10

Численная оценка эффективности жидкостного и воздушного электрокинетических излучателей

© Б.П. Шарфарец, В.Е. Курочкин

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

Поступило в редакцию 7 апреля 2024 г.
В окончательной редакции 10 октября 2024 г.
Принято к публикации 14 ноября 2024 г.

Рассмотрена полученная с помощью моделирования на программном комплексе COMSOL Multiphysics сравнительная эффективность электроакустического преобразования электрокинетического излучателя в двух средах — воде и воздухе. Обоснована возможность моделирования процесса преобразования в рамках модели вязкой несжимаемой жидкости, что позволило существенно уменьшить сложность вычислений в процессе моделирования. При моделировании удалось обойтись усеченной системой уравнений электрогидродинамики — замкнутой системой уравнений Навье–Стокса для несжимаемой жидкости, что значительно упростило модельные расчеты. Приведены результаты моделирования, выявляющие значительные преимущества электрокинетического преобразования в воде по сравнению с электрокинетическим преобразованием в воздушной среде, при этом учитывались только потери, связанные с трением в жидкости.

Ключевые слова: электрокинетические преобразователи, вязкая несжимаемая жидкость.

DOI: 10.61011/JTF.2025.01.59472.111-24

Введение

В современной теоретической и прикладной акустике в силу значительной практической значимости большое место занимают исследования, посвященные повышению эффективности различных акустических преобразователей. К настоящему времени существует большое многообразие различных способов преобразования всевозможных видов энергии в звуковую энергию и обратных к ним преобразований звуковой энергии в электрическую и другие виды энергии.

Одним из относительно новых способов преобразования различных видов энергии в акустическую энергию и обратно являются электрокинетические (электрохимические) преобразования, основанные на открытии электрокинетических явлений (ЭЯ) [1]. В данной работе упоминаются ЭЯ электроосмоса — течение жидкости в капиллярах и пористых телах под воздействием внешнего электрического поля и потенциала течения — появление электрической разности потенциалов на торцах капилляра или мембраны при течении через них жидкости.

К настоящему времени библиография, посвященная использованию электрокинетических явлений для создания различных преобразователей, весьма обширна. Укажем лишь некоторые наиболее значимые работы отечественных и зарубежных ученых (см., например, [2–15]).

Отметим, что электрокинетические явления электроосмоса и потенциала течения привлекли значительное внимание исследователей в связи с возможностью их использования при конструировании излучателей и приемников акустических колебаний в газообразной и жидкой средах. Об этом достаточно подробно говорится в монографиях [12,15].

Существенный вклад в конструкцию электрокинетических излучателей внесло изобретение российских ученых С.П. Дмитриева с соавторами [16]. В указанной работе было предложено при использовании электроосмоса в конструкции излучателя прикладывать к мембранам и капиллярам значительное постоянное напряжение накачки, что существенно увеличивало эффективность электроакустического преобразования.

Еще одной особенностью работы [16] явилось оригинальное предложение авторов этого изобретения использовать при конструировании электрокинетического электроакустического излучателя применительно к воздушной среде в качестве пористой структуры (мембраны) стандартную канцелярскую бумагу. При этом устройство электрокинетического электроакустического преобразователя состояло из пачки бумаги (примерно 20–25 листов) общей толщиной 2–2.5 mm, электродов в виде двух металлических сеток с размером прямоугольных ячеек примерно 0.5 mm и электрической схемы соединения постоянного и переменного напряжений. Внутрь электродов плотно зажималась пачка бумаги, выполняющая функцию пористой мембраны. Размер электродов совпадал с размерами стандартного листа бумаги, а именно 210×297 mm (такая конструкция электрокинетического преобразователя получила в дальнейшем название преобразующей матрицы). Суммарное постоянное и переменное электрические поля подавались с электрической схемы на сетчатые электроды. Величина постоянного электрического поля могла варьироваться от нуля до нескольких тысяч вольт и была ограни-

чена сверху только величиной электрического пробоя электрокинетического излучателя, т. е. описанной выше пачки канцелярской бумаги внутри сетчатых металлических электродов. Величина переменного напряжения на электродах матрицы оставалась постоянной.

Далее в теоретических исследованиях и в модельных экспериментах, проводимых с участием авторов настоящей работы, были вскрыты физические причины значительного увеличения эффективности процесса преобразования вследствие наличия постоянного напряжения накачки не только в режиме излучения (см., например, [17,18]), но также и в режиме приема акустических колебаний (см., например, [19]), и в режиме ретранслятора акустических колебаний (см., например, [20]).

Отметим, что во всех случаях практического использования электрокинетических преобразований в воздушных условиях — и в случае электроакустического преобразования (электрокинетический излучатель), и в случае акустоэлектрического преобразования (электрокинетический приемник), а также в случае электрокинетического ретранслятора в работах [17–20] и в других публикациях с участием авторов настоящей работы, посвященных рассматриваемой тематике, применялась с небольшими отличиями описанная выше преобразующая матрица.

