

УДК 544.638+534.1

© Б. П. Шарфарец, 2019

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИЕМНОЙ АНТЕННЫ НА МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ЯВЛЕНИЯ "ПОТЕНЦИАЛ ТЕЧЕНИЯ"

Показано, что наличие обратимости двух электрокинетических явлений — электроосмоса и потенциала течения — позволяет использовать один и тот же преобразователь, основанный на наличии в капиллярно-пористых структурах развитого двойного электрического слоя, в режиме излучателя и приемника акустических колебаний. Эта обратимость выражена путем записи уравнения Навье—Стокса для случая потенциала течения (приемник), которое оказалось эквивалентным аналогичному уравнению для случая электроосмоса (излучатель). Проведен анализ полученных выражений.

Кл. сл.: электрокинетические явления, электроосмос, потенциал течения, акустический излучатель, акустический приемник, уравнение Навье—Стокса

ВВЕДЕНИЕ

В работах [1, 2] начат цикл статей (целый ряд из которых находится в печати), описывающих физические модели для реализации излучателя нового вида, основанного на использовании такого процесса электрокинетических явлений (ЭЯ), как электроосмос. В этом цикле будут описаны физические процессы, проясняющие принцип действия этого излучателя. Вместе с тем в ЭЯ существует процесс, обратный электроосмосу, носящий название *потенциала течения*. В настоящей работе рассматривается возможность использования процесса потенциала течения для обращения излучателя в приемную акустическую антенну.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

С целью возможности обращения излучающей акустической антенны, работающей на основе процесса электроосмоса, в приемную акустическую антенну необходимо описать математическую модель процесса с использованием такого обратного к электроосмосу феномена ЭЯ, как потенциал течения.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Потенциал течения

Вначале дадим некоторые формулировки [3, с. 534]. ЭЯ — совокупность явлений, происходящих в системах, содержащих капилляры или мембраны, размещенные в электролите, при наложении электрического поля, и обратных к ним эф-

фектов. К ЭЯ относятся: электроосмос, потенциал течения, электрофорез и эффект Дорна. Здесь остановимся на двух ЭЯ: явлении электроосмоса и обратном ему явлении — потенциале течения.

Электроосмос — течение жидкости в капиллярах или пористых телах под воздействием внешнего электрического поля; *потенциалом течения* называется появление электрической разности потенциалов на торцах капилляра или мембраны при течении через них жидкости.

Таким образом, в электроосмосе источником движения жидкости является приложенное к ней внешнее электрическое поле.

Потенциал течения (протекания) — это явление возникновения разности потенциалов при перемещении дисперсионной среды через капиллярно-пористую перегородку. Таким образом, в потенциале течения источником возникновения электрического поля является движение самой жидкости.

Для описания этого явления приведем некоторые сведения. Основную роль в ЭЯ играют двойной электрический слой (ДЭС), формирующийся на границе раздела фаз, и его поляризация. Внешнее электрическое поле, направленное вдоль границы раздела фаз, смещает один из ионных слоев ДЭС по отношению к другому. Это приводит к относительному перемещению фаз — к электроосмосу (и к электрофорезу). При относительном движении фаз, вызываемом внешним механическим воздействием, происходит перемещение ионных слоев ДЭС — пространственное разделение зарядов, т.е. возникает разность потенциалов. Потенциал течения рассматривается на примере проницаемой мембраны, разделяющей резервуары

с электролитом при наличии перепада давления и, следовательно, течения электролита через мембрану [3, с. 534]. Часть ионов одного знака диффузной части ДЭС увлекается течением жидкости, что приводит к появлению разности потенциалов между резервуарами и вызывает появление электрического тока в направлении, противоположном конвективному переносу заряда. Поскольку этот ток возникает в отсутствие перепада потенциала под влиянием движения жидкости, его обычно называют током течения и обозначают $i_{\text{стр}}$. Разность потенциалов, установившаяся при компенсации этих токов называется потенциалом течения. Подробнее см. [4, § 2.5].

