

Плазменно-капиллярный эффект в зазоре, образованном двумя вертикально установленными цилиндрическими стержнями

А. Е. Дубинов^{a,b*}, В. А. Любимцева^a

^aРоссийский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров, Нижегородская обл., 607188, Россия

^bСаровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт», г. Саров, Нижегородская обл., 607186, Россия
*e-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.01.2022

После доработки 12.06.2022

Принята к публикации 15.06.2022

Экспериментально показано, что под действием импульсно-периодических искровых разрядов между электродом и мениском в капилляре, образованном двумя вертикально установленными цилиндрическими стержнями, происходит подъем мениска. Зарегистрированный эффект может найти применение, например, для интенсификации технологических процессов пропитки тканых материалов.

Ключевые слова: плазменно-капиллярный эффект, искровой разряд, мениск

УДК 533.9.15

<https://doi.org/10.52577/eom.2022.58.4.51>

ВВЕДЕНИЕ

Капиллярный эффект, как известно, проявляется в подъеме или опускании столба жидкости внутри вертикально установленного капилляра, один конец которого погружен в сосуд с этой жидкостью, на высоту, большую высоты ее уровня в сосуде. Подъем возникает благодаря смачиванию стенок капилляра жидкостью. Эффект наблюдается и используется повсеместно: в природе, быту, а также в многочисленных технологиях [1, 2].

Недавно был открыт плазменно-капиллярный эффект (ПКЭ), который заключается в дополнительном подъеме жидкости в капилляре при соприкосновении жидкости с плазмой [3–5]. Причина возникновения ПКЭ – модификация параметров поверхностного натяжения и смачиваемости жидкостью стенок капилляра. Происходит это следующим образом: плазма вносит в жидкость электроны, которые в ней становятся гидратированными [6]. Кулоновское отталкивание гидратированных электронов друг от друга снижает энергию поверхностного натяжения и уменьшает контактные углы [7]. Фактически гидратированные электроны представляют собой кулоновский сурфактант. Несложная теория ПКЭ была разработана также в [8].

Экспериментально ПКЭ уже исследовался при подъеме жидкости внутри трубчатого капилляра [3–5], а также внутри щелевого капилляра, образованного параллельными плоскими стенками [4, 5]. Такие капилляры

имеют поперечное сечение в виде выпуклых фигур, ограниченных выпуклыми или плоскими кривыми, поэтому их назовем внутренними капиллярами. Замкнутая контактная линия жидкости на стенках капилляра, то есть граница мениска, здесь также является выпуклой.

Вместе с тем широко исследуется и внешний капиллярный эффект, проявляющий себя в подъеме жидкости в зазоре между двумя параллельными тонкими цилиндрическими стержнями [9–13]. В ряде работ исследовался также внешний капиллярный эффект в зазоре между несколькими, более двух, такими стержнями [14–16]. В них капилляры ограничены вогнутыми контурами, которые, как правило, имеют открытые участки. Граница мениска является также вогнутой. Такие капилляры назовем внешними капиллярами. Таким образом, внутренний и внешний капилляры имеют кривизну стенок противоположных знаков.

Возникает вопрос о существовании внешнего ПКЭ в зазоре между двумя параллельными тонкими цилиндрическими стержнями. В представленных здесь результатах исследований дается положительный ответ на этот вопрос.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оборудование и материалы

Для экспериментов был собран специальный стенд (рис. 1). В нем в прямоугольном сосуде с плоскими прозрачными стенками вертикально

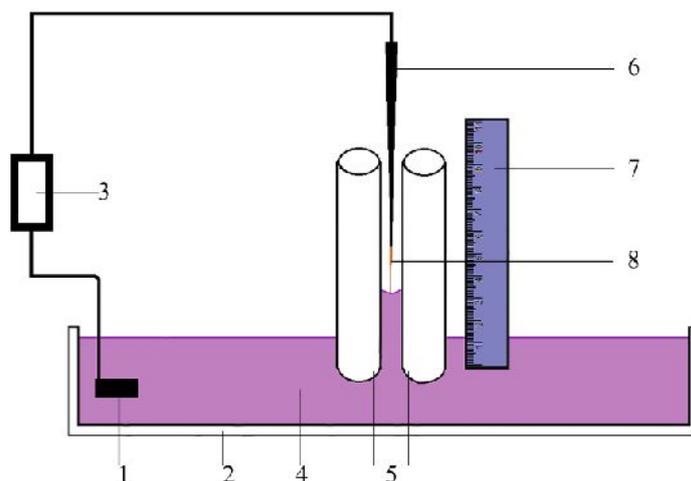


Рис. 1. Схема экспериментов: 1 – алюминиевый электрод; 2 – сосуд; 3 – генератор импульсов высокого напряжения; 4 – жидкость; 5 – полипропиленовые стержни; 6 – игольчатый электрод; 7 – измерительная линейка; 8 – плазма искрового разряда.

