
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 534.621

© С. П. Дмитриев, В. Е. Курочкин, Б. П. Шарфарец, 2021

**О СРАВНЕНИИ КОНДЕНСАТОРНОГО
И ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО МИКРОФОНОВ**

Основываясь на анализе физических особенностей работы микрофона на электрокинетических явлениях, экспериментально подтверждено, что этот микрофон работает на принципе, отличном от принципа работы конденсаторного микрофона. Показано, что микрофон на электрокинетических явлениях благодаря накачке может повышать свою чувствительность на величину до примерно 40 дБ. Сравнение двух экспериментальных исследований показывает, что чувствительность электрокинетического микрофона может сильно зависеть от размера пористости диэлектрика, помещаемого между электродами микрофона.

Кл. сл.: конденсаторный микрофон, микрофон на электрокинетических явлениях, напряжение накачки, чувствительность микрофона

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением целого цикла работ авторов по изучению излучателей и приемников (микрофонов) звуковых колебаний, основанных на использовании электрокинетических явлений (ЭКЯ) [1–8]. Конструкция электроакустических преобразователей, основанных на ЭКЯ, во многом идентична конструкции конденсаторных микрофонов.

Конденсаторный микрофон также содержит два плоскопараллельных электрода с (обычно) воздушным промежутком между ними, на которые подается поляризующее (т.н. фантомное) напряжение для обеспечения заряда конденсатора. Для постоянства этого заряда во времени конденсатор нагружается на достаточно большое активное сопротивление [9, с. 102].

Микрофон на ЭКЯ представляет собой два плоских *перфорированных* электрода, с помещенной меж электродов пористой структурой (например, пачкой канцелярской бумаги толщиной несколько миллиметров) и называемой далее матрицей (2D-размеры электродов и бумаги совпадают)¹. На электроды в обоих режимах — излучения и приема — подается постоянное электрическое поле (напряжение накачки). При этом в режиме излучения звука дополнительно на матрицу подается переменное электрическое поле, трансформируемое далее в звуковое поле, а в случае микрофона на матрицу поступает внешнее акустическое поле, трансформируемое

в электрический сигнал. Вследствие наличия в матрице нелинейных гидродинамических процессов энергия постоянного электрического поля перекачивается в акустическую энергию в излучателе или в энергию возникающего в микрофоне под воздействием внешнего акустического поля электрического отклика.

Как видно из вышесказанного, устройство обоих видов микрофонов во многом схоже: и в том, и в другом случае конструктивно присутствует конденсатор, в обоих случаях к обкладкам конденсаторов приложено постоянное электрическое поле. Различие состоит в том, что в случае конденсаторного микрофона электроды не должны быть обязательно перфорированными, а в случае микрофона на ЭКЯ между обкладками обязательно должна находиться пористая структура.

Сопоставление микрофона на ЭКЯ с конденсаторным микрофоном тем более оправдано вследствие того, что последний обладает неплохими электроакустическими параметрами [10, с. 152], такими как уровень чувствительности, ширина полосы воспроизводимых частот и др.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Настоящая работа посвящена более детальному изучению сходств и отличий физических принципов функционирования обоих упомянутых выше видов микрофонов, а также доказательному исключению интерпретации микрофона на ЭКЯ как частного случая конденсаторного микрофона.

¹ В приложении дается разъяснение по поводу сходства и отличий ЭКЯ в жидких электролитах и в воздухе.

КОНДЕНСАТОРНЫЙ МИКРОФОН

Остановимся на конструкции классического конденсаторного микрофона, изобретенного еще в 1916 г. Э. Венте. Она представляет собой заряженный плоский конденсатор, один из электродов которого массивен, а второй представляет тонкую мембрану (подробное описание конденсаторных микрофонов см., например, [9–12]). В этих же источниках подробно описывается теория расчета характеристик конденсаторных микрофонов, порой достаточно нетривиальная. В настоящей работе авторов главным образом интересует упрощенное рассмотрение, но передающее зависимость чувствительности конденсаторного микрофона от его важнейших параметров.

Далее излагается упрощенный вывод чувствительности микрофона, отражающий тем не менее характер ее зависимости от основных параметров микрофона: величины поляризующего напряжения и расстояния между пластинами конденсатора в состоянии покоя.

На конденсатор исходной емкостью $C_0 = \text{const}$ подается поляризующее напряжение $U_0 = \text{const}$ через высокоомное сопротивление R . При колебаниях мембраны под воздействием акустического поля исходное расстояние между электродами d_0 получает приращение $x(t)$, зависящее от времени и пропорциональное акустическому давлению $p(t)$. Таким образом, реальное расстояние между пластинами конденсатора равно $d = d_0 + x(t)$, $x(t) \ll d_0$. Возмущенная емкость плоского конденсатора определяется в СИ выражением [13, с. 360]

$$C(x(t)) = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 + x(t)}, \quad (1)$$

где ε_0 — электрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика внутри конденсатора; S — площадь пластины конденсатора. Полагаем, что площадь пластины остается неизменной $S = \text{const}$. Полагаем далее, что результирующее напряжение между пластинами $U(t)$ равно

$$U(t) = U_0 + u(t), \quad (2)$$

где $u(t)$ — величина возмущения опорного напряжения U_0 , вызванного сторонним акустическим полем, изменяющим стационарное расстояния между мембранами d_0 на величину $x(t)$.

