

03

Влияние диаметра, материала наночастиц и размера нагревателя на критическую плотность теплового потока при кипении наножидкостей

© М.И. Пряжников^{1,2}, А.В. Минаков^{1,2,3}, В.Я. Рудяк²

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск

² Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет

³ Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: Aminakov@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 27 февраля 2015 г.

Экспериментально изучено насыщенное кипение наножидкостей на цилиндрическом нагревателе. Исследуемые наножидкости были приготовлены на основе дистиллированной воды и наночастиц оксидов кремния и алюминия. Объемная концентрация наночастиц изменялась в диапазоне от 0.05 до 0.5%. Диаметр наночастиц варьировался от 10 до 100 nm, диаметр нагревателя варьировался от 0.1 до 0.3 mm. Установлено, что критическая плотность теплового потока в наножидкостях зависит от материала и размера наночастиц, а также от диаметра использовавшегося цилиндрического нагревателя. Показано, что с ростом размера наночастиц критическая плотность теплового потока увеличивается, а с увеличением диаметра нагревателя, напротив, падает.

Кипение, в качестве одного из наиболее эффективных и действенных способов теплообмена, используется в различных инженерных приложениях. Поэтому еще в прошлом веке повышение критической плотности теплового потока при кипении было предметом многочисленных исследований (см., например, [1–3] и цитированную там литературу). В последнее время для этой цели интенсивно изучается возможность применения наножидкостей. По-видимому, первыми работами по исследованию кипения и кризиса кипения наножидкостей следует считать работы [4,5]. В работе [4] исследовалось кипение двух наножидкостей на основе воды с частицами диоксида кремния и оксида алюминия на 10-mm квадратном нагревателе и было установлено, что наличие наночастиц повышает характеристики кипения.

С другой стороны, в [5] исследовалось также пузырьковое кипение наножидкости на основе воды с частицами оксида алюминия, но на цилиндрическом нагревателе диаметром 20 мм. Авторы этой работы пришли к выводу, что наличие наночастиц ухудшает характеристики кипения, и тем больше, чем выше концентрация частиц. Аналогичный вывод сделан и в [6], это объяснялось „выглаживанием“ поверхности нагревателя из-за осаждения на нем наночастиц. Такое объяснение, однако, не согласуется с наблюдениями [7], где изучалось кипение той же наножидкости на 100-мм квадратном нагревателе и было установлено, что шероховатость поверхности нагревателя после завершения процесса кипения увеличивалась с ростом концентрации частиц.

К настоящему времени известно уже более двух десятков статей, посвященных данной тематике. В большинстве из них отмечается существенный рост критического теплового потока (КТП) при использовании наножидкостей (см. обзор [8]). В нашей последней работе [9] помимо этого было установлено, что рост КТП зависит также от размеров наночастиц. Вместе с тем до сих пор отсутствуют систематические данные о том, какова эта зависимость, не ясно, как влияет на КТП материал наночастиц и размер нагревателя. Цель данной работы и состоит в определении этих зависимостей.

Исследование кипения наножидкостей выполнялось на установке, которая детально описана в работе [9]. Исследуемая жидкость помещалась в герметичную стеклянную колбу диаметром 8 см. Объем исследуемой жидкости в колбе 300 ml. В емкость с жидкостью в качестве нагревателя помещалась нихромовая нить длиной 34 ml, закрепленная медными шинами сечением 10×2 mm, по которым подавался электрический ток. С помощью программируемого источника на нихромовый нагреватель подавалось напряжение, которое фиксировалось прецизионным вольтметром GDM-78261. Колба с исследуемой жидкостью была герметично закрыта резиновой пробкой. Образующийся при кипении конденсат стекал обратно в колбу, тем самым поддерживая условия насыщения в рабочей камере. Таким образом, изучалось насыщенное кипение, на нихромовый нагреватель подавалось напряжение и плотность теплового потока измерялась до тех пор, пока не наступал кризис кипения. Плотность теплового потока при кипении на нагревателе определялась соотношением $q = Q/S = IU/S$, где $S = \pi dL$ — площадь боковой поверхности нагревателя, d , L — диаметр и длина нихромового нагревателя, I — сила тока в цепи нагревателя, U — падение напряжения на нагревателе. С учетом

инструментальной погрешности вольтметра и амперметра, а также погрешностей в измерении геометрических размеров нагревателя погрешность определения плотности теплового потока составляет 2%. Температура поверхности нагревателя определялась по зависимости сопротивления нихромовой нити от температуры. Оценки показывают, что погрешность в определении температуры нагревателя составляла около 3%.