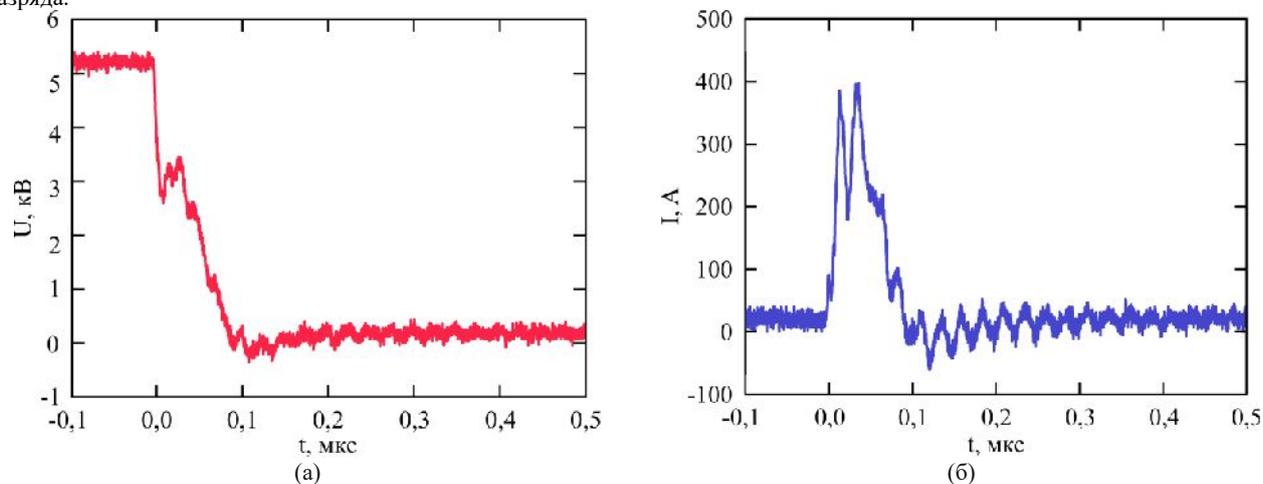


Рис. 2. Типичные осциллограммы одного разрядного импульса: (а) – осциллограмма напряжения; (б) – осциллограмма полного тока разряда.

