

КОЛЕБАНИЯ КАПЛИ, ЗАЖАТОЙ МЕЖДУ НЕОДНОРОДНЫМИ ПОДЛОЖКАМИ, В ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

М. А. Кашина

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

В данной работе исследуются вынужденные колебания капли жидкости, вызванные действием переменного электрического поля. В равновесном состоянии капля имеет форму цилиндра, который ограничен в осевом направлении двумя параллельными твердыми поверхностями. Равновесный краевой угол между боковой поверхностью капли и твердой пластиной – прямой. Капля окружена другой жидкостью. Электрическое поле создает внешнюю периодическую силу, которая действует на линию контакта трех сред: капля-жидкость-твердая пластина. Скорость движения этой линии пропорциональна сумме отклонения краевого угла от равновесного значения и скорости релаксационных процессов, частота которых равна удвоенной частоте электрического поля. Получены данные об отклонении поверхности в зависимости от постоянной Хокинга и геометрического параметра.

Ключевые слова: цилиндрическая капля; контактная линия; вынужденные колебания

OSCILLATIONS OF A DROP BETWEEN HETEROGENEOUS SUBSTRATES UNDER AN ALTERNATING ELECTRIC FIELD

M. A. Kashina

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

Forced oscillations of a liquid drop under an alternating electric field have been investigated in this work. In the equilibrium state the drop has the cylindrical form, which is bounded in the axial direction by two parallel solid surfaces. The equilibrium contact angle between the side surface of the drop and the solid plate is right. The electric field creates an external periodic force, which acts on the contact line of three media: a drop-liquid-solid plate. The velocity of the contact line is proportional to the deviation of the contact angle and the speed of the fast relaxation processes, which frequencies are proportional to twice frequency of the electric field. Data about deviation of the surface was obtained in dependence on the Hocking constant and the aspect ratio.

Keywords: cylindrical drop; contact line; forced oscillations

В настоящее время изучению поведения движения и устойчивости капли жидкости в электрическом поле уделяется много внимания [1–4]. Одним из важных факторов, влияющих на поведение капли и способы управления, является электросмачивание (electrowetting, EW) – влияние электрического поля на смачивание капель твердой подложки [4]. Толчком к бурному развитию этой тематики послужило использование диэлектрических прокладок на проводящей поверхности (electrowetting-on-dielectric, EWOD)

[4, 5]. Однако условие Юнга-Липмана, которое используется в большинстве работ, плохо описывает отклонение краевого угла в сравнении с экспериментальными данными. Авторами данной работы было предложено другое граничное условие [6], использование которого показывает хорошее согласие с экспериментом.

Постановка задачи в целом повторяет работу [6, 7]. Исследуются вынужденные колебания капли несжимаемой жидкости с плотностью ρ_i^* , окруженной другой жидкостью плотности ρ_e^* . Вся система ограничена двумя параллельными твердыми поверхностями (рис. 1), расстояние между которыми равно h^* . Сосуд замкнут на бесконечности. В равновесии капля имеет форму круглого цилиндра радиусом R_0^* ; равновесный краевой угол между боковой поверхностью капли и твердой поверхностью прямой. На систему действует переменное однородное электрическое поле с амплитудой A^* и частотой ω^* . Это поле играет роль внешней силы, которая заставляет двигаться контактную линию. В цилиндрической системе координат (ось z совпадает с осью симметрии сосуда), боковую поверхность капли можно описать функцией $r^* = R_0^* + \zeta^*(z^*, \alpha, t^*)$, где $\zeta^*(z^*, \alpha, t^*)$ - функция, описывающая отклонение боковой поверхности капли от равновесного положения.

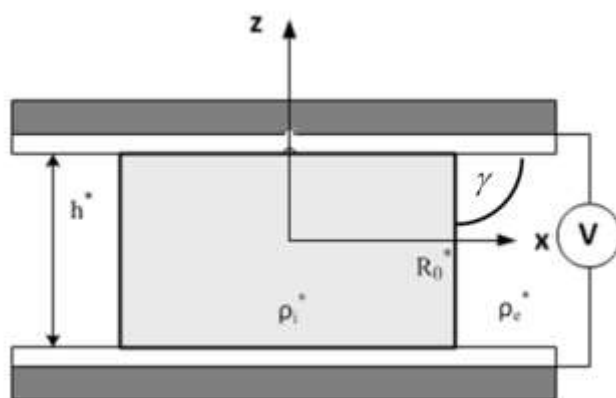


Рис. 1. Геометрия задачи

Движение линии контакта описывается граничным условием [6] (в главном порядке разложения по малой амплитуде вибраций):

$$z = \mp 1/2, r = 1: \quad \zeta_t = \pm \Lambda(\alpha)(\zeta_z + A \cos 2\omega t), \quad (1)$$

где $z = z^*/h^*$, $r = r^*/R_0^*$, $\zeta = \zeta^*/A^*$, $\Lambda = \Lambda^* b \sqrt{(\rho_e^* + \rho_i^*) R_0^*/\sigma^*}$, $b = R_0^*/h^*$,

Λ^* – параметр Хокинга, σ^* – коэффициент поверхностного натяжения.

