

УДК 537.21; 537.311  
PACS 47.65.-d, 82.45.-h

## О пондеромоторных силах, действующих на погруженное в слабопроводящую жидкость тело в электрическом поле

**В. А. Семёнов**

Пермский государственный национальный исследовательский университет  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15  
email: semenov@psu.ru

Рассмотрена возможная модель механизма действия пондеромоторных сил, действующих на погруженное в слабопроводящую жидкость тело в электрическом поле, основанная на формальной аналогии между уравнениями для напряженности поля в электростатическом поле и в проводящей среде в условиях протекания постоянного тока. Представлены результаты эксперимента, из которых следует, что данная модель неадекватно описывает реальный механизм действия пондеромоторных сил в слабопроводящей жидкости.

**Ключевые слова:** электрогидродинамика; пондеромоторные силы

*Поступила в редакцию 08.11.2017; принята к опубликованию 23.11.2017*

## On ponderomotive forces action on body immersed in the low conductive liquid under an electric field

**V. A. Semenov**

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm  
email: semenov@psu.ru

The possible model of the mechanism of action of ponderomotive forces acting on body immersed in the low conductive liquid under an electric field, based on formal analogies between the equations for field strength in an electrostatic field and in a conducting medium under the conditions of flow of direct current. Experimental results are presented, from which it follows that this model inadequately describes the real mechanism of action of ponderomotive forces in weakly conducting liquid.

**Keywords:** electrohydrodynamics; ponderomotive forces

*Received 08.11.2017; accepted 23.11.2017*

doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-59-62

Вопрос о пондеромоторных силах, действующих на диэлектрическое (проводящее) тело, погруженное в жидкий диэлектрик, в электростатическом поле, достаточно хорошо изучен и рассматривается во многих учебных изданиях

[1, 2]. При этом, как правило, для вычисления силы используется формула [1]:

$$\vec{F} = \frac{\epsilon_m}{4\pi} \oint \left[ \vec{E}(\vec{n}\vec{E}) - \frac{1}{2} E^2 \vec{n} \right] ds, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_m$  - диэлектрическая проницаемость жидкости,  $\vec{E}$  - напряженность поля в жидкости на поверхности тела,  $\vec{n}$  - вектор внешней нормали к поверхности тела,  $ds$  - элемент поверхности тела.

Как показано в [3,4], результаты расчета сил по формуле (1) совпадают с данными экспериментов о равновесии тел в слабопроводящих жидкостях для случая переменных полей, частота которых удовлетворяет условию «электростатичности» поля:

$$T \ll \frac{\varepsilon_m}{4\pi\sigma_m}. \quad (2)$$

Здесь  $T$  - период изменения поля,  $\sigma_m$  - проводимость жидкости.

Подставляя в (2) характерные значения, например, для касторового масла  $\varepsilon_m = 4.3$ ,  $\sigma_m \approx 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1} \approx 0.9 \text{ ед. СГС}$ , получим оценку  $T \ll 0.4 \text{ сек}$ .

Вместе с тем, как показывает обзор научной литературы вопрос о пондеромоторных силах, действующих на тело, погруженное в слабопроводящую жидкость, в постоянном электрическом поле при протекании тока и больших напряженностях поля (более 1000 В/см) еще недостаточно изучен. Поскольку в слабопроводящей среде имеются связанные и свободные заряды, то, соответственно, силу, действующую на тело, можно разделить на две составляющие - силу, действующую на связанные заряды, и силу, действующую на свободные заряды. При этом для вычисления силы, действующей на связанные заряды, как правило, используется (1). Значительно сложнее вопрос о силе, действующей на свободные заряды, поскольку непосредственно связан с механизмом формирования свободного заряда на поверхности тела в условиях протекания тока. Известно [5, 6], что в отсутствие внешнего электрического поля в электролитах происходит адсорбция ионов на границе раздела сред, что приводит к образованию двойных слоев. Взаимодействие этих зарядов с внешним полем при небольших напряженностях (менее 100 В/см) обуславливает такие явления, как электрофорез, электроосмос и т.д. [7,8]. Возникает вопрос происходят ли аналогичные процессы в слабопроводящих жидкостях при больших напряженностях электрического поля и, соответственно, каков механизм действия электрических сил на тело? В ряде работ [9, 10] расчет пондеромоторных сил в слабопроводящей жидкости основан на следующей модели. Известно [1, 10, 12], что существует формальная аналогия между уравнениями для напряженности поля в электростатическом поле и в проводящей среде в условиях протекания постоянного тока, обусловленная гармоничностью потенциала поля. В связи с этим предлагается при расчете сил при протекании тока в выражении (1)

