

Взаимодействие электромагнитных волн с жидкими пленками

© А.В. Харланов, Т.С. Харланова

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

E-mail: harlanov_av@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 мая 2023 г.

В окончательной редакции 9 июля 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Рассматривается влияние электромагнитной волны на протекание жидкой пленки между двумя плоскими пластинами. Показано, что вектор напряженности электрического поля оказывает воздействие на двойной электрический слой жидкости у поверхности пластин. Увеличение скорости движения жидкости может быть связано с вибрационными эффектами.

Ключевые слова: электромагнитная волна, жидкая пленка, двойной электрический слой, электроосмос.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56864.17A

Текущие тонкие пленки используются в системах оборудования для химической обработки, нанесения покрытий, обработки полимеров, охлаждения микроэлектронных приборов [1,2]. Движение тонкой пленки по подложке — сложная задача, не имеющая аналитического решения. Кроме того, неровная поверхность стекающей жидкости приводит к неравномерности ее толщины, что в свою очередь ведет к неравномерности охлаждения или других технологических процессов [3,4]. Эту проблему можно обойти, если жидкость будет течь между двумя пластинами. В этом случае свободная поверхность будет отсутствовать, уравнения, описывающие течение жидкости, существенно упростятся, а толщина жидкости будет постоянной. Однако дополнительная поверхность будет тормозить течение жидкости. Чтобы ее ускорить, можно воспользоваться комбинацией двух физических явлений: электроосмос и вибрационная механика [5,6]. Причиной этого служит заряженный слой на границе раздела двух различных веществ. Слой жидкости прилипает к твердой поверхности. Электрическое поле действует на этот слой и приводит его в движение. Подобно тому как электроосмос объясняется действием постоянного поля на заряженный слой, приводящим его в движение, переменное поле, действующее на Вибрационные эффекты получили развитие в широком спектре научной деятельности [6–8]. Рассмотрим данные эффекты в приложении к течению жидкой тонкой пленки. О возможности такого увеличения скорости течения пленки свидетельствует патент [9]. В нем предлагается способ измерения мощности электромагнитного излучения путем воздействия его на капилляр с водой. Капилляр ориентируется в направлении электрической составляющей излучения, а мощность измеряют по изменению скорости истечения струи. Механизм такого влияния электромагнитной волны на скорость течения жидкости никак не объясняется, но можно предположить, что и для тонкой пленки, и для капилляра этот механизм будет одинаковым.

Пусть к телу массой m , лежащему на горизонтальной поверхности, горизонтально приложена постоянная сила F_C , которая меньше силы трения покоя, т.е. тело поко-

ится. Если теперь воздействовать горизонтальной силой $F_0 \sin \omega t$ с частотой ω и амплитудой F_0 , большей силы трения покоя, то тело начнет двигаться. В вибрационной механике выводится выражение для скорости установившегося движения [10]:

$$U_0 = \frac{F_0}{m\omega} \cos \frac{k_+}{k_+ + k_-} \pi, \quad (1)$$

где $k_- = \frac{F_f + F_C}{mg} > k_+ = \frac{F_f - F_C}{mg}$, F_f — максимальная сила трения покоя.

Рассмотрим плоскую жидкую пленку между двумя твердыми поверхностями, текущую под действием разности давлений. Мысленно выделим слой жидкости и рассмотрим силы, действующие на него (рис. 1, а). На торцевые поверхности действуют силы, обусловленные разностью давлений ($P_1 - P_2$), на боковые поверхности действуют силы вязкого трения F_f . При стационарном течении эти силы уравниваются друг друга, отсюда можно получить выражение для распределения скоростей

$$U(x) = \frac{P_1 - P_2}{2\eta l} (a^2 - x^2), \quad (2)$$

где $2a$ — расстояние между поверхностями, η — коэффициент динамической вязкости. Неподвижный слой жидкости, находящийся непосредственно у стенок, имеет заряд. Если в этой области каким-то образом создать переменное электрическое поле вдоль оси z с амплитудой E_0 , то под действием переменной (вибрационной) силы этот слой приобретет скорость U_0 (рис. 1, б). Тогда новая формула распределения скоростей запишется в виде

$$U(x) = \frac{P_1 - P_2}{2\eta l} (a^2 - x^2) + U_0. \quad (3)$$

Для оценки предположим, что жидкость течет между двумя вертикальными плоскими поверхностями под действием силы тяжести. Рассмотрим слой жидкости толщиной h , находящийся непосредственно у стенки. На этот слой действуют сила тяжести, сила адгезии со стороны стенки и сила вязкого трения со стороны соседнего слоя жидкости.

