

03

Измерение критической плотности теплового потока при кипении наножидкостей на цилиндрическом нагревателе

© А.В. Минаков, А.С. Лобасов, В.Я. Рудяк, Д.В. Гузей,
М.И. Пряжников

Сибирский федеральный университет, Красноярск
Институт теплофизики им. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: Aminakov@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 14 февраля 2014 г.

Экспериментально изучено насыщенное кипение наножидкостей на цилиндрическом нагревателе. Исследуемые наножидкости были приготовлены на основе дистиллированной воды и наночастиц оксида железа Fe_3O_4 и алмаза. Объемная концентрация наночастиц изменялась в диапазоне от 0.25 до 1%. Установлено, что критическая плотность теплового потока в наножидкостях оказывается существенно выше, чем в воде. Помимо этого она зависит от размера наночастиц.

Исследования последних двух десятилетий показали, что наножидкости имеют нестандартные свойства переноса. В частности, малые добавки наночастиц в несущую жидкость могут существенно повышать ее теплопроводность и вязкость [1–4]. Это инициировало многочисленные теплофизические приложения наножидкостей, в частности для интенсификации теплообмена. Выяснилось, что наножидкости действительно имеют повышенные коэффициенты теплоотдачи (см., например, [5,6] и цитированную там литературу). Дальнейшее желание увеличить его привело к изучению теплоотдачи наножидкостей при кипении. Эти работы также достаточно интенсивно проводятся все последнее десятилетие. Тем не менее полученные результаты оказались достаточно противоречивыми. Так, например, в [7] отмечается, что добавление наночастиц не меняет заметно теплоотдачу, авторы [8] указывают

даже на снижение коэффициента теплоотдачи при кипении. Напротив, в [9–11] наблюдалось его увеличение.

В данной работе экспериментально изучено влияния наночастиц на критическую плотность теплового потока при кипении. Исследование теплофизических свойств наножидкостей показало, что они в общем случае зависят не только от объемной концентрации частиц, но и от их размера [4,12,13]. Поэтому в данной работе рассматривались 2 наножидкости с существенно разными размерами частиц. В обоих случаях несущей жидкостью была дистиллированная вода и использовались наночастицы алмаза и оксида железа (III) с объемной концентрацией от 0.25 до 1%. Для приготовления наножидкости применялся стандартный двухшаговый процесс. После добавления в воду необходимого количества нанопорошка емкость с наножидкостью на полчаса для разрушения агрегатов наночастиц помещалась в ультразвуковой диспергатор УЗДН-А. Наночастицы алмаза были приобретены в ФНПЦ „Алтай“, г. Бийск. По данным рентгенофазового анализа удельная поверхность порошка составила $280 \pm 60 \text{ m}^2/\text{g}$, что соответствует среднему размеру наночастиц 5 nm. Нанопорошок оксида железа (III) производства ООО „Передовые порошковые технологии“, г. Томск, имел удельную поверхность $10 \text{ m}^2/\text{g}$, что соответствует среднему размеру частиц 95 nm.

Схема использовавшейся экспериментальной установки представлена на рис. 1. Исследуемая жидкость помещалась в герметичную стеклянную колбу 4 диаметром 8 см. Объем жидкости в колбе составлял 300 ml. В емкость с жидкостью в качестве нагревателя помещалась нихромовая нить 1 диаметром $d = 0.2 \text{ mm}$ и длиной $L = 34 \text{ mm}$, закрепленная медными проводами диаметром 2 mm. С помощью источника GPS-6030D на нагреватель подавалось напряжение, которое фиксировалось с помощью вольтметра GDM-78261 (отмечен буквой V на рис. 1). Сила тока в цепи измерялась с помощью амперметра АРРА-109N (отмечен буквой А на рис. 1). Колба с исследуемой жидкостью была герметично закрыта, поэтому образующийся конденсат стекал в колбу, поддерживая условия насыщения в рабочей камере. Для контроля температуры жидкости в колбе использовалась хромель-копелевая термопара, которая подключалась к измерителю температуры 5 TMP-200. Конец термопары располагался на одном уровне с нихромовым нагревателем на расстоянии 2 см от него.