Поскольку постоянная времени $\tau = C_0 R \cdot 1$ велика, то справедливо утверждение о постоянстве заряда конденсатора $q = q_0 = \text{const}$ при вариациях напряжения и емкости в конденсаторе, где q_0 — изначальный заряд конденсатора. Тогда из определения емкости [13, с. 360] запишем формулу определения емкости конденсатора C :

$$C = \frac{q_0}{U}. \quad (3)$$

Очевидно, что в невозмущенном случае (3) имеет вид $C_0 = \frac{q_0}{U_0}$. Из (3) имеем

$$U = \frac{q_0}{C}. \quad (4)$$

Последняя формула в невозмущенном случае, очевидно, принимает вид $U_0 = \frac{q_0}{C_0}$.

Перепишем (4) с учетом возмущений:

$$U_0 + u(t) = \frac{q_0}{C(x(t))}. \quad (5)$$

Далее представим в (5) дробь $\frac{q_0}{C(x(t))}$ в виде ряда по степеням x с точностью $O(x^2)$ (аргумент t опущен для упрощения записи)

$$U_0 + u = \frac{q_0}{C(x)} = \frac{q_0}{C_0} + \frac{q_0}{C_0^2} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \frac{x}{d} + O(x^2),$$

что после упрощения дает с точностью до величины $O(x^2)$ следующее выражение:

$$U_0 + u = U_0 + U_0 \frac{x}{d}. \quad (6)$$

Из (6) имеем для возмущения напряжения на конденсаторе (здесь уже вернем аргумент t)

$$u(t) = U_0 \frac{x(t)}{d}. \quad (7)$$

Таким образом, возмущение напряжения на конденсаторе $u(t)$ прямо пропорционально опорному напряжению U_0 и отношению возмущения расстояния между мембранами к его невозмущенному значению $x(t)/d$.

Для получения из (7) выражения для чувствительности в случае гармонического сигнала при-

мем, что $u(t) = ue^{-i\omega t}$ и $x(t) = xe^{-i\omega t}$, где u , x — соответствующие амплитуды. Очевидно, что в случае падения на приемник осевой плоской акустической волны имеет место соотношение

$$x(t) = xe^{-i\omega t} = \int V e^{-i\omega t} dt = -\frac{V}{i\omega} e^{-i\omega t}. \quad (8)$$

Амплитуды акустического давления p и скорости V в плоской гармонической волне связаны соотношением [14, с. 74]

$$V = \frac{p}{\rho c},$$

где ρ — плотность среды, c — скорость звука в ней. Тогда амплитуда гармонического возмущения мембраны в (8) равна

$$x = -\frac{V}{i\omega} = -\frac{p}{i\omega \rho c}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (7), имеем для амплитуды напряжения u в гармоническом режиме

$$u = -U_0 \frac{p}{i\omega \rho c d}. \quad (10)$$

Поделив (10) на амплитуду давления p , получаем выражение для осевой чувствительности S конденсаторного микрофона:

$$S = \frac{u}{p} = -\frac{U_0}{i\omega \rho c d}. \quad (11)$$

Полученное в работе упрощенное выражение (11) для осевой чувствительности исходит по умолчанию из ряда допущений. А именно, выше предполагалось, что конденсаторный микрофон представляет собой систему с сосредоточенными параметрами; величина амплитуды колебаний мембраны не учитывает ее заземленности по краям; рассмотрена только модель плоской падающей акустической волны; при выражении смещения мембраны через скорость звуковой волны не учтена реакция взаимодействия звуковой волны с мембраной (не учтена ее инерционность, связанная с исходным натяжением мембраны) и т.д. Тем не менее просмотр специальной литературы подтверждает следующее: во всех специальных работах по конденсаторному микрофону в выражении для чувствительности обязательно присутствует отношение опорного напряжения U_0 к толщине слоя между пластинами микрофона в стационарном состоянии U_0/d [9, с. 78]; [10, с. 34, 35]; [11, с. 478]. Эта величина, как нетрудно увидеть, равна величине амплитуды вектора электрической

напряженности постоянного (опорного) поля на конденсаторе $E_0 = U_0/d$.

Отличительный функциональный признак конденсаторного микрофона

Из полученных выражений (7) и (11) видно, что при нулевом опорном напряжении $U_0 = 0$ (при нулевой амплитуде вектора напряженности стационарного электрического поля $E_0 = U_0/d$ на конденсаторе $E_0 = 0$) **отклик конденсаторного микрофона отсутствует**.

Для лучшего изучения отличительных свойств ЭКЯ-микрофона был проведен натурный эксперимент с двумя макетами микрофонов.

НАТУРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

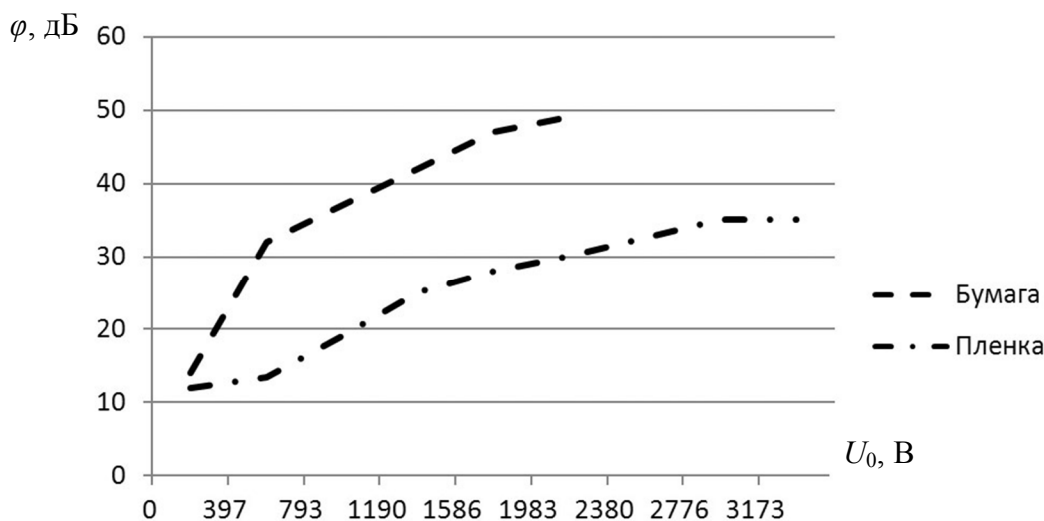
Макет1 ЭКЯ-микрофона

В обычном микрофоне на ЭКЯ пористая структура была заменена на структуру в виде пластиковой пластины формата А4 толщиной 1 мм, обернутой несколькими слоями полиэтилена. Суммарная толщина этой прокладки между перфорированными металлическими электродами составила 2 мм. Отличие такого микрофона от классического конденсаторного воздушного микрофона состоит в перфорированности электродов и наличии невоздушной диэлектрической прокладки. Такого рода микрофон больше ассоциируется с конденсаторным микрофоном, т.к. пластиковая прокладка ближе по структуре к непористому гетерогенному диэлектрику, чем к пористой структуре, каковой является бумага (в сравниваемом микрофоне).

Согласно работе [15, с. 47], известно, что "по электрокинетической эффективности пористые материалы можно расположить в ряд: полиэтилен, шамотно-бентонитовая керамика, керамика Государственного НИИ керамической промышленности, кварц, фторопласт-4, стекло, магнелиальная керамика...". На то, что полиэтилен является пористым, укажут и результаты приведенных ниже экспериментов, из которых следует, что отклик микрофона с полиэтиленовым диэлектриком между электродами возможен и при нулевом напряжении накачки $U_0 = 0$.

Макет2 ЭКЯ-микрофона

Между перфорированными электродами такой же матрицы, что и в приведенном выше случае, вместо пластиковой пластины, обернутой несколькими слоями полиэтилена, помещалась пачка бумаги формата А4 толщиной 2 мм.



Зависимость потенциала φ (дБ) на микрофонах от напряжения накачки U_0 (В) для микрофонов на ЭКЯ.
(— — — бумага) и (— · — · пленка)

Результаты экспериментов

Отметим, что приводимые численные результаты носят не абсолютный, а относительный характер. Результаты измерений приведены без привязки к реальным уровням измеряемых величин, а зарегистрированы относительно уровня шумов на спектроанализаторе. Это было сделано в связи с тем, что чувствительность микрофонов сильно зависит от схемы согласования матрицы с измерительным прибором. В данном случае авторов больше интересовали данные измерений с микрофонов по отношению одних к другим.

В ходе экспериментов с динамиками задавалось звуковое поле частотой 1000 Гц.

1. На первом этапе напряжение накачки для обоих микрофонов отсутствовало ($U_0 = 0$). Далее выяснялось давление источника стороннего звукового поля (поля динамика), при котором выходное напряжение u с матрицы на каждом микрофоне начинало превышать уровень шумов на спектроанализаторе². Выяснилось, что надежное обнаружение отклика матриц на дискретной составляющей частотой 1000 Гц составило примерно условные 14 дБ для каждой матрицы. Таким образом, и микрофон-макет1 нормально функционировал при $U_0 = 0$.

2. Затем для обеих матриц осуществлялся процесс накачки, что означало постепенное поочередное увеличение на каждой матрице напряжения накачки U_0 при фиксированной величине звукового поля, соответствующего п. 1.

Результаты экспериментов представлены на рисунке. Верхняя кривая соответствует микрофону-макету2, нижняя — микрофону-макету1 (с твердым диэлектриком между электродами). Из кривых видно, что при росте U_0 микрофон-макет2 быстро входит в режим, когда превышение отклика на акустический сигнал на нем u начинает превышать отклик на микрофоне-макет1 примерно на 20 дБ при одинаковом напряжении накачки.

Таким образом, микрофон-макет1 функционирует при отсутствии накачки при $U_0 = 0$, а при ненулевой накачке ведет себя аналогично микрофону-макету2. Это означает, что физика его работы не соответствует принципу работы конденсаторного микрофона, а совпадает с принципом работы микрофона на ЭКЯ, а именно на явлении потенциала течения, тем более что электроды у этого микрофона были перфорированными³.

Превышение отклика в случае, когда пористой средой является бумага, над откликом в случае пластикового материала можно объяснить боль-

² Эксперименты, разумеется, проводились последовательно: сначала для одного микрофона, затем для другого.

³ На микрофоны на ЭКЯ ограничивалась величина напряжения накачки во избежание пробоя матрицы при больших значениях U_0 .

шой разницей в размере пор этих материалов. В следующей работе авторы вернутся к более тщательному изучению этого явления.

