

10 Электрокинетический акустический ретранслятор, находящийся в постоянном электрическом поле

© Б.П. Шарфарец, С.П. Дмитриев, В.Е. Курочкин

Институт аналитического приборостроения РАН,
198095 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: sharb@mail.ru, lavrovas@yandex.ru

Поступило в Редакцию 21 августа 2023 г.
В окончательной редакции 10 октября 2023 г.
Принято к публикации 17 ноября 2023 г.

Показано, что вследствие наличия в электрокинетическом акустоэлектрическом преобразователе одновременно электроосмоса и обратного ему электрокинетического явления — потенциала течения, в преобразователе при приложении постоянного электрического поля (напряжения накачки) в процессе приема акустического сигнала возникает возможность ретрансляции исходного внешнего акустического поля. Приведены необходимые теоретические обоснования этого явления. Представлены данные натурального эксперимента, подтверждающие теорию, приведена подробная схема натурального эксперимента, а также перечислены необходимые приборы, задействованные в нем.

Ключевые слова: электрокинетические явления, электрокинетический ретранслятор, электроакустическое и акустоэлектрическое преобразования, электроосмос, потенциал течения, накачка энергии.

DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56913.100-23

Введение

Ранее авторами рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты реализации электроакустических и акустоэлектрических электрокинетических преобразователей (ЭКП), основанных на использовании явления электроосмоса и обратного ему явления потенциала течения [1,2]. Анализ принципов функционирования акустоэлектрического ЭКП приводит к выводу о наличии возможности реализации на основе акустоэлектрического ЭКП режима ретрансляции акустического сигнала. Большую роль в процессе вновь играет приложение к электродам ЭКП постоянного электрического поля — напряжения накачки.

Теория электрокинетического ретранслятора впервые уже была кратко изложена в экспресс-публикации [3]. Ранее, до ее появления, подобное использование электрокинетических эффектов для реализации режима ретранслятора авторам неизвестно.

В настоящей работе более подробно излагается теория электрокинетического ретранслятора, а также детально излагаются особенности проведения экспериментальных исследований.

1. Физическая модель процесса в электрокинетическом ретрансляторе

Обычно пористая среда в ЭКП представляет собой довольно сложную структуру. Однако для простоты анализа, в настоящей работе будем исходить из простейшей модели пористой среды, а именно представ-

лять ее как твердый капилляр, наполненный жидкостью. Такое приближение оправданно при весьма жестких ограничениях на произвольную пористую структуру [4]. Возможность режима ретрансляции следует из анализа уравнения движения применительно к акустоэлектрическому преобразованию, когда к торцам капилляра, наполненного жидкостью, одновременно прикладывается постоянное электрическое поле и внешнее акустическое поле \mathbf{E}_0 с полем давления p_a . Анализ процесса проводим с помощью уравнения Навье-Стокса в следующем виде:

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

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 внешнего постоянного электрического поля, направленного вдоль оси капилляра; объемная сила определяется выражением (см., например, [2,3] и другие работы авторов)

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

— объемная внешняя сила, источником которой является процесс потенциала течения; η и ξ — динамическая и объемная вязкости соответственно; ρ_e — объемная плотность электрического заряда, вызванная наличием двойного электрического 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 полям, вызванным процессом накачки. Отметим также, что электроосмотическая скорость \mathbf{v}_0 при равенстве нулю вектора постоянного электрического поля ($\mathbf{E}_0 = 0$) также равна нулю ($\mathbf{v}_0 = 0$).

