

ОТКЛОНЕНИЕ КРАЕВОГО УГЛА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАПЛИ В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

М. А. Кашина

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Изучению поведения движения и устойчивости капли жидкости в электрическом поле посвящено большое количество работ [1]. Одним из важных факторов, влияющих на поведение капли и способы управления, является электросмачивание (electrowetting, EW) – влияние электрического поля на смачивание капель твердой подложки [1, 2]. Толчком к бурному развитию этой тематики послужило использование диэлектрических прокладок на проводящей поверхности (electrowetting-on-dielectric, EWOD) [3] (Рис. 1). В настоящее время EWOD активно используется в различных областях, например, микроустройства для анализа жидкостей (lab-on-a-chip), жидкие линзы с переменным фокусным расстоянием, дисплеи и т.д. Примеры типичных устройств EWOD показаны на рисунке 1.



Рис. 1. Типичные схематические устройства:
1 – электрод, 2 – диэлектрический слой

Если напряжение V , которое прикладывается между каплей и электродом, постоянное, то значение теоретическое значение краевого угла ϑ между поверхностью капли и подложкой определяется из уравнения Юнга-Липпмана [1–3]:

$$\cos \vartheta = \cos \vartheta_0 + \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2d\sigma} V^2, \quad (1)$$

где ϑ_0 – равновесный краевой угол в отсутствии электрического поля, определяемый уравнением Юнга, σ – коэффициент поверхностного натяжения, d – толщина диэлектрического слоя, ε_0 и ε – диэлектрическая проницаемость вакуума и диэлектрического слоя, соответственно. Последнее слагаемое в уравнении (1) представляет собой модифицированный член уравнения Липпмана [1–3]. В работе [2] для случая переменного электрического поля вместо V^2 в уравнении (1) было предложено использовать квадрат эффективного напряжения U^2 . Однако, многочисленные эксперименты [1–3, 4] показали, что уравнение (1) хорошо работает только в случае малых значений V (Рис. 2 а). В настоящее время существует несколько полуфеноменологических моделей, призванных уточнить согласие (1) с экспериментальными данными [1–3].

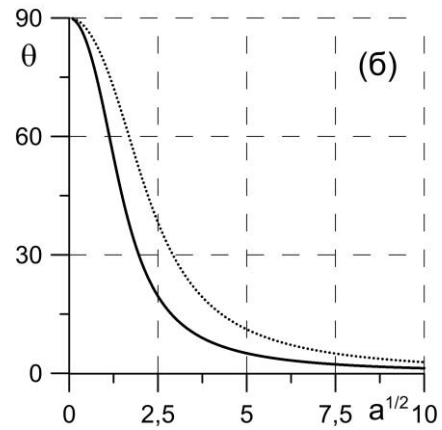
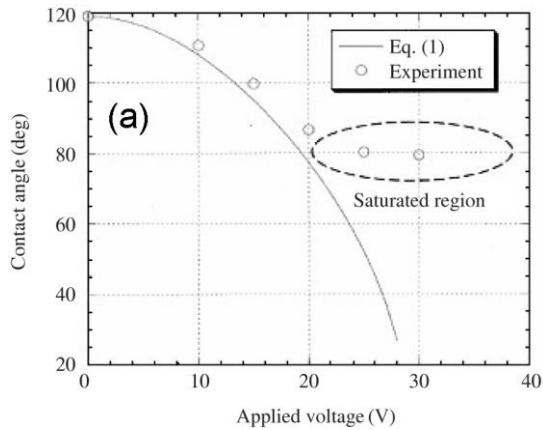


Рис. 2. Зависимость краевого угла от напряжения:

а) для полусферической капли воды на подложке 1000 \AA кремния и 200 \AA тефлона [4],
 б) для цилиндрической капли ($\lambda = 1$), $\omega = 5$ – сплошная линия, $\omega = 10$ – пунктирная

В данной работе продолжают исследования поведения цилиндрической капли жидкости в переменном электрическом поле, начатые в работах [5–8] (Рис. 3). Капля несжимаемой жидкости с плотностью ρ_i^* , окруженная другой жидкостью плотности ρ_e^* . Вся система ограничена двумя параллельными твердыми поверхностями, расстояние между которыми равно h^* . Сосуд замкнут на бесконечности. Капля имеет форму круглого цилиндра радиусом R^* в отсутствие внешних сил. Равновесный краевой угол между боковой поверхностью капли и твердыми плоскостями прямой.