выполнить формальную замену диэлектрической проницаемости на проводимость. Рассмотрим это на следующем примере.

Допустим, что в неоднородное электростатическое поле в жидкий диэлектрик помещен диэлектрический шар радиусом  $R$ . Известно [11,12], что в дипольном приближении сила, действующая на шар, определяется выражением:

$$\vec{F}_1 = -\frac{\varepsilon_m(\varepsilon_1 - \varepsilon_m)}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_m} R^3 \nabla \left( \frac{E^2}{2} \right), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_1$  - диэлектрическая проницаемость шара.

В соответствии с предлагаемой моделью сила, действующая на шар в слабопроводящей жидкости при условии равенства диэлектрических проницаемостей жидкости и шара, может быть вычислена по формуле:

$$\vec{F}_2 = -\frac{\sigma_m(\sigma_1 - \sigma_m)}{2\sigma_1 + \sigma_m} R^3 \nabla \left( \frac{E^2}{2} \right) \quad (4)$$

Здесь  $\sigma_1$ ,  $\sigma_m$  - соответственно, проводимость шара и жидкости.

По всей видимости, такой перенос подобия на силы возможен, если ионы жидкости, образующие свободный поверхностный заряд, будут адсорбированы на поверхности тела. При этом в [9,10] отмечается, что при «включении» поля вначале сила определяется формулой (3), а затем с течением времени из-за электризации жидкости при протекании тока - формулой (4). Если, действительно, в слабопроводящей жидкости на тело действует сила в соответствии с данной моделью, то можно ожидать следующие результаты при рассмотрении равновесия тела в электрическом поле.

Устойчивое равновесие погруженного в диэлектрическую жидкость диэлектрического тела в электростатическом поле [3] можно интерпретировать как выбор такой «геометрии» поля, в которой на тело со стороны поля всегда действует сила, направленная к положению равновесия (рис.1). Такая конфигурация силовых линий характерна для центрально-симметричных полей.

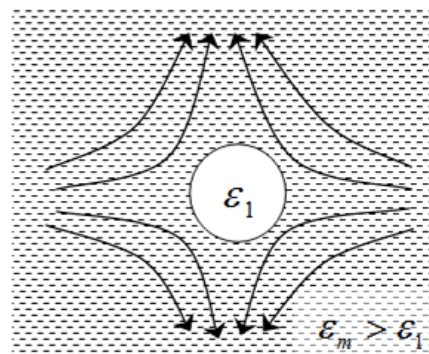


Рис.1. Силовые линии центрально-симметричного поля.

Допустим, что в слабопроводящей жидкости создано поле аналогичной «геометрии». Тогда, если в такое поле поместить тело, проводимость которого меньше, чем у жидкости, а их диэлектрические проницаемости равны, то в соответствии с рассматриваемой моделью следует также ожидать устойчивое равновесие тела.

С целью проверки данного результата проведен следующий эксперимент.

В стеклянную кювету, которая заполнялась различными слабопроводящими жидкостями, помещались электроды: кольцо диаметром 8 мм из медного провода толщиной 0.5 мм и две заземленные медные пластины (рис.2). На кольцо подавалось от разных высоковольтных источников постоянное или переменное напряжение частотой 50 Гц.