Акустический процесс в капилляре описывается в терминах сжимаемой жидкости в линеаризованном виде уравнением ([1–3])

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

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

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

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

где (\mathbf{v}_a, p_a) — акустическое поле в капилляре, вызванное внешним акустическим полем без накачки, подчиняется следующему уравнению:

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

а (\mathbf{v}', p') — акустическое поле, полученное внутри капилляра за счет приложения стационарного поля \mathbf{E}_0 , подчиняется следующему уравнению (об этом свидетельствует наличие в нем отличной от нуля электроосмотической скорости \mathbf{v}_0)

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} + (\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}' + (\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}' \nabla) \mathbf{v}_0 + (\mathbf{v}_a \nabla) \mathbf{v}_0 \right) = -\nabla p' + \eta \nabla \mathbf{v}' + \left(\xi + \eta/3 \right) \nabla \nabla \mathbf{v}' + \mathbf{F}'. \quad (6)$$

В инерционном члене уравнения (5) пропадает слагаемое $(\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}_a \nabla) \mathbf{v}_0$ в силу того, что, как отмечалось выше, при равном нулю векторе постоянного электрического поля ($\mathbf{E}_0 = 0$) равна нулю и электроосмотическая скорость ($\mathbf{v}_0 = 0$).

Сумма уравнений (5) и (6) приводит, как видно, к исходному уравнению (3). Система уравнений (5), (6) очевидно несвязанная, при этом вначале необходимо находить поле (\mathbf{v}_a, p_a) из (5), а затем, решая уравнение (6), находить поле (\mathbf{v}', p') , а далее общее поле (4) (\mathbf{v}, p) .

В (5), (6), согласно (2) и второму уравнению (4):

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

В выражении (7) \mathbf{F} трактуем как силу Кулона $\mathbf{F} = \rho_e \mathbf{E}$, где $\mathbf{E} = \mathbf{E}_a + \mathbf{E}'$ — вектора 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

$$\begin{aligned} \rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}_a}{\partial t} &= -\nabla p_a + \eta \nabla \mathbf{v}_a + \left(\xi + \eta/3 \right) \nabla \nabla \mathbf{v}_a + \rho_e \mathbf{F}_a, \quad (9) \\ \rho_0 (\partial \mathbf{v}' / \partial t + (\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}' + (\mathbf{v}' \nabla) \mathbf{v}_0) &= -\nabla p' + \eta \nabla \mathbf{v}' \\ &+ \left(\xi + \eta/3 \right) \nabla \nabla \mathbf{v}' - \rho_0 [(\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}_a \nabla) \mathbf{v}_0] + \rho_e \mathbf{E}'. \end{aligned} \quad (10)$$

В уравнении (9), описывающем акустическое поле (\mathbf{v}_a, p_a) в капилляре, вызванное внешним акустическим полем без накачки (при $\mathbf{E}_0 = 0$), объемный источник в правой части (9) вызван давлением p_a внешнего акустического поля. Здесь следует отметить следующее: анализ уравнения (9) показывает, что даже без накачки ($\mathbf{E}_0 = 0$) акустическое поле (\mathbf{v}_a, p_a) отлично от нуля, а следовательно $\nabla p_a \neq 0$, что в свою очередь создает разность потенциалов на торцах капилляра (возникает потенциал течения), что в конечном итоге создает переменное электроосмотическое течение, т.е. возникает эффект ретрансляции. Однако процесс этот неуправляемый, и при слабом акустическом поле эффект ретрансляции может быть незначительным.

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 $-\rho_0 [(\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}_a + (\mathbf{v}_a \nabla) \mathbf{v}_0]$ обусловлено нелинейностью задачи (1) с вектором скорости 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 $\kappa_a \gg 1$ (a — радиус капилляра; $\kappa = 1/\lambda_D$; λ_D — дебаевская длина или толщина двойного слоя), электроосмотическая скорость записывается в виде

$$\mathbf{v}_0 = (0, 0, U_{eo}), \quad U_{eo} = E_0 \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi}}{\eta} = \text{const.}$$

Таким образом, $\mathbf{v}_0(0, 0, U_{eo})$. Согласно [3,5], в декартовой и цилиндрической системах координат при $\mathbf{v}_0 = \text{const}$ имеют место равенства

$$\begin{aligned} (\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}' &= U_{eo} \partial \mathbf{v}' / \partial z = E_0 (\varepsilon \varepsilon_0 / \eta) \tilde{\xi} \partial \mathbf{v}' / \partial z, \\ (\mathbf{v}_0 \nabla) \mathbf{v}_a &= U_{eo} \partial \mathbf{v}_a / \partial z = E_0 (\varepsilon \varepsilon_0 / \eta) \partial \mathbf{v}_a / \partial z. \end{aligned} \quad (11)$$