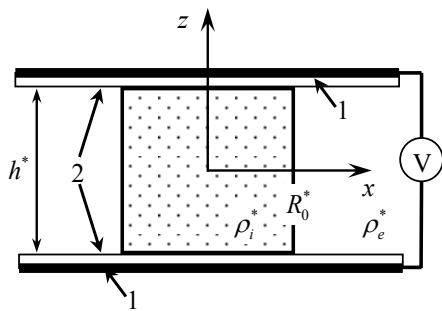


Рис. 3. Геометрия задачи

В работах [5–8] было предложено вместо уравнения Юнга-Липпмана (1) использовать эффективное условие Хокинга [9], которое допускает линейную зависимость между скоростью движения линии контакта и отклонением краевого угла. Это условие использовалось для исследования влияния механических вибраций на капли и пузырьки как полусферической формы [10–12], так и цилиндрической [13–19].

Модифицированное условие Хокинга, используемое в [5–8], полагает, что скорость движения контактной линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла и скорости быстрых релаксационных процессов, частоты которые пропорциональны удвоенной частоте электрического поля:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \mp \lambda \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z} \pm a f(\alpha) \cos(2\omega t) \right), \quad (2)$$

где ζ – отклонение поверхности от равновесного положения, λ – безразмерная постоянная Хокинга, a – безразмерная эффективная амплитуда электрического поля, $f(\alpha)$ – функция, описывающая неоднородность элек-

трического поля, ω – частота электрического поля. Подробнее постановку задачи и метод решения можно посмотреть в [5–8].

На Рис. 2 б показана зависимость значения краевого угла между боковой поверхностью цилиндрической капли и твердой подложкой при максимальном отклонении в зависимости от безразмерной эффективной амплитуды $\sqrt{a} \sim V$ для однородного электрического поля, т.е. $f(\alpha) = 1$ в (2). Представленные зависимости качественно совпадают с экспериментальными данными, приведенными на Рис. 2 а. Форма боковой поверхности капли и амплитудно-частотные характеристики приведены в работе [5].

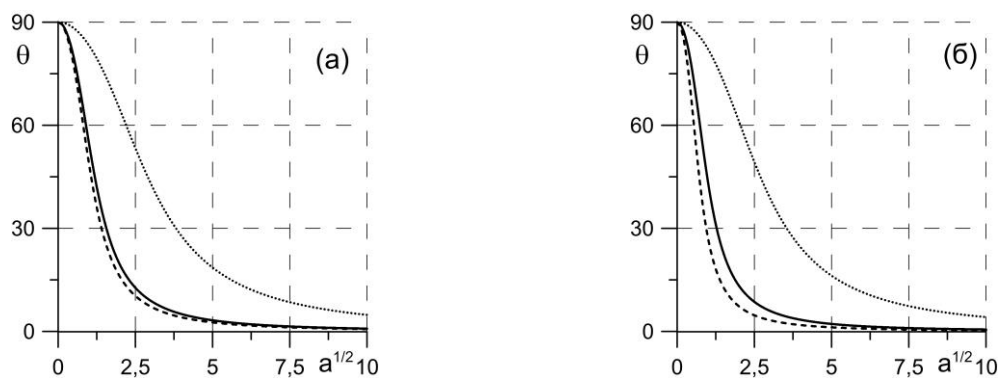


Рис. 4. Зависимость краевого угла от амплитуды ($b = 1$, $\rho_i = 0.7$, $\omega = 10$):

а) $k = 1$; б) $k = 10$; $\lambda = 1$ – сплошная линия, $\lambda = 0.1$ – пунктирная, $\lambda = 10$ – штриховая

На рисунке 4 представлено максимальное отклонение краевого угла в от безразмерной эффективной амплитуды неоднородного поля, для которого $f(\alpha) = \cos(k \sin(\alpha))$. Из представленных графиков видно, что рассматриваемая неоднородность качественно не влияет на поведение краевого угла. Однако, изменение параметра Хокинга позволяет управлять максимальным отклонением, что, возможно, позволит в дальнейшем добиться количественного соответствия с экспериментальными данными. В дальнейшем будет рассмотрен случай произвольного значения равновесного краевого угла, что позволит более точно сравнивать с результатами эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 14-21-00090).