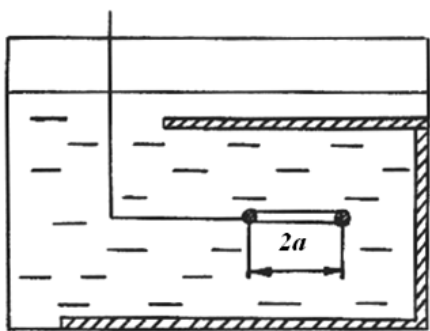


Рис.2. Схема экспериментальной модели

В опытах, которые имели качественный характер, изучалась возможность устойчивого равновесия образцов из различных материалов вблизи центра кольца в двух жидкостях: касторовом масле и олеиновой кислоте. Образцы шаровой формы изготавливались из полиэтилена, фторопласта (тефлона), винипласта, значения диэлектрических проницаемостей которых приведены в таблице. Проводимости обеих жидкостей больше, чем у образцов на несколько порядков [13].

*Диэлектрические проницаемости жидкостей и образцов*

Кастор. масло	Олеин. к-та	Поли-этилен	Фторо-ро-пласт	Вини-пласт
4.3	2.3	2.3	2.2	5

Опыты проводились по следующей методике. В кювету помещался образец, который в зависимости от его плотности находился либо вблизи верхней или нижней пластины. Далее к образцу придвигалось кольцо, на которое подавалось высокое напряжение. При этом образец либо втягивался в центр кольца и занимал некоторое положение устойчивого равновесия, либо выталкивался в объем кюветы (неустойчивое равновесие).

Результаты следующие:

В касторовом масле наблюдалось устойчивое равновесие вблизи центра кольца образцов из по-

лиэтилена и фторопласта в постоянном и в переменном поле. Устойчивое равновесие образцов из винипласта не было зафиксировано как в постоянном, так и в переменном поле.

В олеиновой кислоте устойчивое равновесие всех образцов не наблюдалось в обоих полях. Для увеличения проводимости в некоторых опытах в олеиновую кислоту добавлялся этиловый спирт. Это приводило к усилению электроконвективных течений в объеме жидкости, но равновесие образца вблизи кольца все равно не наблюдалось.

В опытах с образцами из фторопласта и полиэтилена в касторовом масле в постоянном поле наблюдалось их вращение вблизи центра кольца (эффект Герца-Квинке [14]). В переменном электрическом поле частотой 50 Гц вращение не наблюдалось.

Таким образом, в проведенных экспериментах не установлена возможность устойчивого равновесия непроводящих тел с диэлектрической проницаемостью большей, чем у слабопроводящей жидкости в постоянном электрическом поле. Вместе с тем, устойчивое равновесие тел с диэлектрической проницаемостью меньшей, чем у жидкости возможно.

Из результатов эксперимента следует, что модель, предложенная в [9,10], неадекватно описывает реальный механизм пондеромоторных сил, действующих на тело в слабопроводящей жидкости в электрическом поле.

По всей видимости, в слабопроводящей жидкости при соответствующих напряженностях электрического поля свободные заряды (ионы) перестают быть адсорбированы к поверхности и происходит их перемещение вдоль поверхности тела под действием тангенциальных составляющих напряженности поля, которое сопровождается поверхностным течением [15], влияние которого также необходимо учитывать при рассмотрении возможных механизмов пондеромоторных сил.

## Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 1984. 620 С.
2. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма. М.: Гостехиздат, 1948. 539 с.
3. Братухин Ю. К., Семенов В. А. Об условиях устойчивого равновесия диэлектрических шаров в электростатическом поле // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1982. Т. 83. Вып. 6. С. 2170–2175.
4. Семенов В. А. Равновесие покрытого оболочкой шара в электростатическом поле // Журнал технической физики. 1984. Т. 54. Вып. 10. С. 2060–2064.
5. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Изд-во АН СССР. 1952. 553 с.
6. Фрумкин А. Н. Избранные труды: Электродные процессы. М.: Наука. 1987. 336 с.

