

03

Испарение капель воды с углеродными нанотрубками

© В.И. Терехов, Н.Е. Шишкин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск
E-mail: terekhov@itp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 19 июля 2011 г.

Представлены результаты экспериментального исследования процесса испарения капель воды с углеродными нанотрубками. Капли испарялись в потоке сухого воздуха в диапазоне температур $T_0 = (20-200)^\circ\text{C}$; число Рейнольдса по начальному диаметру капли составляло $Re = 500-2000$. Измерение температуры поверхности и скорости испарения капли показали, что добавление наночастиц $\sim 0.1\%$ по массе в базовую жидкость (вода) практически не сказывается на закономерностях теплопереноса.

Изучение процессов испарения жидких капель как состоящих из многокомпонентных смесей, так и содержащих взвешенные включения твердых частиц, имеет большое практическое значение при проектировании различных энергетических устройств [1,2]. Пристальное внимание привлекает и испарение капель на твердой поверхности [3,4]. При высыхании капель протекают различные физико-химические процессы, которые в конечном итоге могут приводить к формированию разнообразных структур. Процессы образования структур, наблюдаемые при испарении капли, важны при проведении медицинской диагностики, при более качественном тестировании лекарственных средств, при струйной печати и в технологии покрытий, при производстве полимерных пленок, создании структурированных поверхностей микро- и наномасштабов и т.д.

В последнее время значительно вырос интерес к изучению теплообменных процессов в наножидкостях (НЖ) [5,6]. Большое число работ посвящено исследованию кипения НЖ. Современное состояние данной проблемы отражено в монографии [7]. В то же время процесс испарения капель НЖ практически не изучался. Исключения составляют работы [8,9], в которых измерялись скорость испарения в окружающую неподвижную воздушную среду подвешенных к капилляру капель НЖ,

а также их поверхностное натяжение. В качестве базовой жидкости использовалась вода, а частиц — лапонит, Ag и Fe₂O₃, концентрация которых составляла 0.05% и только для лапонита 0.5%. Главным выводом этих работ является слабое влияние добавки наночастиц на поверхностное натяжение жидких капель, а также скорость их испарения в начальные моменты времени. При достижении некоторого критического размера скорость испарения капель НЖ снижается, причем наиболее сильно этот эффект проявляется для частиц серебра. Для лапонита изменения скорости испарения капель не наблюдается, а НЖ с частицами Fe₂O₃ занимает промежуточное положение между ними.

Из вышесказанного очевидно, что задача о тепломассопереносе при испарении НЖ далека от своего завершения. В данной работе представлены первые результаты экспериментального исследования испарения капель НЖ в потоке сухого воздуха при вариации его температуры. Объектом исследования были капли дистиллированной воды диаметром ~ 3 mm, в качестве твердой примеси послужили углеродные нанотрубки. Одностеночные нанотрубки были изготовлены фирмой „Карболекс“. Они были произвольной длины, менее 1 μm, и диаметром 1.3 nm. Начальное массовое содержание углеродных частиц в капле было неизменным, и оно составляло ~ 0.1%. Микроскопические исследования показали равномерное распределение нанотрубок в жидкости при отсутствии кластерных образований.

В опытах капли подвешивались на проволочном кольце (диаметр проволоки 50 μm) в центре воздушной струи, вытекающей из канала диаметром 52 mm. Воздух низкой влажности (менее 2%) подавался со скоростью 0–6 m/s, степень турбулентности составляла ~ 5.5%, температура струи изменялась в диапазоне ~ 20–200°C. Были проведены измерения температуры поверхности и размера капель как чистой воды, так и содержащих нанотрубки при изменении скорости и температуры обтекающей струи воздуха с помощью термографической камеры Thermo Tracer TH7102MV. Более подробное описание методики эксперимента и погрешностей измерения представлено в работах [10,11].

