

ОСОБЕННОСТИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ИСПАРЯЮЩИХСЯ КАПЛЯХ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КАПЛИ НАНОСЕКУНДНЫХ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ

© 2019 г. А. Е. Дубинов^а, *, В. А. Любимцева^а

^аРоссийский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики

Россия 607188, Саров, Нижегородская обл., просп. Мира, 37

*E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.07.2018 г.

После доработки 23.08.2018 г.

Принята к публикации 29.08.2018 г.

В работе экспериментально исследовались процессы кристаллизации при высыхании капель растворов под действием наносекундных искровых разрядов. Показано, что в обрабатываемых плазмой каплях кристаллизация происходит иначе, чем в таких же каплях, но высыхающих естественным образом.

Ключевые слова: раствор, высыхающая капля, искровой разряд, кристаллизация

DOI: 10.1134/S0023119319010030

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в гидродинамике и физике жидкостей (чистых жидкостей, смесей, растворов, коллоидных систем, эмульсий и др.) наметилось новое направление – изучение динамики и кинетики испаряющихся на твердой подложке капель, а также следов (паттернов), которые они оставляют после полного своего испарения [1–10]. В частности, при испарении капель растворов солей на подложке остаются кристаллы, особенности роста которых в процессе испарения интенсивно изучаются. Так, например, в [11] исследовалась динамика испарения капель водных растворов NaCl и Na₂SO₄ и кристаллизация этих солей в паттернах высохших капель, в [12, 13] изучалась такая же кристаллизация NaCl в желатине, а в [14] – кристаллизация NaCl в альбумине.

Во всех указанных работах капли испарялись естественным образом. В [15] предложено осуществлять испарение капель на подложке с помощью последовательности наносекундных искровых электрических разрядов над поверхностью капли. Такое испарение происходит заметно быстрее естественного испарения. Целью данной работы являлось экспериментальное сравнение кристаллических паттернов, возникающих при испарении капель водных растворов при естественном испарении и ускоренном испарении с помощью искровых разрядов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оборудование и материалы

Исследовались водные растворы NaCl, CuSO₄ и сахара. Капли исследуемых растворов с помощью дозатора наносились на алюминиевую фольгу толщиной 11 мкм. В случае испарения искровыми разрядами фольга играла роль одного из электродов.

Над каплей закреплялся другой электрод в форме стальной иглы так, чтобы зазор между верхней точкой капли и острием иглы был шириной 2–5 мм. К электродам подключался генератор импульсов. В качестве генератора использовалась бытовая электрозажигалка “Iskorka-6” трансформаторного типа, которая выдает непрерывную последовательность наносекундных импульсов высокого напряжения (до 15 кВ). Импульсы следуют с частотой 20 Гц. При подключении к выходу генератора нагрузки в виде искрового промежутка, в цепи возникают импульсы тока разряда. Типичная осциллограмма импульса тока проводимости одного разряда показана на рис. 1.

Исследования проводились в воздухе при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении. Все приведенные далее результаты были многократно повторены (не менее 10 раз).

Визуализация разрядов и фотографирование высохших капель осуществлялись с помощью

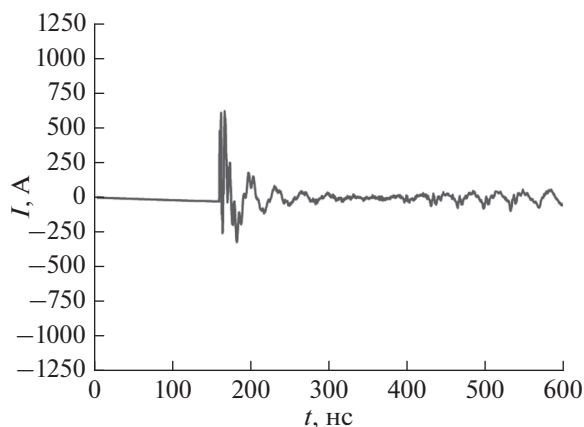


Рис. 1. Типичная осциллограмма тока проводимости в разряде.

ручного цифрового микроскопа Celestron (Model 44302-A).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При визуализации самих разрядов выяснилось следующее: если раствор имеет достаточно большую электропроводность (растворы солей), то канал разряда начинается на игольчатом электроде и заканчивается на вершине капли, и далее ток разряда протекает в объеме капли (рис. 2а); если же раствор имеет низкую электропроводность (раствор сахара), то разряд протекает по поверхности капли (рис. 2б).

