

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stokes G. G.* On the effect of internal friction of fluids on the motion of pendulums.— «Trans. Cambr. Phil. Soc., IX, 8 (1851). Math. and Phys. papers, Cambr.», 1901, p. 1—141.
2. *Rayleigh.* On the motion of solid bodies through viscous liquids.— «Phil. mag.», 1911, vol. 21, p. 697—711.
3. *Yang H. T., Lees L.* Rayleigh's problem at low Mach number according to the kinetic theory of gases.— «J. Mathem. and Phys.», 1956, vol. 35, N 3, p. 195—235.
4. *Gross E. P., Jackson E. A.* Kinetic theory of the impulsive motion of an infinite plane.— «Phys. Fluids», 1958, vol. 1, N 4, p. 318—328. Рус. пер. в сб. Механика, 1959, № 5.
5. *Кошмаров Ю. А.* Течение разреженного газа около стенки, внезапно приведенной в движение.— «Инж. журн.», 1963, т. III, вып. 3, с. 433—441; *Шидловский В. П.* Введение в динамику разреженного газа. М., «Наука», 1965.
6. *Ян Сюнь — Тяо, Лиэ.* Проблема Рэлея для низких чисел Рейнольдса согласно кинетической теории газов.— В кн.: Газодинамика разреженных газов. М., ИЛ, 1963, с. 325—375.
7. *Trilling L.* Asymptotic solution of the Boltzmann — Krook equation for the Rayleigh shear flow problem.— «Phys. Fluids», 1964, vol. 7, N 10, p. 1681—1691.
8. *Cercignani C., Sernagiotto F.* Rayleigh's problem at low Mach numbers according to kinetic theory.— In: Rarefied gas dynamics. Vol. 1. N. Y., 1965, p. 332—353.
9. *Epstein M.* Linearized Rayleigh's problem with incomplete surface accommodation.— In: Rarefied gas dynamics. Vol. 1. N. Y., 1969, p. 255—265.
10. *Черчиньяни К.* Математические методы в кинетической теории газов. М., «Мир», 1973.
11. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. М., «Высш. школа», 1967.
12. *Градштейн М. С., Рыжик И. М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1963.
13. *Гросе Е. П., Джексон Е. А.* Кинетические модели и линеаризованное уравнение Больцмана.— В сб. пер. Механика, 1960, № 5, с. 65—81.
14. *Лагунтьев М. А., Шабат Б. В.* Методы теории функций комплексного переменного. М., «Наука», 1973.
15. *Диткин В. А., Кузнецов П. И.* Справочник по операционному исчислению. М.— Л., ГИТТЛ, 1951.
16. *Loyalka S. K., Cipolla J. W.* Thermal creep slip with arbitrary accommodation at the surface.— «Phys. Fluids», 1971, vol. 14, N 8, p. 1656—1661.
17. *Яламов Ю. И., Ищенко И. Н., Дерягин Б. В.* Газокинетический расчет скорости теплового скольжения газа вблизи твердой поверхности.— «Докл. АН СССР», 1967, т. 177, № 1, с. 74—76.
18. *Абрамов Ю. Ю., Гладуш Г. Г.* Течение разреженного газа вблизи неоднородной нагретой поверхности.— «Изв. АН СССР. МЖГ», 1970, № 2, с. 20—29.
19. *Loyalka S. K.* Approximate method in the kinetic theory.— «Phys. Fluids», 1971, vol. 14, N 11, p. 2291—2294.

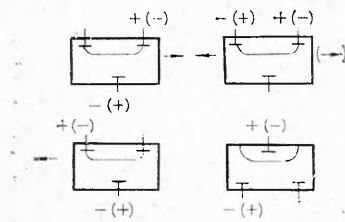
УДК 537. 84

ДВИЖЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ЭЛЕКТРОЛИТ — ГАЗ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

В. П. Блинов, Ю. В. Жилин
(Миасс)

Рассматривается явление движения поверхности раздела электролит — газ, обнаруженное впервые в электрических уровнях. Дается сравнительная характеристика явления в целях практического использования при решении задач управления положением поверхности раздела жидкостей.

