УДК 537.874.2:534.122.001.5

О действии акустического излучения на двойной электрический слой в ионопроводящей среде

Георгий Я. Шайдуров*
Галина Н. Романова
Ольга Л. Ярыгина
Институт инженерной физики и радиоэлектроники,
Сибирский федеральный университет,
Киренского, 26, 660026, Россия

Получена 18.09.2011, окончательный вариант 25.10.2011, принята к печати 10.11.2011

Рассмотрены процессы в двойном электрическом слое на границе раздела электронной и ионопроводящей сред. Дана количественная оценка эффектов, возникающих при взаимодействии электромагнитных и акустических колебаний на двойном электрическом слое Гуи-Гельмгольца.

Ключевые слова: двойной электрический слой, ионная проводимость, акустика, сейсмо-электрический эффект, геофизика.

Изучению взаимодействия физических полей разного происхождения в однородных и неоднородных средах с ионной проводимостью посвящено достаточно много работ.

Наиболее перспективным полагается изучение сейсмоэлектрических явлений, т.е. процессов, возникающих при одновременном возбуждении в среде упругих и электромагнитных полей. Несмотря на то, что эти процессы анализируются уже почти 100 лет, до сих пор соответствующие технологии не вышли из стадии отдельных экспериментов, что можно объяснить недостаточным развитием их теоретико-экспериментальных основ.

Видимо, первой работой на эту тему был патент Блау и Стэхема [1], которые описали изменение силы тока, проходящего через среду при наличии постоянной разности потенциалов между двумя электродами, под действием упругих колебаний. Это явление названо J-эффектом, или эффектом первого рода.

Эффект второго рода (E-эффект) обнаружил А.Г. Иванов [2]. E-эффект заключается в том, что распространение упругих волн в неоднородной среде сопровождается появлением разности потенциалов между точками, расположенными на различных расстояниях от источника излучения упругих волн.

J-эффект обусловлен изменением электрического сопротивления среды под влиянием упругих колебаний. E-эффект можно объяснить электрофильтрационными процессами в неоднородной (двухфазной) среде. Предположим, двухфазная среда состоит из электролита и частиц горной породы. При этом поверхности раздела фаз являются средоточием двойных электрических слоев.

Двойной электрический слой (ДЭС) возникает на границе раздела сред с разным типом проводимости. Общая теория ДЭС разработана О. Штерном [3]. ДЭС является пространственно-распределенным электрическим зарядом на границе соприкосновения различных фаз, приводящий к возникновению разности электрических потенциалов между ними, т.е. ДЭС — два весьма близких друг к другу слоя электрических зарядов разного знака, но с одинаковой поверхностной плотностью. ДЭС в целом нейтрален. При пересечении ДЭС электрический потенциал меняется скачком. Две части пограничного двойного

*GShaidurov@sfu-kras.ru
© Siberian Federal University. All rights reserved

слоя часто называют его обкладками: внутренней и наружной. К внутренней обкладке относятся заряды, прочно связанные с твердым веществом. Их подвижность по нормали к границе фаз равна нулю, но в тангенциальных направлениях они подвижны.

Наружная оболочка целиком относится к жидкой фазе. В ней преобладают ионы с зарядами одного знака, избыток которых уменьшается при удалении от границы фаз. В большей части наружной обкладки ионы находятся в изотропном тепловом движении. В непосредственной близости от границы подвижность ионов по нормам к ней исчезает.

Наружная обкладка имеет толщину 0,01–0,1 мкм, что почти не отличается от толщины двойного слоя в целом [4]. Схематически наружную обкладку делят на две части: диффузионный слой, или слой Гуи, и плотный слой, или слой Гельмгольца. Слой Гуи распространяется практически на всю толщину обкладки. Внутри его ионы находятся в состоянии беспорядочного теплового движения. Слой Гельмгольца имеет толщину, сравнимую с диаметром гидратированного иона, и прилегает непосредственно к фазовой границе.