Здесь следует сказать, что в работах [17–20] и в других многочисленных работах с участием авторов настоящих исследований, посвященных изучению и созданию электрокинетических преобразователей (излучателей, приемников и ретрансляторов акустических колебаний), эксперименты проводились только в воздухе. В процессе этих экспериментов были выявлены значительные преимущества электрокинетических преобразователей по сравнению с существующими аналогами, использующими другие физические принципы преобразований. Например, в работе [21] в экспериментах для воздушного электрокинетического микрофона было показано, что при использовании напряжения накачки для электрокинетического микрофона удалось экспериментально получить чувствительность микрофона, практически вдвое превышающую величину чувствительности рекордного по этому показателю среди воздушных микрофонов — угольного микрофона (его чувствительность составляет около 1000 mV/Pa), тогда как чувствительность электрокинетического микрофона в экспериментах в условиях применения напряжения накачки составила около 2000 mV/Pa.

На жидкостных электрокинетических преобразователях с преобразующей матрицей описанного выше типа с заменой бумаги некоторой пористой, например, кварцевой структурой такие эксперименты авторами не проводились ввиду их большой сложности. Все это приводит к необходимости еще до решения технических проблем проводить исследование особенностей функционирования жидкостных преобразователей по сравнению с воздушными аналогами с помощью численных модельных экспериментов на вычислительных пакетах.

Известно, что в гидродинамическом аспекте теории электрокинетических преобразователей для газа и жидкости практически идентичны вследствие малых различий в соответствующей системе гидродинамических уравнений в этих средах. Основные различия преобразователей в газе и жидкости заключаются в значительно большей электропроводности в жидкости по сравнению с электропроводностью в газе. Это приводит к тому, что при математическом моделировании в газе можно обойтись учетом только вязких потерь, в то время как в жидкости тепловые потери могут значительно превосходить вязкие потери. Поэтому в жидкости, помимо системы уравнений гидродинамики, необходимо учитывать также уравнение теплопроводности.

Кроме того, воздушные преобразователи достаточно просто реализуются технически. Все обстоит иначе в случае жидкостных преобразователей, что обусловлено наличием существенного влияния электрических процессов в рабочей жидкости, куда помещена мембрана с электродами, и на которые необходимо подавать электрическое напряжение с амплитудой существенной величины. Возникающие в связи с этим технические проблемы до конца не исследованы, однако представляется необходимым, учитывая большое прикладное значение создания эффективных электрокинетических жидкостных излучателей (а в дальнейшем — не только излучателей, но и приемников, а также ретрансляторов звуковых колебаний), провести в настоящей работе прогнозирование ожидаемой эффективности жидкостных электрокинетических излучателей по сравнению с воздушными аналогами в условиях пренебрежения тепловыми потерями. В настоящей работе будет сделан такой прогноз.

В связи с изложенным выше, представляется полезным произвести математическое модельное прогнозирование на вычислительном пакете COMSOL Multiphysics ожидаемой эффективности жидкостных электрокинетических преобразователей по сравнению с воздушными аналогами в условиях пренебрежения тепловыми потерями. Результаты такого прогнозирования могут оказаться весьма востребованными в дальнейших исследованиях и подсказать пути повышения эффективности электрокинетических преобразователей. В настоящей работе будет сделан такой сравнительный прогноз для воздушных и жидкостных электрокинетических излучателей.

1. Постановка задачи

Целью настоящей работы, в силу большой практической значимости жидкостных излучателей, является предварительное (до решения непростых технических вопросов, связанных с натурными экспериментами в случае жидкостных электрокинетических излучателей) выявление с помощью математических модельных экспериментов возможностей и вероятных преимуществ

жидкостных электроакустических электрокинетических излучателей по сравнению с атмосферными аналогами с точки зрения эффективности электроакустического преобразования.

Для упрощения проблемы из всей системы уравнений электрогидродинамики (см., например, [22]), которые описывают рассматриваемый процесс, оставим только уравнения гидродинамики (уравнение сохранения импульса Навье–Стокса и уравнение непрерывности). Уравнение сохранения энергии (теплопроводности) и другие уравнения электрогидродинамики опускаются для упрощения и без того громоздких численных расчетов. Их влияние на процессы в электрокинетических преобразователях будет рассмотрено в следующих работах авторов. Таким образом, в работе, из всей совокупности уравнений, входящих в систему уравнений электрогидродинамики, исследуется только система гидродинамических уравнений Навье–Стокса (т.е. учитываются только вязкие потери жидкости), при этом тепловые потери в жидкости не учитываются.

