.*, 2004, 59, P.3125–3139
28. *Li X.D., Wei W., Wang R.S., Shi J.M.* Numerical and experimental investigation of heat transfer on heating surface during subcooled boiling flow of liquid nitrogen. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2009, 52, P.1510–1516
29. *Yeoh G.H., Cheung S.C.P., Tu J.Y., Ho M.K.M.* Fundamental consideration of wall heat partition of vertical subcooled boiling flows. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2008, 51, P.3840–3853
30. *Basu N., Warriar G.R., Dhir V.K.* Wall heat flux partitioning during subcooled flow boiling: part 1. *J. Heat Transf.* 2005, 127, P.131–140
31. *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
32. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Tyrinov A.I., Blinov D.G.* Heat transfer in stable film boiling of a nanofluid over a vertical surface. *Int. Journal of Thermal Sciences*, 2015, 92, P.106–118
33. *Avramenko A.A., Shevchuk I.V., Abdallah S., Blinov D.G., Yarmand S., Tyrinov A.I.* Symmetry analysis for film boiling of nanofluids on a vertical plate using a nonlinear approach. *Jour. of Molecular Liquids*, 2016, № 223, P.156–164
34. *Avramenko A.A., Kovetskaya M.M., Tyrinov A.I.* Osobennosti teploobmena pri kipenii nanozhidkosti [Features of heat transfer during boiling of nanofluids]. *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial heat engineering]*, 2017, V.39, №3, P.25–34. (Rus.)

Отримано 06.02.2018
Received 06.02.2018