Основной характеристикой ДЭС является дзета-потенциал ζ. Градиент электрического потенциала ΔV связан с изменением давления ΔP соотношением [5]:

$$\Delta V = \frac{\varepsilon\zeta}{4\pi\mu\,\sigma}\Delta P, \tag{1}$$

где ζ — потенциал между твердым веществом и свободной жидкостью; μ — коэффициент вязкости среды (воды), σ — ее электропроводность; ε — диэлектрическая проницаемость; ΔP — разность гидростатических давлений между обкладками ДЭС.

Распределение потенциала по толщине x двойного слоя приближенно экспоненциальное [6]:

$$V_0 = \zeta \exp(-x/d)\,.$$

Толщина d тонкого ДЭС:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{F^2}{\varepsilon RT}\sum_{i=1}^{L} c_i z_i\,, \tag{2}$$

где $F = 96485$ Кул/моль — число Фарадея; $R = 8{,}314$ Дж/моль; T — газовая постоянная; ε — диэлектрическая проницаемость жидкости; z_i — валентности; c_i — молекулярные концентрации ионов в электролите.

Численные оценки по формуле (2) при характерных концентрациях ионов в жидкости устанавливают, что значения d не превышают $3\cdot10^{-8}$м, поэтому ДЭС обладает высокой электрической емкостью $C_0 \approx 10^{-5}$ Ф/см^2 и внутри него действует сильное электрическое поле $E_c \approx 10^6$ В/см, ζ — потенциал составляет примерно 1–3 В.

Влияние акустического давления на жидкую часть ДЭС различно для сильно связанных с поверхностью твердого вещества ионов (слой Гельмгольца) и диффузионных ионов (слой Гуи). Следует ожидать, что ионы слоя Гуи смещаются на большие расстояния, чем ионы Гельмгольца. Для оценки вклада смещения слоя Гуи в изменение электрического потенциала ΔV можно применить уравнение кинетики.

Численные оценки

Проведем численные оценки для очень простого эксперимента, схема которого показана на рис. 1.

В среду со свойствами электролита (ε_1 — диэлектрическая проницаемость; σ_1 — проводимость) на глубину h помещена металлическая пластина размером $L\times L$. На расстоянии $x_{\text{изл.}}$ от нее находится акустический излучатель. Электроды a, b должны фиксировать изменение напряжения при воздействии на среду с пластиной акустических колебаний.

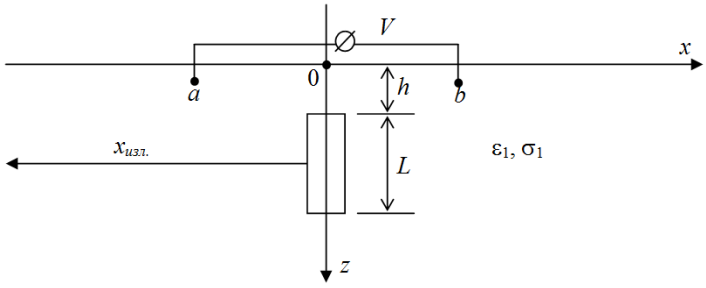

Рис. 1. Схема эксперимента

Заряд участка $\Delta S = dzdy$ одной обкладки ДЭС, который возникает на пластинке при помещении ее в электролит:

$$\Delta q = \frac{\varepsilon_c \Delta S \Delta V}{d}, \tag{3}$$

где ε_c — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками ДЭС; ΔV — разность потенциалов электрического поля ДЭС; d — расстояние между обкладками ДЭС.

Поле элементарного участка ΔS ДЭС во внешнем пространстве можно представить как поле элементарного диполя с момента $\Delta M = \Delta q(d+\Delta d)$. В направлении перпендикулярном оси диполя, т. е. на оси z (рис. 1):

$$\Delta E = \frac{\Delta M}{4\pi\varepsilon_1 z^3} = \frac{\varepsilon_c \Delta V dydz(d+\Delta d)}{4\pi\varepsilon_1 z^3 d},$$

где Δd — дополнительное смещение обкладки ДЭС под действием АК давления ΔP, т. е. амплитуда смещения части среды под действием АК поля; $\Delta d = A = \dfrac{1}{\omega_a}\sqrt{\dfrac{2J}{\rho V_a}}$; J — сила звука; ω_a — частота акустических колебаний; ρ — плотность среды; V_a — скорость распространения акустических колебаний.

