

03.5

## Экспериментальное исследование подъема уровня жидкости в плоском капилляре, образуемом эластичными периодически растягиваемыми стенками

© В.А. Дехтярь<sup>1</sup>, Г.Н. Колесов<sup>1,2</sup>, В.П. Отмахов<sup>1</sup>, А.Е. Дубинов<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия<sup>2</sup> Саровский физико-технический институт — филиал Научно-исследовательского ядерного университета „МИФИ“, Саров, Нижегородская обл., Россия  
E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступило в Редакцию 2 мая 2023 г.

В окончательной редакции 5 июля 2023 г.

Принято к публикации 5 июля 2023 г.

Экспериментально продемонстрирован подъем воды в плоском капилляре с эластичными стенками при их периодическом растяжении. Измерялась зависимость высоты подъема мениска воды от величины периодического во времени упругого растяжения стенок капилляра. Зарегистрировано отклонение измеренной зависимости от линейной, которая могла бы реализоваться в режиме идеального пиннинга края мениска.

**Ключевые слова:** плоский эластичный капилляр, растяжение, мениск, высота подъема.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.17.56084.19614

Капиллярный эффект (КЭ) — фундаментальное гидродинамическое явление. Эффект заключается в дополнительном подъеме жидкости в вертикально установленном капилляре, один конец которого погружен в сосуд с жидкостью, на высоту, большую высоты ее уровня в сосуде. КЭ возникает благодаря смачиванию жидкостью стенок капилляра [1,2]. Он наблюдается и используется повсеместно: в природе, в быту, в медицине, а также в многочисленных технологиях.

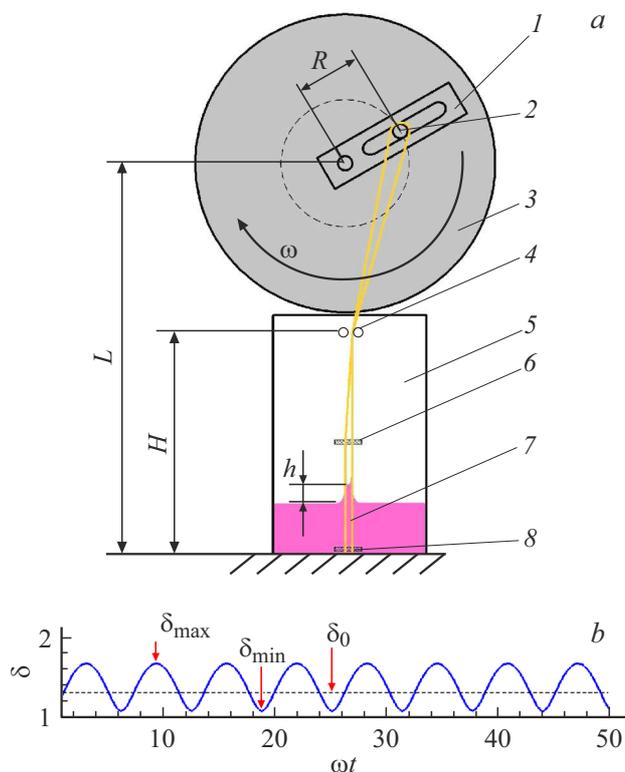
Уже давно существует и решается проблема увеличения подъема жидкости в капиллярах. Например, в [3] описан ультразвуковой КЭ, за обнаружение которого в 1961 г. был выдан диплом на открытие в СССР № 109 [4]. Известен также магнитный КЭ в магнитных жидкостях [5], а в исследованиях [6–8] был открыт плазменный КЭ.

Недавно в науке о смачиваемости и капиллярных явлениях появилось новое направление — эластокапиллярность, в котором изучается поведение жидкостей при их контакте с эластичными деформируемыми поверхностями [9–11]. В рамках этого направления изучалось, например, поведение жидких капель, сидящих на плоских горизонтальных растягиваемых резиновых подложках [12,13].

В [14] были исследованы особенности КЭ в капилляре с поперечно деформируемыми эластичными стенками. Возникает вопрос о величине КЭ в капилляре с продольно деформируемыми эластичными стенками.

