

УДК 532.64

## **Испарение капель жидкостей с поверхности анодированного алюминия\***

**Г.В. Кузнецов, Д.В. Феоктистов, Е.Г. Орлова**

*Томский политехнический университет*

E-mail: enja199105@gmail.com

Представлены результаты исследований процесса испарения капли воды и водно-солевого раствора NaCl с твердой подложки из анодированного алюминия. Получены параметры, характеризующие профиль капли: контактный диаметр, контактный угол, высота капли. По экспериментальным данным рассчитана удельная скорость испарения. Установлено, что капли воды и водно-солевого раствора с концентрациями до 9,1 % испаряются в режиме зацепления контактной линии. При увеличении концентрации соли в растворе до 16,7 % зарегистрирован режим растекания. Выделены две стадии испарения капель в зависимости от изменения скорости фазового превращения.

**Ключевые слова:** контактный диаметр, контактный угол, удельная скорость испарения, режим зацепления, режим растекания.

### **Введение**

Исследование процессов испарения и теплопереноса в капле жидкости и на линии раздела фаз актуально в связи с его прикладным значением в области микро- и нанозлектроники [1, 2], струйной печати [3], тонкопленочных покрытий [4], струйного охлаждения [5], оптоэлектроники [6].

Установление закономерностей процессов испарения, смачивания и теплопереноса возможно при анализе изменения удельной скорости испарения, диаметра смоченного пятна и контактного угла. Известно, что на эти характеристики значительное влияние оказывают давление паров жидкости, теплопроводность и степень шероховатости подложки [7–10].

Изменение фазового состояния капель однокомпонентных жидкостей изучалось экспериментально [1–8, 10] и теоретически [8–11]. Однако теория испарения жидких растворов не разработана на уровне, обеспечивающем прогностическую оценку влияния различных факторов на интенсивность протекания физического процесса. Одна из причин — малое число работ по физическому моделированию процесса испарения капель растворов на твердой поверхности. Модель, описывающая процесс испарения капли двух- и четырехкомпонентных смесей, в основе которой лежит оценка равновесия системы «пар–жидкость», теория диффузии и конвекции, была разработана и представлена в работе [12]. Методы прогнозирования начальных параметров при численном решении задачи испарения многокомпонентных капель были предложены в работе [13].

---

\* Работа выполнена в рамках НИР Госзадания «Наука» № 13.1339.2014/К (шифр федеральной целевой научно-технической программы: 2.1410.2014).

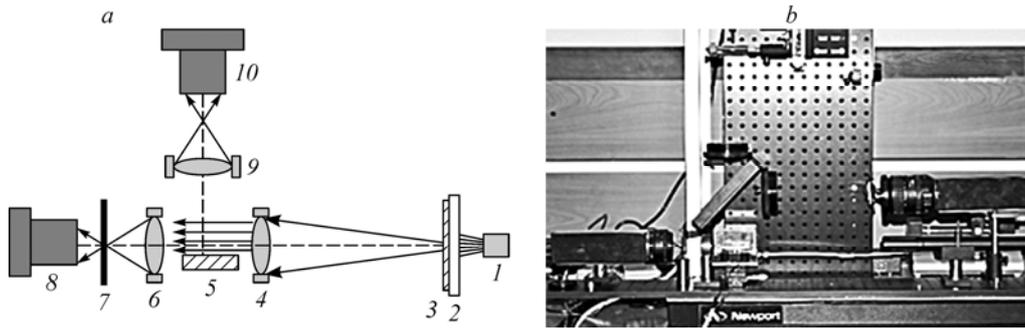


Рис. 1. Принципиальная схема (а) и фотография экспериментальной установки (b).

1 — источник света, 2 — матовое стекло, 3 — щит с отверстием, 4 — коллимирующая линза, 5 — подложка, 6 — конденсирующая линза, 7 — непрозрачный щит с отверстием, 8 — высокоскоростная видеокамера, 9 — линза для верхнего объектива, 10 — высокоскоростная видеокамера.

Целью настоящего исследования является экспериментальное изучение влияния начальной концентрации водно-солевого раствора NaCl на изменение удельной скорости испарения, контактного диаметра и угла в процессе испарения капли, лежащей на нагретой твердой поверхности. Также проведено сравнение характеристик процессов смачивания и растекания капель водных растворов солей с аналогичными характеристиками дистиллированной воды.