Список литературы

1. Mugele F., Baret J.-C. Electrowetting: from basics to applications // J. Phys.: Condens. Matter. 2005. Vol. 17. P. 705-774.
2. Chen L, Bonaccorso E. Electrowetting – from statics to dynamics // Adv. Colloid Interface Sci. 2014. Vol. 210. P. 2-12.
3. Zhao Y.-P., Wang Y. Fundamentals and Applications of Electrowetting: A Critical Review // Rev. Adhesion Adhesives. 2013. Vol. 1. P. 114-174.
4. Cho S. K., Moon H. J., Kim C. J. Creating, transporting, cutting, and merging liquid droplets by electrowetting – based actuation for digital microfluidic circuits // J. Microelectromech. Syst. 2003. Vol. 12. P. 70-80.

5. *Алабужев А. А., Кашина М. А.* Колебания цилиндрической капли в переменном электрическом поле // Технические науки – от теории к практике. 2014. № 41. С. 124-128.
6. *Кашина М. А., Алабужев А. А.* Вынужденные колебания цилиндрической капли в переменном неоднородном электрическом поле // XIX Зимняя школа по механике сплошных сред. Сборник статей / Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН. Пермь, 2015. С. 105-110.
7. *Кашина М. А., Алабужев А. А.* Колебания и параметрическая неустойчивость цилиндрической капли в переменном неоднородном электрическом поле // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов (Казань, 20-24 августа 2015 г.). Казань: Изд-во Казанского (Приволжского) федерального университета. С. 1751–1753.
8. *Alabuzhev A. A., Kashina M. A.* The oscillations of cylindrical drop under the influence of a nonuniform alternating electric field // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 681. 012042.
9. *Hocking L. M.* The damping of capillary-gravity waves at a rigid boundary // J. Fluid Mech. 1987. Vol. 179. P. 253-266.
10. *Любимов Д. В., Любимова Т. П., Шкляев С. В.* Неосесимметричные колебания полусферической капли // Изв. РАН. МЖГ. 2004. № 6. С. 8-20.
11. *Lyubimov D. V., Lyubimova T. P., Shklyayev S. V.* Behavior of a drop on an oscillating solid plate // Phys. Fluids. 2006. Vol. 18. 012101.
12. *Shklyayev S., Straube A. V.* Linear oscillations of a hemispherical bubble on a solid substrate // Phys. Fluids. 2008. Vol. 20. 052102.
13. *Алабужев А. А., Любимов Д. В.* Влияние динамики контактной линии на собственные колебания цилиндрической капли // ПМТФ. 2007. Т. 48, № 5. С. 78-86.
14. *Алабужев А. А., Любимов Д. В.* Влияние динамики контактной линии на колебания сжатой капли // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 1. С. 1-12.
15. *Алабужев А. А.* Поведение цилиндрического пузырька под действием вибраций // Вычисл. мех. сплош. сред. 2014. Т.7, № 2. С. 151–161.
16. *Алабужев А. А., Кайсина М. И.* Трансляционная мода собственных колебаний цилиндрического пузырька // Вестник ПГУ. Физика. 2015. Вып. 1(29). С. 35-41.
17. *Алабужев А. А., Кайсина М. И.* Влияние движения линии контакта на осесимметричные колебания цилиндрического пузырька // Вестник ПГУ. Физика. 2015. Вып. 2(30). С. 56-68.
18. *Алабужев А. А., Кайсина М. И.* Собственные азимутальные колебания цилиндрического пузырька в сосуде конечного объема // Вестник ПГУ. Физика. 2015. Вып. 3(31). С. 38-47.
19. *Alabuzhev A. A., Kaysina M. I.* The translational oscillations of a cylindrical bubble in a bounded volume of a liquid with free deformable interface // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. Vol. 681. 012043.