Поле всей пластины в точке 0 соответственно равно:

$$E = \int\limits_h^{h+L} \Delta E = \frac{\varepsilon_c \Delta V dy(d+\Delta d)}{4\pi\varepsilon_1 d} \int\limits_h^{h+L} \frac{dz}{z^3} = \frac{-\varepsilon_c \Delta V S(d+\Delta d)(1+2h/L)}{\varepsilon_1 d 8\pi (h/L)^2 (1+h/L)^2 L^3}, \tag{4}$$

где S — площадь пластины нормальная звуковой волне.

Для определения разности гидростатических давлений между точками на расстоянии d воспользуемся стандартными соотношениями из теории распространения звуковых колебаний [7]:

$$\Delta P = A\rho\omega_a^2 d \sin\left(\omega_a t - \omega\frac{x}{V_a}\right), \tag{5}$$

учитывая (5), получим разность потенциалов:

$$\Delta V = \frac{\varepsilon_c \rho\, \omega_a d A \zeta}{4\pi\mu\, \sigma_1}, \quad \zeta = E_c d. \tag{6}$$

На рисунке 2 приведены зависимости E от J при различных значениях L/h и частоты акустических колебаний f_a.

Изменение проводимости среды согласно (6) приведет к изменению уровня электрического поля E.

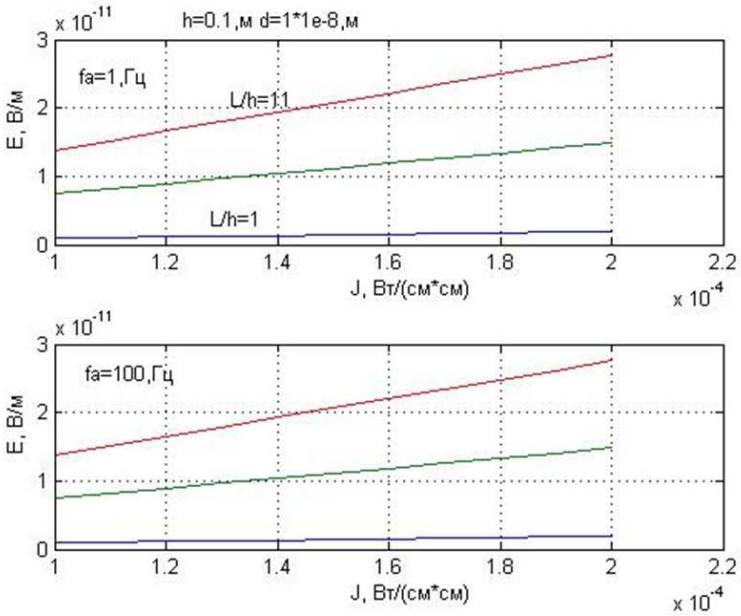

Рис. 2. Зависимость электрического поля пластины площадью $L \times L$ от интенсивности акустических колебаний при различных размерах пластины для частот $f_a = 1$ Гц и $f_a = 100$ Гц. Глубина погружения пластины $h = 0,1$ м, проводимость среды σ^3 см/м (поведение слоя Гельмгольца)

На рисунке 3 показана зависимость электрического поля E в точке 0 (рис. 1) от частоты f_a. Как видим по рис. 2 и 3 зависимость от частоты АК электрического поля, созданного колебанием слоя Гельмгольца, очень слабая.

Рассмотренные соотношения (4),(6) определяются изменением толщины слоя Гельмгольца ДЭС под воздействием упругих колебаний.

Далее исследуем действие акустических колебаний (АК) на слой Гуи путем решения классического уравнения кинетики:

$$m\frac{d^2x}{d^2t} + u\frac{dx}{dt} = F, \tag{7}$$

где F — внешняя сила, под действием которой движется частица массой m в среде с вязкостью u.