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1, основными средствами измерений являются теневая и Шлирен-системы [14]. Во всех экспериментах использовалась высокоскоростная камера Fastvideo-500M. Съемка проводилась с частотой 10 кадров в секунду и разрешением 1280×1024 пикселей. При помощи элемента Пельтье (термоэлектрический преобразователь А-2ТМ 8.0-127/126-1.4 HR1) осуществлялся нагрев подложки (рис. 2), изготовленной из анодированного алюминия, до достижения температуры 61 °С на поверхности.

Подложка из анодированного алюминия представляет собой круглый диск диаметром 54 мм и толщиной 4 мм, структура поверхности которого сформирована концентрически расположенными канавками (рис. 2b). Для очистки поверхности от загрязнений подложка предварительно замачивалась на сутки в дистиллированной воде.

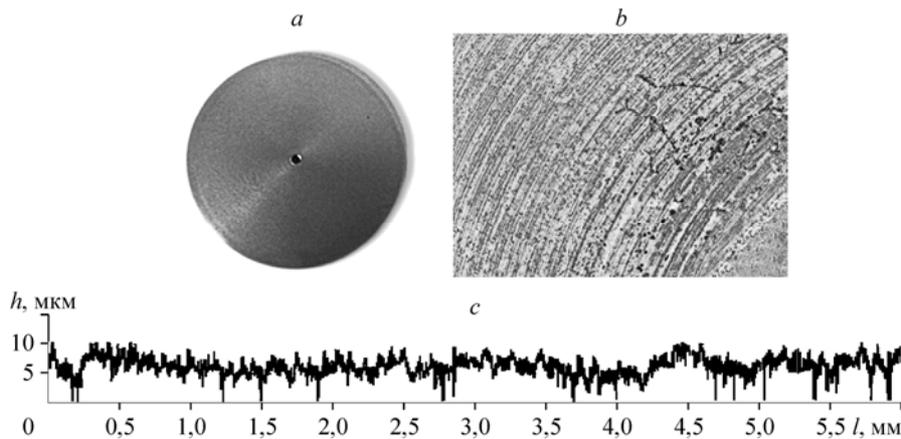
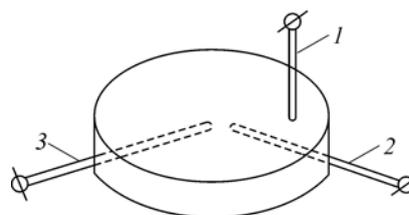


Рис. 2. Исследуемая подложка из анодированного алюминия.

a — фотокадр с увеличением: ×1, b — фотокадр с увеличением: ×100, c — распределение шероховатости по поверхности подложки длиной 6 мм с масштабом 40 мкм; h — высота микронеровностей поверхности, l — длина исследуемого участка подложки на профилометре Micro Measure 3Dstation.

Рис. 3. Расположение датчиков температур.

1 — термопара, установленная на поверхности подложки,  
2, 3 — термопары, установленные под подложкой.



С помощью профилометра Micro Measure 3Dstation был получен профиль поверхности и вычислено среднее арифметическое отклонение профиля подложки, составившее 0,971 мкм (рис. 2с).

Измерение температуры подложки проводилось восьмиканальным устройством Agilent 34901A. В качестве датчиков температур использовались три термопары хромель-копель с погрешностью измерений  $\pm 0,1$  °С (рис. 3). При достижении поверхностью подложки температуры 61 °С капля заданного объема помещалась в произвольно выбранное место на подложке с помощью шприца-дозатора, нагревалась и испарялась.

По результатам предварительных экспериментов определены основные факторы воздействия, которые сведены в таблицу.