В настоящей работе методом цифровой микроскопии изучалось увеличение высоты подъема жидкости в капилляре с эластичными стенками при периодическом продольном растяжении длины капилляра. Для этого

был разработан и создан специальный экспериментальный стенд, схема которого показана на рис. 1, а.



**Рис. 1.** Схема эксперимента. *a* — экспериментальный стенд: 1 — кривошип, 2 — ось крепления стенок капилляра к кривошипу, 3 — маховик, 4 — направляющие валики, 5 — стакан, 6 — направляющие распорки, 7 — капилляр, 8 — направляющий зажим. *b* — пример реализуемой временной зависимости относительного растяжения стенок капилляра  $\delta(t)$ .

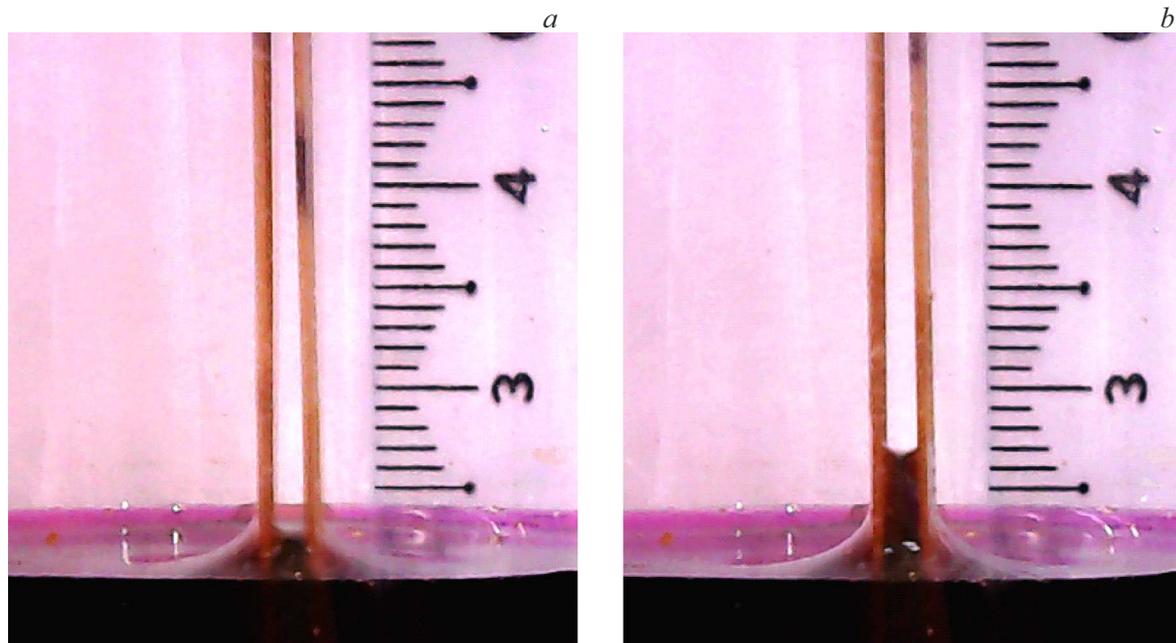


Рис. 2. Изображения жидкости в капилляре в моменты времени, когда реализуются  $h_{\min}$  (a) и  $h_{\max}$  (b).

Действие стенда основано на преобразовании вращательного движения в периодическое поступательное по принципу действия кривошипно-шатунного механизма [15]. Он содержит кривошип, радиус вращения которого можно регулировать в диапазоне  $R = 18\text{--}47\text{ mm}$ , маховик для стабилизации скорости вращения, привод. Роль шатуна играет плоскопараллельный капилляр с эластичными стенками. Стенки капилляра были изготовлены в виде лент из 100% резины шириной 15 mm и толщиной 0.5 mm. Капилляр снизу закреплялся в прозрачном стакане, а сверху — на кривошипе. Зазор между стенками капилляра, который обеспечивали специальные направляющие распорки, составлял 1.5 mm. В стакан наливалась вода. Для улучшения визуализации вода подкрашивалась несколькими кристаллами  $\text{KMnO}_4$ .

Все представленные здесь исследования проведены в условиях упругих (обратимых) одномерных растяжений ленты, когда реализуется линейный режим, подчиняющийся закону Гука.