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждено, что микрофон на ЭКЯ, конструктивно весьма схожий с конденсаторным, действительно работает на принципе, отличном от принципа работы конденсаторного микрофона (он также функционирует при нулевой накачке). Показано (см. рисунок), что микрофон на ЭКЯ благодаря накачке может повышать свою чувствительность на величину до примерно 40 дБ. Сравнение двух экспериментальных исследований показывает (см. рисунок), что чувствительность ЭКЯ-микрофона может сильно зависеть от величины пористости диэлектрика, помещаемого между электродами микрофона.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания 075-00780-20-00 по теме № 0074-2021-0013 Министерства науки и высшего образования.

ПРИЛОЖЕНИЕ. СХОДСТВО И ОТЛИЧИЯ ЭКЯ В ЖИДКИХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ И В ВОЗДУХЕ

Согласно [12, с. 534], "электрокинетические явления — совокупность явлений, происходящих в системах, содержащих капилляры или мембраны, размещенные в электролите, при наложении электрического поля, и обратных им эффектов". Согласно [12, с. 536], "электролиты — жидкие и твердые вещества, обладающие ионной проводимостью, т.е. проводники, в которых электрический ток обусловлен движением ионов (проводники второго рода)". Согласно этой же работе [12, с. 536]: "Наиболее широко применяются и хорошо изучены водные растворы электролитов. Для получения растворов электролитов обычно используют полярные жидкости с высокой ϵ (вода, спирт и т.д.)".

Далее, согласно статье "Ионизация" в Википедии: "Газы по большей мере состоят из нейтральных молекул. Однако, если часть молекул газов ионизируется, газ проводит электрический ток". Есть три основных способа ионизации в газах.

1) Термическая ионизация — ионизация, при которой необходимую энергию для отрыва электрона от атома дают столкновения между атомами вследствие повышения температуры.

2) Ионизация электрическим полем — ионизация вследствие повышения значения напряженно-

сти внутреннего электрического поля выше предельного значения. Из этого следует отрыв электронов от атомов газа.

3) Ионизация ионизирующим излучением.

Обычно концентрация ионов в воздухе (ед. в 1 см^3 его объема) лежит в следующих пределах: 400–50 000 для положительных и 600–50 000 для отрицательных ионов (средние показатели соответственно 1500–3000 для положительных ионов и 3000–5000 для отрицательных ионов).

Кроме того, согласно одному из многочисленных сайтов, посвященных ионизации воздуха (<https://zdorovushka-rf.ru/blogs/articles/ionizator-vozduha-vred-ili-polza>), "в городских квартирах, как правило, происходит «перевес» в сторону ионов с положительным зарядом, которые в изобилии излучаются различной бытовой техникой и гаджетами...".

Согласно данным на сайте (<https://weatherarchive.ru/Pogoda/Saint%20Petersbug>), величина относительной влажности воздуха в Санкт-Петербурге (именно в Санкт-Петербурге осуществлялись все эксперименты) распределена в течение года согласно приведенной таблице. Таким образом, воздух в обычных условиях содер-

Распределение влажности воздуха

По месяцам

Санкт-Петербург		
Месяц	t, °C	φ , %
Январь	–5.2°C	86%
Февраль	–5.1°C	83%
Март	–1°C	76%
Апрель	+5.5°C	68%
Май	+11.5°C	64%
Июнь	+16.1°C	67%
Июль	+19.5°C	72%
Август	+17.4°C	75%
Сентябрь	+12.6°C	80%
Октябрь	+6.4°C	83%
Ноябрь	+1.5°C	87%
Декабрь	–2°C	86%
По месяцам	6.4°C	77%

жит воду.

И последнее замечание относительно различий и сходства жидких электролитов и ионизированного воздуха, насыщенного парами воды. Уравнения сохранения импульса движения среды (уравнение Навье—Стокса) в обоих случаях практически тождественны, с учетом того, что и в том, и другом случае в качестве силы действует электрическое поле (электрофорез) либо акустическое поле (потенциал течения). А согласно [2, с. 534], "основную роль в электрокинетических явлениях играют двойной электрический слой, формирующийся на границе раздела фаз, и его поляризация".

Таким образом, с точки зрения постановки физической проблемы о наличии электрокинетических явлений в жидких электролитах и ионизированном воздухе, насыщенном водой, эти две среды эквивалентны по причинам:

- обе среды содержат ионы;
- обе среды содержат жидкость в том или ином виде;
- в обеих средах на границе жидкость (воздух) / твердое тело образуется двойной слой;
- задача об электрокинетических процессах в обеих средах описывается тождественными уравнениями.