Капли доводились до полного высыхания. Характерные времена полного высыхания капли (диаметр на подложке 3 мм) представлены в табл. 1. Из нее следует, что под действием разрядов высыхание капли происходит в ~2 раза быстрее.

Приведем типичные изображения кристаллических паттернов после высыхания капель указанных растворов (рис. 3). Паттерны высохших естественным образом капель растворов кристаллов NaCl и CuSO₄ оказались типичными (см., напр., [12] для NaCl и [16] для CuSO₄), в них кристаллы вырастали по периметру капли (рис. 3а, 3в). Объясняется это тем, что возникающие центры кристаллизации в процессе испарения капли смеща-

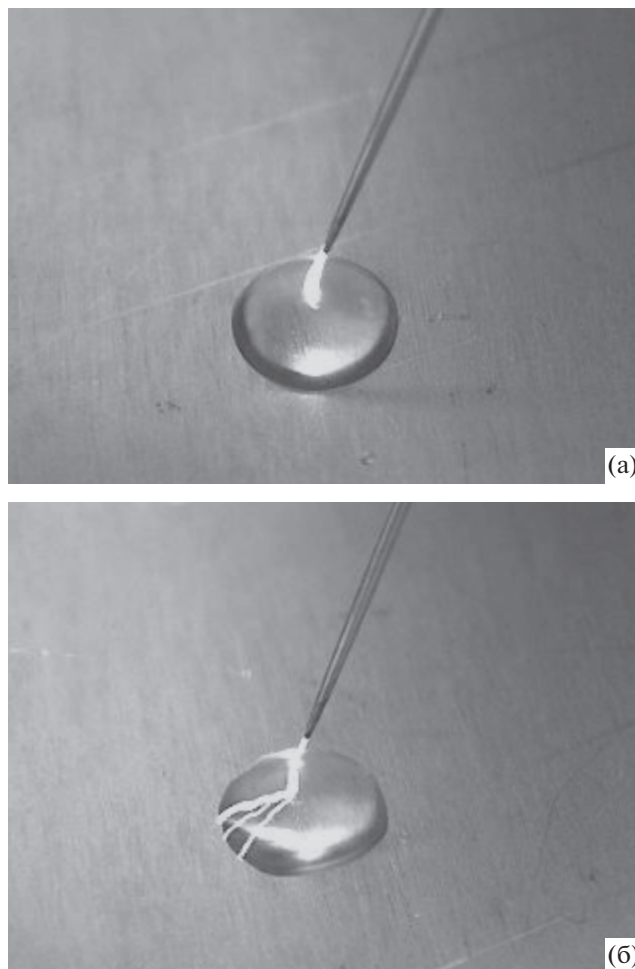


Рис. 2. Разряд над поверхностью капли: а – раствор CuSO₄; б – раствор сахара.

лись благодаря капиллярным силам к краю капли. Этот эффект известен под названием эффекта кофейных колец [17]. Он возникает не только в кофе, но и в любых других коллоидных растворах [18, 19].

При естественном испарении раствора сахара кристаллизация не развивается, а происходит остекловывание сахара с образованием прозрачной карамели (рис. 3д).

При испарении с помощью разрядов картина кардинально меняется: для ионных растворов

Таблица 1. Время полного высыхания капель при естественном испарении и при испарении под действием разрядов

Раствор, (концентрация)	Время естественного высыхания, мин	Время высыхания под действием разрядов, мин
Водный раствор NaCl, (5.5 : 100)	11 ± 2	7 ± 1
Водный раствор CuSO ₄ , (4 : 100)	13 ± 2	6 ± 1
Водный раствор сахара, (8 : 100)	20 ± 2	10 ± 2