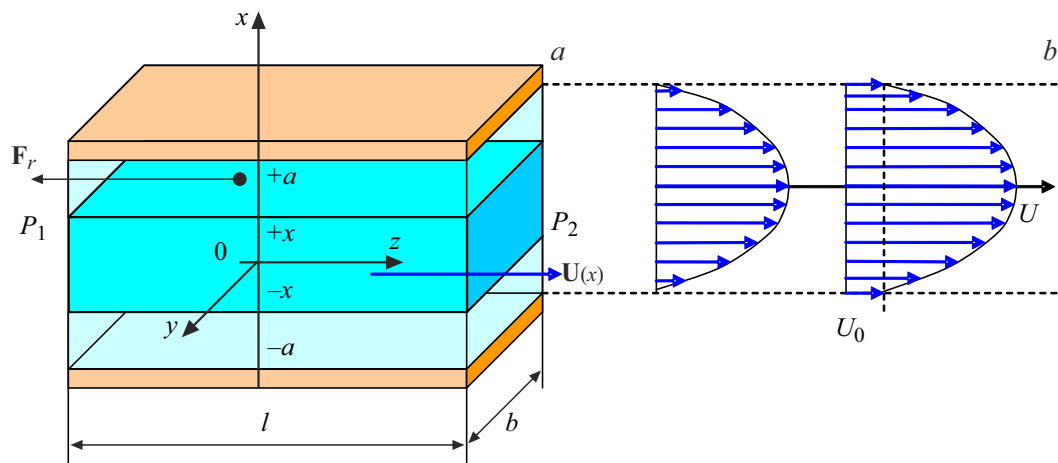


Рис. 1. Движение жидкой пленки. *a* — жидкая пленка, расположенная между двумя плоскими диэлектрическими пластинами; *b* — распределение скоростей в поперечном сечении без учета (слева) и с учетом (справа) вибрационных сил.

При изучении движения тонкой пленки целесообразнее рассматривать силы, действующие на единицу поверхности. Для границы вода–стекло сила адгезии будет иметь порядок $f_A \approx 100 \text{ N/m}^2$ [11,12]. Эта сила аналогична силе F_f в формуле (1).

Теперь оценим силы тяжести f_g и вязкости f_τ , которые для слоя жидкости, примыкающего к стенке, противоположны силе адгезии. Тогда сила тяжести, приходящаяся на единицу поверхности S , будет равна

$$f_g = \frac{F_g}{S} = \frac{\rho b l h g}{b l} = \rho g h. \quad (4)$$

С учетом формулы (2) сила вязкости, приходящаяся на единицу поверхности, будет равна

$$f_\tau = -\eta \left. \frac{dU(r)}{dr} \right|_{r=a} = \eta \frac{P_1 - P_2}{\eta l} a = \frac{\rho g l}{l} a = \rho g a. \quad (5)$$

Таким образом, общая сила, которая будет иметь смысл силы F_C из формулы (1), есть сумма сил (4) и (5):

$$f_C = \frac{F_C}{S} = f_g + f_\tau = \rho g (h + a). \quad (6)$$

Поскольку толщина слоя жидкости, прилипающего к стенке трубы, имеет величину порядка сотен ангстрем [11], в формуле (6) можно пренебречь величиной h . Если расстояние между поверхностями 1 mm, то сила $f_C \approx 10 \text{ N/m}^2$ на порядок меньше силы адгезии, т.е. она не может сдвинуть слой жидкости относительно поверхности.

Амплитуда электромагнитной силы, действующей на тонкий слой жидкости, пропорциональна величине напряженности E_0 и поверхностной плотности заряда ρ_s . Тогда тонкая пленка на границах $\pm a$ приобретет дополнительную скорость в формуле (3), которую можно

записать в явном виде, используя формулу (1):

$$U_0 = \frac{\rho_s E_0}{h \rho \omega} \cos \frac{f_A - f_C}{2 f_A} \pi. \quad (7)$$

Используя оценку (6), из (7) можно получить, что $U_0 = \frac{\rho_s E_0}{\omega} \cdot 1.6 \cdot 10^3 \text{ m/s}$.