Все перечисленное позволяет прийти к заключению о подобии происходящих в этих средах процессов, а именно изучение электрокинетических процессов в одной среде позволяет экстраполировать полученные результаты на случай другой среды и обратно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сергеев В.А., Шарфарец Б.П.* Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Ч. I. Гидродинамический аспект // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 2. С. 25–35.
URL: <http://iairas.ru/mag/2018/abst2.php#abst4>
2. *Сергеев В.А., Шарфарец Б.П.* Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Ч. II. Акустический аспект // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 2. С. 36–44.
URL: <http://iairas.ru/mag/2018/abst2.php#abst5>
3. *Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Шарфарец Б.П., Гуляев Ю.В.* Теоретическое обоснование нового метода электроакустического преобразования. Линейное приближение // Доклады Академии Наук. 2018. Т. 483, № 3. С. 265–268.
4. *Шарфарец Б.П.* Реализация приемной антенны на механизме электрокинетического явления "потенциал течения" // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 2. С. 103–108.
URL: <http://iairas.ru/mag/2019/abst2.php#abst13>
5. *Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Гуляев Ю.В.* О методе электроакустического преобразования, основанном на электрокинетических явлениях // Акуст. журн. 2020. Т. 66, № 4. С. 453–462.
6. *Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А.* О работе электроакустического преобразователя, основанного на электрокинетических явлениях, при турбулентном режиме движения жидкости // Акуст. журн. 2020. Т. 66, № 5. С. 575–580.
7. *Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А.* Об акустоэлектрическом преобразователе, основанном на использовании электрокинетических явлений // Труды всероссийской акустической конференции. СПб.: Политехпресс, 2020. С. 439–444.
8. *Шарфарец Б.П., Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Дмитриев С.П., Телятник С.Г.* Об электроакустическом преобразователе, основанном на использовании электрокинетических явлений // Труды всероссийской акустической конференции. СПб.: Политехпресс, 2020. С. 445–450.
9. *Сапожков М.А.* Электроакустика. М.: Связь, 1978. 272 с.
10. *Эфрусси М.М.* Микрофоны и их применение. М.: Энергия, 1974. 89 с.
11. *Вахитов Ш.Я., Ковалгин Ю.А., Фадеев А.А., Шевьев Ю.П.* Акустика. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 660 с.
12. *Вахитов Я.Ш.* Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура. М.: Искусство, 1982. 415 с.
13. *Яворский Е.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1971. 940 с.
14. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
15. *Касимзаде М.С., Халилов Р.Ф., Балашов А.Н.* Электрокинетические преобразователи информации. М.: Энергия, 1973. 136 с.

ООО "Биопродукт", Москва (Дмитриев С.П.)

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Курочкин В.Е., Шарфарец Б.П.)

Контакты: Шарфарец Борис Пинкусович, sharb@mail.ru

Материал поступил в редакцию 11.02.2021

ABOUT COMPARING CONDENSER AND ELECTROKINETIC MICROPHONES

S. P. Dmitriev¹, V. E. Kurochkin², B. P. Sharfarets²

¹*Bioproduct Ltd, Moscow, Russia*

²*Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia*

Basing on the analysis of the physical features of the operation of the microphone on electrokinetic phenomena, it has been experimentally confirmed that this microphone works on a functional principle different from the principle of operation of a condenser microphone. It is shown that a microphone based on electrokinetic phenomena can increase its sensitivity by up to about 40 dB due to pumping. Comparison of two experimental studies shows that the sensitivity of an electrokinetic microphone can strongly depend on the size of the porosity of the dielectric placed between the electrodes of the microphone.

Keywords: condenser microphone, microphone on electrokinetic phenomena, pump voltage, microphone sensitivity

INTRODUCTION

This work is a continuation of a whole cycle of works by the authors on the study of microphone emitters and receivers of sound vibrations based on the use of electrokinetic phenomena (ECP) [1–8]. The design of electroacoustic transducers based on ECP is in many respects identical to the design of condenser microphones.

A condenser microphone contains two plane-parallel electrodes with (usually) an air gap between them, to which a polarizing (a.k.a. phantom) voltage is applied to charge the capacitor. For the constancy of this charge over time, the capacitor is loaded with a sufficiently large active resistance [9, p. 102].

An ECP microphone consists of two flat perforated electrodes, with a porous structure placed between the electrodes (for example, a pack of paper a few millimeters thick) and called hereinafter a matrix (2D dimensions of the electrodes and paper are the same)¹. A constant electric field (pump voltage) is applied to the electrodes in both modes — emission and reception. In this case, in the mode of sound emission, additionally an alternating electric field is supplied to the matrix and is further transformed into a sound field, and in the case of a microphone, an external acoustic field is supplied to the matrix and is transformed into an electric signal. Due to the presence of nonlinear hydrodynamic processes in the matrix, the energy of a constant electric field is pumped into acoustic energy in the emitter or into the energy of an electric response arising in a microphone under the influence of an external acoustic field.

As can be seen from the above, the layout of both types of microphones is similar in many respects: in both cases a capacitor is structurally present, in both cases a constant electric field is applied to the capacitor plates. The difference is that in the case of a condenser microphone, the electrodes do not have to be necessarily perforated, and in the case of an ECP microphone, there must be a porous structure between the plates.

Comparison of an ECP microphone with a condenser microphone is all the more justified due to the fact that the latter has good electro-acoustic parameters [10, p. 152], such as sensitivity level, bandwidth, etc.

FORMULATION OF THE PROBLEM

This work is devoted to a more detailed study of the similarities and differences in the physical principles of the functioning of both types of microphones mentioned above, as well as to the evidence-based exclusion of the interpretation of an ECP microphone as a particular case of a condenser microphone.

CONDENSER MICROPHONE

Let us get on the design of the classic condenser microphone, invented in 1916 by E. Wente. It is a charged flat capacitor, one of the electrodes of which is massive, and the other is a thin membrane (for a detailed description of condenser microphones, see, for example, [9–12]). The same sources describe in detail the theory of calculating the characteristics of condenser microphones, which is sometimes quite nontrivial. In this work, the authors are mainly interested in a simplified consideration, but conveying the dependence of the sensitivity of a condenser mi-

¹ The appendix provides an explanation of the similarities and differences between ECPs in liquid electrolytes and in air.

crophone on its most important parameters.

