

случае естественно ожидать «близости» статистических характеристик движения на аттракторе и стохастическом множестве соответствующей гамильтоновой системы (По крайней мере на не слишком больших временах.) На рис. 4 представлены спектры мощности системы (1) при  $\mu = 0$  и  $\mu \geq 0,052$ . Видно, что они близки (отличие в средней мощности порядка  $10\% t/T \sim 10^4$ ).

В случае, когда при  $\mu = \mu_2$  величина  $d_1$  оказывается малой ( $d_1 \ll 1$ ), как, например, для аттрактора системы (1) при  $q=9,6$ ,  $\Omega=2,04$  и  $\mu_2=1,32$ , свойства стохастичности в диссипативной и гамильтоновой системах резко отличаются\*.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арнольд В. И. — УМН, 1963, 18, вып. 6(119), с. 91.
2. Aubry S. — Physica D, 1983, 7, № 1—3, p. 240.
3. Chirikov B. V., Izrailev F. M., Shepelyansky D. I. — Soviet. Sci. Rev. Sect. C, 1981, 2, p. 209.
4. Афраймович В. С. Диссертация. Горький, Гос. ун-т, 1974.
5. Лукьянов В. И., Шильников Л. П. — ДАН СССР, 1978, 243, с. 26.
6. Izrailev F. M., Rabinovich M. I., Ugodnikov A. D. — Phys. Lett., 1981, 68A, p. 321.
7. Афраймович В. С., Рабинович М. И., Угодников А. Д. — Письма в ЖЭТФ, 1983, 38, вып. 2, с. 64.
8. Чириков Б. В., Шепелянский Д. Л. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 83-149, Новосибирск, 1983.
9. Заславский Г. М., Рачко Х.-Р. Я. — ЖЭТФ, 1979, 76, с. 2052.

Институт прикладной физики  
АН СССР

Поступила в редакцию  
26 апреля 1984 г.

УДК 541.135

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В РАСТВОРЕ ЭЛЕКТРОЛИТА

*А. Н. Малахов, В. В. Черепенников*

1. В работе [1] описан эффект непосредственного возбуждения электрическим полем акустических волн в электролите, дан вывод волнового уравнения и приведен расчет амплитуды плоской акустической волны

В настоящей статье приводятся результаты экспериментального исследования электрического возбуждения акустических колебаний в растворе электролита в прямоугольном бассейне и сравнение экспериментальных данных с теоретическими.

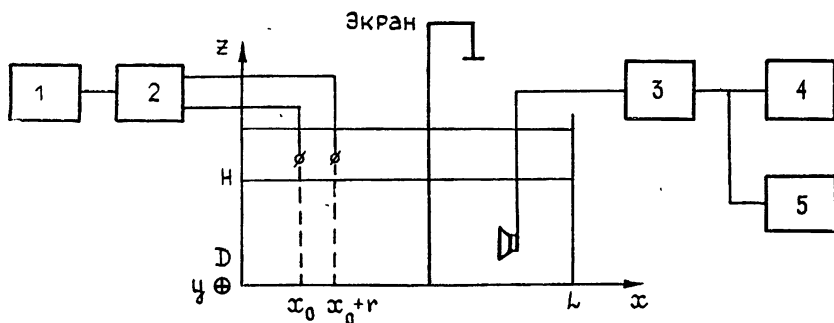


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 — генератор ГЗ-35, 2 — усилитель мощности, 3 — усилитель гидрофона, 4 — вольтметр В7-17, 5 — осциллограф С8-13.

2. Схема эксперимента показана на рис. 1. Размеры бассейна  $L=118$  см,  $D=30$  см, глубина заливки  $H=17$  см. В качестве электролита для эксперимента был выбран раствор NaCl. Излучателем служили металлические сетки из стальной проволо-

\* О связи и отличиях функций корреляции в диссипативной и гамильтоновых системах см. [8, 9].

локи диаметром 0,3 мм с ячейкой 2,5×2,5 мм размерами 20×30 см, расположенные параллельно торцовой грани бассейна. Источником электрических колебаний являлся транзисторный усилитель мощности  $N_{\text{вых}}=150 \text{ Вт}$  ( $\Delta f=20 \text{ Гц} \div 100 \text{ кГц}$ ), на вход которого поступал сигнал с генератора синусоидальных колебаний ГЗ-35. В качестве приемника колебаний давления возбуждаемой волны использовался сферический пьезокерамический гидрофон (ЦТС-19) с частотой резонанса 55 кГц. Гидрофон был откалиброван методом сравнения с гидрофоном Туре 8103 фирмы «Grüel and Kjaerg». Напряжение, развиваемое гидрофоном при воздействии на него волны давления, усиливалось и подавалось на измерительный прибор (В7-17) для измерения давления, и на осциллограф С8-13 для визуальной регистрации. Во всех экспериментах амплитуда регистрируемого сигнала существенно превышала уровень шумов и наводок. Электрическая наводка, возникающая вследствие гальванической связи источника и приемника, устранялась введением заземленного металлического экрана (латунь толщиной 0,1 мм), расположенного параллельно излучающим сеткам. Введение экрана в любом месте бассейна между излучателем и гидрофоном практически не изменяло ни структуры акустических мод, ни их амплитуды.