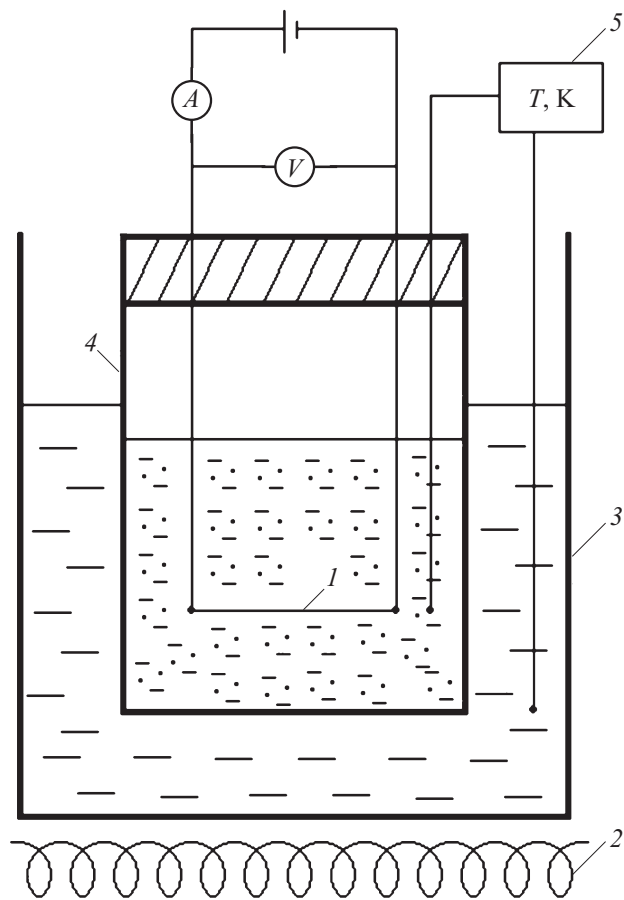


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Колба с исследуемой жидкостью помещалась в водяную баню 3, в которой с помощью электрического нагревателя 2 поддерживалась постоянная температура, которая примерно на 0.5°C была меньше температуры кипения. Таким образом, в работе исследовалось кипение, близкое к насыщенному. Для контроля температуры в водяной бане в нее также помещалась хромель-копелевая термопара, подключенная к

измерителю ТРМ-200. Через некоторое время после помещения колбы в водяную баню температура в ней и в водяной бане выравнивалась. Затем на нихромовый нагреватель подавалось напряжение и измерялась плотность теплового потока. Напряжение повышалось с шагом 20 mV. Стабилизация силы тока в цепи и падение напряжения на нагревателе наступали примерно через 20–40 s, после чего эти значения фиксировались и напряжение увеличивалось дальше до тех пор, пока не наступал кризис кипения.

Плотность теплового потока при кипении на нагревателе определялась соотношением $q = Q/S = IU/S$, где $S = \pi dLS$ — площадь боковой поверхности нагревателя между токоподводящими проводами, Q — тепловой поток, выделяющийся на нагревателе, I — сила тока в цепи нагревателя, U — падение напряжения в нагревателе. Тепло, выделяемое на подводящих проводах, пренебрежимо мало. Суммарная погрешность определения плотности теплового потока составляет около 2%.

Для изучения процессов кипения необходимо также знать температуру поверхности нагревателя. Так как для нихрома зависимость сопротивления R от температуры в исследуемом диапазоне температур близка к линейной, $R = R_0[1 + A(T - T_0)]$, то, измеряя сопротивление нагревателя и зная температурный коэффициент сопротивления A , можно найти значение средней температуры нагревателя: $T = T_0 + (R/R_0 - 1)/A$. Здесь R_0 — сопротивление нагревателя при температуре T_0 . Чтобы определить температурный коэффициент электрического сопротивления нихрома, предварительно выполнена специальная серия измерений сопротивления используемой нихромовой проволоки. Было установлено, что $A = 0.00012$ 1/К. Итоговая погрешность в определении температуры нагревателя составляет около 3%.