The following is a simplified conclusion of the microphone sensitivity, which nevertheless reflects the nature of its dependence on the main parameters of the microphone: the magnitude of the polarizing voltage and the distance between the capacitor plates at rest.

A polarizing voltage is supplied to the capacitor with the initial capacitance $C_0 = \text{const}$ through a high resistance R . When the membrane vibrates under the influence of an acoustic field, the initial distance between the electrodes d_0 gains an increment $x(t)$ that depends on time and is proportional to the acoustic pressure $p(t)$. Thus, the real distance between the plates of the capacitor is equal to $d = d_0 + x(t)$, $x(t) \ll d_0$. The perturbed capacitance of a flat capacitor is determined in SI by the expression [13, p. 360]

$$C(x(t)) = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d_0 + x(t)}, \quad (1)$$

where ε_0 is the electric constant; ε — the relative permittivity of the dielectric inside the capacitor; S — the area of the capacitor plate. We assume that the area of the plate remains unchanged $S = \text{const}$. We further assume that the resulting stress between the plates $U(t)$ is equal to

$$U(t) = U_0 + u(t), \quad (2)$$

where $u(t)$ — the magnitude of the disturbance of the reference voltage U_0 caused by an external acoustic field, which changes the stationary distance between the membranes d_0 by the value $x(t)$.

Since the time constant $\tau = C_0 R \cdot 1$ is large, the statement about the constancy of the capacitor charge $q = q_0 = \text{const}$, where q_0 is the initial charge of the capacitor, is true due to variations in the voltage and capacitance in the capacitor. Then from the definition of capacity [13, p. 360], we write down the formula for determining the capacitance of the capacitor C :

$$C = \frac{q_0}{U}. \quad (3)$$

Obviously, in the unperturbed case (3) has the form $C_0 = \frac{q_0}{U_0}$. From (3) we have

$$U = \frac{q_0}{C}. \quad (4)$$

The last formula in the unperturbed case obviously

takes the form $U_0 = \frac{q_0}{C_0}$.

Let us rewrite (4) taking into account the perturbations:

$$U_0 + u(t) = \frac{q_0}{C(x(t))}. \quad (5)$$

Next, we represent the fraction $\frac{q_0}{C(x(t))}$ in (5) as a series in powers of x with accuracy $O(x^2)$ (the argument t is omitted to simplify the notation)

$$U_0 + u = \frac{q_0}{C(x)} = \frac{q_0}{C_0} + \frac{q_0}{C_0^2} \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \frac{x}{d} + O(x^2),$$

which, after simplification, gives the following expression accurate to the value $O(x^2)$:

$$U_0 + u = U_0 + U_0 \frac{x}{d}. \quad (6)$$

From (6) we have for the perturbation of the voltage across the capacitor (here we will return the argument t)

$$u(t) = U_0 \frac{x(t)}{d}. \quad (7)$$

Thus, the voltage perturbation across the capacitor $u(t)$ is directly proportional to the reference voltage U_0 and the ratio of the perturbation of the distance between the membranes to its undisturbed value $x(t)/d$.

To obtain from (7) the expression for the sensitivity in the case of a harmonic signal, we assume that $u(t) = ue^{-i\omega t}$ and $x(t) = xe^{-i\omega t}$, where u, x are the corresponding amplitudes. It is obvious that in the case of an axial plane acoustic wave incident on the receiver, the following relation applies:

$$x(t) = xe^{-i\omega t} = \int V e^{-i\omega t} dt = -\frac{V}{i\omega} e^{-i\omega t}. \quad (8)$$

The amplitudes of acoustic pressure p and velocity V in a plane harmonic wave are related by the relation [14, p. 74]

$$V = \frac{p}{\rho c},$$

where ρ is the density of the medium, c is the velocity of sound. Then the amplitude of the harmonic disturbance of the membrane in (8) is equal to

$$x = -\frac{V}{i\omega} = -\frac{p}{i\omega\rho c}. \quad (9)$$

Substituting (9) into (7), we have the following formula for the voltage amplitude u in the harmonic mode

$$u = -U_0 \frac{p}{i\omega\rho c d}. \quad (10)$$

Dividing (10) by the pressure amplitude p , we obtain the expression for the axial sensitivity S of the condenser microphone:

$$S = \frac{u}{p} = -\frac{U_0}{i\omega\rho c d}. \quad (11)$$

The simplified expression (11) for the axial sensitivity obtained in the work is based on a number of assumptions by default. Namely, it was assumed above that the condenser microphone is a lumped system; the magnitude of the vibration of the membrane does not take into account its pinching at the edges; only the model of a plane incident acoustic wave is considered; the reaction of the interaction of the sound wave with the membrane is not taken into account (its inertia, associated with the initial tension of the membrane) when expressing the displacement of the membrane through the velocity of the sound wave, etc. Nevertheless, a review of the special literature confirms the following: in all papers on a condenser microphone, the expression for the sensitivity necessarily contains the ratio of the reference voltage U_0 to the thickness of the layer between the microphone plates in a stationary state U_0 / d [9, p. 78]; [10, p. 34, 35]; [11, p. 478]. This value, as it is easy to see, is equal to the magnitude of the electric strength vector of the constant (reference) field on the capacitor $E_0 = U_0 / d$.