7. Щукин Е. Д., Перцов А. В., Амелина Е. А. Коллоидная химия. М.: Изд-во Моск. ун-та. 1982. 348 с.
8. Духин С. С., Дерягин Б. В. Электрофорез. М.: Наука. 1976. С.332.
9. Jones T. B. Dielectrophoretic force calculation // *Journal of Electrostatics*. 1979. Vol. 6. P. 69–82.
10. Новиков В.Н. К расчету пондеромоторных сил в двухфазных диэлектрических средах // *Изв.АН Латв.ССР. Серия физических и технических наук*. 1972. Вып.1. С.94-101.
11. Смайт В. Электростатика и электродинамика. М.: Изд-во иностр. лит. 1954. С.604.
12. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М.: Физматлит. 2003. С.616.
13. Кикоин И. К. (ред.) Таблицы физических величин: справочник. М.: Атомиздат. 1976. 1006 с.
14. Quincke G. Ueber Rotationen im constanten elektrischen Felde // *Annalen der Physik und Chemie*. 1896, Vol. 59. P. 417.
15. Семёнов В. А. О граничных условиях для напряженности электрического поля на поверхности слабопроводящей жидкости // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2017. Вып. 1 (35). С. 11–13.
3. Bratukhin Yu. K., Semyonov V. A. Conditions of stable equilibrium of dielectric spheres in an electrostatic field. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1982. Vol.83, no.6, pp.2170–2175.
4. Semenov V. A. Balance of covered shell of a ball in an electrostatic field. *Journal of Technical Physics*, 1984, vol.54, no.10, pp.2060–2064.
5. Levich V. *Physicochemical hydrodynamics*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1962, 700 p.
6. Frumkin A. N. (Selected works: Electrode processes). М.: Nauka. 1987, p.336 [In Russian]
7. Shchukin E. D., Pertsov A. V., Amelina E. A.. *Colloidal chemistry*. Moscow: Moscow University, 1982, p. 348. [In Russian].
8. Dukhin S. S., Deryagin, B. V., Electrophoresis. М: Nauka. 1976, p. 332.
9. Jones T.B. Dielectrophoretic force calculation *Journal of Electrostatics*, 1979, vol. 6, pp. 69–82.
10. Novikov V. N. Calculation of ponderomotive forces in a two-phase dielectric media. *Izv. An. Latv.SSR. Series of physical and technical Sciences*. 1972, no.1, pp. 94–101 [In Russian].
11. Smythe V. Static and Dynamic Electricity. New-York: Mc-Graw Hill, 1950. 616 p.
12. Tamm I. E. Fundamentals of The Theory of Electricity. Moscow: Mir, 1979, 684 p.
13. Kikoин I. K. (Ed.) *Tables of physical quantities: handbook*. Moscow: Atomizdat, 1976. 1006 p.
14. Quincke G. Ueber Rotationen im constanten elektrischen Felde // *Annalen der Physik und Chemie*. 1896, vol. 59, p. 417.
15. Semenov V. A. On boundary conditions for electric field strength on a surface of low conductivity liquids. *Bulletin of Perm University. Physics*. 2017. Issue 1(35), pp.11–13.

## References

1. Landau L. D., Lifshitz E. M. *Course of Theoretical Physics*, vol. 8. Electrodynamics of Continuous Media. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1984. 460 p.
2. Stratton J. A. *Electromagnetic theory*. New-York: Wiley, 2008. 640 p.

## Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Семёнов В. А. О пондеромоторных силах, действующих на погруженное в слабопроводящую жидкость тело в электрическом поле // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2017. № 4 (38). С. 59–62. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-59-62

## Please cite this article in English as:

Semenov V. A. On ponderomotive forces action on body immersed in the low conductive liquid under an electric field // *Bulletin of Perm University. Physics*, 2017, no. 4 (38), pp. 59–62. doi: 10.17072/1994-3598-2017-4-59-62