В работах [4–7] и ряде других работ приводится выражение, связывающее потенциал течения $\Delta\varphi$ с величиной перепада давления Δp . Однако вследствие отличий приведенных там выражений этой зависимости, в настоящей работе приводится подробный его вывод, основанный на материалах работы [5, § 15.11.4] (где в итоге приведено неверное выражение), описывающих зависимость потенциала течения от перепада давления.

Выражение для потенциала течения

Вывод зависимости потенциала течения от перепада давления приводим, следуя работе [5, § 15.11.4], где эта зависимость получена с помощью аппарата неравновесной термодинамики. Согласно этому подходу, электроосмос и потенциал течения описываются уравнениями термодинамики неравновесных процессов. Средняя скорость жидкости $\bar{V}$, проходящей через мембрану, и плотность тока $\bar{i}$ (записываем эти векторные величины в виде единственных, отличных от нуля проекций) по сечению мембраны связаны с перепадом давления Δp и перепадом потенциала на торцах мембраны $\Delta\varphi$ феноменологическим соотношением неравновесной термодинамики [5, § 15.11.4]

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \Lambda_{11}\Delta p + \Lambda_{12}\Delta\varphi, \\ \bar{i} &= \Lambda_{21}\Delta p + \Lambda_{22}\Delta\varphi,\end{aligned}\quad (1)$$

где кинетические коэффициенты Λ_{11} , Λ_{12} , Λ_{21} , Λ_{22} характеризуют соответственно гидродинамическую проницаемость мембраны, скорость осмотического течения, ток течения и электропроводность электролита. Кинетические коэффициенты удовлетворяют соотношениям Онзагера (теорема Онзагера)

$$\Lambda_{12} = \Lambda_{21}, \quad (2)$$

а вся система (1) является линейной относительно

перепада давления Δp и потенциала течения $\Delta\varphi$. Величины Δp и $\Delta\varphi$ здесь принимаются постоянными.

Найдем последовательно величины Λ_{ij} (далее везде используется система СИ). Скорость осмотического течения V_{e0} в капилляре при условии $a \gg \lambda_D$, где a — радиус капилляра, а λ_D — длина Дебая (примерно равная толщине ДЭС) практически во всем сечении капилляра равна [8, с. 159]

$$V_{e0} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta} E = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta l} \Delta\varphi. \quad (3)$$

Здесь $E = -\frac{\Delta\varphi}{l}$, где E — амплитуда вектора электрической напряженности $\mathbf{E}$, приложенной к жидкости; l — длина капилляра.

Сравнение (1) и (3) дает

$$\Lambda_{12} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta l}. \quad (4)$$

Согласно соотношению Онзагера (2), сразу получаем

$$\Lambda_{21} = \Lambda_{12} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta l}. \quad (5)$$

Для средней скорости $\bar{V}_p$ ламинарного течения в трубке (течение Пуазейля) имеем [9, § 17]

$$\bar{V}_p = \frac{a^2}{8\eta l} \Delta p. \quad (6)$$

Из сравнения (1) и (6) получаем

$$\Lambda_{11} = \frac{a^2}{8\eta l}. \quad (7)$$

Наконец, из второго уравнения (1) получаем, что средняя плотность тока, вызванная потенциалом течения, равна

$$\bar{i}_{\text{стр}} = \sigma E = -\frac{\sigma}{l} \Delta\varphi,$$

где σ — удельная проводимость жидкости. Отсюда и из второго уравнения (1) имеем

$$\Lambda_{22} = -\frac{\sigma}{l}. \quad (8)$$

По определению, потенциал течения $\Delta\varphi$ находится из условия равенства нулю средней плотности тока $\bar{i} = 0$. Тогда из второго уравнения (1) получаем условие для определения потенциала течения

$$\bar{i} = \Lambda_{21}\Delta p + \Lambda_{22}\Delta\varphi = 0. \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражения (5) и (8), окончательно получаем для потенциала течения

$$\Delta\varphi = -\frac{\Lambda_{21}}{\Lambda_{22}}\Delta p = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma}\Delta p. \quad (10)$$

