

03

Критический тепловой поток при кипении водной дисперсии наночастиц

© Б.С. Фокин, М.Я. Беленький, В.И. Альмяшев,
В.Б. Хабенский, О.В. Альмяшева, В.В. Гусаров

Научно-производственное объединение по исследованию
и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова,
Санкт-Петербург
Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,
Санкт-Петербургское отделение
E-mail: vac@mail.ru

Поступило в Редакцию 28 ноября 2008 г.

Исследовано влияние наночастиц в их водной дисперсии на предельную величину плотности теплового потока (критическую плотность потока), отводимого кипящей жидкостью от теплообменной поверхности. Показано иерархическое строение формирующегося на поверхности нагрева в процессе кипения слоя наночастиц. Сделан вывод о том, что гидрофильность этого слоя и его высокая проницаемость, облегчающая подвод жидкости к пузырькам пара, приводят к повышению величины критической плотности теплового потока.

PACS: 47.56.+r, 47.61.-k

Эффективным методом отвода тепла от поверхностей нагрева, используемым в различных областях техники, является кипение жидкости. Однако плотность теплового потока, отводимого кипящей жидкостью от теплообменной поверхности, ограничена предельной величиной — критической плотностью теплового потока (q_{cr}), при превышении которой резко уменьшается коэффициент теплообмена [1].

Повышения q_{cr} можно достичь, используя в качестве теплоносителя водные дисперсии наночастиц различного химического состава и объемной концентрации (наножидкости) [2,3], однако механизм повышения q_{cr} остается невыясненным. Например, в [4] теоретически доказывалось, что сделанные ранее предположения о формировании перколяционных кластеров из наночастиц, приводящих к увеличению теплопереноса через жидкую фазу, несостоятельны. Вместе с тем знание механизма процесса позволяет управлять им. Таким образом, вопрос о механизме повышения q_{cr} при введении в воду незначительного количества наночастиц является актуальным.

Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что даже очень очень малые объемные концентрации наночастиц в воде (0.001–0.1 vol.%) приводят к существенному повышению q_{cr} [2,3]. При этом теплофизические свойства воды с наночастицами (поверхностное натяжение, теплопроводность, вязкость, теплота парообразования, температура кипения), как показано в [2–4], практически не отличаются от теплофизических свойств дистиллированной воды.

В работе исследован кризис кипения водной дисперсии наночастиц на горизонтально расположенной нихромовой проволоке (марки Х20Н80) диаметром $D = 0.2$ mm, нагреваемой переменным электрическим током. Погрешность измерения критической тепловой нагрузки не превышала 6%. В качестве рабочей жидкости использовалась дистиллированная вода с содержанием наночастиц (C_{vol}) до 1 vol.% при давлении $p = 0.1$ МПа и температуре $T = (100 \pm 1)^\circ\text{C}$. Использовали наночастицы состава ZrO_2 (3.5 mol.% Y_2O_3) размером 15 ± 5 nm, полученные гидротермальным методом [5].

Результаты экспериментов представлены на рис. 1 в виде зависимости $q_{cr}^D = j(C_{vol})$ в диапазоне изменения объемной концентрации наночастиц от 0 до 1 vol. %.

В отличие от данных работ [2,3], полученная зависимость q_{cr}^D от объемного содержания наночастиц ZrO_2 (3.5 mol.% Y_2O_3) в воде имеет в пределах погрешности монотонный характер (рис. 1). При увеличении содержания наночастиц до 0.02 vol.% q_{cr}^D в описанных выше условиях эксперимента возрастает, достигая увеличения критического теплового потока в 1.5 раза ($q_{cr}^D = 3.3$ MW/m²) и при дальнейшем увеличении объемного содержания до 1 vol.% остается практически постоянным (рис. 1), что, по-видимому, связано с образованием при длительном кипении дисперсии наночастиц, начиная с определенного их содержания

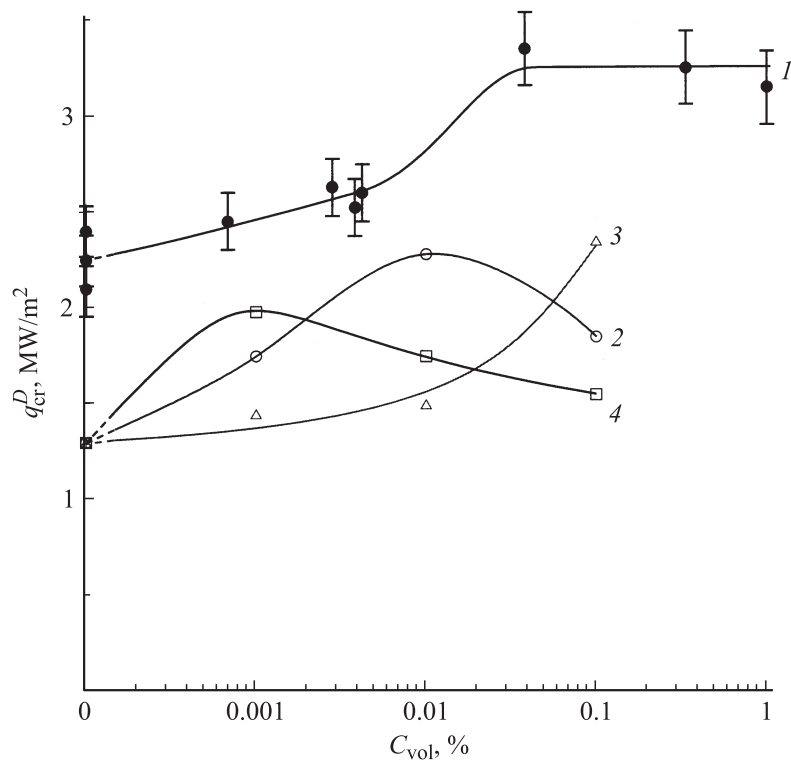


Рис. 1. Зависимость критической плотности теплового потока q_{cr}^D от содержания наночастиц в дистиллированной воде C_{vol} : 1 — данные настоящего исследования, наночастицы ZrO_2 (3.5 mol.% Y_2O_3); 2, 3, 4 — данные [3], наночастицы ZrO_2 , SiO_2 и Al_2O_3 соответственно.