2. Модельные эксперименты. Выбор модели

В качестве среды для постановки модельных экспериментов в воде или в воздухе использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics. Реализовывалась следующая физическая модель электрокинетических излучателей (см. рисунок). В бесконечное трехмерное пространство, заполненное жидкостью (водой или воздухом), помещался также наполненный окружающей жидкостью стеклянный цилиндрический капилляр с открытыми для окружающей среды торцами. Капилляр моделировал поры мембраны (пористую среду). Правомерность такой модели, описывающей пористую среду общего вида, следует из работы [6] при выполнении достаточно необременительных условий [6]:

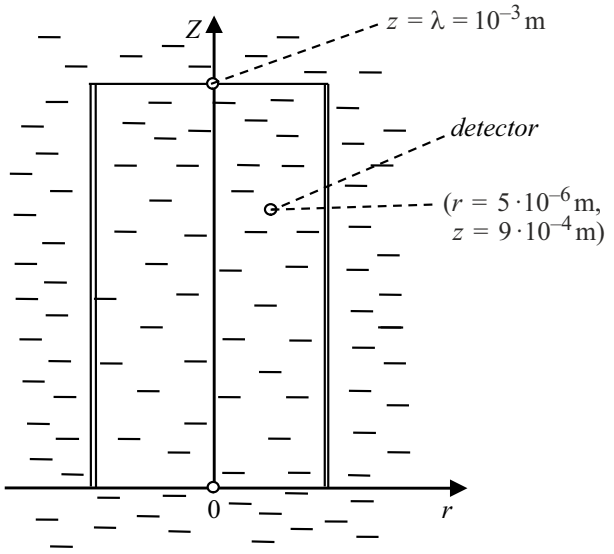
А) толщина двойного слоя λ_D в мембране достаточно мала, а радиусы кривизны внутренней поверхности пор мембраны больше некоторой величины, значительно превышающей величину толщины двойного слоя в мембране;

Б) минимальный линейный размер пор в мембране существенно превышает толщину двойного слоя λ_D.

Ниже в разд. 4, Замечание 2 приведен порядок значений толщины двойного слоя $\lambda_D \backsimeq 19\,\text{nm}$. Для удовлетворения условий А и Б были выбраны следующие размеры цилиндрического капилляра: длина $l = 10^{-3}\,\text{m}$, внутренний радиус капилляра $r_0 = 10^{-5} \gg 19 \times 10^{-9}\,\text{m}$. Отсюда следует правомерность моделирования пористой структуры общего вида цилиндрическим капилляром указанных размеров.

К торцам капилляра подводилось суммарное напряжение

$$u = U_0 + u_1(t). \tag{1}$$



Капилляр в бесконечной жидкости.

Здесь U_0 — постоянное напряжение (напряжение накачки). Переменное по времени t напряжение $u_1(t)$ определялось выражением

$$u_1(t) = u_1 \sin(2\pi f)t. \tag{2}$$

В настоящей работе рассматривалось единственное значение амплитуды переменного напряжения $u_1 = 600\,\text{V}$. Частота колебаний составляла $f = 1000\,\text{Hz}$. Напряжение накачки U_0 в (1) принимало поочередно следующие дискретные значения: 0, 1000, 2000, 3000, 5000, 8000 и 10 000 V.

Акустическое поле рассчитывалось внутри капилляра в точке (детекторе) с координатами $r = 0.5 \cdot 10^{-5}\,\text{m}$, $z = 9 \cdot 10^{-4}\,\text{m}$. Начало координат соответствовало точке ($r = 0$, $z = 0$), расположенной на одном из торцов капилляра (см. рисунок).

3. Математическая модель в численном эксперименте

При изучении поведения жидкости или газа при их движении под воздействием сил разной природы обычно пользуются системами различных связанных между собой уравнений. Так, например, если движение жидкости сопряжено с электрическими силами, то привлекается дополнительно система уравнений электрогидродинамики. Особенностью таких систем разнородных уравнений является необходимость их совместного решения в силу связанности входящих в них физических полей. Решение таких систем аналитически, как правило, невозможно в силу сложности взаимосвязанных уравнений системы, нетривиальности геометрии рассматриваемых в задаче краевых условий и т.д. Поэтому, как правило, такие задачи приходится решать численно с привлечением специализированных вычислительных пакетов, в частности

пакета COMSOL Multiphysics — программного пакета для анализа, решения и моделирования методом конечных элементов для различных физических и инженерных приложений, особенно для связанных мультифизичных явлений.

В арсенале пакета можно выбрать математические модели различной сложности. Основной задачей предметного специалиста является выбор компромиссного набора математических моделей исходя из критерия „цена–качество“, т. е. выбор наименее сложной математической модели при приемлемой точности получаемого решения.

В акустических процессах (каковым является рассматриваемый процесс) обычно используется математическая модель вязкой сжимаемой жидкости. Такая модель весьма трудоемка при численных расчетах. В настоящей работе при численном моделировании электрокинетических излучателей была использована возможность замены, при выполнении определенных условий, модели вязкой сжимаемой жидкости моделью вязкой несжимаемой жидкости. При получении нижеследующих оценок учитывались результаты работы [23].

