

10.2

Электрокинетический ретранслятор акустических колебаний

© Б.П. Шарфарец¹, С.П. Дмитриев¹, В.Е. Курочкин¹, Ф.Ф. Легуша²¹ Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет,
Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sharb@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 июля 2021 г.

В окончательной редакции 22 июля 2021 г.

Принято к публикации 15 апреля 2022 г.

Показано, что в электрокинетическом акустоэлектрическом преобразователе при приложении постоянного электрического поля (напряжения накачки) в процессе приема акустического сигнала возникает возможность ретрансляции исходного внешнего акустического поля. Это происходит вследствие наличия в преобразователе одновременно обратных электрокинетических явлений: электроосмоса и потенциала течения. Приведены необходимые теоретические обоснования этого явления. Представлены данные натурального эксперимента, подтверждающие теорию.

Ключевые слова: акустоэлектрическое преобразование, электрокинетические явления, потенциал течения, накачка энергии, электрокинетический ретранслятор.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52610.18971

Ранее в [1,2] и других работах авторов рассмотрено электроакустическое преобразование, основанное на электрокинетическом явлении электроосмоса. В работе [3] предложено акустоэлектрическое преобразование, основанное на обратном электроосмосу электрокинетическом явлении — потенциале течения, иногда называемом потенциалом протекания [4]. Как видно из анализа работ [1–3], в обоих случаях прямого и обратного преобразования наблюдаются практически идентичные математические и физические модели процессов, что следует из обратимости преобразований и тем самым из обратимости электрокинетических преобразователей.

В настоящей работе рассматривается еще один эффект, связанный с электрокинетическими преобразователями, а именно возможность реализации в них режима ретрансляции, заключающегося в том, что акустоэлектрический приемник может в свою очередь переизлучать с усилением акустическое поле. Далее приводятся необходимые теоретические и экспериментальные результаты.

Рассмотрим ретранслятор в случае, когда пористая структура моделируется капилляром, наполненным жидкостью. Возможность режима ретрансляции следует из анализа уравнения движения применительно к акустоэлектрическому преобразованию, когда к торцам капилляра, наполненного жидкостью, одновременно прикладываются постоянное электрическое поле \mathbf{E}_0 и внешнее акустическое поле с полем давления p_a . Анализ процесса проводим с помощью уравнения Навье–Стокса в виде [1,2]:

$$\rho_{\Sigma}(\partial \mathbf{v}_{\Sigma} / \partial t + (\mathbf{v}_{\Sigma} \cdot \nabla) \mathbf{v}_{\Sigma}) = -\nabla p_{\Sigma} + \eta \Delta \mathbf{v}_{\Sigma} + (\xi + \eta/3) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}_{\Sigma} + \rho_e \mathbf{E}_0 + \mathbf{F}. \quad (1)$$

Здесь $\rho_{\Sigma} = \rho_0 + \rho$, $\mathbf{v}_{\Sigma} = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}$, $p_{\Sigma} = p_0 + p$ — соответственно поля плотности, скорости и давления в жидкости, $\mathbf{E}_0 = \text{const}$ — вектор напряженности постоянного электрического поля, направленного вдоль оси капилляра,

$$\mathbf{F} = (\rho_e \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) \nabla p(\mathbf{x}, t) \quad (2)$$

— внешняя объемная сила, являющаяся источником процесса потенциала течения [3], η и ξ — динамическая и объемная вязкости соответственно, ρ_e — объемная плотность электрического заряда, вызванная наличием двойного слоя в электрокинетических процессах, ε — диэлектрическая проницаемость, ε_0 — электрическая постоянная, $\tilde{\xi}$ — электрокинетический потенциал (дзета-потенциал), σ — удельная проводимость жидкости. Индекс 0 соответствует электроосмотическому процессу, источником которого является постоянное электрическое поле \mathbf{E}_0 , величины без индекса соответствуют остальным процессам, вызванным внешним акустическим полем, потенциалом течения, а также поля, вызванные процессом накачки.

Акустический процесс в капилляре описывается в терминах сжимаемой жидкости в линеаризованном виде

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 \right) = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \left(\xi + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (3)$$

с уравнением непрерывности для сжимаемой жидкости $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$.

Уравнение (3) является линейным относительно акустических полей \mathbf{v} и p , которые после представления их

в виде сумм

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{v}_a, \quad p = p' + p_a \quad (4)$$

подчиняются следующим уравнениям [3]:

$$\rho_0 \partial \mathbf{v}_a / \partial t = -\nabla p_a + \eta \Delta \mathbf{v}_a + (\xi + \eta/3) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}_a + \mathbf{F}_a, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \rho_0 (\partial \mathbf{v}' / \partial t + (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}' + (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}' \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 \\ + (\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \mathbf{v}_0) = -\nabla p' + \eta \Delta \mathbf{v}' + (\xi + \eta/3) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}' + \mathbf{F}'. \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь, согласно (2) и второму уравнению (4),

$$\mathbf{F} = (\rho_e \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) \nabla (p_a(\mathbf{x}, t) + p'(\mathbf{x}, t)) = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}'. \quad (7)$$