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

$$\begin{aligned} \rho_0 (\partial \mathbf{v}' / \partial z) &= -\nabla p' + \eta \Delta \mathbf{v}' + \left(\xi + \eta/3 \right) \nabla \nabla \mathbf{v}' \\ &- \rho_0 U_{eo} \partial (\mathbf{v}_a + \mathbf{v}') / \partial z + \rho_e (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) \nabla p'. \end{aligned}$$

Полагая процесс потенциальным $\mathbf{v}' = \nabla \Phi'$, $\mathbf{v}_a = \nabla \Phi_a$, приводим последнее уравнение к скалярному виду

$$\begin{aligned} \rho_0 \partial \Phi' / \partial z &= -p' + \left(\xi + 4\eta/3 \right) \Delta \Phi' \\ &- \rho_0 U_{eo} \partial (\Phi_a + \Phi') / \partial z + \rho_e (\varepsilon \varepsilon_0 \tilde{\xi} / \eta \sigma) p'. \end{aligned} \quad (12)$$

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

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

После элементарных 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 из соотношения

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

а $k_0 = \omega / c$ — волновое число для невязкой однородной жидкости; c — скорость звука в 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 и 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, вызванный накачкой, 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 авторами ранее.

Отметим также, что процесс ретрансляции, вызываемый накачкой, является управляемым с помощью варьирования параметров, фигурирующих в правой части выражения (14).

Заключая теоретический раздел, заметим, что электрокинетическая тематика вызывает большой научный и практический интерес в научной среде, отметим, в частности, недавно изданную фундаментальную монографию [6], содержащую обширный теоретический и прикладной материал о последних достижениях, связанных с электрокинетической проблематикой. Много полезного можно найти по рассматриваемой тематике в давнишней и недостаточно известной монографии [7]. Близкие вопросы освещаются, например, в работах [8–13] и целом ряде других работ.

2. Натурный эксперимент

В описанных ниже экспериментах, проведенных в условиях воздушной среды в качестве пористой структуры, реализующей ретранслятор, использовалась пачка офисной бумаги формата А4 толщиной 2.5 mm. Пачка бумаги, находящаяся внутри электродов, сжималась по периметру металлическими пружинными скрепами, образуя тем самым пористую единую сквозную структуру (матрицу), аналогичную описанной в работах [1,2].

2.1. Состав измерительных приборов

В измерительной схеме задействовались следующие приборы и элементы.

I. Акустическая система (динамик): колонки 2.0 Oklick OK-164 мощностью 30 W. Два динамика воспроизводят звук в диапазоне 35–20 000 Hz с соотношением сигнал/шум 65 dB. В экспериментах использовался один динамик.

II. Цифровой двухканальный генератор сигналов FY3200S: диапазон настройки частоты синусоидального сигнала — 0 Hz–24 MHz; точность настройки частоты синусоидального сигнала $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ Hz; регулируемая амплитуда выходного сигнала ≤ 20 V.

III. Шумомер цифровой DT-805: нижний предел измерений 30 dB; верхний предел измерений 130 dB; длительность измерения 125 ms; погрешность измерения 1.5 dB; частотный диапазон 31.5 Hz–8 kHz; разрешающая способность 0.1 dB. Шумомер DT-805 представляет собой калиброванный спектроанализатор, работающий в указанном выше частотном диапазоне и состоящий из линейки полосовых фильтров, позволяющих фиксировать уровень анализируемого сигнала в зависимости от частоты (частотный спектр анализируемого сигнала).