Первое условие при стационарном движении жидкости для такого упрощения выглядит так [23]:

$$|v| \ll c, \tag{3}$$

что означает тот факт, что для малых вариаций плотности среды скорость течения жидкости v должна быть много меньше скорости звука в жидкости c.

Второе условие, но уже при нестационарном движении жидкости, таково, что в случае выполнения условия [23]:

$$\tau \gg \frac{l}{c}, \tag{4}$$

производной плотности жидкости ρ по времени $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ можно пренебречь (считать плотность ρ неизменной во времени).

Здесь τ и l — константы, имеющие порядок величины промежутка времени (τ) и расстояния (l), на которых скорость жидкости испытывает заметное изменение. В (4) в качестве τ принимаем период гармонических колебаний жидкости $\tau = T = 1/f$, где T — период колебаний, а f — их частота. Подставляя последнее выражение в (4), получаем неравенство

$$f \ll \frac{c}{l}. \tag{5}$$

Рассмотрим ограничения (3) и (5) для воздуха и для воды. Скорости звука в воздухе и в воде равны соответственно $c_{air} \approx 340\,\text{m/s}$ и $c_{water} \approx 1500\,\text{m/s}$. Толщина мембраны, в которой осуществляется процесс электроосмоса, составляет $l = 10^{-3}\,\text{m}$. Тогда для воздуха и воды получаем соответственно оценки по частоте колебаний

$$f_{air} \ll \frac{c_{air}}{l} = \frac{340}{10^{-3}} = 340\,\text{kHz}, \tag{6}$$

$$f_{water} \ll \frac{c_{water}}{l} = \frac{1500}{10^{-3}} = 1500\,\text{kHz}. \tag{7}$$

Как видно из выражений (6) и (7), ограничение (5) начинается в глубоком ультразвуковом диапазоне, и приблизительно для частот $f \leq 50\,\text{kHz}$ для воздуха и $f \leq 200\,\text{kHz}$ для воды остается справедливым.

Далее проверим ограничение (3) для обеих рассматриваемых сред. Согласно данным работы [24], на болевом пороге при воздействии мощного звука в воздухе амплитуда колебательной скорости частиц достигает всего лишь 1 m/s. Поэтому условие (3) для воздуха заведомо выполняется: $1 \ll 340$.

Поскольку авторам не удалось найти соответствующие величины для предельных значений скоростей акустического течения в воде, для них получим значение из приведенных ниже рассуждений.

Определим величину предельной колебательной скорости в воде из следующего соображения. Примем, что в воде имеется акустическое давление с амплитудой p_{water}, равной амплитуде давления в воздухе p_{air}, и равное p_0:

$$p_{water} = p_{air} = p.$$

При давлении p_0 амплитуда колебательной скорости в воде v_{water} будет равна $v_{water} = \frac{p_{water}}{z_{water}}$. После несложной цепочки тождественных преобразований находим

$$v_{water} = \frac{p_0}{z_{water}} = \frac{p_{water}}{z_{water}} = \frac{p_{air}}{z_{water}}$$
$$= \frac{z_{air} p_{air}}{z_{air} z_{water}} = \frac{z_{air} p_{air}}{z_{water} z_{air}} = \frac{z_{air}}{z_{water}} v_{air}. \tag{8}$$

Здесь через $z = p/v$ обозначено удельное акустическое сопротивление соответствующей среды, равное отношению амплитуд давления и колебательной скорости.

Найдем отношение z_{air}/z_{water}, подставляя общедоступные соответствующие величины ($z_{air} \approx 417\,\text{Pa s/m}$, $z_{water} \approx 150 \cdot 10^4\,\text{Pa s/m}$). Окончательно получаем

$$\frac{z_{air}}{z_{water}} \approx \frac{417}{150 \cdot 10^4} = 2.78 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, из (8) получаем, что при одинаковой амплитуде давления в воде и в воздухе колебательная скорость воды является величиной примерно четвертого порядка малости по сравнению с колебательной скоростью в воздухе.

Отсюда ограничение (3) для колебательной скорости в воздухе и в воде при принятых параметрах модельных экспериментов выполняется с большим запасом, а ограничение (5) справедливо для воздуха до частот $f \leq 50\,\text{kHz}$ и для воды до частот $f \leq 200\,\text{kHz}$.

4. Уравнения движения несжимаемой жидкости

Поскольку выполняются допущения о несжимаемости жидкости, приведем ниже систему уравнений

Навье–Стокса для несжимаемой жидкости [23]. Уравнение движения имеет вид

$$\rho\left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v}\right] = -\nabla p + \eta\Delta\mathbf{v} + \mathbf{F}. \qquad (9)$$

Уравнение непрерывности также сводится к виду, соответствующему несжимаемой жидкости [23]:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \qquad (10)$$

К уравнениям (9) и (10) необходимо добавить краевое условие прилипания жидкости к внутренней боковой поверхности капилляра, т.е. равенство нулю скорости жидкости на этой поверхности $v\big|_{r=r_0} = 0$.