The functional feature of a condenser microphone

From the obtained expressions (7) and (11) it can be seen that at zero reference voltage $U_0 = 0$ (at zero amplitude of the vector of the stationary electric field strength $E_0 = U_0 / d$ across the capacitor $E_0 = 0$) **there is no response from the condenser microphone.**

For a better study of the distinctive properties of the ECP microphone, a full-scale experiment was carried out with two microphone models.

FULL-SCALE EXPERIMENT

Model1 of ECU microphone

In a conventional ECP microphone, the porous structure was replaced by a structure in the form of an A4 plastic plate 1 mm thick, wrapped in several layers of polyethylene. The total thickness of this spacer between the perforated metal electrodes was 2 mm. The difference between such a microphone and a classic condenser air microphone is the perforation of the electrodes and the presence of an airless dielectric spacer. This kind of microphone is more associated with a condenser microphone because the plastic spacer is closer in structure to a non-porous heterogeneous dielectric than to a porous structure, which is paper (in the compared microphone).

According to [15, p. 47], it is known that "In terms of electrokinetic efficiency, porous materials can be arranged in a row: polyethylene, chamotte-bentonite ceramics, ceramics of the State Research Institute of the Ceramic Industry, quartz, fluoroplastic-4, glass, magnesia ceramics ...". The fact that polyethylene is porous will also be indicated by the results of the experiments below, from which it follows that the response of a microphone with a polyethylene dielectric between the electrodes is possible even at zero pump voltage $U_0 = 0$.

Model2 of ECP microphone

Between the perforated electrodes of the same matrix as in the above case, instead of a plastic plate wrapped in several layers of polyethylene, a pack of A4 paper 2 mm thick was placed.

Experimental results

Note that the numerical results presented are not absolute, but relative. The measurement results are given without reference to the real magnitudes of the measured values, but relative to the noise level detected by a spectrum analyzer. This was done due to the fact that the sensitivity of the microphones is highly dependent on the matrix matching circuit with the measuring device. In this case, the authors were more interested in the data of microphone measurements in relation to each other.

During the experiments, a sound field with a frequency of 1000 Hz was set from the speakers.

1. At the first stage, there was no pump voltage for both microphones ($U_0 = 0$). Further, the pressure of the source of the external sound field (speaker field)

Dependence of the microphone potential φ (dB) on the pump voltage U_0 (B) for the ECP microphones.

(— — — — paper) and (— · — · film)

was determined, at which the output voltage u from the matrix of each microphone began to exceed the noise level detected by the spectrum analyzer². It turned out that the reliable detection of the matrix response on a discrete component with a frequency of 1000 Hz was approximately 14 dB for each matrix. So, model1 functioned normally if $U_0 = 0$.

2. Then, for both matrices, the pumping process was carried out, which meant a gradual sequential increase in the pump voltage U_0 on each matrix at a fixed value of the sound field corresponding to Section 1.

The experimental results are shown in the figure. The upper curve corresponds to the model2, the lower curve corresponds to the model 1 (with a solid dielectric between the electrodes). It can be seen on the curve that as U_0 grows, model2 quickly enters the mode when the excess of the response to the acoustic signal u begins to exceed the response of the model1 by about 20 dB at the same pump voltage value.

Thus, the model1 functions in the absence of pumping at $U_0 = 0$, and behaves similarly to the model 2 at non-zero pumping. This means that the physics of its operation does not correspond to the principle of operation of a condenser microphone, but coincides with the principle of operation of a ECP microphone, namely, the phenomenon of flow potential, especially since the electrodes of this microphone were perforated³.

The excess of the response in the case when the porous medium is paper over the response in the case of the plastic material can be explained by the large difference in the pore size of these materials. In the next work, the authors will return in more detail for a more thorough study of this phenomenon.

CONCLUSIONS

It has been experimentally confirmed that an ECP microphone, structurally very similar to a condenser microphone, actually works on a principle different from the principle of operation of a condenser microphone (it also functions at zero pumping). It has been

shown (see figure) that an ECP microphone can increase its sensitivity by up to about 40 dB due to pumping. Comparison of the two experimental studies shows (see figure) that the sensitivity of an ECP microphone can strongly depend on the value of the porosity of the dielectric placed between the electrodes of the microphone.

The work was carried out at the Institute for Analytical Instrumentation of the Russian Academy of Sciences within the framework of the State Assignment 075-00780-20-00 on topic No. 0074-2021-0013 of the Ministry of Science and Higher Education.

ATTACHMENT. SIMILARITIES AND DIFFERENCES OF ECP IN LIQUID ELECTROLYTES AND IN AIR

According to [12, p. 534], "electrokinetic phenomena are a set of phenomena, occurring in systems containing capillaries or membranes, located in an electrolyte, when an electric field is applied, and effects opposite to them." According to [12, p. 536], "electrolytes are liquid and solids substances with ionic conductivity, i. e. conductors in which the electric current is caused by the movement of ions (second-class conductors). According to the same work [12, p. 536]:" The most widely used and well studied are aqueous solutions of electrolytes. To obtain electrolyte solutions, polar liquids with high ε (water, alcohol, etc.) are usually used. "

Further, according to the article "Ionization" in Wikipedia: "Gases are mostly composed of neutral molecules. However, if some of the gas molecules are ionized, the gas conducts an electric current. There are three main ways of ionization in gases.

1) Thermal ionization - ionization in which the necessary energy for the detachment of an electron from an atom is given by collisions between atoms due to an increase in temperature.