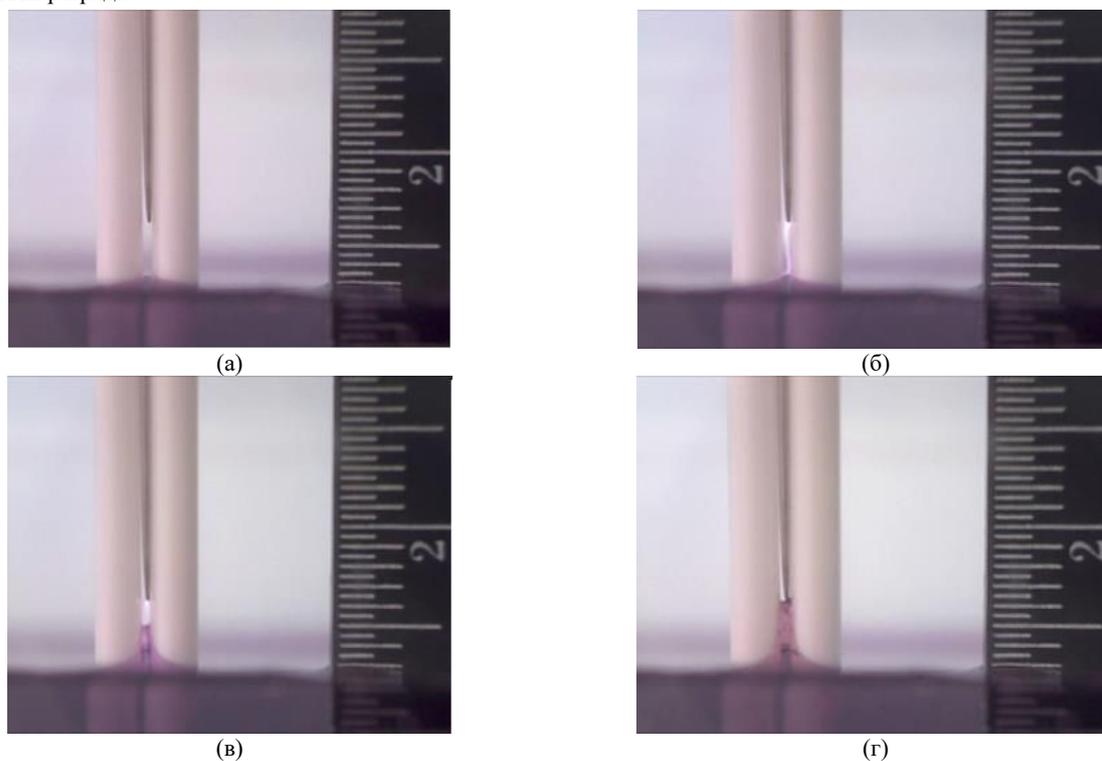


Рис. 3. Отдельные кадры видеозаписи процесса: (а) – исходное состояние жидкости во внешнем капилляре; (б), (в) – состояние жидкости в капилляре на различных стадиях подъема мениска; (г) – финальное состояние, когда мениск дошел до иглы.

закреплялись два цилиндрических полипропиленовых стержня диаметром 2,5 мм. Выставлялся зазор между стержнями, который мог варьироваться от 0 до 3 мм. Зазор при этом образовывал внешний капилляр. В сосуд наливался водный раствор перманганата калия (массовая доля KMnO_4 – 1:3000), который являлся рабочей жидкостью. Использование такого раствора вместо чистой воды было поддиковано двумя причинами: увеличением электропроводности воды, так как она служила одним из электродов газоразрядного промежутка, и окраской жидкости для улучшения визуализации. Рядом со стержнями закреплялась диэлектрическая линейка с делениями для измерения высоты подъема жидкости в капилляре.

В зазор между стержнями вводился игольчатый стальной электрод диаметром 0,53 мм так, чтобы его конец и верхний край жидкости в зазоре образовывали газоразрядный промежуток длиной 5–10 мм. Для замыкания цепи в саму жидкость погружался алюминиевый электрод.

К электродам подключался генератор импульсов высокого напряжения, работающий по принципу непрерывной зарядки и самопробоя. Ранее он использовался в [17] для других исследований, в которых было определено, что на уровне зарядного напряжения между электродами $\sim 5,5$ кВ на нагрузке в виде воздушного промежутка длиной от нескольких миллиметров до полутора сантиметров он генерирует униполярные искровые разряды с током ~ 400 А. Длительность импульса тока разряда составляет 100 нс. Энергия в разряде оценивалась как $\sim 0,2$ Дж. Типичные осциллограммы напряжения и тока одного из разрядных импульсов показаны на рис. 2а,б. Генератор способен обеспечивать частоту следования таких искровых разрядов до 250 Гц.

Наблюдения ПКЭ осуществлялись с помощью ручного цифрового микроскопа Celestron (Model 44302-A), позволяющего записывать видео процесса с частотой 20 кадров в секунду.

Все описанные ниже эксперименты проводились при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении.

Результаты экспериментов

Эксперименты показали следующее. До включения генератора высота подъема была небольшой $\sim 1,5$ мм. После включения генератора импульсов высокого напряжения между игольчатым электродом и мениском зажигались искровые разряды, следующие друг за другом с частотой 250 Гц. При этом высота подъема мениска увеличивалась. В течение нескольких

десятков секунд мениск достигал острия игольчатого электрода и разряды прекращались. После выключения генератора положение мениска не изменялось по меньшей мере в течение часа.

Было проведено несколько десятков таких экспериментов при различных величинах зазора между стержнями в диапазоне от 1 до 3 мм, в результате которых была продемонстрирована повторяемость процесса.

Длительность каждого процесса подъема мениска в экспериментах была различной. Она зависела от величины зазора между стержнями, начального расстояния между электродом и мениском и неконтролируемого в данных экспериментах состояния поверхностей полипропиленовых стержней.