Также играет роль распределение полей в пленке. Можно разными способами создать переменное электрическое поле в пленке. Конденсатор создаст поле, перпендикулярное оси z , что неэффективно с точки зрения вибрационной механики. Использование внешних излучателей не всегда приемлемо, так как пространство внутри устройств, охлаждающихся жидкими пленками, как правило, ограничено. Поэтому наиболее удобным выглядит вариант ввода электромагнитной энергии в систему как в волновод. Также при таком подходе поля будут распределяться равномерно. Если рассматривать такую систему как трехслойный прямоугольный волновод, то нужную нам составляющую напряженности электрического поля можно записать, используя векторный потенциал \mathbf{A} [13]:

$$E_{zj} = -i \frac{1}{\omega \epsilon_0 \epsilon} \frac{\partial^2 A_{xj}}{\partial x \partial z}, \quad (8)$$

где $A_{xj} = (B_j \cos(k_x x) + C_j \sin(k_x x)) \sin(k_y y) e^{ik_z z}$, j — номер области волновода ($j = 1$ — область пластин, $j = 2$ — область жидкости), k_{xj}, k_y — поперечные волновые числа, k — постоянная распространения волны, d — толщина пластин, ограничивающих жидкую пленку, B_j, C_j — постоянные коэффициенты, определяемые интенсивностью волны. На границе жидкость–диэлектрик тангенциальные составляющие полей должны быть равны. Используя такие граничные условия, можно получить систему уравнений для коэффициентов B_j, C_j .

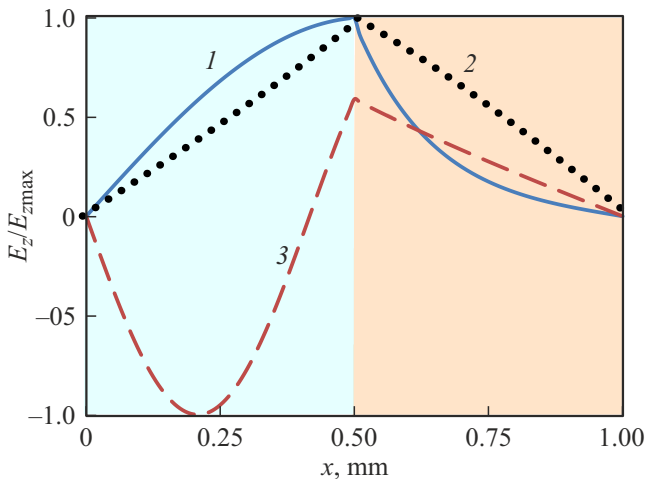


Рис. 2. Распределение полей. 1 — LM_{21} , $\varepsilon_2 = 60$; 2 — LM_{21} , $\varepsilon_2 = 6$; 3 — LM_{41} , $\varepsilon_2 = 60$.

Решение системы нетривиально, если выполняется дисперсионное уравнение [13]:

$$\frac{k_{x1}\varepsilon_2}{k_{x2}\varepsilon_1} \operatorname{tg}(k_{y1}d) + \operatorname{tg}(k_{y2}a) = 0, \quad (9)$$

а поперечные волновые числа определяются из соотношений

$$k_{xj} = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon_j - k_y^2 - k^2}, \quad k_y = \frac{n\pi}{b}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (10)$$

Сшивая решения (8) на границах и используя (9), (10), можно получить распределения полей в волноводе. Результаты получены для продольно-магнитных волн LM_{mn} ($H_x = 0$). При расчетах использованы следующие параметры: $a = h = 0.5$ mm, $b = 3$ mm, $f = \omega/2\pi = 50$ GHz, $\varepsilon_1 = 10$, $\varepsilon_2 = 6-60$ [14–16]. Частота определяется размерами волновода. Диэлектрическая проницаемость воды и водных растворов вблизи этой частоты сильно изменяется и зависит от температуры. Результаты представлены в относительном виде $E_z/E_{z\max}$ (рис. 2), где $E_{z\max}$ определяется по интенсивности электромагнитной волны. Видно, что для разных волн максимум напряженности электрического поля будет находиться в разных местах. Геометрия системы будет влиять на распределение полей. Так, например, для капилляра с водой поля будут описываться функциями Бесселя [17]. Нужно подобрать параметры так, чтобы на границу вода–диэлектрик приходился максимум напряженности электрического поля.