На рис. 1 представлены результаты измерения зависимости температуры поверхности испаряющихся капель от времени при различных температурах воздушного потока. Как видно, температура поверхности быстро стабилизируется и принимает равновесное значение с учетом тепловых потерь в поддерживающую каплю провода [12,13]. При этом

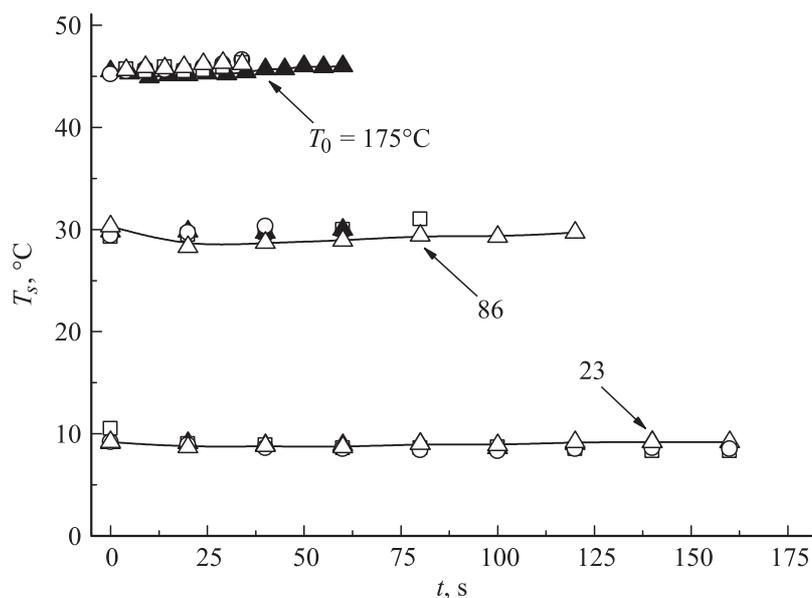


Рис. 1. Температура поверхности испаряющихся капель — темные точки — вода, светлые — НЖ.

температура капель НЖ практически совпадает с каплями чистой воды для всего исследованного диапазона температур окружающего воздуха, что говорит об отсутствии влияния добавки наночастиц на термодинамические параметры процесса испарения. В работе [8] измерение температуры капель не проводилось, что не дает возможности даже качественного их сравнения с данными этой работы.

Скорость испарения капель принято характеризовать по изменению их диаметров d по времени. В такой форме результаты экспериментов показаны на рис. 2 для температур обтекаемого воздуха $T_0 = 23$ и 175°C на рис. 2, *a* и *b* соответственно. Из рисунков следует, что опытные данные для чистой воды и НЖ расслаиваются между собой. Однако при этом следует иметь в виду, что скорость испарения капли зависит от ее начального диаметра d_0 , а обеспечить неизменность этой величины в экспериментах было затруднительно.

Обобщение опытных данных о скорости испарения капель жидкости производилось с использованием методики [10]. Из уравнения теплового