Решение уравнения (7) для внешней силы, изменяющейся по закону $F = F_0\cos(\omega_a t)$, получено с использованием символьных операций в системе Matlab:

$$x = \frac{m\omega_a(\exp(-ut/m) - \cos(\omega_a t)) + u\sin(\omega_a t)}{\omega_a(u^2 + \omega_a^2 m^2)} \cdot F_0. \tag{8}$$

В уравнении (8): x — смещение частицы массы m под действием силы $F = F_0\cos(\omega_a t)$, ω_a — частота акустического колебания, F_0 — амплитуда давления в акустической волне приведенная к единице площади, т. е. к размерности Ньютон.

Если на ДЭС кроме акустических колебаний действует еще и электрическое поле с частотой ω_e, то его эквивалентную схему можно представить как параллельно соединенные сопротивление R и емкость C (рис. 4).

При воздействии на ДЭС акустической волны происходит смещение обкладок конденсатора, а следовательно, изменения его сопротивления. Изменение емкости $C = \dfrac{S \cdot \varepsilon_c}{d}$ равно

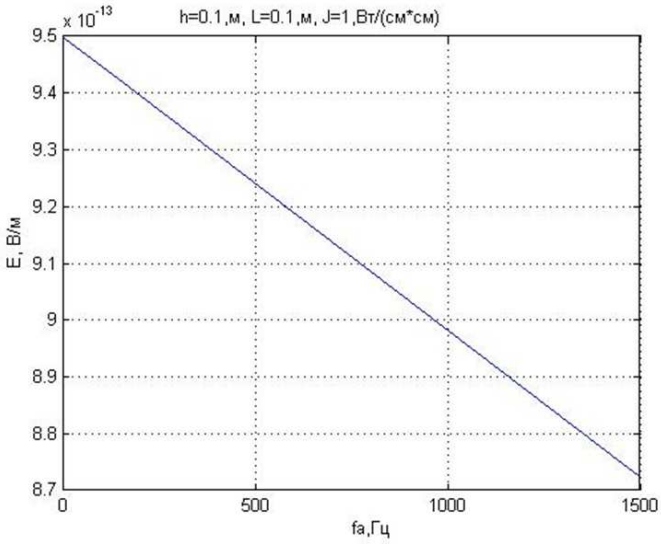

Рис. 3. Зависимость электрического поля пластины площадью $L \times L = 0,1 \times 0,1\,\text{м}^2$ от частоты акустического возбуждения. Интенсивность АК $J = 1$ Вт/см^2, глубина погружения пластины $h = 0,1$ м, проводимость среды $\sigma = 10^{-3}$ см/м (поведение слоя Гельмгольца)

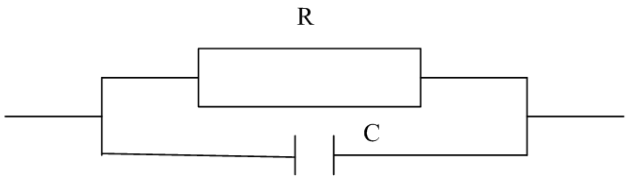

Рис. 4. Эквивалентная схема ДЭС

$\Delta C = -\dfrac{\Delta d}{d} \cdot C$, где S — площадь обкладок ДЭС, ε_c — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками ДЭС, d — толщина ДЭС. Оценим изменения сопротивления ДЭС при воздействии АК. Сопротивление цепи (рис. 4):

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega_e RC}. \tag{9}$$

Изменение сопротивления при изменении толщины d ДЭС

$$dZ = Z\frac{j\omega_e RC}{1 + j\omega_e RC} \cdot \frac{\Delta d}{d} = jz^2\omega_e C\frac{\Delta d}{d}, \tag{10}$$

где d — изменение толщины ДЭС под воздействии АК, т.е. равно значению x в соотношении (8): $\Delta d = x$.

Численные оценки.