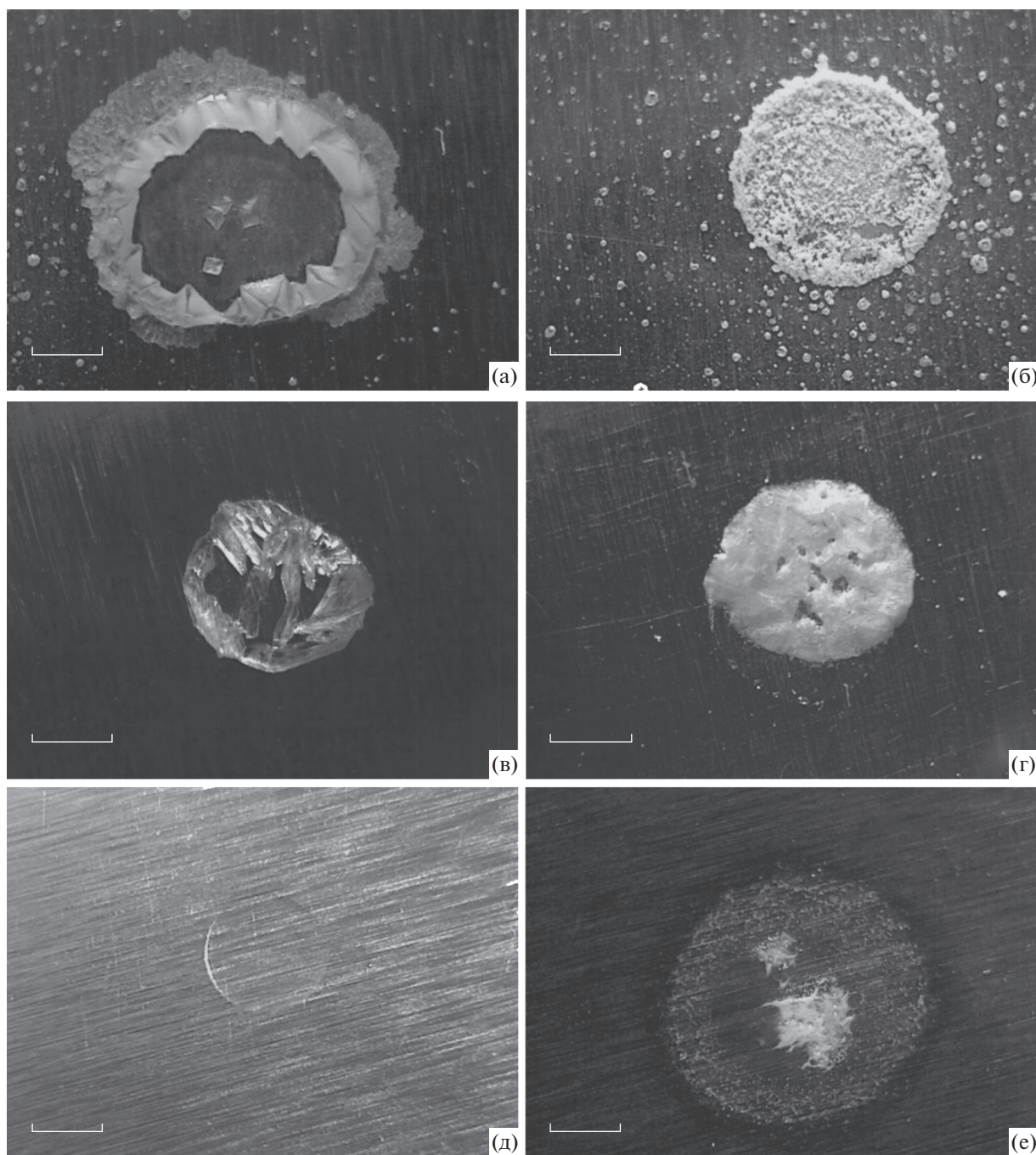


Рис. 3. Кристаллические паттерны высохших капель (везде – размерный отрезок 1 мм): а – естественное испарение, раствор NaCl; б – испарение под действием разрядов, раствор NaCl; в – естественное испарение, раствор CuSO₄; г – испарение под действием разрядов, раствор CuSO₄; д – естественное испарение, раствор сахара; е – испарение под действием разрядов, раствор сахара.