IV. Матрица-ретранслятор (описана выше).

V. Генератор постоянного напряжения (авторская разработка).

2.2. Описание экспериментов

Для проверки приведенной теории были проведены следующие эксперименты. Источником звука был звуковой динамик I, излучавший гармонические звуковые колебания частотой 1 kHz. Частота 1 kHz была выбрана из соображений, что при измерениях чувствительности приемных устройств (а ретранслятор подразумевает прием сигнала и его переизлучение) используется именно эта частота. Источником электрических колебаний, поступающих на динамик, был генератор звуковых сигналов II. Последовательно были проведены следующие эксперименты. Приводимые ниже уровни сигналов на спектроанализаторе (шумомере) относятся именно к частоте 1 kHz.

1. В первом эксперименте на некотором расстоянии в волновой зоне относительно динамика I был установлен лабораторный шумомер III. Между динамиком

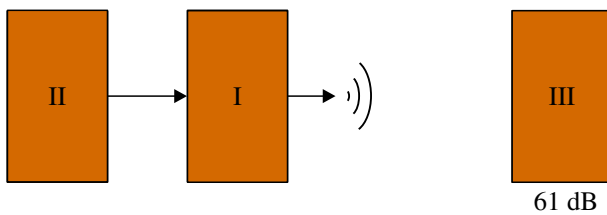


Рис. 1. Схема эксперимента № 1 по определению уровня давления на шумомере III при фиксированном расстоянии между шумомером и динамиком I и фиксированном уровне излучения динамика. Между динамиком и шумомером препятствия отсутствуют.

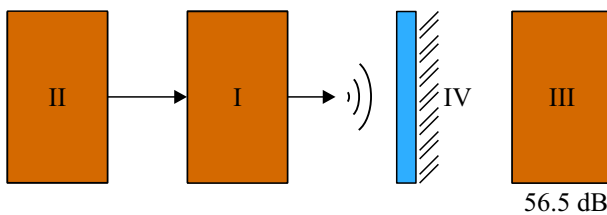


Рис. 2. Схема эксперимента № 2 по определению уровня давления на шумомере III при фиксированном расстоянии между шумомером и динамиком I и фиксированном уровне излучения динамика. Между динамиком и шумомером расположена матрица III в режиме отсутствия накачки.

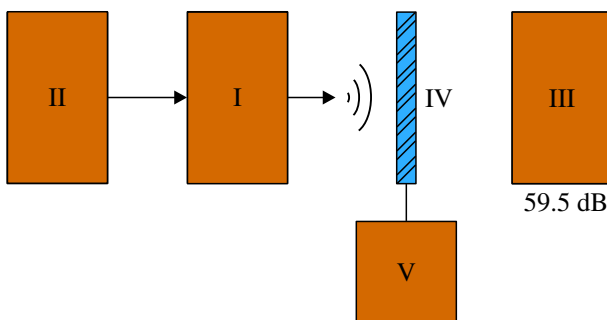


Рис. 3. Схема эксперимента № 3 по определению уровня давления на шумомере III при фиксированном расстоянии между шумомером и динамиком I и фиксированном уровне излучения динамика. Между динамиком и шумомером расположена матрица III в режиме наличия накачки.

и шумомером имелось свободное пространство. После включения звукового поля шумомер зафиксировал уровень звука 61 дБ на частоте 1 кГц. Расстояние между динамиком и шумомером оставалось постоянным в этом и последующих экспериментах. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

2. При прежней геометрической конфигурации шумомера и динамика между шумомером и динамиком на одной линии была установлена матрица-ретранслятор IV. При этом на матрицу накачка не подавалась. Шумомер на частоте 1 кГц зафиксировал звуковое давление 56.5 дБ. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

3. На этом этапе выполнялись условия опыта п. 2, но с тем отличием, что на матрицу-ретранслятор плавно подавалось напряжение накачки от 0 до 1320 В с генератора постоянного напряжения V. На шумомере на частоте 1 кГц при росте накачки на ретрансляторе фиксировалось плавное увеличение уровня звукового давления от 56.5 до 59.5 дБ. Уровень звукового давления в остальной части спектра звукового сигнала, фиксируемого шумомером, также незначительно вырос. Однако специальных замеров величин изменения уровня шумовой составляющей не проводилось ввиду большого соотношения сигнал-шум, где сигналом являлась дискретная составляющая полезного сигнала 1 кГц, а шумом являлся весь остальной спектр звукового сигнала. Схема эксперимента приведена на рис. 3.