Система уравнений (9), (10) состоит из четырех уравнений (трех скалярных уравнений, входящих в векторное уравнение (9), и скалярного уравнения (10)) и является замкнутой для вычисления трех составляющих поля скоростей $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ и скалярного поля давления p. Здесь $\rho = \text{const}$ — плотность несжимаемой среды; η — коэффициент динамической вязкости среды (для упрощения принимаем его постоянным $\eta = const$); $\mathbf{F} = \rho_e\mathbf{E}$ — объемная сила; $\mathbf{E} = (0, 0, E)$ — напряженность внешнего электрического поля, $E = E_0 + E_1(t)$, где величина амплитуды вектора постоянной напряженности электрического поля E_0 соответствует постоянному напряжению U_0, а переменная величина напряженности электрического поля $E_1(t)$ соответствует переменному напряжению $u_1(t)$; ρ_e — плотность электрического заряда в жидкости (электрический заряд единицы объема жидкости).

Замечание 1

Отметим, что при моделировании в пакете COMSOL Multiphysics рассматриваемой задачи используется однородное уравнение движения (9): сила $\mathbf{F} = \rho_e\mathbf{E}$ принимается равной нулю. Одновременно вводится эквивалентное силе $\mathbf{F}$ „электроосмотическое“ краевое условие, заключающееся в том, что вместо стандартного условия прилипания жидкости на боковой границе капилляра $\mathbf{v}\big|_{r=r_0} = 0$ принимается условие, что прилегающий к боковой границе слой жидкости имеет скорость, равную электроосмотической скорости

$$\mathrm{v_z}\big|_{r=r_0} = U_{eo} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\xi}{\eta}E = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\xi}{\eta}\big(E_0 + E_1(t)\big). \qquad (11)$$

В (11) введены обозначения: U_{eo} — электроосмотическая скорость; ε и ε_0 — относительная диэлектрическая проницаемость среды и электрическая постоянная соответственно; ξ — дзета-потенциал. Ниже будет показана правомерность такого краевого условия на внутренней боковой поверхности капилляра, однако для этого необходимо сделать еще одно замечание.

Замечание 2

Большое влияние на электроосмотические процессы имеет отношение длины (радиуса) Дебая λ_D, которая характеризует толщину диффузного подвижного слоя в двойном слое электроосмотического процесса, к радиусу капилляра: λ_D/r_0. При малых величинах этого отношения $\lambda_D/r_0 \le 0.01$ скорость жидкости в капилляре имеет поршневой характер, т.е. практически постоянна во всем поперечном сечении капилляра по всей его длине [25].

При рассмотрении краевой задачи (9), (10) в круговом капилляре при краевых условиях $\mathrm{v_z}(r_0) = 0$; $\frac{\partial \mathrm{v_z}}{\partial r}\big|_{r=0} = 0$ в [25] было установлено, что структура электроосмотической скорости в капилляре имеет поршневой (одномерный) характер $\mathbf{v} = \big(0, 0, \mathrm{v_z}(r)\big)$, и получено следующее выражение для продольной скорости $\mathrm{v_z}$ в цилиндрическом капилляре:

$$\mathrm{v_z}(r) = \left[1 - \frac{I_0(r/\lambda_D)}{I_0(r_0/\lambda_D)}\right]U_{eo}.$$

Из этого выражения при $\lambda_D \ll r_0$ следует (см. [25]). Здесь I_0 — модифицированная функция Бесселя (мнимого аргумента) нулевого порядка. В нашем случае $\lambda_D \backsimeq 19 \cdot 10^{-9}$ m, $r_0 = 10^{-5}$ m, следовательно, $\lambda_D/r_0 = 1.9 \cdot 10^{-3} \ll 1$. Что и позволяет сделать вывод о правомерности краевого условия (11).

Это касается и постоянной составляющей электроосмотической скорости, вызванной постоянным напряжением накачки U_0, и переменной гармонической составляющей электроосмотической скорости, вызванной переменным напряжением $u_1(t)$. Этот факт будет подтвержден ниже результатами модельных экспериментов на пакете COMSOL Multiphysics.