Если механика жидкости в настоящее время достаточно изучена, то проблема эффективного управления движением жидкости еще не решена. При этом речь идет не о механическом управлении, которому при-



Ф и г. 1

сущи известные недостатки (низкое быстродействие, большой вес, габариты), а об управлении положением распределенных масс жидкостей с помощью сил электрического поля. Открытый недавно ряд эффектов [1-7] дает такую принципиальную возможность, однако техническая их реализация в связи со спецификой предъявляемых требований (высокий коэффициент преобразования управляющего сигнала, малые

габариты, вес, безопасность обслуживания, надежность) затруднительна. Причиной этому являются характерные условия существования движения жидкой фазы: а) присутствие сильных постоянных либо переменных полей; б) использование суспензий или чистых диэлектрических жидкостей.

Сравнительно большую возможность практической реализации имеет эффект движения поверхности раздела электролит — газ, обнаруженный в электрических уровнях [8].

Особенности опыта следующие. На электроды прямоугольной конфигурации, вваренные в цилиндрическую стеклянную ампулу (в ее нижнюю и верхнюю части), заполненную электролитом (2%-ный раствор лития в этаноле) и содержащую газовую полость, подавалось напряжение постоянного (до 50В) либо переменного тока (частотой от 20 Гц до 10 МГц и амплитудой до 60В). При этом наблюдалось явление движения поверхности раздела в направлении, показанном на фиг. 1 стрелкой.

В результате ряда экспериментов были выяснены характерные обстоятельства:

1. При создании поля (постоянного либо переменного) между противоположно расположенными электродами движение газовой полости всегда направлено к положению симметричного расположения полости относительно осевой линии, соединяющей центры электродов. При создании же поля между верхними электродами движение полости преимущественно направлено в сторону электрода с отрицательной полярностью.

2. Измерение величины сквозного тока между электродами показывает (при установившемся движении полости), что в случае отрицательной полярности верхнего электрода ток, убывая экспоненциально, с течением времени становится практически равным нулю (величина тока через 30 мин после подачи на электроды напряжения 50 В составила 6 мкА). Однако в случае положительной полярности имеет место сравнительно большой остаточный ток.

По результатам опытов можно заключить, что вероятный механизм явления, обусловленный стремлением электрической системы перейти в состояние с минимальной энергией, в значительной степени осложнен взаимодействием поля с диффузионной обкладкой двойного слоя, образующегося у поверхности раздела сред.

Из уравнения баланса механической и затраченной электрической энергии следует

$$-\Delta W_m = \Delta W_e,$$

где ΔW_m и ΔW_e определяются выражениями:

$$(1) \quad \Delta W_m = mgh;$$

$$(2) \quad \Delta W_e = \frac{\varepsilon}{8\pi} \int E^2(\gamma) dV,$$

здесь m — масса жидкости; g — ускорение силы тяжести; h — высота поднятия центра тяжести массы жидкости; ϵ — диэлектрическая проницаемость; E — напряженность электрического поля; V — объем; γ — проводимость электролита.

Считая, что на границе раздела отсутствует поверхностная плотность зарядов, с учетом геометрических соотношений (фиг. 2) выражения (1), (2) в зависимости от величины смещения поверхности раздела x и угла наклона ампулы уровня α при пренебрежении краевыми эффектами примут вид

$$\Delta W_m \simeq -\frac{1}{32} \rho g l_a^3 b_{\Pi} \alpha^2,$$

$$\Delta W_a = \frac{3}{8\pi} \left[\frac{1}{\epsilon} E_1^2 V_c(x) + E_2^2(\gamma) V_d(x) + E_3^2(\gamma) (V_{cd}(x) - V_{cd}^*) \right],$$

где

$$(3) \quad \left. \begin{aligned} V_c(x) &\approx \frac{2}{3} b_{\Pi} h_{\Pi} x \\ V_d(x) &\approx \frac{1}{3} (3\pi r_a^2 - 2b_{\Pi} h_{\Pi}) x \\ V_{cd}(x) &\approx \pi r_a^2 (l_a - x) \\ V_{cd}^* &\approx \pi r_a^2 l_a \end{aligned} \right\} 0 \leq x \leq l_a.$$

Здесь ρ — удельный вес; l_a — длина ампулы; l_a — длина электрода; r_a — радиус ампулы; h_{Π} — высота полости; b_{Π} — ширина полости. Общее приращение энергии при замене $x = k_{\alpha} \alpha$ (k_{α} — механический коэффициент преобразования ампулы) определится при постановке выражением