Однородные пластины были рассмотрены в работе [6]. В качестве примера влияния неоднородности поверхности пластин, рассмотрим две

функции в условии (1). Решение задачи представлялось в виде ряда по собственным функциям оператора Лапласа. Однородное поле возбуждает осесимметричную азимутальную моду колебаний [6].

На (рис. 2) показана амплитуда отклонения линии контакта ζ в зависимости от частоты электрического поля для трех значений постоянной Хокинга λ и геометрического параметра b для функции $\Lambda(\alpha) = \lambda |\cos \alpha|$, а на рис. 3 для $\Lambda(\alpha) = \lambda |\cos(\cos \alpha)|$. Данные функции возбуждают только чётные азимутальные моды. Таким образом, из-за неоднородности поверхностей энергия из осесимметричной азимутальной моды передаётся в другие моды колебаний.

Из представленных рисунков (рис. 2 а, 3 а) видно, что при малых значениях параметра λ резонансные эффекты отсутствуют, что объясняется сильным взаимодействием линии контакта с подложкой внешней силы недостаточно. При больших значениях λ линия контакта свободно скользит по твердой поверхности, что приводит к хорошо выраженным резонансным эффектам для всех частот собственных колебаний. Кроме того, для малых и конечных значений λ резонансной является только осесимметричная мода, тогда как для больших значений λ появляются резонансы и на частотах других азимутальных мод.

С увеличением геометрического параметра b растут значения частот собственных колебаний, что приводит к сдвигу резонансных значений частоты поля (рис. 2 б, 3 б). Существуют также «антирезонансные» частоты, при которых линия контакта неподвижна, а изменяется только краевой угол.

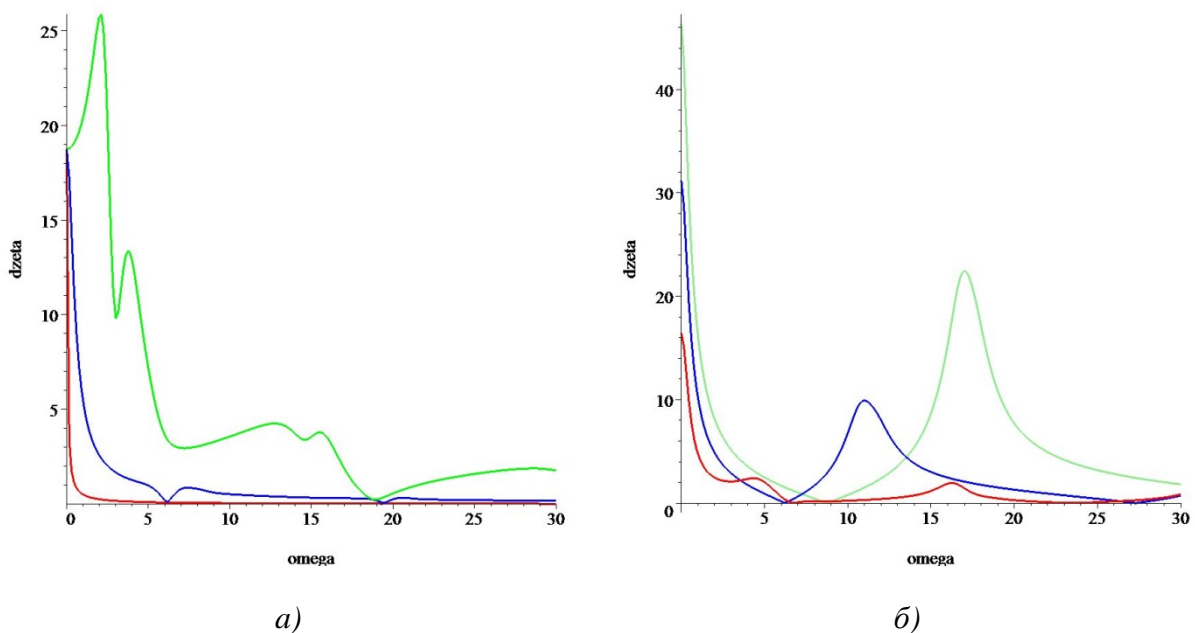


Рис. 2. Максимальное отклонение линии контакта ζ от частоты ω : а) при трех значениях λ ($b=1.0$, $A=10.1$, $\lambda=0.1$, $\lambda=1.0$, $\lambda=10.0$); б) при трех значениях b ($\lambda=1.0$, $A=10.0$, $b=0.9$, $b=1.5$, $b=2.0$)