Таблица

## Основные факторы воздействия

Параметр	Значения
Объем жидкости	60 мкл
Материал подложки	анодированный алюминий
Параметр шероховатости поверхности подложки Ra	0,971 мкм
Смачивающая жидкость	Недеаэрированная дистиллированная вода, водно-солевой раствор NaCl (концентрации 4,8, 9,1, 16,7 %)
Температура верхней поверхности подложки	61 °С
Температура нижней поверхности подложки	62,5 °С

Значения контактного угла, контактного радиуса и высоты капли рассчитывались с использованием программного обеспечения компании KRUSS после обработки фотокадров, полученных в серии опытов. Начальные значения параметров на кривых,

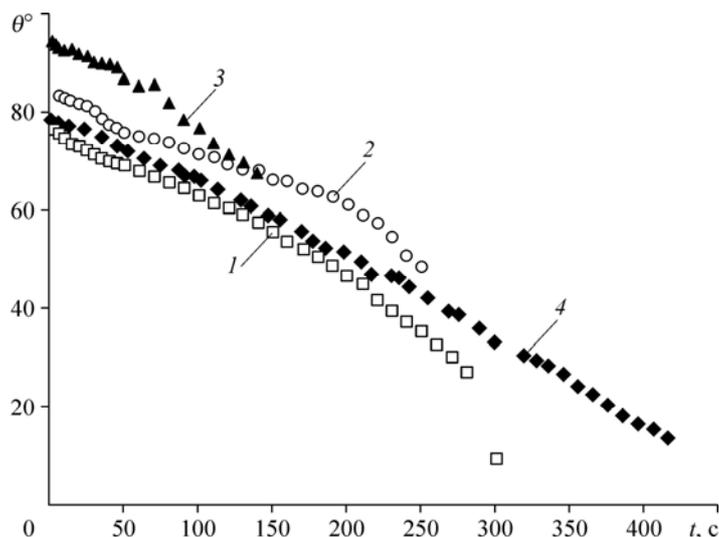


Рис. 4. Изменение во времени контактного угла в процессе испарения капель дистиллированной воды и водно-солевого раствора объемом 60 мкл на подложке из анодированного алюминия с температурой поверхности 61 °С.

1 — NaCl (4,8 %), 2 — NaCl (9,1 %), 3 — NaCl (16,7 %), 4 — вода.

представленных на рис. 4, 5, 7, соответствуют моменту помещения капли на подложку. Регистрация экспериментальных данных проводилась до образования солевых колец.

Удельная скорость испарения определялась из выражения [15]:

$$w = \frac{(V_i - V_{i+1})}{\Delta t \cdot (A_i + A_{i+1}) / 2}, \quad \frac{\text{мл}}{\text{с} \times \text{мм}^2}, \quad (1)$$

где  $V_i, V_{i+1}, A_{i+1}, A_i$  — объем (мл) и площадь поверхности капли ( $\text{мм}^2$ ) в момент времени  $t_i$  и  $t_{i+1}$  соответственно.

На рис. 4 представлено изменение во времени контактного угла капли на подложке из анодированного алюминия. Установлено, что в процессе испарения капель воды и водных растворов солей контактный угол уменьшается почти линейно. Аналогичные результаты получены при проведении экспериментальных исследований на подложках из спин-тефлона, спрей-тефлона и алюминия, нагретых до  $64^\circ\text{C}$  (объем капель дистиллированной воды изменялся от 88,7 мкл до 104,7 мкл) [15].

По результатам экспериментов можно сделать вывод, что капля воды на подложке из анодированного алюминия испаряется в режиме пиннинга контактной линии, т.е. изменение контактного диаметра не происходит (рис. 5). Пиннингом контактной линии называется зацепление линии трехфазного контакта капли на неровностях поверхности, при этом скорость ее перемещения равна нулю, а контактный диаметр постоянен. При испарении капель водно-солевого раствора с концентрациями 4,8 и 9,1 % наблюдается такой же эффект (пиннинг). С увеличением концентрации соли в растворе до значения 16,7 % происходит незначительное увеличение контактного диаметра, т.е. движение контактной линии в сторону увеличения площади, занимаемой каплей на подложке (растекание).

С увеличением концентрации соли в растворе увеличивается поверхностное натяжение капли, что препятствует ее растеканию по подложке. В начальный момент времени испарения зафиксировано меньшее значение контактного диаметра (6,580 мм) у капель с большей концентрацией соли (16,7 %). У капли воды этот диаметр составляет 8,064 мм.