Таким образом, в режиме ретрансляции гармонического звукового сигнала частотой 1 кГц при наличии накачки от 0 до 1320 В (эксперимент 3) уровень сигнала на шумомере вырос на 3 дБ по сравнению с режимом ретрансляции без накачки (эксперимент 2, накачка 0 В). Уменьшение гармонического сигнала на шумомере в экспериментах 2 и 3 без накачки по сравнению с экспериментом 1 объясняется геометрическим экранированием матрицей-ретранслятором звукового поля, излученного динамиком.

Заключение

В работе теоретически показано и экспериментально подтверждено, что, вследствие наличия в ЭКП 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 вследствие одновременного присутствия в рассматриваемом преобразователе двух обратных электрокинетических процессов:

- под воздействием внешнего акустического поля в пористой структуре возникает эффект потенциала течения (возникновение разности электрических потенциалов U_{FP} на электродах пористой структуры);

- разность потенциалов U_{FP} , вызванная потенциалом течения вследствие наличия в этой же системе явления электроосмоса, вызывает возникновение акустического поля (p_{FP}, v_{FP}), подобного исходному внешнему акустическому полю (p_0, v_0);

- вследствие нелинейности гидродинамической системы в процессе описываемых преобразований поле (p_{FP}, v_{FP}) многократно усиливается наличием постоянной разности потенциалов U_0 на электродах преобразователя.

Финансирование работы

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания 122032300337-4 Министерства науки и высшего образования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] 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**, 431 (2020). DOI: 10.1134/S1063771020030057]
- [2] Б.П. Шарфарец, С.П. Дмитриев, В.Е. Курочкин, В.А. Сергеев. Акуст. журн., **68** (5), 571 (2022). DOI: 10.31857/S0320791922050112 [B.P. Sharfarets, S.P. Dmitriev, V.E. Kurochkin, V.A. Sergeev. Acoust. Phys., **68**, 521 (2022). DOI: 10.1134/S1063771022050104]
- [3] Б.П. Шарфарец, В.Е. Курочкин, С.П. Дмитриев, Ф.Ф. Легуша. Письма в ЖТФ, **48** (11), 29 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.11.52610.18971 [B.P. Sharfarets V.E. Kurochkin, S.P. Dmitriev, F.F. Legusha. Tech. Phys. Lett., **48** (6), 21 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.06.53459.18971]
- [4] С.С. Духин, Б.В. Дерягин. *Электрофорез* (Наука, М., 1976)
- [5] А.Н. Гузь. *Введение в динамику сжимаемой вязкой жидкости* (LAP Lambert Publ., Saarbrucken, 2017)
- [6] A.S. Dukhin, P.J. Goetz. *Characterization of Liquids, Nano- and Microparticulates, and Porous Bodies using Ultrasound*. 3 eds (Elsevier, Amsterdam-Boston-London-New-York, 2018)
- [7] М.С. Касимзаде, Р.Ф. Халилов, А.Н. Балашов. *Электрокинетические преобразователи информации* (Энергия, М., 1973)
- [8] R.J. Hunter. *Zeta potential in Colloid Science. Principles and Applications* (Academic Press, London, 1981)
- [9] J. Lyklema. *Fundamentals of Interface and Colloid Science* (Academic Press, San Diego, 2001), v. 2.
- [10] Д.А. Фридрихсберг. *Курс коллоидной химии* (Лань, СПб, М., Краснодар, 2010), 4-е изд., испр. и доп.
- [11] Е.Д. Шукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. *Коллоидная химия* (Высшая школа, М., 2004)
- [12] Дж. Ньюмен. *Электрохимические системы* (Мир, М., 1977)
- [13] О.Н. Григоров, З.П. Козьмина, А.В. Маркович, Д.А. Фридрихсберг. *Электрокинетические свойства капиллярных систем* (Изд-во АН СССР, М.-Л, 1956), с. 113–124.