

УДК 532.529.6, 536.246

Экспериментальное исследование испарения капли жидкости на нагреваемой твердой поверхности*

А.А. Семенов^{1,2}, Д.В. Феоктистов³, Д.В. Зайцев², Г.В. Кузнецов³,
О.А. Кабов^{1,2,3}

¹Новосибирский государственный университет

²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

³Томский политехнический университет

E-mail: semenov.itp@gmail.com, zaitsev@itp.nsc.ru

Выполнено экспериментальное исследование испарения капли воды при разнице температур между твердой поверхностью и окружающей атмосферой от 30 до 60 °С. Исследования проводились на подложках с микро- и нанопокрывтиями, обладающими различной смачиваемостью. Изучены особенности испарения капли при подвижной, частично подвижной и полностью неподвижной линией контакта трех фаз (жидкость–газ–твердое тело). Показано, что с уменьшением объема капли воды удельная скорость испарения (поток массы с единицы площади поверхности) возрастает, особенно на последней стадии испарения капли.

Ключевые слова: испарение, краевой угол смачивания, линия контакта трех фаз.

Процесс испарения капли жидкости, имеющий место в различных технологических системах в энергетике, медицине, сельском хозяйстве, химической и других отраслях, активно исследуется в последнее десятилетие [1–4]. В большинстве экспериментальных и теоретических работ исследуется испарение изотермической капли воды. Публикации по исследованию неизотермического испарения капли жидкости с достаточно высокой разницей температур между твердой поверхностью и атмосферой (от 30 до 60 °С) практически отсутствуют.

В настоящей работе изучается процесс испарения капли жидкости достаточно большого размера в открытую атмосферу. Объем капли варьируется от 100 до 400 микролитров. Капля жидкости помещается на поверхность с известной смачиваемостью. Далее капля нагревается до наступления квазистационарного теплообмена между твердой подложкой и каплей жидкости. В качестве рабочей жидкости используется дистиллированная деионизированная нанофильтрованная вода фирмы Milli-Q. Использование воды с относительно высокой температурой кипения в качестве рабочей жидкости позволяет достаточно детально исследовать влияние разницы температур между твердой поверхностью и окружающей атмосферой на интенсивность испарения и теплообмен. Разница

* Исследование выполнено за счет гранта РФ (соглашение № 14-19-01755).

температур между твердой поверхностью и окружающей атмосферой варьируется от 30 до 60 °С. Были изучены три типа испарения капли жидкости: 1) постоянный краевой угол смачивания (движущаяся контактная линия), 2) постоянная площадь контакта с поверхностью (неподвижная контактная линия), 3) смешанный тип (происходит скачкообразное уменьшение краевого угла смачивания и площади контакта с поверхностью).

Эксперименты по испарению капли воды в открытую атмосферу были выполнены на экспериментальном стенде, схема которого представлена на рис. 1. Рабочий участок представлял собой алюминиевую пластину толщиной 50 мм, на нижней стороне которой располагался нагреватель. В качестве нагревателя использовался элемент Пельтье, размеры которого составляли 40×40 мм². На верхней стороне алюминиевой пластины закреплялась исследуемая подложка, которая представляла собой диск диаметром 52 мм и толщиной 3,2 мм. Измерения температуры поверхности исследуемой подложки проводились с помощью плоской термопары, закрепленной на расстоянии 1–2 мм от контактной линии капли жидкости. Температура под подложкой измерялась тремя термопарами К-типа. Термопары располагались радиально на разных расстояниях от центра диска и позволяли измерять распределение температуры вдоль радиуса подложки. В работе использовались три различные подложки. Две подложки были изготовлены из флот-стекла со слоем нанопокртытия, состоящего из металла (золото или алюминий) оптического качества: покрытие Spin Teflon получается путем центрифугирования капли расплавленного фторопласта (гистерезис краевого угла смачивания определяется как разность между натекающим и оттекающим краевыми углами смачивания, $\Theta_h = \Theta_a - \Theta_r = 122,5^\circ - 112,7^\circ = 9,8^\circ$), покрытие Spray Teflon наносится распылением частиц фторопласта ($\Theta_h = 119,9^\circ - 90,6^\circ = 29,3^\circ$). Третья подложка, изготовленная из нержавеющей стали, обладала развитой шероховатой структурой рабочей поверхности, которая была получена путем бомбардирования этой поверхности калиброванными частицами оксида алюминия. Шероховатость такой поверхности составляла порядка 5 мкм. Относительная влажность воздуха в помещении во время проведения экспериментов составляла 20–30 %.