Таким образом, в работе предложен возможный механизм влияния электромагнитной волны на движение плоских жидких пленок при использовании их в качестве волноводов. Поскольку скорость U_0 не зависит от толщины пленки, с увеличением толщины, как видно из формулы (3), вклад „вибрационной“ скорости будет уменьшаться. Поэтому чем толще пленка, тем менее

заметным будет наблюдаемый эффект. Увеличение скорости течения тонкой пленки может применяться не только для увеличения эффективности охлаждения электронных устройств, но и для определения параметров жидких тонких пленок, так как скорость течения зависит от заряда пленки, который обусловлен химическим составом жидкости. Нельзя полностью исключать и другие возможные механизмы увеличения скорости течения жидкости, например вследствие уменьшения вязкости за счет нагрева. Но авторы, проводившие эксперимент, утверждают, что явление сопровождается уменьшением сил адгезии стенки капилляра и жидкости [18,19], что характерно для вибрационных эффектов. Также этот эффект заметнее при больших скоростях течения жидкости, при этом вода, протекая через область действия поля, будет меньше нагреваться, что должно, наоборот, уменьшить эффект. Сила вязкости при этом увеличится, что должно привести к увеличению эффекта с точки зрения вибрационной механики.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] O.A. Kabov, D.V. Zaitsev, V.V. Cheverda, A. Bar-Cohen, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **35**, 825 (2011). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2010.08.001
- [2] T. Ubara, H. Asano, K. Sugimoto, *Appl. Sci.*, **10**, 1632 (2020). DOI: 10.3390/app10051632
- [3] R.V. Craster, O.K. Matar, *Rev. Mod. Phys.*, **81**, 1131 (2009). DOI: 10.1103/RevModPhys.81.1131
- [4] C. Ma, S. Hu, G. Dong, B. Li, *Appl. Sci.*, **10**, 76 (2020). DOI: 10.3390/app10010076
- [5] О.Н. Григоров, *Электрокинетические явления* (Изд-во ЛГУ, Л., 1973).
- [6] M. Tiboni, C. Remino, R. Bussola, C. Amici, *Appl. Sci.*, **12**, 972 (2020). DOI: 10.3390/app12030972
- [7] C. Li, C. Zhu, S. Sui, J. Yan, *Appl. Sci.*, **12**, 40 (2020). DOI: 10.3390/app12010040
- [8] В.А. Александров, С.П. Копысов, Л.Е. Тонков, *ЖТФ*, **89** (7), 998 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.07.47787.234-18 [V.A. Aleksandrov, S.P. Kopysov, L.E. Tonkov, *Tech. Phys.*, **64** (7), 939 (2019). DOI: 10.1134/S106378421907003X].
- [9] О.В. Бецкий, К.Д. Казаринов, А.В. Путвинский, *Способ измерения мощности СВЧ*, а.с. № 1101750. Бюл. открытий и изобретений, № 25, 120 (1984).
- [10] *Вибрации в технике*, под ред. К.В. Фролова (Машиностроение, М., 1978).
- [11] А.Д. Зимон, *Адгезия жидкости и смачивание* (Химия, М., 1974).
- [12] Y. Sun, Y. Li, X. Dong, X. Bu, J.W. Drelich, *Coll. Surf. A*, **591**, 124562 (2020). DOI: 10.1016/j.colsurfa.2020.124562
- [13] Ю.В. Егоров, *Частично заполненные прямоугольные волноводы* (Сов. радио, М., 1967).
- [14] A.A. Bahgat, M.M. El-Samanoudy, A.I. Sabry, *J. Phys. Chem. Solids*, **60**, 1921 (1999). DOI: 10.1016/S0022-3697(99)00211-5

- [15] W.J. Ellison, J. Phys. Chem. Ref. Data, **36**, 1 (2007).
DOI: 10.1063/1.2360986
- [16] S. Gabriel, R.W. Lau, C. Gabriel, Phys. Med. Biol., **41**, 2271 (1996). DOI: 10.1088/0031-9155/41/11/003
- [17] J.D. Jackson, *Classical electrodynamics* (Wiley, N.Y.–London–Sydney, 1998).
- [18] К.Д. Казаринов, *Роль примембранных водных слоев в биологических эффектах миллиметрового излучения низкой интенсивности*, канд. дис. (Ин-т высш. нерв. деятельности и нейрофизиологии АН СССР, М., 1986).
- [19] О.В. Бецкий, В.В. Кислов, Н.Н. Лебедева, *Миллиметровые волны и живые системы* (Сайнс-пресс, М., 2004).