3. Аналог уравнения (4) статьи [1] для потенциала колебательной скорости  $\Phi(r, t)$  имеет вид

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \Delta \Phi + \frac{\alpha}{c^2 \rho_0} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\nabla \varphi(r, t) = -E$ ,  $c$  — скорость звука,  $\alpha = \bar{n}e(v_i - v_e)/v_i v_e$ ,  $v_i$ ,  $v_e$  — эффективные частоты соударений ионов сорта  $i$  и  $e$  соответственно с молекулами растворителя,  $\bar{n}$  — средняя концентрация ионов,  $e$  — заряд электрона. Параметр  $\bar{n}$  может быть выражен через молярную концентрацию  $C_{\text{Наси}} \text{ моль/л}$ ,  $\bar{n} = C_{\text{Наси}} A/1000 \text{ см}^{-3}$ ,  $A$  — число Авогадро.

Решение уравнения (1) для прямоугольного бассейна размером  $L \times D \times H$  при нулевых начальных условиях, жестких границах и свободной поверхности, полученное методом Фурье, имеет вид

$$\Phi(x, y, z, t) = \sum_{l, d, h} C_{l, d, h} \cos \frac{\pi l}{L} x \cos \frac{\pi d}{D} y \cos \frac{\pi(2h-1)}{2H} z T(t),$$

где  $T(t)$  описывает временную зависимость. Коэффициенты  $C_{l, d, h}$ , определяющие вес каждой моды возбужденных акустических колебаний, зависят от конфигурации поля  $E$  и находятся из разложения  $\varphi(x, y, z, t)$  по собственным функциям волновой задачи с указанными краевыми условиями. В эксперименте рассматривалось

$$\varphi(x, y, z, t) = e^{i\omega t} \begin{cases} 0, & 0 \leq x \leq x_0 \\ E(x - x_0), & x_0 \leq x \leq x_0 + r \\ Er, & x_0 + r \leq x \leq L \end{cases}$$

$\omega = 2\pi f$  — циклическая частота. В этом случае

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{\alpha \omega^2 E L}{\pi^3 \rho_0} e^{i\omega t} \sum_{l, h=1}^{\infty} \frac{(-1)^h \gamma_l (\omega^2 - \omega_{l,0,h}^2 - i\omega \omega_{l,0,h}^2 \beta)}{l^2 (2h-1) [(\omega^2 - \omega_{l,0,h}^2)^2 + \omega^4 \omega_{l,0,h}^2 \beta^2]} \times \\ \times \cos \frac{\pi l}{L} x \cos \frac{\pi(2h-1)}{2H} z, \quad (2)$$

где

$$\gamma_l(r, x_0) = 32 \sin \frac{\pi r l}{2L} \sin \frac{\pi l(2x_0 + r)}{2L}, \quad \omega_{l,0,h}^2 = c^2 \pi^2 [l^2/L^2 + (2h-1)^2/4H^2], \quad (3)$$

$\omega_{l,0,h}^2$  — квадраты собственных частот бассейна. Коэффициент  $\beta$ , определяющий затухание, позволяет учесть потери при отражении от стенок бассейна. Расчет коэффициента  $\beta$  для экспериментального бассейна со стенками из оргстекла указанных размеров  $L \times D \times H$  проводился на основе литературных данных [2,3].

Можно и экспериментально оценить величину  $\beta$ , исследуя зависимость амплитуды давления возбуждаемой моды от частотной расстройки. Рассматривая  $\omega = \omega_{l,0,h} + \Delta\omega$ , где  $\Delta\omega \ll \omega_{l,0,h}$ , и вводя  $\Delta\omega_{1/2}$  — расстройку на уровне половинной амплитуды, из (2) получим

$$\beta = \omega_{l,0,h}^{-1} (\Delta\omega_{1/2}/\omega_{l,0,h}).$$

4. Перейдем к рассмотрению экспериментальных данных. В соответствии с выражением (2) амплитуда потенциала колебательной скорости  $\Phi(r, t)$ , а с ним и давления  $P(r, t) = -\rho_0 \partial \Phi(r, t) / \partial t$  пропорциональна амплитуде электрического поля  $E$