В работе применялись две оптические методики. К первой относится теневой метод, в котором использовались источник плоскопараллельного света и фотокамера. В качестве источника света был задействован красный светодиод фирмы Thorlabs и система линз, которая на выходе создавала параллельный пучок света. Фотокамера NIKON D200 с макрообъективом Nikon 105mm f/2.8G IF-ED AF-S VR Micro-Nikkor

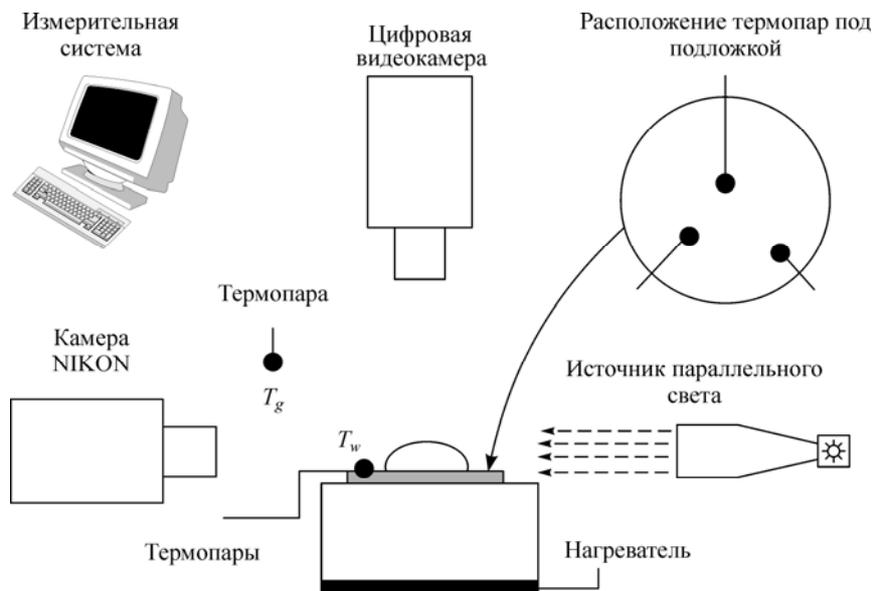


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

в режиме 1:1 использовалась для съемки профиля исследуемого объекта на просвет. Пространственное разрешение такой системы составляло 6 мкм/пиксель, а частота съемки варьировалась от 3 до 8 кадров в секунду. С помощью теневого метода были получены теневые фотографии профиля капли жидкости. Изображения обрабатывались пакетом программного обеспечения Drop Shape Analysis компании KRUSS. Теневая фотография использовалась для подбора профиля капли методом Юнга–Лапласа. Далее определялись геометрические параметры капли жидкости, такие как диаметр основания, максимальный диаметр, высота, объем, краевые углы (правый, левый, средний), площадь поверхности, площадь основания.

Вторая оптическая методика состояла из цифровой видеокамеры (ImagingSource с разрешением 5 мегапикселей), которая размещалась над каплей жидкости и позволяла визуализировать процесс испарения сверху и контролировать симметричность капли. В том случае, если капля теряла симметричность, эксперимент проводился повторно.