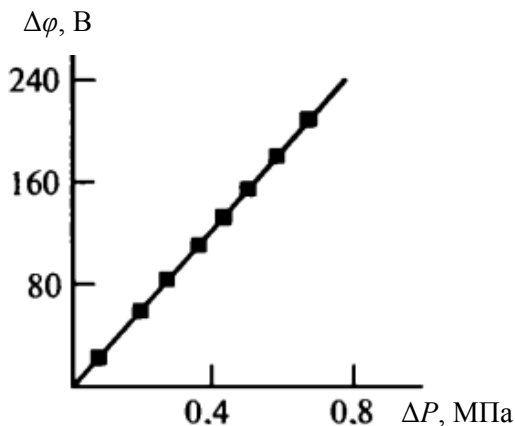
С поправкой на то, что (10) приведено в системе СИ, оно совпадает с точностью до знака, например, с выражением (1.2) в [4, с. 10] или с выражением (IV.16) в [7, с. 184], но не совпадает, как отмечено выше, с выражением (15.112) в работе [5, с. 516], где, по-видимому, присутствует опечатка.

Соотношение (10) показывает, что потенциал течения не зависит от площади сечения капилляра, а задается только величиной перепада давления. Этот результат подтвержден в многочисленных экспериментах для самых многообразных мембран [5, с. 516].

На рисунке (заимствован рисунок 15.12 из [5, с. 516]) представлена зависимость потенциала течения от перепада давления для кварцевого капилляра радиусом 10 мкм при течении через него 1-1 электролита с концентрацией 10^{-2} моль/л. Видно, что величина потенциала течения может иметь достаточно большое значение.

При переходе от индивидуального капилляра к реальной связнодисперсной системе (мембрана или диафрагма) возникают осложнения, связанные со структурой порового пространства, в котором происходит перенос вещества и электрического тока. Однако все описанные закономерности типа (1)–(10) остаются справедливыми, и в этом случае только радиус капилляра и его длина заменяются некоторыми размерными коэффициентами, называемыми структурными факторами [7, с. 184].

В проведенных выше рассуждениях принима-



Зависимость потенциала течения от перепада давления ([5, с. 516])

лось, что величины $\Delta\varphi$ и Δp имеют постоянные значения. Однако в капиллярах, в частности, и в капиллярно-пористых структурах, в целом, величины $\Delta\varphi$ и Δp могут быть переменными по сечению капилляра. Тогда, как видно из цепочки рассуждений (1)–(10) (в этом случае система (1) осредняется по сечению капилляра, а кинетические коэффициенты Λ_{11} , Λ_{12} , Λ_{21} , Λ_{22} уже изначально усреднены), выражение (10) верно и для средних по сечению значений $\Delta\bar{\varphi}$ и $\Delta\bar{p}$

$$\Delta\bar{\varphi} = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma}\Delta\bar{p}. \quad (10a)$$

Кроме того, полученные результаты можно попытаться обобщить на случай переменных во времени величин $\Delta\bar{\varphi}(t)$ и $\Delta\bar{p}(t)$ при условии, что время релаксации зарядов в жидкости* много меньше периодов колебаний величин $\bar{\varphi}(t)$ и $\bar{p}(t)$. Тогда выражение (10) можно переписать в следующем виде

$$\Delta\bar{\varphi}(t) = -\frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma}\Delta\bar{p}(t). \quad (11)$$

Преобразуем (11) в дифференциальную форму. Помножим обе части (11) на $-\rho_e/l$. Имеем (зависимость от времени t опускаем для краткости)

$$-\rho_e \frac{\Delta\bar{\varphi}}{l} = \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \frac{\Delta\bar{p}}{l}. \quad (12)$$

Свяжем выражения (11), (12) с такими величинами, как вектор напряженности электрического поля и градиент давления. При $l = \Delta z \rightarrow 0$ имеем из (12):

$$\begin{aligned} \rho_e \left(-\frac{\Delta\bar{\varphi}}{\Delta z} \right) &= \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \frac{\Delta\bar{p}}{\Delta z} \Rightarrow \\ \Rightarrow \rho_e \left(-\frac{\partial\bar{\varphi}}{\partial z} \right) &= \rho_e \frac{\varepsilon\varepsilon_0\zeta}{\eta\sigma} \frac{\partial\bar{p}}{\partial z}. \end{aligned} \quad (13)$$