В экспериментах для достижения критической тепловой нагрузки постепенно увеличивалось напряжение, подаваемое на нихромовый нагреватель. При достижении критической плотности теплового потока происходил переход от пузырькового режима кипения к пленочному, что вело к резкому увеличению термического сопротивления и соответственно повышению температуры поверхности нагреваемой нити.

Измеренные данные зависимости плотности теплового потока от температуры локального перегрева жидкости $\Delta T = T_w - T_f$ (T_w — температура поверхности нагревателя, T_f — температура жидкости) для однопроцентных наножидкостей представлены на рис. 2. Здесь слева

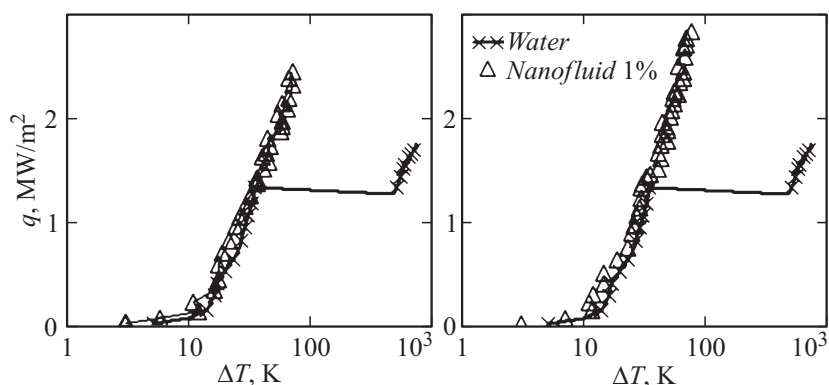


Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока от температуры локального перегрева для наножидкости на основе частиц оксида железа (слева) и алмаза (справа).

составлены кривые кипения для наножидкости (треугольники) с частицами оксида железа и воды (кресты), а справа — с частицами алмаза (треугольники) и воды (кресты). Дистиллированная вода имеет значение критической тепловой нагрузки в пределах $1.2\text{--}1.4\text{ MW/m}^2$, что согласуется с данными [14]. После достижения критической тепловой нагрузки для воды удавалось осуществить переход к пленочному режиму кипения. Такое поведение показано на рис. 2 для воды (2 ветвь кривой кипения). В этом режиме кипения нихромовый нагреватель продолжал работать до температуры 850°C .

В данной статье под критической тепловой нагрузкой имеется в виду нагрузка, соответствующая переходу к пленочному режиму кипения. Поскольку при этом на начальном этапе происходит существенное падение теплоотдачи, то температура нагревателя резко увеличивается, хотя он мог и не перегорать. Именно так происходило для воды. Переход к пленочному режиму кипения для наножидкости осуществить не удалось, нагреватель перегорал. Это и не удивительно, критическая тепловая нагрузка наножидкости с частицами оксида железа почти в 2 раза выше, чем у воды, а наножидкости с частицами алмаза — примерно в 2.3 раза.

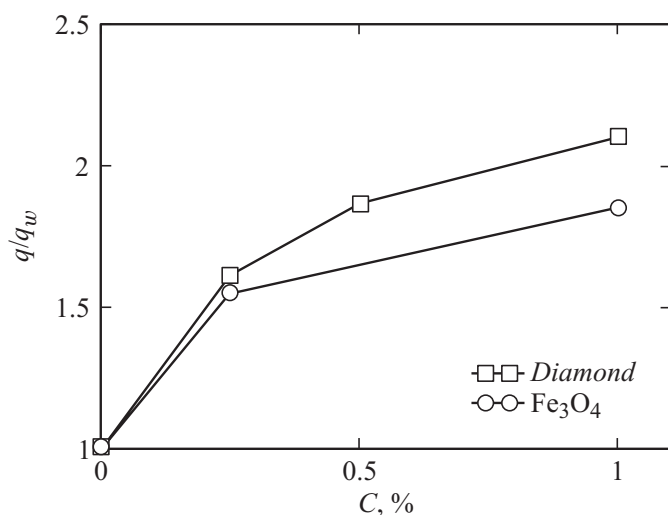


Рис. 3. Относительное увеличение критической тепловой нагрузки по сравнению с дистиллированной водой в зависимости от объемной концентрации наночастиц.