Проведение эксперимента начиналось с предварительной подготовки исследуемой подложки, которая заключалась в тщательной очистке рабочей поверхности, затем подложка целиком помещалась в резервуар с дистиллированной водой на сутки. После этого, с целью удаления остатков воды с поверхности подложка продувалась специальным чистым сжатым воздухом, предназначенным для очистки оптических компонентов. Капля жидкости заданного объема помещалась на нагретую до требуемой температуры поверхность с помощью электронного шприца. Проводилась фокусировка объектива теневого метода (глубина резкости составляла несколько мм) с последующей периодической съемкой с шагом 10 секунд до полного испарения капли жидкости. Верхняя камера включалась заранее и вела съемку процесса испарения с частотой 1 Гц.

На рис. 2 представлены зависимости краевого угла смачивания и диаметра основания капли от времени испарения. Результаты приведены для двух различных типов нанесения фторопласта: Spray Teflon и Spin Teflon. Температура поверхности изменялась от 55 до 85 °С. Начальные объемы капель составляли около 100 мкл. Из рис. 2а видно, что повышение температуры приводит к более интенсивному снижению краевого угла смачивания. При этом для каждой температуры наблюдаются две области, где происходит резкое снижение краевого угла: первая — приблизительно первая треть времени жизни капли, вторая — приблизительно последняя треть времени жизни капли. В первую треть времени краевой угол резко снижается из-за того, что диаметр смоченного пятна постоянен (рис. 2b), а объем капли уменьшается в результате испарения. В последнюю треть времени резкое снижение краевого угла, по-видимому, вызвано резким увеличением скорости испарения (а следовательно и объема) капли.

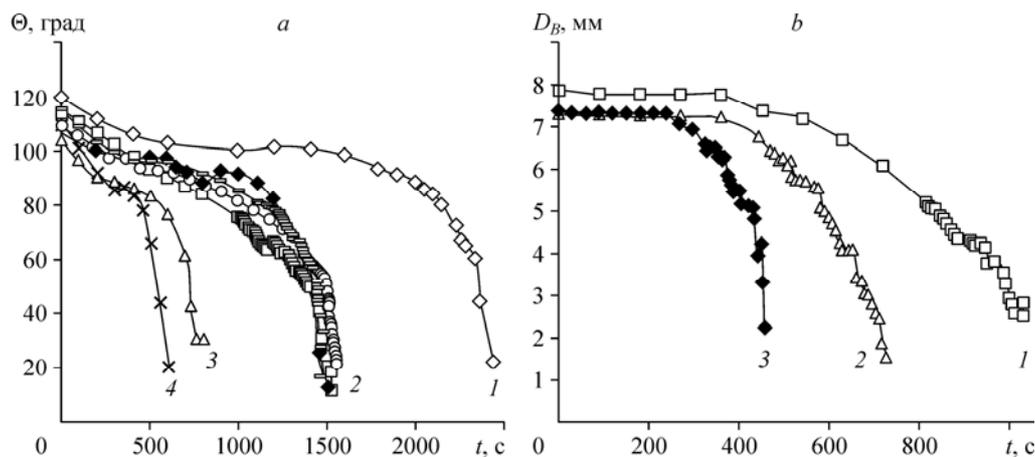


Рис. 2. Зависимость краевого угла смачивания и диаметра основания капли от времени в процессе испарения на подложке с различными покрытиями.

a — Spray Teflon при температурах поверхности $T = 55$ (1), 65 (2) (серия из четырех повторений), 75 (3), 85 (4);
b — Spin Teflon при температурах поверхности $T = 65$ (1), 75 (2), 85 (3) °С.