и средней концентрации ионов  $\bar{n}$ . В эксперименте проверялась зависимость амплитуды давления моды, возбуждаемой акустической волной, от амплитуды электрического поля (рис. 2) и от концентрации электролита (рис. 3). Измерения проводились на частотах  $f_{9,0,1} = 6,3$  кГц и  $f_{10,0,1} = 6,8$  кГц, соответствующих возбуждаемым модам 9, 0, 1 и 10, 0, 1. Из выражения для собственных частот (3) легко видеть, что при этих частотах моды 9, 0, 1 и 10, 0, 1 являются единственными. Зависимость давления от вертикальной координаты  $P(z)$  для этих мод совпадала с теоретической (рис. 4).

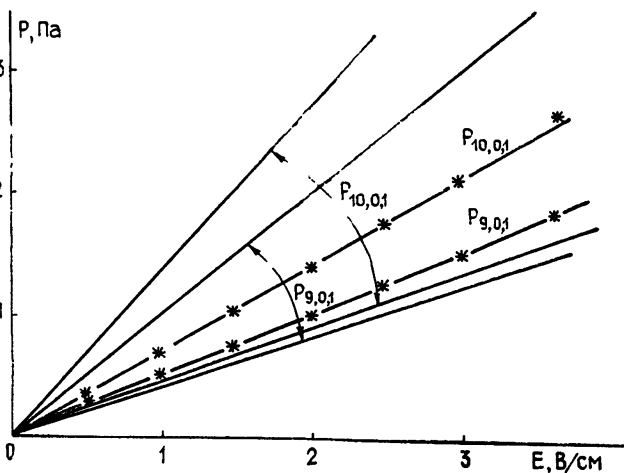


Рис. 2. Зависимость  $P_{9,0,1}(E)$  и  $P_{10,0,1}(E)$ ,  $C_{\text{NaCl}} = 0,1$  моль/л.

Исследование зависимости  $P_{9,0,1}(E)$  и  $P_{10,0,1}(E)$  проводилось при  $x_0 = 10,2$  см,  $r = 4$  см. Гидрофон размещался в пучности волны давления, в непосредственной близости от дна бассейна. Концентрация электролита в этих экспериментах составляла  $C_{\text{NaCl}} = 0,1$  моль/л, что соответствовало  $n = 6 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ .

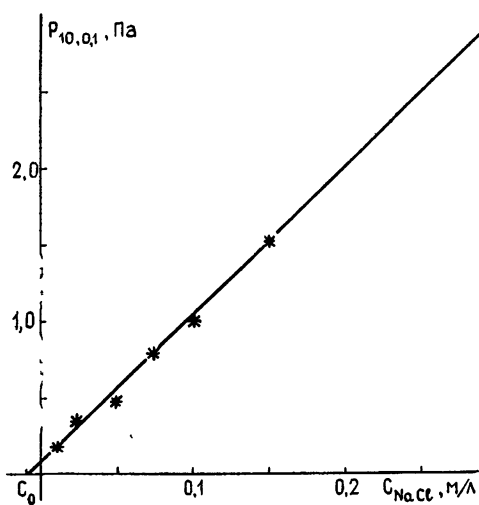


Рис. 3.

Рис. 3. Зависимость  $P_{10,0,1}(C_{\text{NaCl}})$ ,  $E = 2$  В/см = const.

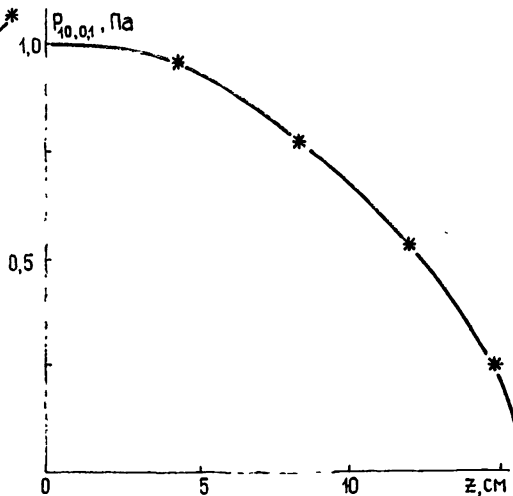


Рис. 4.

Рис. 4. Зависимость  $P_{10,0,1}(z)$ ,  $E = 2$  В/см,  $C_{\text{NaCl}} = 0,1$  моль/л.