В выражении (7) \mathbf{F} трактуем как силу Кулона $\mathbf{F} = \rho_e \mathbf{E}$, где $\mathbf{E} = \mathbf{E}_a + \mathbf{E}'$ — векторы напряженности некоторых переменных электрических полей (см. [3]),

$$\mathbf{E}_a = (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) \nabla p_a, \quad \mathbf{E}' = (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) \nabla p'. \quad (8)$$

С учетом (7) и (8) уравнения (5) и (6) переписываются в эквивалентном виде

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}_a}{\partial t} = -\nabla p_a + \eta \nabla \mathbf{v}_a + (\xi + \eta/3) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}_a + \rho_e \mathbf{E}_a, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho_0 (\partial \mathbf{v}' / \partial t + (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}' + (\mathbf{v}' \cdot \nabla) \mathbf{v}_0) = -\nabla p' + \eta \Delta \mathbf{v}' \\ + (\xi + \eta/3) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}' - \rho_0 [(\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \mathbf{v}_0] + \rho_e \mathbf{E}'. \end{aligned} \quad (10)$$

Поле (\mathbf{v}_a, p_a) — акустическое поле, вызванное в капилляре внешним акустическим полем без накачки, а объемный источник в правой части (9) вызван давлением p_a внешнего акустического поля. В (10) поле (\mathbf{v}', p') — акустическое поле, полученное внутри капилляра за счет приложения стационарного поля \mathbf{E}_0 (наличие справа в (10) объемного источника $-\rho_0 [(\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \mathbf{v}_0]$, обусловленного нелинейностью задачи с вектором электроосмотического течения \mathbf{v}_0), т.е. за счет накачки. Для рассмотрения электрокинетического ретранслятора исследуем уравнение (10).

Предполагаем, что ось капилляра ориентирована вдоль оси Oz . В работе [3] показано, что в предположении тонкого двойного слоя $ka \gg 1$ (a — радиус капилляра, $\kappa = 1/\lambda_D$, λ_D — дебаевская длина или толщина двойного слоя) электроосмотическая скорость записывается в виде $\mathbf{v}_0 = (0, 0, U_{eo})$, $U_{eo} = E_0 \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\eta} \tilde{\xi} = \text{const}$. Таким образом, $\mathbf{v}_0 = (0, 0, U_{eo})$. Согласно [5], в декартовой и цилиндрической системах координат при $\mathbf{v}_0 = \text{const}$ имеют место равенства

$$(\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}' = U_{eo} \partial \mathbf{v}' / \partial z = E_0 (\varepsilon \varepsilon_0 / \eta) \tilde{\xi} \partial \mathbf{v}' / \partial z,$$

$$(\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}_a = U_{eo} \partial \mathbf{v}_a / \partial z = E_0 (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta) \partial \mathbf{v}_a / \partial z. \quad (11)$$

Перепишем (10) с учетом равенств (8), (11), а также очевидного равенства $\nabla \mathbf{v}_0 \equiv 0$

$$\begin{aligned} \rho_0 (\partial \mathbf{v}' / \partial t) = -\nabla p' + \eta \Delta \mathbf{v}' + (\xi + \eta/3) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}' \\ - \rho_0 U_{eo} \partial (\mathbf{v}_a + \mathbf{v}') / \partial z + \rho_e (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) \nabla p'. \end{aligned}$$

Полагая процесс потенциальным $\mathbf{v}' = \nabla \Phi'$, $\mathbf{v}_a = \nabla \Phi_a$, так же, как в [2], приводим последнее уравнение к скалярному виду

$$\begin{aligned} \rho_0 \partial \Phi' / \partial t = -p' + (\xi + 4\eta/3) \Delta \Phi' - \rho_0 U_{eo} \partial (\Phi_a + \Phi') / \partial z \\ + \rho_e (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) p'. \end{aligned} \quad (12)$$

Из уравнения непрерывности и условия баротропности жидкости получаем через скалярный потенциал $\partial p' / \partial t = -\rho_0 c^2 \Delta \Phi'$. В гармоническом случае с временным фактором $e^{-i\omega t}$, выражая амплитуду давления p' через амплитуду потенциала Φ' в виде $p' = (\rho_0 c^2 / i\omega) \Delta \Phi'$, выражение (12) преобразуем к виду

$$\begin{aligned} -\rho_0 i\omega \Phi' = -(\rho_0 c^2 / i\omega) \Delta \Phi' + (\xi + 4\eta/3) \Delta \Phi' \\ - \rho_0 U_{eo} \partial (\Phi_a + \Phi') / \partial z + (\rho_e \varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} \rho_0 c^2) / (\eta \sigma i\omega) \Delta \Phi'. \end{aligned}$$

После преобразований это уравнение принимает вид неоднородного уравнения Гельмгольца

$$\Delta \Phi' + k^2 \Phi' = U_{eo} (k^2 / i\omega) \partial (\Phi_a + \Phi') / \partial z, \quad (13)$$