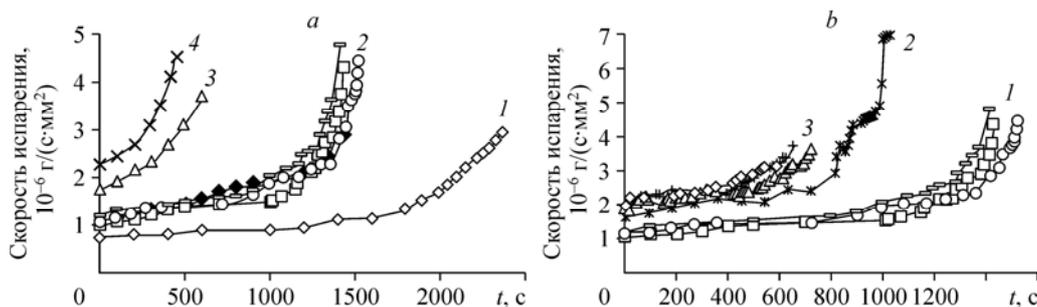


Рис. 3. Зависимость удельной скорости испарения от времени.

a — данные, полученные на подложке с покрытием Spray Teflon: температура подложки $T = 55$ (1), 65 (2) (серия из 4-х повторений), 75 (3), 85 (4); *b* — данные, полученные на различных подложках при температуре поверхности $T = 65$ °C: поверхности с покрытием Spray Teflon (1), Spin Teflon (2), подложка из нержавеющей стали с шероховатой структурой (3).

Зависимость удельной скорости испарения жидкости от времени на различных подложках представлена на рис. 3. Скорость испарения рассчитывалась как отделение массы с единицы площади поверхности капли за единицу времени. С увеличением начальной температуры подложки (рис. 3*a*) удельная скорость испарения может увеличиваться в несколько раз, особенно на поверхностях с малым гистерезисом краевого угла смачивания.

Исследования показали, что удельная скорость испарения возрастает с уменьшением объема капли и на последней стадии испарения может в несколько раз превышать начальные значения. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами работы [5], в которой приведено сравнение экспериментальных и теоретических данных по зависимости удельной скорости испарения от времени. В отличие от работы [5], где исследования выполнялись при одной температуре поверхности ($T = 64$ °C), в настоящей работе получены новые данные для диапазона температур поверхности от 55 до 85 °C. Возрастание удельной скорости испарения наблюдается во всем диапазоне исследованных температур. В работе [6] также было обнаружено возрастание скорости испарения капель жидкости, однако исследования были выполнены для подвешенных капель жидкости на аэродинамическом стенде с нагревом воздуха до 300 °C.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов получены новые данные по испарению капли жидкости на твердой поверхности. Проведены измерения основных геометрических параметров капли воды в процессе испарения в диапазоне изменения температуры поверхности от 55 до 85 °C. Обнаружено возрастание удельной скорости испарения, особенно на последней стадии жизни капли. Данные, полученные в работе, согласуются с экспериментальными и теоретическими данными других авторов [5].

Список литературы

1. Ajaev V.S. Spreading of thin volatile liquid droplets on uniformly heated surfaces // *J. Fluid Mech.* 2005. Vol. 528. P. 279–296.
2. Sobac B., Brutin D. Triple-line behavior and wettability controlled by nanocoated substrates: influence on sessile drop evaporation // *Langmuir.* 2011. Vol. 27. P. 14999–15007.
3. Sikarwar B.S., Muralidhar K., Khandekar S. Effect of drop shape on heat transfer during dropwise condensation underneath inclined surfaces // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer.* 2013. Vol. 1, No. 4. P. 339–356.
4. Fang G., Amirfazli A. Investigation of wetting behavior on patterned surfaces with different microgeometries // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer.* 2014. Vol. 2, No. 2. P. 155–180.
5. Gatapova E.Ya., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Evaporation of a sessile water drop on a heated surface with controlled wettability // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engng Aspects.* 2014. Vol. 441. P. 776–785.
6. Терехов В.И., Терехов В.В., Шишкин Н.Е., Би К.Ч. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости // *Инж.-физ. журнал.* 2010. Т. 83, № 5. С. 829–836.

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2014 г.,
после доработки — 29 июня 2015 г.