эффект кофейных колец разрушается (рис. 3б, 3г) и во всех случаях происходит мелкодисперсная кристаллизация (размерами 5...25 мкм) с концентрацией микрокристаллов почти по всей площа-

ди основания капли (рис. 3б, 3г) или вблизи центра (рис. 3е). Такие формы кристаллических паттернов объясняются тем, что разряды возбуждают в объеме капли циркулирующие потоки [20, 21],

которые оказываются интенсивнее естественных капиллярных потоков. Эти возбужденные разрядами потоки захватывают в движение центры кристаллизации и формируют наблюдаемые паттерны. Мелкодисперсность кристаллов также может быть объяснена этими потоками, которые омывают центры кристаллизации и повторно растворяют молекулы в воде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что в каплях растворов, высыхающих под действием последовательности электрических разрядов, кристаллизация происходит иначе, чем в таких же каплях, но высыхающих естественным образом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Deegan R.D. // Phys. Rev. E. 2000. V. 61. № 1. P. 475. doi 10.1103/PhysRevE.61.475
2. Annarelli C.C., Fornazero J., Bert J., Colombani J. // Eur. Phys. J. E. 2001. V. 5. № 1. Suppl. P. 599. doi 10.1007/s101890170043
3. Perelaer J., Smith P.J., Hendriks C.E., van den Berg A.M.J., Schubert U.S. // Soft Matter. 2008. V. 4. № 5. P. 1072. doi 10.1039/b715076h
4. Yakhno T.A. // Phys. Chem. 2011. V. 1. № 1. P. 10. doi 10.5923/j.pc.20110101.02
5. Darwich S., Mougin K., Haidara H. // Soft Matter. 2012. V. 8. № 4. P. 1155. doi 10.1039/c1sm06623d
6. Gorr H.M., Zueger J.M., McAdams D.R., Barnard J.A. // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 2013. V. 103. № 1. P. 59. doi 10.1016/j.colsurfb.2012.09.043
7. Yang X., Lib C.Y., Sun Y. // Soft Matter. 2014. V. 10. № 25. P. 4458. doi 10.1039/c4sm00497c
8. Paria S., Chaudhuri R.G., Jason N.N. // New J. Chem. 2014. V. 38. № 12. P. 5943. doi 10.1039/c4nj01267d
9. Esmonde-White K.A., Esmonde-White F.W.L., Morris M.D., Roessler B.J. // Analyst. 2014. V. 139. № 11. P. 2734. doi 10.1039/c3an02175k
10. Roy B., Choudhuri M.D., Dutta T., Tarafdar S. // Appl. Surf. Sci. 2015. V. 357. № 1. P. 1000. doi 10.1016/j.apusc.2015.09.085
11. Shahidzadeh-Bonn N., Rafai S., Bonn D., Wegdam G. // Langmuir. 2008. V. 24. № 16. P. 8599. doi 10.1021/la8005629
12. Choudhury M.D., Dutta T., Tarafdar S. // Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects. 2013. V. 432. № 1. P. 110. doi 10.1016/j.colsurfa.2013.04.064
13. Choudhury M.D., Dutta T., Tarafdar S. // Soft Matter. 2015. V. 11. № 35. P. 6938. doi 10.1039/c5sm00742a
14. Яхно Т.А. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 11. С. 30. [Yakhno T.A. // Techn. Phys. 2015. V. 60. № 11. P. 1601. doi 10.1134/S1063784215110262].
15. Kozhayeva J.P., Dubinov A.E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. V. 45. № 12. P. 3089. doi 10.1109/TPS.2017.2707498
16. Bhattacharyya S., Roy B., Choudhury M.D. // J. Surface Sci. Technol. 2016. V. 32. № 3–4. P. 79. doi 10.18311/jsst/2016/7752
17. Deegan R.D., Bakajin O., Dupont T.F., Huber G., Nagel S.R., Witten T.A. // Nature. 1997. V. 389. № 6653. P. 827. doi 10.1038/39827
18. Choi S., Stassi S., Pisano A.P., Zohdi T.I. // Langmuir. 2010. V. 26. № 14. P. 11690. doi 10.1021/la101110t
19. Still T., Yunker P.J., Yodh A.G. // Langmuir. 2012. V. 28. № 11. P. 4984. doi 10.1021/la204928m
20. Berendsen C.W.J., van Veldhuizen E.M., Kroesen G.M.W., Darhuber A.A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. № 2. P. 025203. doi 10.1088/0022-3727/48/2/025203
21. Dubinov A.E., Maximov K.A. // Magnetohydrodynamics. 2016. V. 52. № 4. P. 454. doi 10.22364/mhd