Относительное удлинение ленты  $\delta$  регистрировалось по удлинению специального цветного маркера, нанесенного на торец лент. Значение относительного удлинения  $\delta = 1$  соответствует длине маркера в отсутствие деформации.

Наблюдение за высотой подъема мениска в капилляре над уровнем воды в стакане производилось с помощью оптического цифрового микроскопа „Celestron“ (MODEL#44302-A) [16], работающего в режиме видеозаписи.

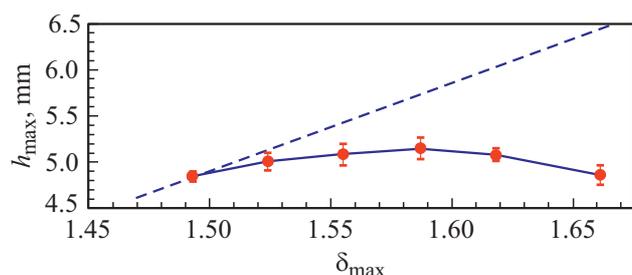
При вращении привода с постоянной частотой  $\omega$  относительное растяжение стенок капилляра  $\delta(t)$  изменяется

по периодическому закону

$$\delta(t) = \frac{\delta_0}{L - R} \left[ H + \sqrt{R^2 + (L - H)^2 - 2R(L - H) \cos \omega t} \right], \quad (1)$$

где  $\delta_0$  — начальное растяжение стенок капилляра, соответствующее горизонтальному положению кривошипа,  $L$  — расстояние от точки закрепления капилляра на дне стакана до оси вращения кривошипа,  $H$  — расстояние от точки закрепления капилляра на дне стакана до направляющих валиков (рис. 1, a). Обратим внимание на то, что значение  $\delta_0$  выбиралось таким, чтобы относительное минимальное удлинение  $\delta_{\min}$ , когда кривошип находится в крайнем нижнем положении, слегка превосходило значение 1. Это было необходимо, чтобы исключить повисание лент. Зависимость относительного растяжения стенок капилляра от фазы согласно (1) представлена на рис. 1, b, на котором  $\delta(t)$  изменяется от  $\delta_{\min}$  до  $\delta_{\max}$ . При этом некоторые участки стенок, первоначально погруженные в воду, периодически поднимаются выше начального уровня воды в стакане. При подъеме этих участков некоторые порции воды захватываются вверх за счет смачиваемости. Этот эффект в некоторых чертах похож на известный эффект увлечения жидкости вытягиваемой из нее с постоянной скоростью нерастяжимой лентой [17,18], рассмотренный Ландау и Левичем [19].

Было зарегистрировано следующее: высота подъема мениска в капилляре изменяется по периодическому закону на частоте вращения привода от минимального значения до максимального  $h_{\max}$ . Изображения жидкости в капилляре в моменты времени, когда реализуются  $h_{\min}$  и  $h_{\max}$ , показаны на рис. 2, a, b соответственно.



**Рис. 3.** Зависимость  $h_{\max}(\delta_{\max})$ . Штриховая прямая — линия идеального пиннинга края мениска.

В экспериментах вращение кривошипа осуществлялось на разных частотах из диапазона  $\nu = \omega/2\pi = 0.2\text{--}3\text{ Hz}$ . Было получено, что максимальная высота подъема жидкости  $h_{\max}$  не зависит от частоты  $\omega$ , но зависит от  $\delta_{\max}$ .

На рис. 3 приведена зависимость  $h_{\max}(\delta_{\max})$ , полученная при частоте 1 Hz в диапазоне аргумента  $1.49 \leq \delta_{\max} \leq 1.66$ . Этот диапазон соответствует диапазону изменения радиуса кривошипа  $R = 18\text{--}47\text{ mm}$ . Погрешности измерений, указанные на рисунке, возникли в результате статистической обработки как среднеквадратичные отклонения величин  $h_{\max}$  от средних значений в различных реализациях. Они не превышают  $\pm 5\%$ .

На рис. 3 показана также прямая, соответствующая идеальному без соскальзывания пиннингу края мениска на поверхности стенок капилляра. С ростом амплитуды растягивания  $\delta_{\max}$  измеренные значения  $h_{\max}$  все больше отклоняются от прямой пиннинга по причине гравитационного соскальзывания воды вниз.