5. Модельный эксперимент

Модельный эксперимент проводился на программном комплексе COMSOL Multiphysics. В качестве гидродинамической модели использовалась модель несжимаемой вязкой жидкости (9), (10). В качестве среды в экспериментах использовались вода и воздух (обобщенно жидкость). В безграничную жидкость помещался цилиндрический капилляр с открытыми концами, заполненный окружающей жидкостью. Размеры капилляра: длина — $l = 1 \cdot 10^{-3}$ m, радиус — $r_0 = 1 \cdot 10^{-5}$ m, концы оси капилляра имели координаты $(r, z)_{\text{lower}} = (0, 0)$ m и $(r, z)_{\text{upper}} = (0, 10^{-3})$ m. К торцам капилляра подавалось электрическое напряжение (1), (2). Как отмечено выше, амплитуда постоянного напряжения накачки U_0 принимала поочередно значения 0; 1000; 2000; 3000; 5000; 8000; 10 000 V. Амплитуда переменного напряжения сохраняла во всех экспериментах неизменное значение $u_1 = 600$ V. Частота колебаний во всех модельных экспериментах также сохранялась постоянной: $f = 1000$ Hz.

Соотношение величин характерных параметров при электроосмотическом электроакустическом преобразовании в воде и воздухе (излучение звука)

Напряжение накачки, U_0, V	Давление в воздухе, p_{air}, Pa	Давление в воде, p_{water}, Pa	Колебательная скорость в воздухе, v_{air}, m/s	Колебательная скорость в воде, v_{water}, m/s	Отношение амплитуд давлений в воде и в воздухе, P_{water}/P_{air}	Отношение амплитуд колебательных скоростей в воде и в воздухе, v_{water}/v_{air}	Отношение интенсивностей звука в воде и в воздухе, $(pv)_{water}/(pv)_{air}$
0	0.011	7.5	0.02	0.0035	750	0.175	131.3
1000	0.012	45.75	0.02	0.004	3812	0.2	762.5
2000	0.0175	77.55	0.02	0.004	4431	0.2	886.3
3000	0.0265	100.9	0.02	0.0039	3807	0.195	742.5
5000	0.044	133	0.019	0.0037	3022	0.195	588.6
8000	0.070	162.75	0.019	0.0034	2325	0.18	416
10 000	0.085	176.05	0.019	0.0033	2071	0.174	359.7

Замечание 3

При моделировании полей в капилляре важным параметром при решении краевой задачи (9)–(11) является указание краевого условия (11). Наибольшую неопределенность в (11) вызывает задание значения ξ-потенциала в жидкости и в воздухе. Согласно [25], величина ξ-потенциала в жидкости достигает значения $\xi_{water} = 100\,\text{mV}$ и более. Что касается величины ξ-потенциала в воздухе, то ее задание вызвало у авторов затруднение в силу практического отсутствия в печати такой информации. Не помогло и общение с ведущими специалистами по этому вопросу. Вследствие этого было принято решение принять величину дзета-потенциала для воздуха также равной $\xi_{air} = 100\,\text{mV}$.

Поля акустического давления и колебательной скорости внутри капилляра рассчитывались на пакете COMSOL Multiphysics в различных точках (детекторах) по системе уравнений (9)–(11).

Ниже в таблице представлены соотношения величин характерных параметров полей давления и колебательной скорости в воде и воздухе в точке (детекторе) $(r, z) = (5 \cdot 10^{-6}, 9 \cdot 10^{-4})\,\text{m}$ внутри капилляра при $r = r_0/2$ в зависимости от различных значений напряжения накачки при постоянной амплитуде переменного напряжения из (2) $u_1 = 600\,\text{V}$. (В таблице представлены величины, характеризующие параметры переменной составляющей потока жидкости в капилляре, а именно амплитуды акустического давления и амплитуды колебательной скорости в капилляре соответственно для воды и воздуха.)

6. Обсуждение и трактовка результатов модельного эксперимента

6.1. Проверка справедливости Замечания 2

В модельных экспериментах в первую очередь была проверена справедливость Замечания 2 о постоянстве амплитуд давления и скорости поля (p, v) в поперечном сечении капилляра. Для этого при напряжении накачки $U_0 = 1000\,\text{V}$ рассчитывались параметры поля (p, v) в следующих точках поперечного сечения капилляра с координатами (r, z): $(1 \cdot 10^{-6}, 9 \cdot 10^{-4})$,$(5 \cdot 10^{-6}, 9 \cdot 10^{-4})$ и $(9 \cdot 10^{-6}, 9 \cdot 10^{-4})\,\text{m}$, т.е. практически у оси капилляра, на половине его радиуса и у боковой поверхности капилляра. Результаты расчета соответствующих полей (p, v) оказались идентичными.