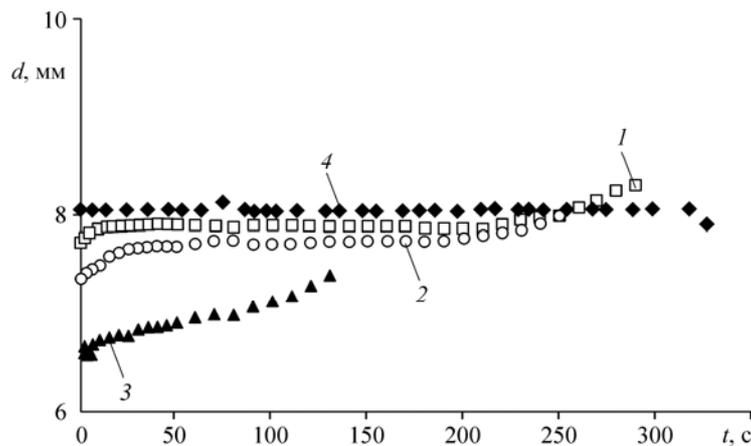


Рис. 5. Изменение контактного диаметра в процессе испарения капель воды и водно-солевого раствора объемом 60 мкл на подложке их анодированного алюминия с температурой поверхности  $61^\circ\text{C}$ .

1 — NaCl (4,8 %), 2 — NaCl (9,1 %), 3 — NaCl (16,7 %), 4 — вода.

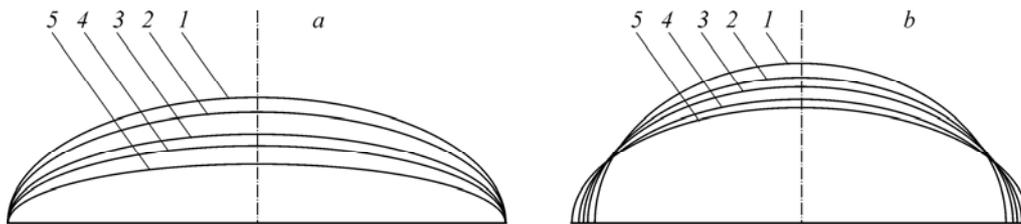


Рис. 6. Эволюции профиля капли, испаряющейся в двух режимах.

*a* — режим зацепления для капли воды: время испарения 0,1 (1), 35 (2), 120 (3), 200 (4), 280 (5) с;  
*b* — режим растекания для капли водно-солевого раствора с концентрацией 16,7%:  
 время испарения 0,1 (1), 30 (2), 60 (3), 100 (4), 130 (5) с.

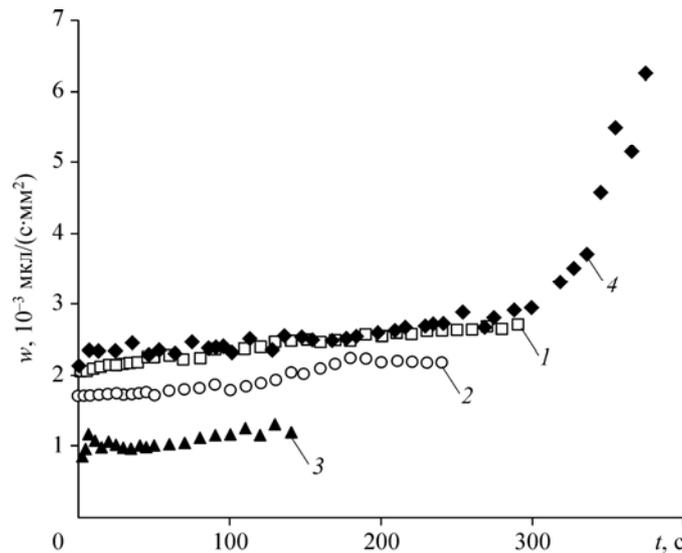


Рис. 7. Изменение удельной скорости испарения капель воды и водно-солевого раствора на подложке их анодированного алюминия с температурой поверхности  $t_{\text{п}} = 61$  °С.

1 — NaCl (4,8 %), 2 — NaCl (9,1 %), 3 — NaCl (16,7 %), 4 — вода.

Эволюции профиля капли воды, испаряющейся в режиме пиннинга, и капли водно-солевого раствора с концентрацией 16,7 %, испаряющейся в режиме растекания, представлены на рис. 6.

На рис. 7 представлена зависимость удельной скорости испарения от времени. В результате анализа выделены два режима испарения капли. Первый характеризуется незначительным изменением в начальный период времени скорости испарения (8–10 %) капель воды и водных растворов. Во втором с ростом времени происходит резкое возрастание удельной скорости испарения капель воды (с 0,0026 до 0,0062 мкл/с·мм<sup>2</sup>). Полученная кривая удельной скорости испарения капли воды совпадает с результатами работы [15] для поверхностей из анодированного алюминия, спрей-тефлона и спин-тефлона. При испарении капель водно-солевых растворов второй режим отсутствует. Это объясняется тем, что в конце первого режима происходит образование кристаллов соли и растворитель полностью испаряется.