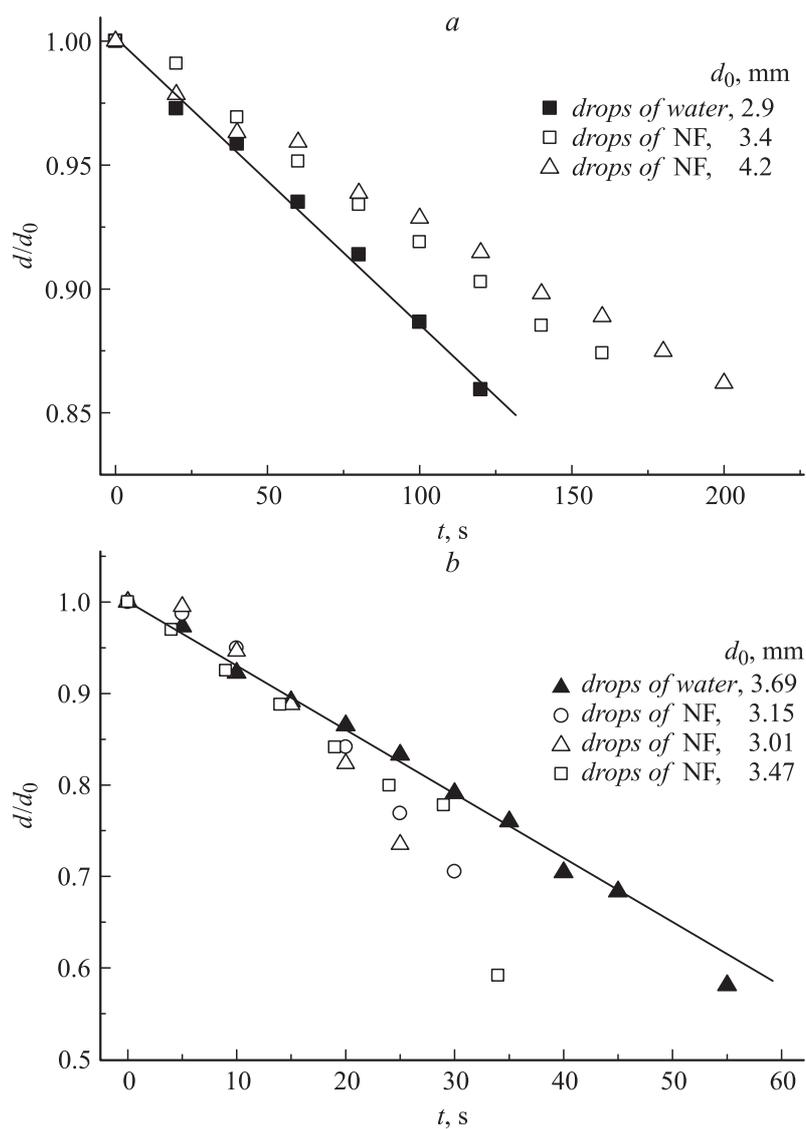


Рис. 2. Изменение диаметра испаряющихся капель: $a - T_0 = 23^\circ\text{C}$; $b - 175^\circ\text{C}$.

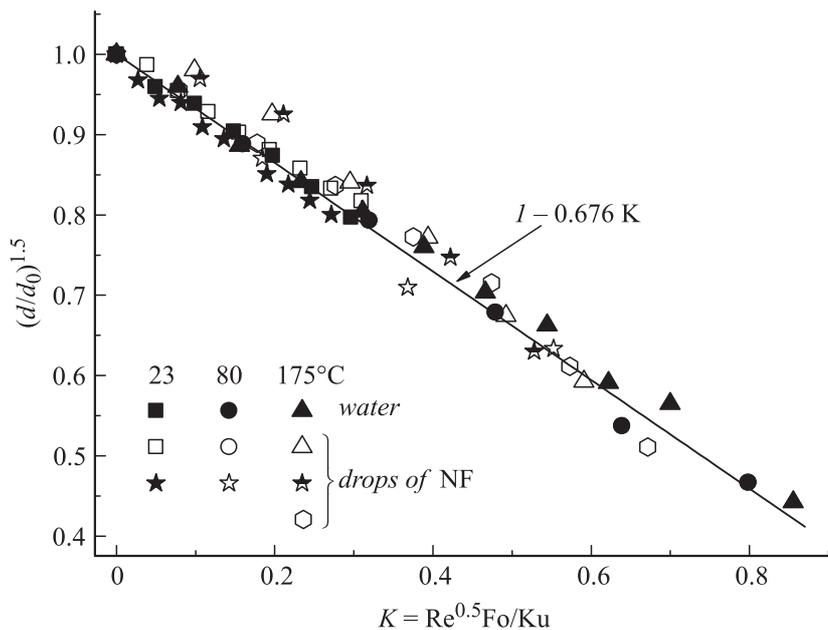


Рис. 3. Обобщение опытных данных по испарению капель воды и НЖ.