где k — соответствующее волновое число, определяемое с помощью соотношения

$$k = k_0 / \left(1 - \rho_e (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) - i\omega / (\rho_0 c^2) (\xi + 4\eta/3) \right)^{1/2},$$

где $k_0 = \omega / c$ — волновое число для невязкой однородной жидкости. Уравнение (13) перепишем в виде

$$\Delta \Phi' + k^2 \Phi' = U_{eo} (k^2 / i\omega) (v_{za} + v'_z),$$

где v_{za} и v'_z — z -компоненты скоростей \mathbf{v}_a и \mathbf{v}' соответственно. Перепишем последнее выражение с учетом значения электроосмотической скорости U_{eo}

$$\Delta \Phi' + k^2 \Phi' = E_0 (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} k^2 / (\eta i\omega)) (v_{za} + v'_z). \quad (14)$$

Из (14) видно, что потенциал Φ' скорости ретрансляционного течения \mathbf{v}' прямо пропорционален амплитуде E_0 напряженности электрического поля накачки \mathbf{E}_0 и амплитуде z -компоненты скорости \mathbf{v}_a , вызванной сторонним акустическим полем (p_a, \mathbf{v}_a) . При отсутствии поля накачки $E_0 = 0$ ретрансляционный режим отсутствует: $p' = 0$, $\mathbf{v}' = 0$. Кроме того, из (14) видно влияние других параметров процесса, в частности то, что ретрансляционный эффект обратно пропорционален величине циклической частоты ω . Остальные особенности поведения решения (14) изложены кратко в [2].

Для проверки приведенной теории были выполнены эксперименты. Источником звука были звуковые колонки, излучавшие гармонические звуковые колебания частотой 1 kHz. Последовательно были проведены следующие эксперименты.

1. В первом эксперименте на некотором расстоянии в волновой зоне относительно колонок был установлен лабораторный шумомер. Между колонками и шумомером

было свободное пространство. После включения звукового поля шумомер зафиксировал уровень звука 61 dB.

2. При прежней геометрической конфигурации шумомера и динамика между шумомером и колонками динамика на одной линии была установлена приемная матрица (электрокинетический акустоэлектрический преобразователь [3]). При этом на матрицу накачка не подавалась. Шумомер зафиксировал звуковое давление 56.5 dB.

3. На данном этапе проверялся режим ретрансляции. При этом выполнялись условия опыта из пункта 2, но с тем отличием, что на приемную матрицу подавалась накачка 1320 V. Шумомер при накачке на приемной матрице (т.е. на ретрансляторе) зафиксировал уровень звукового давления 59.5 dB.

Таким образом, в режиме ретрансляции при наличии накачки уровень сигнала на шумомере вырос на 3 dB.

В работе показано, что вследствие наличия в электрокинетическом преобразователе двух обратных электрокинетических явлений (электроосмоса и потенциала течения) возникает возможность при реализации акустоэлектрического преобразователя при наличии накачки получить эффект ретрансляции исходного акустического сигнала. Это становится возможным благодаря тому, что возникающая вследствие накачки нелинейность гидродинамической модели процесса приводит к появлению наряду с акустоэлектрическим процессом в исходном акустоэлектрическом приемном устройстве и электроакустического преобразования, что и ведет к появлению эффекта ретрансляции. Для утилитарного использования ретрансляционного эффекта необходимы дополнительные экспериментальные исследования.

Финансирование работы

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках государственного задания 075-00780-20-00 по теме № 00742021-0013 Министерства науки и высшего образования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] В.Е. Курочкин, В.А. Сергеев, Б.П. Шарфарец, Ю.В. Гуляев, ДАН, **483** (3), 265 (2018). DOI: 10.31857/S086956520003244-1 [V.E. Kurochkin, V.A. Sergeev, B.P. Sharfarets, Yu.V. Gulyaev, Dokl. Phys., **63** (11), 455 (2018). DOI: 10.1134/S1028335818110083].
- [2] Б.П. Шарфарец, В.Е. Курочкин, В.А. Сергеев, Ю.В. Гуляев, Акуст. журн., **66** (4), 453 (2020). DOI: 10.31857/S0320791920030053 [B.P. Sharfarets, V.E. Kurochkin, V.A. Sergeev, Yu.V. Gulyaev, Acoust. Phys., **66** (4), 431 (2020). DOI: 10.1134/S1063771020030057].
- [3] Б.П. Шарфарец, Науч. приборостроение, **29** (2), 103 (2019). DOI: 10.18358/np-29-2-i103108
- [4] М.С. Касимзаде, Р.Ф. Халилов, А.Н. Балашов, *Электрокинетические преобразователи информации* (Энергия, М., 1973).
- [5] А.Н. Гузь, *Введение в динамику сжимаемой вязкой жидкости* (LAP Lambert Publ., Saarbrücken, 2017), с. 83.