Рассмотрим слой Гуи площадью $S = 1\,\text{см}^2$, состоящий из молекул воды. Масса молекулы воды $m = 3 \cdot 10^{-26}$кг, диаметр $3 \cdot 10^{-10}$м, следовательно, масса слоя в одну молекулу $m \cong 10^{-11}$кг. Соленая вода содержит ионы более десятка элементов, основными являются

ионы Na и Cl. Ионы Na составляют $10,76$ г/кг, Cl — $19,35$ г/кг. Следовательно, масса слоя 1см^2 соленой воды составит $m = (10^{-11} + 3 \cdot 10^{-13})$ кг.

На эту массу действует АК силой звука $J = 1\frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$, т. е. давление согласно [7]:

$$P = \frac{\sqrt{20\rho \cdot V_a J}}{981} \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}, \tag{11}$$

здесь: $\rho \cdot V_a$ — акустическое сопротивление воды ($\rho \cdot V_a = 1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{г}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$).

Вернемся к схеме эксперимента рис. 1. Оценим вклад слоя Гуи в электрическое поле, созданное изменяющимся ДЭС.

Поле элемента ДЭС площадью $\Delta S = \Delta z \Delta y$ можно представить как поле элементарного электрического диполя с моментом $\Delta M = -j\omega\varepsilon_c E_c \Delta S(d + \Delta d)$.

$$\Delta E = -j\frac{\varepsilon_c \Delta S E_c(d + \Delta d)}{4\pi\varepsilon_1}\frac{1}{z^3}\,. \tag{12}$$

Всю площадь пластины разобьем на элементарные участки с размерами по Δz= 1 см, по $\Delta y = L$, и поле ДЭС всей пластины получим суммированием.

Результаты расчетов приведены на следующих рис. 5 и 6. На рисунке 5 зависимости электрического поля возбужденной пластины в точке 0 (рис. 1) для различных значений размеров пластины L, при частотах АК $f_a = 1$ Гц и $f_a = 100$ Гц.

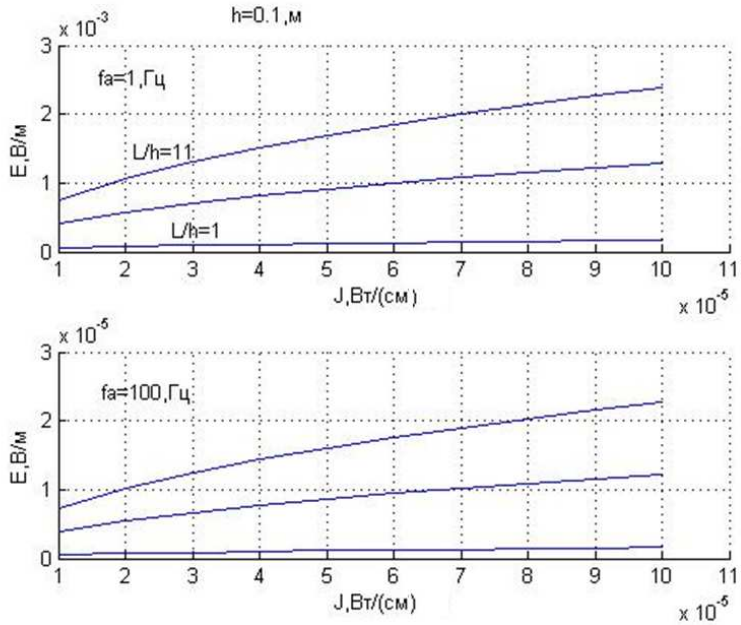

Рис. 5. Зависимость электрического поля пластины площадью $L \times L$ от интенсивности акустических колебаний при различных размерах пластины для частот $f_a = 1$ Гц и $f_a = 100$ Гц. Глубина погружения пластины $h = 0,1$ м (поведение слоя Гуи)

Рисунок 6 показывает частотную зависимость электрического поля при различных размерах пластины в диапазоне $f_a = 1$ Гц до $f_a = 15000$ Гц. Глубина погружения пластины в раствор $h = 0,1$ м. Сравнение рис. 2, 3 и 5, 6 показывает, что величина электрического поля, созданного возбужденным АК ДЭС, определяется смещением слоя Гуи.