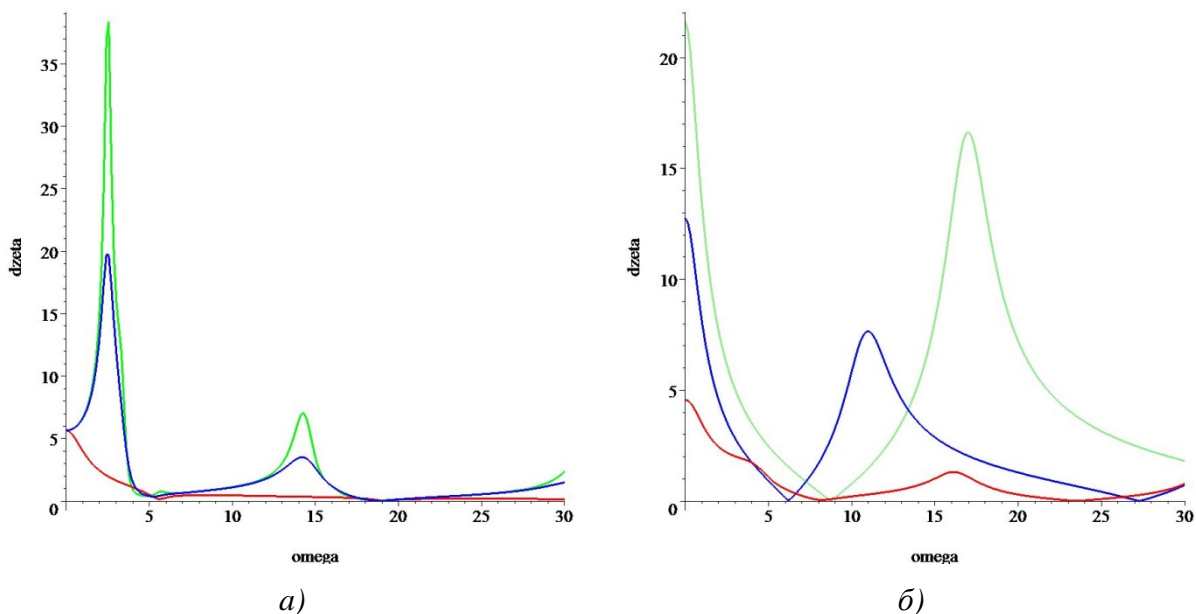


Рис. 3. Максимальное отклонение линии контакта ζ от частоты ω : а) при трех значениях λ ($\rho_i=0.7$, $b=1.0$, $A=10.1$, $\lambda=1.0$, $\lambda=10.0$, $\lambda=20.0$); б) при трех значениях b ($\rho_i=0.7$, $\lambda=1.0$, $A=10.0$, $b=0.9$, $b=1.5$, $b=2.0$).

Список литературы

1. *Melcher J. R., Taylor G. I.* Electrohydrodynamics: A Review of the Role of Interfacial Shear Stresses // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1969. Vol. 1. P. 111–146.
2. *Pelekasis N. A., Economou K., Tsamopoulos J. A.* Linear oscillations and stability of a liquid bridge in an axial electric field // *Physics of Fluids*. 2001. Vol. 13. P. 3564–3581.
3. *Шутов А. А.* Форма капли в постоянном электрическом поле // *Журнал технической физики*. 2002. Т. 72. № 12. С. 15–22.
4. *Mugele F., Baret J.-C.* Electrowetting: from basics to applications // *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2005. Vol. 17. P. 705–774.
5. *Berge B.* Electrocapillarity and Wetting of Insulator Films by Water // *Comptes rendus de l'Académie des sciences. II*. 1993. Vol. 317. P. 157–163.
6. *Alabuzhev A. A., Kashina M. A.* The oscillations of cylindrical drop under the influence of a nonuniform alternating electric field // *Journal of Physics: Conference Series* 2016. Vol. 681. 012042.
7. *Кашина М. А.* Влияние неоднородности поверхности подложки на колебания цилиндрической капли в переменном электрическом поле // *Неравновесные процессы в сплошных средах: материалы межд. симп.: Перм. гос. нац. исслед. ун-т. Пермь, 2017. Т. 1. С. 223–225.*