Критическая тепловая нагрузка наножидкостей существенно меняется с ростом объемной концентрации наночастиц. Зависимость относительной критической тепловой нагрузки a/q_w (q_w — значение критической плотности теплового потока для воды) от объемной концентрации наночастиц приведена на рис. 3. Представленные здесь значения критической плотности теплового потока были получены усреднением по данным 5 независимых экспериментов. Значение критической плотности теплового потока для воды равнялось $q_w = 1.32 \text{ MW/m}^2$. Анализ поведения плотности теплового потока при кипении наножидкостей показывает, что использование наночастиц приводит к существенному увеличению критической тепловой нагрузки. Уже при объемной концентрации частиц, равной 0.25%, критическая плотность теплового потока увеличивается более чем на 50% и продолжает расти с дальнейшим повышением концентрации наночастиц. Таким образом, применение наножидкостей может значительно повысить значение критической тепловой нагрузки по сравнению с обычным теплоносителем и, следова-

тельно, повысить энергоэффективность установок, основным процессом теплообмена в которых является кипение.

В заключение необходимо отметить еще одно важное обстоятельство. Критическая тепловая нагрузка наножидкостей с частицами оксида железа и алмаза достаточно сильно различается. При концентрации наночастиц 1% это различие более 40%. Физически данный результат вполне естественен. С уменьшением диаметра d наночастиц их безразмерная числовая плотность nd^3 в жидкости возрастает. Действительно, пусть числовая плотность частиц оксида железа и алмаза соответственно равна: n_{Fe} , n_{C} . Тогда при равной объемной концентрации их отношение обратно пропорционально кубу диаметров: $n_{\text{Fe}}/n_{\text{C}} \sim d_{\text{C}}^3/d_{\text{Fe}}^3$. В данном случае $n_{\text{Fe}}/n_{\text{C}} \sim 7 \cdot 10^3$. Это означает, что в наножидкостях с частицами алмаза почти в 10 тысяч раз больше центров парообразования, чем в жидкостях с наночастицами оксида железа.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (13-01-00052, 14-08-31632) и грантов президента РФ МК-6296.2013.8 и РФ НШ-2924.20.14.1.

Список литературы

- [1] *Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T.* Nanofluids Science and Technology. New Jersey: Wiley-Interscience, 2007. 397 p.
- [2] *Wang X.-Q., Mujumbar A.S.* // International J. Thermal Sciences. 2007. V. 46. P. 1.
- [3] *Рудяк В.Я., Белкин А.А., Томилина Е.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 14. С. 49–54.
- [4] *Rudiyak V.Ya.* // Advances in Nanoparticles. 2013. V. 2. P. 266–279.
- [5] *Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В.* // Теплофизика и аэромеханика. 2010. № 2. С. 173–188.
- [6] *Гузей Д.В., Минаков А.В., Рудяк В.Я., Дектерев А.А.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 5. С. 34–42.
- [7] *Kwark S.M., Kumar R., Moreno G., Yoo J., You S.M.* // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 53 (5–6). P. 972–981.
- [8] *Das S.K., Narayan G. Prakash, Baby A.K.* // J. Nanopart. Res. 2008. V. 10 (7). P. 1099–1108.
- [9] *Coursey J.S., Kim J.* // Int. J. Hat Fluid Flow. 2008. V. 29 (6). P. 1577–1585.
- [10] *Shi M.H., Shuai M.Q., Chen Z.Q., Li Q., Xuan Y.* // J. Enhanced Heat Transfer. 2007. V. 14 (3). P. 223–231.

- [11] Фокин Б.С., Беленький М.Я., Альмяшев В.И., Хабенский В.Б., Альмяшева О.В., Гусаров В.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 10. С. 1–5.
- [12] Timofeeva E.V., Smith D.S., Yu W., France D.M., Singh D., Routbo J.L. // Nanotechnology. 2020. V. 21. P. 215 703.
- [13] Рудяк В.Я., Димов С.В., Кузнецов В.В. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 17. С. 53.
- [14] Анохина Е.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. В. 5. С. 54–62.