Обозначим $\bar{\mathbf{E}} = -\nabla\bar{\varphi}$ — среднее по сечению капилляра значение вектора электрической напряженности, соответствующего потенциалу сечения. С учетом допущения $\bar{\mathbf{E}} = (0, 0, \bar{E})$ из цепочки (13) получаем:

* Во всех, даже плохих проводниках время релаксации зарядов необычайно мало. Так, в морской воде время релаксации порядка $2 \cdot 10^{-10}$ с; даже в таком плохом проводнике, как дистиллированная вода, оно не более $2 \cdot 10^{-6}$ с [10, с. 27].

$$\rho_e \bar{\mathbf{E}} = \rho_e \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \sigma} \nabla \bar{p}. \quad (14)$$

Таким образом, в рамках принятых предположений при проведенных выше выкладках получено, что объемная электрическая сила в уравнении Навье—Стокса $\rho_e \bar{\mathbf{E}}$ (см. [1, 2, 4–6, 11, 12] и др.), действующая при электроосмосе, эквивалентна объемной силе $\rho_e \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \sigma} \nabla \bar{p}$, действующей при потенциале течения.

В случае гармонического процесса с циклической частотой ω выражение (14) переписывается в виде

$$\rho_e \bar{\mathbf{E}}(\omega) = \rho_e \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \sigma} \nabla \bar{p}(\omega). \quad (15)$$

Здесь под $\bar{\mathbf{E}}$ и $\bar{p}$ принимаются модули гармонических величин $\bar{\mathbf{E}} e^{-i\omega t}$ и $\bar{p} e^{-i\omega t}$.

Таким образом, в случае потенциала течения возникает действующая на жидкость средняя объемная сила $\rho_e \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \sigma} \nabla \bar{p}$, которая эквивалентна средней объемной силе $\rho_e \bar{\mathbf{E}}$, характерной для процесса электроосмоса, где $\bar{\mathbf{E}}$ — среднее по сечению капилляра значение вектора напряженности электрического поля, отвечающего потенциалу течения. Это позволяет воспользоваться полной системой уравнений электрогидродинамики [12], представленной усеченно, например, в работах [1, 2, 4–6, 8, 11].

Система уравнений для потенциала течения

Для темы настоящей работы существенным является только уравнение Навье—Стокса (сохранения импульса). Как и в [1, 2, 11, 12], принимаем его в наиболее общем виде для движения вязкой сжимаемой однородной жидкости:

$$\begin{aligned} \rho_\Sigma \left(\frac{\partial \mathbf{v}_\Sigma}{\partial t} + (\mathbf{v}_\Sigma \cdot \nabla) \mathbf{v}_\Sigma \right) = \\ = -\nabla p_\Sigma + \eta \Delta \mathbf{v}_\Sigma + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v}_\Sigma + \rho_{el} \mathbf{E}_0 + \mathbf{F}. \end{aligned} \quad (16)$$

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 электрического поля; $\mathbf{F}$ — внешняя объемная сила, являющаяся источником процесса потенциала течения; ζ — объемная вязкость. Ин-

декс 0 соответствует электроосмотическому процессу, источником которого является электрическое поле $\mathbf{E}_0$; величины без индекса соответствуют процессу потенциала течения, вызванного силой $\mathbf{F}$ (весьма упрощенный вариант такой модели использовался ранее в [6, § 63] при совместном математическом моделировании электроосмоса и потенциала течения).

Подставим в (16) значения суммарных полей. Далее примем, что течение в электроосмотическом процессе ламинарное. Тогда уравнение (16) применительно к стационарному электроосмотическому процессу в несжимаемой жидкости с учетом $\nabla p_0 = 0$ (см., например [1, 11]) принимает вид

$$\begin{aligned} \rho_0 (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 &= \eta \Delta \mathbf{v}_0 + \rho_{el} \mathbf{E}_0, \\ \nabla \cdot \mathbf{v}_0 &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

Здесь полагается, что градиент равновесного давления ∇p_0 равен нулю $\nabla p_0 = 0$.