Несколько кадров одной из видеозаписей представлены на рис. 3. Они демонстрируют отдельные фазы подъема мениска, приобретающего в процессе движения, как и указано в работах [9–16], сложную трехмерную форму.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что под действием импульсно-периодических искровых разрядов между электродом и мениском в капилляре, образованном двумя близко стоящими вертикальными стержнями и имеющем, таким образом, отрицательную кривизну, происходит подъем мениска. Эти эксперименты продемонстрировали существование внешнего ПКЭ. Зарегистрированный ПКЭ может найти применение, например, при интенсификации технологических процессов пропитки тканых материалов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. de Gennes, P.G., Brochard-Wyart, F. and Quéré, D., *Capillarity and wetting phenomena. Drops, bubbles, pearls, waves*. NY: Springer-Verlag, 2004. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-21656-0>
2. Bormashenko, E.Yu., *Wetting of real surfaces*. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2013. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/9783110583144/html>
3. Дубинов, А.Е., Кожаева, Ю.П., Селемир, В.Д., *Плазменный капиллярный эффект, Теплофизика высоких температур*, 2018, т. 56, № 3, с. 469. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0018151X18020062>
4. Dubinov, A.E., Kozhayeva, J.P., Lyubimtseva, V.A. and Selemir, V.D., Plasma as a surfactant: A new

- capillary effect and a new wetting effect induced by nanosecond spark discharges, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2017, vol. 45, no. 12, p. 3094. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8039440>
5. Dubinov, A.E., Kozhayeva, J.P., Lyubimtseva, V.A. and Selemir V.D., Hydrodynamic and physicochemical phenomena in liquid droplets under the action of nanosecond spark discharges: A review, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2019, vol. 271, no. 1, 101986. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868619301599>
 6. Martin, D.C., Bartels, D.M., Rumbach, P. and Go, D.B., Experimental confirmation of solvated electron concentration and penetration scaling at a plasma–liquid interface, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2021, vol. 30, no. 3, 03LT01-1–6. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6595/abe11c>
 7. Dubinov, A.E., Iskhakova, D.N. and Lyubimtseva, V.A., An inversion of contact angle hysteresis when a liquid drop slides up on an inclined plane under the spark discharge action, *Phys. Fluids*, 2021, vol. 33, no. 6, 061707-1–4. <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0055862>
 8. Бредихин, А.А., Кулумбаев, Э.Б., К теории плазменного капиллярного эффекта, *Теплофизика высоких температур*, 2020, т. 58, № 6, с. 856. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0018151X20060061>
 9. Liu, T., Choi, K.F. and Li, Y., Capillary rise between cylinders, *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 2007, vol. 40, no. 16, p. 5006. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3727/40/16/038>
 10. Liu, T. and Choi, K.F., Capillary rise between cylinders, *Surf. Interf. Analysis.*, 2008, vol. 40, nos. 3–4, p. 368. <https://analyticalsciencejournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sia.2690>
 11. Cooray, H., Cicuta, P. and Vella, D., The capillary interaction between two vertical cylinders, *J. Phys.: Condens. Matter.*, 2012, vol. 24, no. 28, p. 284104-1–8. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/24/28/284104>
 12. Rieser, J.M., Arratia, P.E., Yodh, A.G., Gollub, J.P., et al., Tunable capillary-induced attraction between vertical cylinders, *Langmuir*, 2015, vol. 31, no. 8, p. 2421. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/la5046139>
 13. Sun, X., Lee, H.J., Michielsen, S. and Wilusz, E., Profile of capillary bridges between two vertically stacked cylindrical fibers under gravitational effect, *Appl. Surface Sci.*, 2018, vol. 441, no. 1, p. 791. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169433218304537>
 14. Lukáš, D., Chaloupek, J., Košťáková, E., Pan, N., et al., Morphological transitions of capillary rise in a bundle of two and three solid parallel cylinders, *Physica A*, 2006, vol. 371, no. 2, p. 226. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378437106004614>
 15. Duprat, C., Protière, S., Beebe, A.Y. and Stone, H.A., Wetting of flexible fibre arrays, *Nature*, 2012, vol. 482, no. 7386, p. 510. <https://www.nature.com/articles/nature10779>
 16. Charpentier, J.-B., Brändle de Motta, J.C. and Ménard, T., Capillary phenomena in assemblies of parallel cylindrical fibers: From statics to dynamics, *Int. J. Multiphase Flow*, 2020, vol. 129, no. 1, 103304-1–13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301932219309735>
 17. Dubinov, A.E., Kozhayeva, J.P., Golovanov, V.V. and Selemir, V.D., Coalescence of liquid droplets under effect of pulsed-periodic spark discharges, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2019, vol. 47, no. 1, p. 76. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8466040>

Summary

It is experimentally shown that a meniscus is raised under the action of pulsed-periodic spark discharges between the electrode and the meniscus in a capillary formed by two vertically fixed cylindrical rods. The recorded effect can be applied, for example, to intensify technological processes of the fabric impregnation.

Keywords: plasma-capillary effect, spark discharge, meniscus