Таким образом, в работе экспериментально продемонстрирован эффект подъема воды в плоском капилляре с эластичными стенками при их периодическом растягивании — эффект, схожий с известным эффектом Ландау—Левича. Измерялась зависимость высоты подъема мениска воды от величины периодического во времени упругого растяжения стенок капилляра. Зарегистрировано отклонение измеренной зависимости от линейной, которая могла бы реализоваться в режиме идеального пиннинга края мениска.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart, D. Quéré, *Capillarity and wetting phenomena. Drops, bubbles, pearls, waves* (Springer-Verlag, N.Y., 2004).
- [2] Y. Pomeau, E. Villiermaux, *Phys. Today*, **59** (3), 39 (2006). DOI: 10.1063/1.2195314.
- [3] П.П. Прохоренко, Н.В. Дежкунов, Г.Е. Коновалов, *Ультразвуковой капиллярный эффект* (Наука и техника, Минск, 1981).

- [4] *Ультразвуковой капиллярный эффект. Открытия в СССР* (ЦНИИПИ, М., 1973).
- [5] M. Li, Q. Dai, Q. Jiao, W. Huang, X. Wang, *Soft Matter*, **15** (13), 2817 (2019). DOI: 10.1039/c9sm00270g
- [6] A.E. Dubinov, J.P. Kozhayeva, V.A. Lyubimtseva, V.D. Selemir, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **45** (12), 3094 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2750482
- [7] А.Е. Дубинов, Ю.П. Кожаева, В.Д. Селемир, *ТВТ*, **56** (3), 469 (2018). DOI: 10.7868/S0040364418030213 [A.E. Dubinov, J.P. Kozhayeva, V.D. Selemir, *High Temp.*, **56** (3), 451 (2018). DOI: 10.1134/S0018151X18020062].
- [8] А.Е. Дубинов, В.А. Любимцева, *Электронная обработка материалов*, **58** (4), 51 (2022). DOI: 10.52577/eom.2022.58.4.51 [A.E. Dubinov, V.A. Lyubimtseva, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, **59** (2), 251 (2023). DOI: 10.3103/S1068375523020059].
- [9] R.W. Style, A. Jagota, C.-Y. Hui, E.R. Dufresne, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, **8**, 99 (2017). DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-031016-025326
- [10] J. Bico, E. Reyssat, B. Roman, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **50**, 629 (2018). DOI: 10.1146/annurevfluid-122316-050130
- [11] J.-L. Liu, X.-Q. Feng, *Acta Mech. Sinica*, **28** (4), 928 (2012). DOI: 10.1007/s10409-012-0131-6
- [12] S.J. Cho, H. Nam, H. Ryu, G. Lim, *Adv. Funct. Mater.*, **23** (45), 5577 (2013). DOI: 10.1002/adfm.201300442
- [13] R.M. do Nascimento, J.-F. Schmitt, U. Sarig, J.E.F.S. Rodrigues, C. Pecharromán, A.P. Ramos, P. Ciancaglini, F.L. Faita, R. Rahouadj, A.C. Hernandez, I.H. Bechtold, *Langmuir*, **37** (15), 4639 (2021). DOI: 10.1021/acs.langmuir.1c00430
- [14] T. Cambau, J. Bico, E. Reyssat, *Europhys. Lett.*, **96** (2), 24001 (2011). DOI: 10.1209/0295-5075/96/24001
- [15] R.S.Hartenberg, J. Denavit, *Kinematic synthesis of linkages* (McGraw–Hill, N.Y., 1964).
- [16] V.A. Dekhtyar, A.E. Dubinov, *Sci. Visual.*, **15** (1), 1 (2023). DOI: 10.26583/sv.15.1.01
- [17] R. Golestanian, E. Raphaël, *Europhys. Lett.*, **55** (2), 228 (2001). DOI: 10.1209/epl/i2001-00607-5
- [18] H.C. Mayer, R. Krechetnikov, *Phys. Fluids*, **24** (5), 052103 (2012). DOI: 10.1063/1.4703924
- [19] L. Landau, B. Levich, *Acta Physicochim. URSS*, **17** (1-2), 141 (1942). DOI: 10.1016/B978-0-08-092523-3.50016-2