Наножидкости были приготовлены на основе дистиллированной воды и наночастиц оксидов алюминия и кремния с объемной концентрацией от 0.05 до 0.5%. Для приготовления наножидкости применялся стандартный двухшаговый процесс. После добавления в воду необходимого количества нанопорошка наножидкость сначала механически тщательно перемешивалась, а затем для разрушения конгломератов частиц на полчаса помещалась в ультразвуковой диспергатор. Диаметр использовавшихся наночастиц варьировался от 10 до 100 нм. Наночастицы были приобретены у компании „Плазмотерм“ Москва.

Первая серия экспериментов была проведена с целью определить зависимость КТП от концентрации наночастиц. Типичные результаты представлены на рис. 1 для наножидкости с частицами SiO_2 со средним диаметром 25 нм на нагревателе диаметром 0.2 мм. Каждая точка является средним по ансамблю из пяти измерений. После достижения критической тепловой нагрузки происходил переход к пленочному режиму кипения. При этом нагреватель либо мгновенно перегорал, либо в очень редких случаях продолжал работать в пленочном режиме кипения. Такое поведение, например, показано на рис. 1 для воды (рост КТП, который начинается при температуре выше 700°C). При этом измерения в пленочном режиме кипения для наножидкостей осуществить не удавалось, нагреватель практически всегда перегорал. Это и неудивительно, как видно, критическая тепловая нагрузка при переходе в наножидкости в 2–3 раза выше, чем у воды. С увеличением концентрации наночастиц критическая плотность теплового потока растет. На рис. 1 видно, что при концентрации наночастиц 0.05% КТП равна 2.27 MW/m^2 , для концентрации 0.1% — 2.8 MW/m^2 и для концентрации 0.5% — 3.5 MW/m^2 .

Вторая серия экспериментов проведена для изучения влияния на КТП диаметра наночастиц. В работе [9] отмечалось, что КТП, по-видимому, зависит от размера наночастиц. Однако там изучались наножидкости с разными частицами (алмаза и оксида железа), поэтому

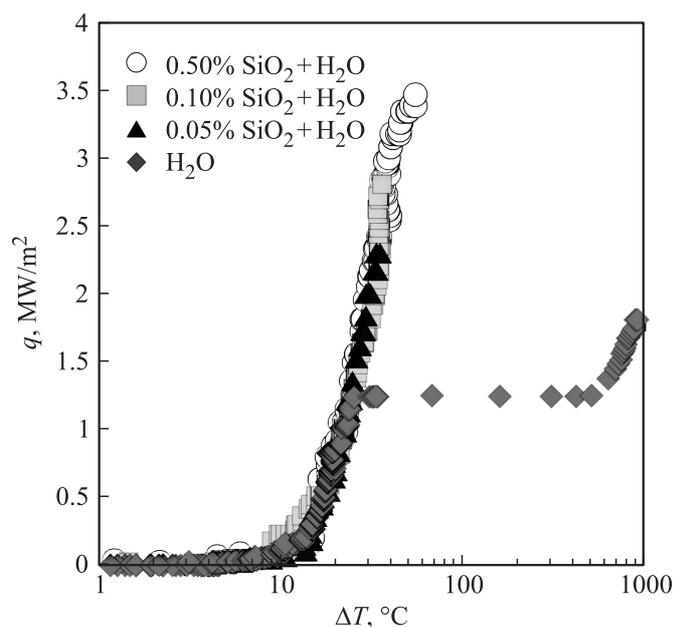


Рис. 1. Кривые кипения в дистиллированной воде и наножидкостях с различной концентрацией частиц SiO₂.