Акустический процесс (потенциал течения естественно представить как акустический процесс) рассматривается для сжимаемой жидкости в линейаризованном виде, и уравнение сохранения импульса для него получается подстановкой разложений $\rho_\Sigma = \rho_0 + \rho$, $\mathbf{v}_\Sigma = \mathbf{v}_0 + \mathbf{v}$, $p_\Sigma = p_0 + p$ в (16) и вычитанием из него (17):

$$\begin{aligned} \rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 \right) = \\ = -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} + \mathbf{F}. \end{aligned} \quad (18)$$

К уравнению движения (18) следует добавить стандартное линейаризованное уравнение непрерывности для сжимаемой жидкости:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \mathbf{v} = 0. \quad (19)$$

Согласно (14) и (15), имеем соответственно

$$\mathbf{F}(t) = \rho_e \bar{\mathbf{E}}(t) = \rho_e \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \sigma} \nabla \bar{p}(t), \quad (20)$$

$$\mathbf{F}(\omega) = \rho_e \bar{\mathbf{E}}(\omega) = \rho_e \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \sigma} \nabla \bar{p}(\omega). \quad (21)$$

Подставляя в (18) вместо $\mathbf{F}$ его значение из (20) в виде $\rho_e \bar{\mathbf{E}}(t)$ мы по сути дела сводим задачу потенциала течения к линейной акустической электроосмотической задаче:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}_0 \cdot \nabla) \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}_0 \right) =$$

$$= -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{\eta}{3} \right) \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho_e \bar{\mathbf{E}}(t), \quad (22)$$

где $\rho_e \bar{\mathbf{E}}(t)$ определяется из (20).

Уравнение (22) содержит неопределенность, т.к. правая часть (22) содержит осредненное по сечению значение давления $\bar{p}$ искомого акустического давления p (см. (20)). Однако здесь речь идет не об определении параметров течения $\mathbf{v}$, $\mathbf{v}_0$ и p (они полагаются известными), а о возможности решения обратной задачи, т.е. возможности замера величины вектора напряженности $\bar{\mathbf{E}}(t)$, вызванного потенциалом течения и напрямую связанного с акустическим полем $(\mathbf{v}, p)$. Таким образом, уравнение (22) демонстрирует физическую модель процесса использования электроосмотического преобразователя в режиме приемника акустических колебаний.

Замечание

В (22) в отличие от [1, (6)] не пренебрегаем конвективным членом слева, т.е. полагаем, что число Рейнольдса электроосмотического течения $\mathbf{v}_0$ не пренебрежимо мало. Как будет показано в следующих работах, это позволяет получать некоторые качественные отличия по сравнению со случаем, когда электроосмотическое течение отсутствует $\mathbf{v}_0 = 0$.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что наличие обратимости двух электрокинетических явлений: электроосмоса и потенциала течения, позволяет использовать один и тот же преобразователь, основанный на наличии в капиллярно-пористых структурах развитого двойного электрического слоя, и как излучатель, и как приемник акустических колебаний. Эта обратимость выражена в работе путем записи уравнения Навье—Стокса для случая потенциала течения для акустических колебаний (приемник), которое оказалось эквивалентным аналогичному уравнению для случая электроосмоса (излучатель).