Наиболее сложной является теоретическая оценка  $\alpha$ . Параметры  $\rho_e$ ,  $\rho_i$ ,  $V_e$ ,  $V_i$  — удельная плотность и объемы ионов сорта  $e$  и  $i$ , определяющие эффективные частоты соударений  $\nu_e$  и  $\nu_i$ , находились из справочных данных [4,5]:

$$\rho_i = \bar{n}(m_{\text{Na}^+} + K_{\text{Na}} m_{\text{H}_2\text{O}}),$$

где  $\bar{n}$  — концентрация ионов,  $m_{Na}$  — масса иона,  $m_{H_2O}$  — масса молекулы воды,  $K_{Na}$  — гидратационное число  $Na^+$ .

Согласно справочным данным значение гидратационного числа сильно варьирует:  $K_{Na} = 2 \div 7$ , что дает изменение  $\alpha$  в 2—3 раза. Учитывая этот разброс, теоретическая зависимость  $P_{9,0,1}(E)$ ,  $P_{10,0,1}(E)$  задается (на рис. 2) соответствующими секторами. Расчет  $\beta$  для мод колебаний 9, 0, 1 и 10, 0, 1 дает  $\beta \cong 2 \cdot 10^{-8}$  с [2]. Оценка  $\beta$  по расстройке на уровне половинной амплитуды дает  $\beta_{всп} = 4 \cdot 10^{-8}$  с. Экспериментальные данные  $P_{9,0,1}(E)$  и  $P_{10,0,1}(E)$  нанесены точками. Предсказываемая теоретическая линейность  $P(E)$  выполняется с довольно высокой степенью точности. Совпадение теоретически рассчитанных и экспериментально наблюдаемых величин давления вполне удовлетворительно.

Зависимость  $P(C_{NaCl})$  при  $E = 2$  В/см = const исследовалась при прежних расположении и размерах излучающих сеток для моды 10, 0, 1. В диапазоне концентраций  $C_{NaCl} = (0,005 \div 0,3)$  моль/л зависимость  $P(C_{NaCl})$  линейна. Аппроксимация экспериментальных данных при  $P_{10,0,1} \rightarrow 0$  дает  $C_{NaCl} = -0,005$  моль/л. Это отрицательное значение объясняется тем, что для заливки использовалась водопроводная вода, уже содержащая растворенные соли, и поэтому можно считать, что  $C_{NaCl} = 0$  с точностью до содержания диссоциированных солей в водопроводной воде. В частности, вода, использованная для заливки, имеет  $C_0 = 0,005$  моль/л, что эквивалентно растворению 0,3 г NaCl в одном литре воды.

В заключение считаем необходимым отметить, что использование подобного излучателя представляется нам весьма перспективным для создания эталонных гидроакустических полей, которые могут быть использованы, в частности, для градуировки гидроакустических датчиков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Малахов А. Н., Черепенников В. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1983, 26, № 2, с. 1251.
2. Лайтхилл Дж. Волны в жидкостях. — М.: Мир, 1977.
3. Клей К., Медвин Г. Акустическая океанография. — М.: Мир, 1980.
4. Измайлов Н. А. Электрохимия растворов. — М.: Химия, 1976.
5. Сухотин А. М. Справочник по электрохимии. — М.: Химия, 1981.

Горьковский государственный  
университет

Поступила в редакцию  
14 июля 1983 г.;  
з окончательном варианте  
14 марта 1984 г.

В статье Н. И. Даниловича «Формирование ионного потока в многоапертурном ионном источнике» (Радиофизика, 1984, № 8, с. 1056—1063) по вине автора допущены следующие опечатки.

Рис. 3а следует рассматривать как рис. 3б, соответственно рис. 3б — как рис. 3а (с. 1060).

Расположенные в верхней левой части рис. 4 (с. 1061) зависимости профиля распределения ионного тока МИИ типа «Millatron» (которые фигурируют в тексте как кривые рис. 4б) пронумерованы в подписи к рис. 4 как кривые 8 (пунктир) и 9. На основном рисунке (который следует рассматривать как рис. 4а) нумерация кривых идет сверху вниз, причем максимальные значения тока для них соответственно равны 2,4, 1,65, 1; 1; 0,8; 0,29; 0,15.

По оси абсцисс рис. 6 (с. 1063) вместо  $V_y$ ,  $B$  следует читать —  $V_y$ ,  $B$ ; в первой строке подписи к рисунку вместо «... плотности ионного тока  $J_{max}$  в цепи.» следует читать «... плотности ионного тока  $J$ , тока в цепи...».

Редакция приносит свои извинения читателям журнала и, пользуясь случаем, напоминает авторам о необходимости соблюдения правил оформления рукописей.

Редакция