сделать окончательный вывод было нельзя. Необходимо было изучить КТП наножидкостей с одинаковым материалом частиц, но разными их размерами. В данной работе рассматривались две наножидкости с частицами оксида кремния и оксида алюминия. Их размер варьировался от 25 до 100 nm. Диаметр нагревателя был равен 0.2 mm. Результаты измерений для концентрации наночастиц, равной 0.05%, представлены на рис. 2, где приведена зависимость относительной критической плотности теплового потока (q/q_w). Здесь q_w — критическая плотность теплового потока в дистиллированной воде. Для обеих наножидкостей критическая плотность теплового потока растет с увеличением диаметра наночастиц. Вторым важным обстоятельством является зависимость критической плотности теплового потока от материала наночастиц. Обе представленные здесь жидкости приготовлены на основе воды, тем не менее критическая плотность теплового потока при кипении

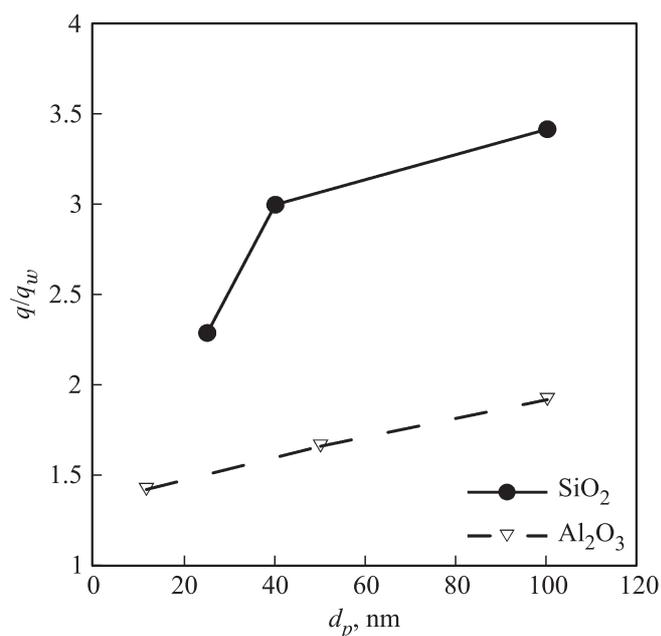


Рис. 2. Зависимость относительной критической плотности теплового потока от диаметра наночастиц при концентрации 0.05%.

наножидкости с частицами оксида алюминия существенно ниже (почти вдвое), чем с частицами оксида кремния.

Далее было исследовано влияние диаметра нагревателя. Диаметр нагревателя варьировался от 0.1 до 0.3 mm. Полученные данные для наножидкости с частицами оксида кремния со средним размером 25 nm представлены на рис. 3, где приведена зависимость относительной критической плотности теплового потока (q/q_w). Здесь q_w — критическая плотность теплового потока для каждого из нагревателей в дистиллированной воде. Как видно, с уменьшением диаметра нагревателя критическая плотность теплового потока значительно повышается.

Итак, проведенные эксперименты показали, что использование наножидкостей позволяет при кипении в разы увеличить критическую плотность теплового потока даже при очень небольших концентрациях