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания 075-00780-19-00 по теме № 0074-2019-0013 Министерства науки и высшего образования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сергеев В.А., Шарфарец Б.П.* Об одном новом методе электро-акустического 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. Физическая энциклопедия. Т. 5 / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 760 с.
4. *Духин С.С., Дерягин Б.В.* Электрофорез. М.: Наука, 1986. 332 с.
5. *Ролдугин В.И.* Физикохимия поверхности. Долгопрудный: "Интеллект", 2011. 568 с.
6. *Ньюмен Дж.* Электрохимические системы. М.: Мир, 1977. 464 с.
7. *Шукин Е.Д., Перцов А.В., Амелина Е.А.* Коллоидная химия. М.: Высшая школа, 2004. 445 с.
8. *Bruus H.* Theoretical Microfluidics. Oxford University Press, 2008. 346 p.
9. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика. Т. 6. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
10. *Стрэттон Дж. А.* Теория электромагнетизма. М.-Л.: ОГИЗ, 1948. 539 с.
11. *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. 260–264.
12. *Шарфарец Б.П.* Система уравнений электрогидродинамики применительно к электроосмотическим процессам // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 1. С. 135–142.
URL: <http://iairas.ru/mag/2019/abst1.php#abst20>

*Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург*

Контакты: *Шарфарец Борис Пинкусович,*
sharb@mail.ru

Материал поступил в редакцию 26.10.2018

IMPLEMENTATION OF RECEIVING ANTENNA USING MECHANISM OF ELECTROKINETIC PHENOMENON "FLOW POTENTIAL"

B. P. Sharfarets

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint-Petersburg, Russia

The paper continues the series of publications describing physical processes and models for implementation of a new type of emitter based on the use of electrokinetic phenomenon of electroosmosis. The mathematical description of the phenomenon named "flow potential" and procedure of its adjustment are presented. It is shown that the presence of reversibility of two electrokinetic phenomena: electroosmosis and flow potential—allows using the same transducer based on the presence of a developed double electrical layer, in the acoustic oscillations emitter mode and in the receiver mode. This reversibility is expressed by writing the Navier—Stokes equation for the case of a flow potential (receiver), which turned out to be equivalent to the similar equation for the case of electroosmosis (emitter). The analysis of the obtained expressions is performed.

Keywords: electrokinetic phenomena, electroosmosis, flowpotential, acoustic emitter, acoustic receiver, Navier—Stokes equation

Fig. Dependence of the flow potential on the pressure drop

REFERENCES

1. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. A theory based on electrokinetic phenomena. Part I. The hydrodynamic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 25–35. (In Russ.). DOI: 10.18358/np-28-2-i2535
2. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. A theory based on electrokinetic phenomena. Part II. The acoustic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 36–44. (In Russ.). DOI: 10.18358/np-28-2-i3644
3. Prohorov A.M., ed. *Fizicheskaya ensiklopediya* [Physical encyclopedia]. Vol. 5. Moscow, Bolshaya Rossiyskaya ensiklopediya Publ., 1998. 760 p. (In Russ.).
4. Duhin S.S., Deryagin B.V. *Elektroforez* [Electrophoresis]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 332 p. (In Russ.).
5. Roldugin V.I. *Fizikohimiya poverhnosti* [Surface physical chemistry]. Dolgoprudny, Intellect Publ., 2011. 568 p. (In Russ.).
6. Newman J. *Elektrochimicheskie sistemy* [Electrochemical Systems]. Moscow, Mir Publ., 1977. 464 p. (In Russ.).
7. Schukin E.D., Perzov A.V., Amelina E.A. *Kolloidnaya khimiya* [The colloid chemistry]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2004. 445 p. (In Russ.).
8. Bruus H. *Theoretical Microfluidics*. Oxford University Press, 2008. 346 p.
9. Landau L.D., Lifshiz E.M. *Teoreticheskaya fizika. T. 6. Gidrodinamika* [Theoretical physics. Vol. 6. Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 736 p. (In Russ.).
10. Stretton J.A. *Teoriya elektromagnetizma* [Theory of electromagnetism]. Moscow, Leningrad, OGIz Publ., 1948. 539 p. (In Russ.).
11. Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Sharfarets B.P., Gulyaev Yu.V. [Theoretical justification of a new method of electro-acoustic transformation. Linear approach]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of Academy of Sciences], 2018, vol. 483, no. 3, pp. 260–264. (In Russ.).
12. Sharfarets B.P. [System electrohydrodynamics equations applied to electroosmotic processes]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2019, vol. 29, no. 1, pp. 135–142. Doi: 10.18358/np-29-1-i135142. (In Russ.).

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

Article received by editing board on 26.10.2018