в воде, предельного по степени влияния на q_{cr} слоя наночастиц на поверхности проволоки.

Анализ рельефа слоя наночастиц, формирующегося на поверхности при кипении наножидкости, представленного на рис. 2, свидетельствует о появлении регулярно расположенных в нем кратеров с характерным диаметром около $20 \mu m$. Электронно-микроскопическое исследование структуры этих кратеров (сканирующий электронный микроскоп

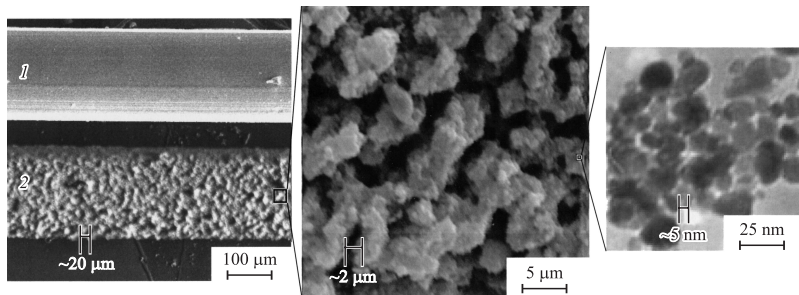


Рис. 2. Микрофотографии исходной проволоки (1) и проволоки после кипения в наножидкости (2): структура слоя наночастиц ZrO_2 (3.5 mol.% Y_2O_3) на поверхности проволоки.

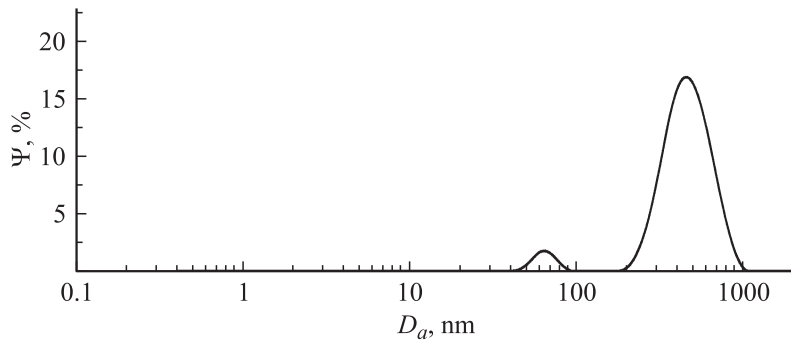


Рис. 3. Распределение агломератов наночастиц ZrO_2 (3.5 mol.% Y_2O_3) (ψ — плотность распределения) по размеру (D_a) в наножидкости (при $T = 60^\circ C$).

Hitachi S-570) показывает, что они, в свою очередь, сформированы из пористой матрицы с характерными размерами макропор около $2-5 \mu m$. Характерный размер стенок каркаса матрицы также варьируется в диапазоне $2-5 \mu m$. Так как размер агломератов наночастиц, находящихся в воде, по данным, полученным методом динамического рассеяния света (анализатор Malvern Zetasizer Nano ZS), изменяется в достаточно узком диапазоне (рис. 3), то можно ожидать высокой пористости каркаса, образованного укладкой таких агломератов в процессе кипения. При

этом основная доля пор между агломератами будет иметь характерный размер около 100 nm. В свою очередь, сами агломераты, как показывают результаты исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (просвечивающий электронный микроскоп ЭМ-125), состоят из наночастиц диаметром 10–20 nm, между которыми находятся поры размером около 5 nm (рис. 2).

Таким образом, формирующийся при кипении слой из наночастиц ZrO_2 (3.5 mol. % Y_2O_3) обладает иерархическим пористым строением, что с учетом его высокой общей пористости и гидрофильности поверхности наночастиц обеспечивает более устойчивый приток жидкости к поверхности нагрева в пристенном слое по сравнению с пузырьковым кипением жидкости без наночастиц. Этот фактор и увеличение смачиваемости поверхности при образовании вышеописанного слоя вследствие его гидрофильности, по-видимому, и определяют увеличение в 1.5 раза q_{cr} в наножидкости.

Авторы выражают благодарность М.Д. Толкачеву (ИГГД РАН) и В.В. Кнауфу (ЗАО „НАТИ“) за помощь в проведении электронно-микроскопических исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-08-12160-офи).

Список литературы

- [1] *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
- [2] *Kim S.J., Truong B., Buongiorno J., Hu L.W., Bang I.C.* // Paper 6005. Proceedings of ICAPP'06. Reno, NV USA, June 4–8, 2006.
- [3] *Kim S.J., Bang I.C., Buongiorno J., Hu L.W.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 4105–4116.
- [4] *Eapen J., Li Ju, Yip S.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. P. 028302.
- [5] *Альмяшева О.В.* Гидротермальный синтез, структура и свойства нанокристаллов и нанокомпозитов на основе системы $ZrO_2-Al_2O_3-SiO_2$. Автореф. дис... к.х.н. СПб., 2007. 22 с.