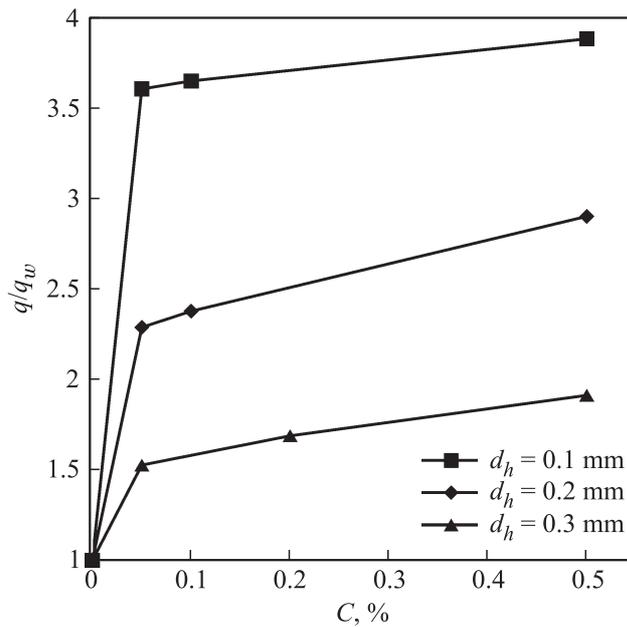


Рис. 3. Зависимость относительной критической плотности теплового потока от концентрации частиц для различных диаметров нагревателя.

наночастиц (менее 1%). Второе важное обстоятельство — зависимость результата от диаметра нагревателя. С его уменьшением приращение критического теплового потока растет. Это, по-видимому, связано с определяющей ролью в процессе осаждения наночастиц на поверхности нагревателя, которое увеличивает его шероховатость, высказанной впервые в работе [10]. При одинаковой концентрации наночастиц в жидкости необходимая для интенсификации процесса высота отложений на поверхности меньшего нагревателя формируется гораздо быстрее, чем на поверхности большего. Более того, одинаковые слои наночастиц на нагревателях разного размера могут сформироваться лишь при различных объемных концентрациях наночастиц. Для большего нагревателя необходимы более высокие концентрации наночастиц. Существование подобной зависимости, видимо, является одной из главных причин значительных расхождений в результатах экспериментов, проведенных

различными авторами. Практически все эти эксперименты делались на нагревателях существенно различных размеров и формы.

Весьма вероятно, что этой же причиной объясняется и зависимость КТП от размера наночастиц. Здесь имеют место два конкурирующих процесса. С одной стороны, с уменьшением диаметра наночастиц их числовая плотность в жидкости возрастает (см. оценки в [9]), а значит и возрастает число центров парообразования, что способствует росту КТП. С другой стороны, шероховатость поверхности увеличивается с ростом размера осаждающихся наночастиц. Здесь следует также иметь в виду то обстоятельство, что осаженные частицы из-за их высокой температуры значительно сильнее интенсифицируют процесс парообразования, нежели частицы в объеме, поскольку температура последних просто равна температуре кипения воды.

Таким образом, в результате исследований показано, что с ростом размера наночастиц критическая плотность теплового потока при кипении наножидкостей увеличивается, а с увеличением диаметра нагревателя, напротив, падает.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение № 14-19-00312).

Список литературы

- [1] Лабунцов Д.А. // Инж.-физ. журн. 1963. Т. 6. № 4. С. 33–40.
- [2] Кузма-Кичта Ю.А. и др. // Теплоэнергетика. 1997. № 6. С. 53–57.
- [3] Ягов В.В. // ИФЖ. 1993. Т. 64. С. 740–751.
- [4] You S.M., Kim J.H., Kim K.H. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. P. 3374–3376.
- [5] Das S.K., Putra N., Roetzel W. // Int. J. Multiphase Flow. 2003. V. 29. P. 1237–1247.
- [6] Tsai C.Y., Chien H.T., Ding P.P., Chan B., Luh T.Y., Chen P.H. // Mater. Lett. 2003. V. 58. P. 1461–1465.
- [7] Bang I.C., Chang S.H. // Proceedings of ICAPP. Pittsburgh, US. 2004. P. 272.
- [8] Kamatchi R., Venkatachalapath S. // International J. Thermal Sciences. 2015. V. 87. P. 228–240.
- [9] Минаков А.В., Лобасов А.С., Рудяк В.Я., Гузей Д.В., Пряжников М.И. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 113. С. 44–51.
- [10] Eung Surk Kim, Jung-Yeul Jung, Yong Tae Kang // J. Mechanical Science and Technology. 2013. V. 27 (10). P. 3177–3182.