баланса на поверхности капли и соотношения для ее коэффициента теплоотдачи [14]

$$\text{Nu} = 2 + 0.53\text{Re}^{0.5}\text{Pr}^{1/3} \quad (1)$$

с преобладанием конвективного переноса ($\text{Re} \gg 1$ — в экспериментах $\text{Re}_0 = 500-2000$) можно получить следующую зависимость:

$$(d/d_0)^{3/2} = 1 - A \frac{\text{Re}_0^{0.5}\text{Fo}}{\text{Ku}}, \quad (2)$$

где $\text{Fo} = t a_0 / d_0^2$ — число Фурье, $\text{Ku} = r / [c_{p0}(T_0 - T_s)]$ — критерий фазового превращения Кутателадзе, r и c_{p0} — скрытая теплота парообразования и теплоемкость газа, а T_s и T_0 — температура парогазовой смеси на поверхности капли (линия насыщения) и в окружающем потоке воздуха соответственно.

В отличие от известного квадратичного закона испарения, справедливого для малых чисел Рейнольдса ($Re_0 \rightarrow 0$ и $Nu = 2$), при больших числах Re , как следует из (2), имеет место закон $(d/d_0)^{3/2}$.

Результаты обобщения опытных данных приведены на рис. 3. Из рисунка следует, что закон „3/2“ приводит к хорошему обобщению экспериментальных точек. Причем скорость испарения капель НЖ практически совпадает с чистой жидкостью. Следует подчеркнуть, что вследствие отсутствия надежных данных по теплофизическим свойствам НЖ, а также небольшой концентрации углеродных трубок, свойства жидкости капель принимались как для базовой жидкости (вода). Естественно, что такое допущение может привести к качественным изменениям закономерностей теплообмена капель НЖ. Кроме того, остается открытым вопрос о влиянии концентрации наночастиц и их состава на поверхностное натяжение и интенсивность испарения капель. Это диктует необходимость проведения дальнейших детальных исследований.

Авторы выражают благодарность Новопащину С.А. за полезные обсуждения и Смутьскому Я.И. за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке программы РАН „Фундаментальные процессы в многофазных и турбулентных потоках“ (проект № 11.1) и РФФИ (грант № 11-08-91156-ГФЕН-а).

Список литературы

- [1] *Sazhin S.S.* // Prog. Energy Comb. Sci. 2006. P. 162–214.
- [2] *Lage P.L.C., Rangel R.H., Hackenberg C.M.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1993. V. 34. P. 3573–3581.
- [3] *Tarasevich Y.Y.* // Physical Review E. 2005. V. 71. P. 27301.
- [4] *Guilizzoni M., Sotgia G.* // Exp. Thermal and Fluid Sci. 2010. V. 34. P. 93–103.
- [5] *Choi S.U.S.* // Heat Transfer Eng. 2008. V. 29. P. 429–441.
- [6] *Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В.* // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17. С. 173–178.
- [7] *Das S.K., Choi S.U.S., Yu W., Pradeep T.* // Nanofluids. Science and Technology. A Jone Wiley & Sons Inc., Publication, 2008.
- [8] *Chen R.-H., Phuoc T.X., Martello D.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2010. V. 53. P. 3677–3682.
- [9] *Chen R.-H., Phuoc T.X., Martello D.* // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2011. V. 54. P. 2459–2466.

- [10] Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч. // Инж. физ. журн. 2010. № 5. С. 829–836.
- [11] Терехов В.И., Шишкин Н.Е. // Теплофизика и аэродинамика. 2009. № 2. С. 253–259.
- [12] Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде. М.: Изд. АН СССР, 1958. С. 92.
- [13] Harada T., Watanabe H., Suzuki Y., Kamata H., Matsuhita Y., Aoki H., Miura T. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 2011. V. 54. P. 649–655.
- [14] Ranz W.E., Marshall W.R. // Chem. Eng. Prog. 1952. V. 48. P. 141–146, 173–180.