6.2. Влияние напряжения накачки

Из таблицы видно, что амплитуды давления в обеих средах прямо пропорционально зависят от амплитуды напряжения накачки U_0, в то время как амплитуды колебательной скорости практически от U_0 не зависят. Физически эти факты можно объяснить следующим образом. Как было показано в работах [17,18], вследствие нелинейности задачи (9), (10) рост напряжения накачки U_0 вызывает прямо пропорциональное увеличение амплитуды P поля акустического давления $p(r, z, t)$. Амплитуда колебательной скорости V в капилляре определяется суммой двух составляющих: составляющей, зависящей от амплитуды акустического давления P (которое, в свою очередь, зависит от переменной амплитуды накачки через волновое сопротивление среды), и от величины амплитуды переменного напряжения накачки $U_1(t)$, связанной с электрическим полем $E_1(t)$ (см. (11)). Анализ показывает, что вклад, связанный с изменением акустического давления, на 2–3 порядка меньше, чем вклад величины переменного напряжения накачки, связанной с величиной электрического потенциала $E_1(t)$ в (11). Таким образом, амплитуда колебательной скорости в капилляре определяется практически только переменным напряжением накачки, которое в ходе рассматриваемого эксперимента оставалось постоянным, что указывает на электроосмотическую природу происхождения колебательной скорости в капилляре в данных экспериментах.

6.3. О влиянии допущения $\xi_{air} = 100\,\text{mV}$

Как видно из таблицы, отношение амплитуд давления в воде и воздухе достигает величины около 4500, а соответствующее отношение интенсивностей звукового поля — около 900. Поэтому даже если предположить, что величина дзета-потенциала воздуха достигнет значений $\xi_{air} = 300-500\,\text{mV}$ (что является весьма маловероятным), то, как показывает анализ, и в этом случае эффективность жидкостного электрокинетического излучателя будет значительно превышать эффективность воздушного аналога.

6.4. О влиянии величины дзета-потенциала ξ, толщины диффузного слоя в двойном электрическом слое λ и радиуса капилляра r_0 и их соотношения на электрокинетическое преобразование

Эти вопросы подробно рассмотрены в специальной литературе, например, [10,12,13,15,25 и др.]. Здесь не будем подробно останавливаться на этом, приведем лишь результаты численного эксперимента, проделанного в рамках описанной физической модели при величине напряжения накачки $U_0 = 2000\,\text{V}$. При этом варьировалась величина дзета-потенциала ξ, принимавшего последовательно значения 100, 10 и 1 mV. Вычислялось отношение в рассматриваемой точке капилляра амплитуд давления в воде и воздухе при прочих неизменных физических и геометрических параметрах, рассмотренных выше. В результате получены следующие результаты. При $\xi = 100\,\text{mV}$ отношение амплитуд давления в воде и воздухе составило 4431 раз (см. таблицу), при $\xi = 10\,\text{mV}$ это отношение составило 6267 раз и наконец, при $\xi = 1\,\text{mV}$ отношение составило 6423 раза. Этот факт, по-видимому, требует отдельного изучения.

Заключение

В работе привлекается внимание к прикладному значению таких важных для науки и техники явлений, как электрокинетические явления. Дается краткая история открытия электрокинетических явлений и их использования в различных областях науки и техники. Приводится актуальное состояние вопроса применительно к созданию одного из видов электрокинетических преобразователей — электрокинетического излучателя. Отмечается, что авторам ранее удалось создать теоретически единую теорию таких излучателей для воздушных и жидкостных условий. Вместе с тем отмечается, что вследствие наличия больших технических сложностей, связанных с электрическими процессами в жидкости, пока еще не удается на практике реализовать такой же эффективный, как воздушный, жидкостный электрокинетический излучатель. Вследствие этого ставится задача предварительных модельных исследований сравнительной эффективности воздушного и жидкостного излучателей для выяснения целесообразности проектирования и создания электрокинетического жидкостного излучателя. С помощью численного моделирования на программном комплексе COMSOL Multiphysics рассмотрена сравнительная эффективность электроакустического преобразования электрокинетического излучателя в воде и в воздухе. Пористая структура моделировалась цилиндрическим капилляром. Правомерность выбора такой физической модели пористой структуры обосновывается в работе. Кроме того, в работе рассматривались только потери, связанные с вязкостью среды, и не учитывались тепловые потери, которые будут рассмотрены в следующих работах авторов. В процессе постановки и решения задачи была выявлена возможность проведения расчетов с „облегченной“ гидродинамической моделью — моделью вязкой несжимаемой жидкости. Такой подход позволил весьма значительно снизить вычислительные затраты на проведение модельных экспериментов практически без потери точности проведенных расчетов. Результаты численного моделирования при дзета-потенциале, равном 100 mV, показали следующие весьма обнадеживающие результаты: при одинаковых электрических потенциалах в условиях одинаковых физических моделей излучаемое электрокинетическим преобразователем давление в воде оказалось в диапазоне от 750 до 4431 раз выше давления в воздухе для различных напряжений накачки; отношение интенсивностей звука в воде и воздухе лежит в диапазоне от 131.3 до 866.3 раз для различных напряжений накачки. Полученные результаты, безусловно, окажутся весьма полезными на заключительной практической фазе проектирования жидкостных электрокинетических излучателей.