2) Ionization by an electric field - ionization due to an increase in the value of the strength of the internal electric field above the limiting value. From this follows the separation of electrons from gas atoms.

3) Ionization by ionizing radiation.

Usually the concentration of ions in the air (particles in 1 cm³ of its volume) lies in the following limits: 400–50 000 for positive and 600–50 000 for negative ions (average values are respectively 1500–3000 for positive ions and 3000–5000 for negative ions).

² The experiments, of course, were carried out sequentially: first for one microphone, then for another.

³ The pump voltage was limited to ECP microphones in order to avoid breakdown of the matrix at large values U_0 .

In addition, according to one of the many sites dedicated to air ionization (<https://zdorovushka-rf.ru/blogs/articles/ionizator-vozduha-vred-ili-polza>), "In city apartments, as a rule, there is an overweight towards ions with a positive charge, which are emitted in abundance by various household appliances and gadgets ...".

According to the website <https://weatherarchive.ru/Pogoda/Saint%20Petersburg>, the value of the relative air humidity in St. Petersburg (all experiments were carried out in this location) is distributed throughout the year according to the table. Thus, air normally contains water.

And a final note regarding the differences and similarities between liquid electrolytes and ionized air saturated with water vapor. The equation of conservation of momentum of motion of the medium (the Navier – Stokes equation) is practically identical in both cases, taking into account that in both cases an electric field (electrophoresis) or an acoustic field (flow potential) acts as a force. And according to [2, p. 534], "the main role in electrokinetic phenomena is played by the electric double layer, which is formed at the phase boundary, and its polarization."

Thus, from the point of view of formulating the physical problem of the presence of electrokinetic phenomena in liquid electrolytes and ionized air saturated with water, these two media are equivalent for the following reasons:

- both media contain ions;
- both media contain liquid in one form or another;
- in both media, a double layer is formed at the liquid (air) / solid interface;
- the problem of electrokinetic processes in both environments is described by identical equations.

All of the above allows us to come to the conclusion about the similarity of the processes occurring in these environments, namely, the study of electrokinetic processes in one environment allows us to extrapolate the results obtained to the case of another environment and vice versa.

REFERENCES

1. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. Theory based on electrokinetic phenomena. Part I. Hydrodynamic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 25–35. DOI: 10.18358/np-28-2-i2535 (In Russ.).
2. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. Theory based on electrokinetic phenomena. Part II. Acoustic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 36–44. DOI: 10.18358/np-28-2-i3644 (In Russ.).
3. Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Sharfarets B.P., Gulyaev Yu.V. [Theoretical justification of the new electroacoustic conversion method. Linear approximation]. *Doklady Akademii Nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences], 2018, vol. 483, no. 3, pp. 265–268. (In Russ.).
4. Sharfarets B.P. [Implementation of receiving antenna using mechanism of electrokinetic phenomenon "flow potential"]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2019, vol. 29, no. 2, pp. 103–108. DOI: 10.18358/np-29-2-i103108 (In Russ.).
5. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Gulyaev Yu.V. [On electroacoustic transformation method based on electrokinetic phenomena]. *Akust. zhurn.* [Acoustical Physics], 2020, vol. 66, no. 4, pp. 453–462. (In Russ.).
6. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E., Sergeev V.A. [On operation of electroacoustic transducer based on electrokinetic phenomena in turbulent fluid movement mode]. *Akust. zhurn.* [Acoustical Physics], 2020, vol. 66, no. 5, pp. 575–580. (In Russ.).
7. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E., Sergeev V.A. [About acoustoelectric transducer based on the use of electrokinetic phenomena]. *Trudy vs Rossiyskoy akusticheskoy konferenzii* [Works of the All-Russian Acoustic Conference], St. Petersburg, Politechpress Publ., 2020, pp. 439–444. (In Russ.).
8. Sharfarets B.P., Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Dmitriev S.P., Telyatnik S.G. [About electroacoustic transducer based on the use of electrokinetic phenomena]. *Trudy vs Rossiyskoy akusticheskoy konferenzii* [Works of the All-Russian Acoustic Conference], St. Petersburg, Politechpress Publ., 2020, pp. 445–450. (In Russ.).
9. Sapozhkov M.A. *Elektroakustika* [Electroacoustics]. Moscow, Svyaz' Publ., 1978. 272 p. (In Russ.).
10. Efrussi M.M. *Mikrofony i ich primeneniye* [Microphones and their application]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 89 p. (In Russ.).
11. Vachitov Sh.Ya., Kovalgin Yu.A., Fadeev A.A., Schev'ev Yu.P. *Akustika* [Acoustics]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom Publ., 2009. 660 p. (In Russ.).
12. Vachitov Ya.Sh. *Teoreticheskie osnovy elektroakustiki i elektroakusticheskaya apparatura* [Theoretical foundations of electroacoustics and electroacoustic equipment]. Moscow, Iskuststvo Publ., 1982. 416 p. (In Russ.).
13. Yavorskiy E.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Physics Handbook]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 940 p. (In Russ.).
14. Isakovich M.A. *Obschaya akustika* [General acoustics]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 496 p. (In Russ.).
15. Kasimzade M.S., Chalilov R.F., Balashov A.N. *Elektrokineticheskie preobrazovateli informazii* [Electrokinetic Data Converters]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 136 p. (In Russ.).

Contacts: *Sharfarets Boris Pinkusovich*,
sharb@mail.ru

Article received by the editorial office on 11.02.2021