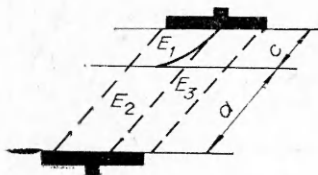
$$\Delta W(\alpha) = \frac{\epsilon k_{\alpha}}{8\pi} \left[\frac{2}{3\epsilon} b_{\Pi} h_{\Pi} E_1^2 + \frac{1}{3} (3\pi r_a^2 - 2b_{\Pi} h_{\Pi}) E_2^2(\gamma) - \pi r_a^2 E_3^2(\gamma) \right] \alpha - \frac{1}{32} l_a^3 b_{\Pi} \rho \alpha^2.$$

За счет движения полости система переходит в новое стационарное состояние, характеризующееся минимумом энергии при данных начальных условиях:

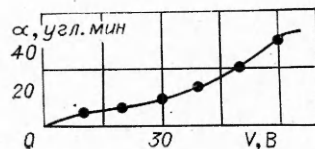
$$\frac{d[\Delta W(\alpha)]}{d\alpha} = 0.$$

Отсюда может быть определена связь между углом наклона ампулы и удерживающим полем

$$(4) \quad \alpha = \frac{2\epsilon k_{\alpha}}{\pi l_a^3 b_{\Pi} \rho} \left[\frac{2}{3\epsilon} b_{\Pi} h_{\Pi} E_1^2 + \frac{1}{3} (3\pi r_a^2 - 2b_{\Pi} h_{\Pi}) E_2^2(\gamma) - \pi r_a^2 E_3^2(\gamma) \right].$$



Ф и г. 2



Ф и г. 3

Выражение (4) можно скорректировать, принимая во внимание существование на границе раздела фаз поля двойного слоя зарядов, напряженностью [9]

$$E^* = \frac{4\pi C(\varphi - \psi_1)}{\varepsilon_0 \varepsilon}$$

(φ — потенциал электрода; C — емкость двойного слоя; ψ_1 — термодинамический потенциал);

$$(5) \quad \alpha = \frac{2\varepsilon k_z}{\pi l_a^3 b_{\text{пф}}} \left[\frac{2}{3\varepsilon} b_{\text{пф}} h_{\text{пф}} E_1^2 + \frac{1}{3} (\pi r_a^2 - 2b_{\text{пф}} h_{\text{пф}}) E_2^2(\gamma) - \pi r_a^2 E_3^2(\gamma) + \right. \\ \left. + \frac{\pi C^2 b_{\text{пф}}^2 \delta_c l_a^3 \rho}{\varepsilon^2 \varepsilon_0^2} (\varphi - \psi_1)^2 \right].$$

Считая напряженности полей отдельных участков ($\gamma = \text{const}$) пропорциональными приложенному напряжению U , из выражения (5) получим $\alpha \simeq kU^2$. Однако, как показывает экспериментально снятая зависимость (фиг. 3), α на начальном и конечном участках имеет вид

$$\alpha \simeq kU^n \quad (n \leq 1).$$

Такое расхождение результатов можно объяснить, в частности, имеющейся зависимостью проводимости электролита от величины приложенного к электродам напряжения (особенно отчетливо это видно в опытах с постоянным током). С физической стороны в основе этой зависимости, по-видимому, лежит взаимодействие поля со сравнительно подвижной диффузионной обкладкой двойного слоя зарядов на границе раздела сред.

Таким образом, экспериментально установлено, что эффективность управления положением поверхности раздела сред электролит — газ значительно выше (на несколько порядков) по отношению к существующему управлению с использованием диэлектрической жидкости.

Поступила 16 VII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Melcher J. R. Electrohydrodynamics.— В кн.: Сборник аннотаций XIII Международного конгресса по теоретической и прикладной механике. М., 1972.
2. Янговский Е. И. Течение незаряженной диэлектрической жидкости в поперечном электрическом поле.— «Электричество», 1973, № 10.
3. Нагорный В. С. Статические характеристики электрогидродинамических обратных преобразователей.— В кн.: Приборостроение. Киев, 1972, вып. 12.
4. Pickard W. F. An explanation of the de Sumoto effect.— «J. of Appl. Phys.», 1962, vol. 33.
5. Pohl H. A. Some effects of nonuniform fields on dielectrics.— «J. of Appl. Phys.», 1958, vol. 29.
6. Euen P. B. — «Clays and clay minerals», 1966, vol. 19, p. 549.
7. Pohl H. A. — «J. Electrochem. Soc.», 1968, vol. 115, p. 155.
8. Блинов В. П. Электролитический уровень. Бюллетень изобретений. Авт. свид. № 415491, 1974, № 6.
9. Фрумкин А. А. и др. Кинетика электродных процессов. М., изд. Моск. ун-та, 1952.