### Заключение

По результатам исследования процесса испарения капель воды и водно-солевого раствора NaCl трех концентраций на подложке из анодированного алюминия, нагретой до 61 °С, установлено, что капли воды и водно-солевого раствора с концентрациями 4,8 %

и 9,1 % (по масс.) испаряются в режиме зацепления контактной линии. При увеличении концентрации соли в растворе до 16,7 % зарегистрирован режим растекания.

Одним из наиболее важных результатов является определение удельной скорости испарения по экспериментальным данным. При испарении капли воды выделены два режима. Первый характеризуется незначительным изменением в начальный период времени скорости испарения. Во втором с ростом времени происходит резкое увеличение удельной скорости испарения. При испарении капель водно-солевых растворов второй режим отсутствует.

### Список литературы

1. Xia D., Brueck S.R.J. Strongly anisotropic wetting on one-dimensional nanopatterned surfaces // Nano Letters. 2008. Vol. 8. P. 2819–2824.
2. Carroll G.T., Wang D., Turro N.J., Koberstein J.T. Photochemical micropatterning of carbohydrates on a surface // Langmuir. 2006. Vol. 22. P. 2899–2905.
3. Park J., Moon J. Control of colloidal particle deposit patterns within picoliter droplets ejected by ink-jet printing // Langmuir. 2006. Vol. 22. P. 3506–3513.
4. Kimura M., Misner M.J., Xu T., Kim S.H., Russell T.P. Long range ordering of diblock copolymers induced by droplet pinning // Langmuir. 2003. Vol. 19, No. 23. P. 9910–9913.
5. Jia W., Qiu H.H. Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2003. Vol. 27. P. 829–838.
6. Kawase T., Siringhaus H., Friend R.H., Shimoda T. Inkjet printed via-hole interconnections and resistors for all-polymer transistor circuits // Advanced Materials. 2001. Vol. 13. P. 1601–1605.
7. Erbil H.Y., McHale G., Rowan S.M., Newton M.I. Determination of receding contact angle of sessile drops on polymer surfaces by evaporation // Langmuir. 1999. Vol. 15, No. 21. P. 7378–7385.
8. Hu H., Larson R.G. Evaporation of a sessile droplet on a substrate // J. Physical Chemistry B. 2002. Vol. 106. P. 1334–1344.
9. Girard F., Antoni M., Faure S., Steinchen A. Influence of heating temperature and relative humidity in the evaporation of pinned droplets // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2008. Vol. 323. P. 36–49.
10. Nguyen T.A., Nguyen A.V., Hampton M.A., Xu Z.P., Huang L., Rudolph V. Theoretical and experimental analysis of droplet evaporation on solid surfaces // Chemical Engng. Sci. 2012. Vol. 69. P. 522–529.
11. Roisman I.V., Opfer L., Tropea C., Raessi M., Mostaghimi J., Chandra S. Drop impact onto a dry surface: role of the dynamic contact angle // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Engng. Aspects. 2008. Vol. 322. P. 183–191.
12. Jarvas G., Quellet C., Dallos A. COSMO-RS based CFD model for flat surface evaporation of non-ideal liquid mixtures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2011. Vol. 54, No. 21/22. P. 4630–4635.
13. Dallos A., Jarvas G., Quellet C. Calculation of essential input parameters for estimating the evaporation of multicomponent liquid droplets // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. 2013. Vol. 1, No. 3. P. 259–272.
14. Orlova E.G., Kuznetsov G.V., Feoktistov D.V. The evaporation of the water-sodium chlorides solution droplets on the heated substrate // EPJ Web of Conferences. 2014. Vol. 76. P. 012039-1–012039-8.
15. Gatapova E.Ya., Semenov A.A., Zaitsev D.V., Kabov O.A. Evaporation of a sessile water drop on heated surface with controlled wettability // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engng Aspects. 2014. Vol. 441. P. 776–785.

*Статья поступила в редакцию 20 октября 2014.,  
после доработки — 13 января 2015 г..*