Ввиду большой научной и прикладной значимости описываемой тематики представляется крайне необходимым продолжить в самое ближайшее время проведенные исследования с точки зрения дальнейшего учета особенностей описываемых электрокинетических электроакустических преобразований, а именно тепловых потерь в моделях преобразователей, а также других важных технических и прикладных особенностей рассмотренного преобразования.

В перспективе такой же сравнительный анализ необходимо провести и для приемного режима электрокинетических преобразователей. Кроме того, вследствие обнаруженной авторами возможности создания электрокинетических ретрансляторов, такой же сравнительный анализ должен быть проведен и для режима ретрансляции акустических колебаний.

Все это в совокупности позволит после завершения указанных исследований принять решения о выборе оптимальных путей дальнейших научных исследований в целях создания эффективных, конкурентоспособных электрокинетических преобразователей.

Финансирование работы

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ № 075-01157-23-00 от 29.12.2022 г.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] *Физическая энциклопедия* (Большая Российская энциклопедия, М, 1998), т. 5.
[2] R.J. Hunter. *Zeta potential in colloid science. Principles and applications* (Academic Press, London, 1981), p. 64–68.
[3] R.J. Hunter. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, **141**, 37 (1998).
[4] J. Lyklema. *Fundamentals of Interface and Colloid Science*, vol. 2 (Academic Press, San Diego, 2001), p. 4.25–4.28.
[5] Д.А. Фридрихсберг. *Курс коллоидной химии* (Лань, СПб, М., Краснодар, 2010), 4-е изд., испр. и доп., с. 221–225.
[6] С.С. Духин, Б.В. Дерягин. *Электрофорез* (Наука, М., 1976), с. 45–48.
[7] 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.
[8] L.E. Ermakova, A.S. Kuznetsova, A.V. Volkova, T.V. Antropova. Colloids and Surfaces A, Physicochemical and Engineering Aspects, **576**, 91 (2019).
[9] Л.Э. Ермакова, А.В. Волкова, Т.В. Антропова, Ф.Г. Муртузалиева. Коллоид. журн., **76** (5), 594 (2014).
[10] S. Levine, J.R. Marriott, G. Neale, N. Epstein. J. Colloid Interface Sci., **52**, 136 (1975).
[11] A.S. Dukhin, P.J. Goetz. *Characterization of Liquids, Dispersions, Emulsions, and Porous Materials Using Ultra Sound*. 3-th ed. (Elsevier, 2017)
[12] М.С. Касимзаде, Р.Ф. Халилов, А.Н. Балашов. *Электрокинетические преобразователи информации* (Энергия, М., 1973)
[13] J. Newman, K.E. Thomas-Alyea. *Electrochemical Systems* (John Wiley&Sons, 2004)
[14] В.И. Ролдугин. *Физикохимия поверхности* (Издат. Дом „Интеллект“, Долгопрудный, 2011)
[15] Н.С. Лидоренко, Б.И. Ильин, И.А. Зайденман, В.В. Соболь, И.Г. Щигорев, А.А. Кузьмин, Н.В. Петькин, Б.Н. Костенко, Б.Б. Кузьменко, Ю.В. Карякин, А.П. Григин, А.М. Капустин. *Введение в молекулярную электронику*, под ред. Н.С. Лидоренко (Энергоатомиздат, М., 1984)
[16] S.V. Shishov, S.A. Andrianov, S.P. Dmitriev, D.V. Ruchkin. *Method of converting electric signals into acoustics oscillations and an electric gas-kinetic transducer* (United States Patent # US 8,085,957,B2 Dec. 27, 2011)
[17] 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]
[18] 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]
[19] Б.П. Шарфарец, С.П. Дмитриев, В.Е. Курочкин, Ф.Ф. Легуша. Письма в ЖТФ, **47** (24), 24 (2021). DOI: 10.21883/PJTF.2021.24.51794.18970 [B.P. Sharfarets, S.P. Dmitriev, V.E. Kurochkin, F.F. Legusha. Tech. Phys. Lett., **48** (15), 61 (2022). DOI: 10.21883/TPL.2022.15.54269.18970]
[20] Б.П. Шарфарец, С.П. Дмитриев, В.Е. Курочкин. ЖТФ, **94** (1), 151 (2024). DOI: 10.61011/JTF.2024.01.56913.100-23
[21] С.П. Дмитриев, В.Е. Курочкин, Б.П. Шарфарец. Научное приборостроение, **31** (2), 77 (2021).
[22] А.И. Жакин. УФН, **55** (5), 495 (2012). DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205b.0495 [A.I. Zhakin. Phys. Usp., **55** (5), 465 (2012). DOI: 10.3367/ufne.0182.201205b.0495]
[23] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теоретическая физика. Гидродинамика* (Наука, М., 1986), т. 6.
[24] М.А. Исакович. *Общая акустика* (Наука, М., 1973)
[25] H. Bruus. *Theoretical Microfluidics* (Oxford University Press, 2008)