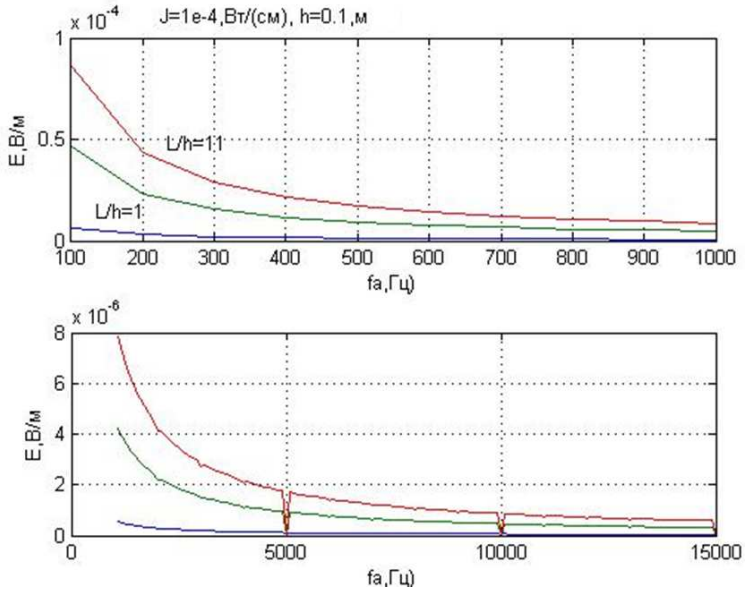

Рис. 6. Зависимость электрического поля пластины площадью $L \times L$ от частоты акустического возбуждения при различных размерах пластины. Интенсивность АК $J = 1$Вт/см^2, глубина погружения $h = 0,1$ м (поведение слоя Гуи)

Выводы

1. С увеличением акустического давления растет смещение обкладок двойного электрического слоя, увеличивается приращение импеданса ячейки и, следовательно, увеличивается электрическое поле, вызванное воздействием АК на ДЭС.
2. С ростом проводимости вмещающей среды уменьшается величина электрического поля ДЭС.
3. Увеличение частоты вызывает уменьшение электрического поля ДЭС, причем на достаточно больших частотах $f_a > 1000$ Гц, падение поля более интенсивное.
4. Увеличение размеров пластины естественно приводит к росту электрического поля ДЭС.
5. Полученные закономерности могут служить основой для создания нового сейсмо-электрического метода поиска минеральных ресурсов.

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы»; проект №2.1.2/775.

Список литературы

[1] W.Blau, L.Statham, USA, Pat. №2054067, 1936.

[2] А.Г.Иванов, Сейсмоэлектрический эффект второго рода, *Изв. АН СССР. Серия географическая и геофизическая*, (1940), №5, 18–21.

[3] О.К.Штерн, К теории электромагнитного двойного слоя, В сб. Коагуляция коллоидов, М., 1936.

[4] С.М.Шейнман, Современные физические основы теории электроразведки, Ленинград, Недра, 1969.

[5] Я.И.Френкель, К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве, *Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофизика*, **VIII**(), №4, 133–150.

[6] А.А.Авагимов, В.П.Исаков, М.И.Корхова и др., О сейсмоиндуктивном зондировании с применением взрывомагнитных генераторов, Учеб. пособие, Красноярск, ИПК СФУ, 2008.

[7] Л.Бергман, Ультразвук и его применение в науке и технике, М., ИЛ, 1957.

On Influence Acoustic Radiation on Electric Double Layer in Ion Medium

Georgy Ya. Shaidurov
Galina N. Romanova
Olga L. Yarygina

This article describes process in double electrical layer on interface electric and ion medium. There are quantitative estimate effects eventuate with communication electromagnetic and acoustic fluctuation on double electrical layer Gui-Gelmgolz.

Keywords: electric double layer, ionic conductance, acoustic, seismic-electric effect, geophysics.