

УДК 681.53

Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. О. Оробей, И. Г. Сухорукова
Белорусский государственный технологический университет

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ФОРМИРОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СИГНАЛА
В ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СДВИГА**

В статье рассмотрен вариант построения математической модели для электрокинетического преобразователя, который использует устройство на основе переменного сдвига. Приведена основная структурная схема построения первичного преобразователя. Использование измерительных преобразователей со сдвиговым эффектом при определенных конструктивных подходах позволяет повысить частоту полезного сигнала и, таким образом, уменьшить влияние паразитных явлений, а также одновременно выполнять измерения электрокинетического потенциала и тока течения.

Математическая модель основана на совместном решении уравнений гидродинамики Навье – Стокса и распределении заряда в двойном электрическом слое в щелевом капилляре с учетом уравнения Пуассона. Рассмотрен случай щелевого капилляра с различными значениями электрокинетического потенциала на стенках. Показано, что постоянный сдвиговый поток может формировать ζ -потенциал/ток течения только при различии электрокинетических свойств поверхностей щелевого капилляра и/или при наличии перепада давления.

Использование простейшей аппроксимации распределения заряда позволило получить временную зависимость тока течения от нестационарного сдвига. Для этого было применено известное решение развития сдвигового движения вязкой жидкости и простейшая аппроксимация распределения заряда в двойном электрическом слое.

Для контроля полученных результатов использованы измерения электрокинетического потенциала в растворах солей.

Ключевые слова: математическая модель, электрокинетический преобразователь, переменный потенциал течения.

D. A. Hryniuk, N. M. Oliferovich, I. O. Orobei, I. G. Suhorukova
Belarusian State Technological University

**MATHEMATICAL MODEL OF FORMATION OF MEASURING
SIGNAL IN ELECTROKINETIC CONVERTER OF VARIABLE SHIFT**

The article discusses the option of constructing a mathematical model for an electrokinetic converter that uses a device based on a variable shift. The main block diagram of the sensing device's construction is given. The use of measuring transducers with a shear effect under certain structural approaches allows to increase the frequency of the useful signal and thus reduce the influence of parasitic phenomena, as well as simultaneously measure the electrokinetic potential and streaming current.

Obtaining a mathematical model is based on the joint solution of the Navier – Stokes hydrodynamics equations and the charge distribution in the double electrical layer in the slit capillary taking into account the Poisson equation. The case of a slit capillary with different values of the electrokinetic potential on the walls is considered. It is shown that a constant shearing flow can form a ζ -potential/streaming current only if the electrokinetic properties of the surfaces of the slit capillary are different and/or in the presence of a pressure drop.

The use of the simplest approximation of the charge distribution allowed us to obtain a time dependence of the streaming current on a nonstationary shift. For this, a well-known solution was used to develop the shear motion of a viscous fluid and the simplest approximation of the charge distribution in an double electrical layer.

To control the results obtained, measurements of the electrokinetic potential in salt solutions were used.

Key words: mathematical model, electrokinetic converter, alternating stream potential.

Введение. В основе технологий дисперсных систем, в том числе и коллоидных, лежат процессы, которые зависят от параметров двойного электрического слоя (ДЭС). Наиболее доступной характеристикой ДЭС является ζ -потенциал, что определяет его использова-

ние в качестве параметра для построения систем оптимального управления технологическими процессами [1].

Широкое применение данного параметра в технологических процессах сдерживается сложностью построения измерительных пре-

образователей. Несмотря на отработанную методику измерения электрокинетических характеристик в научных исследованиях и учебных лабораториях [2], для построения систем управления получили широкое распространение приборы на основе переменного потенциала течения (The Streaming Current Detector). Использование устройств с формированием переменного сигнала позволяет нивелировать паразитные явления, которые сопутствуют устройствам измерения электрокинетического потенциала на постоянном значении тока.

The Streaming Current Detector получил наиболее широкое распространение в технике использования ζ -потенциала для управления процессами очистки сточных вод [3, 4], для производства бумаги [5, 6], в пищевой промышленности [7] и т. д.

Измерительный преобразователь. По совокупности параметров (быстродействие, непрерывность процесса измерения, возможность самоочистки) для построения приборов по измерению электрокинетического потенциала (ЭКП) в промышленных условиях предпочитают метод переменного потенциала (тока) течения. На основе этого метода разработаны детекторы тока течения, принцип действия которых состоит в придании жидкости с помощью поршня возвратно-поступательного движения, в результате чего, благодаря адсорбированным на его внутренних поверхностях частицам, генерируется переменный ток течения, который впервые был предложен в [10]. Данное направление получило наибольшее распространение и продолжает совершенствоваться [11–13]. Однако из-за сложности процессов измерения существуют и другие подходы формирования переменного потенциала с использованием переменного давления [14, 15] либо путем формирования сигнала механическим сдвигом [16].

Для улучшения метрологических характеристик при измерении ЭКП создан первичный преобразователь [16], в котором потенциал (ток) течения генерируется с помощью вращающегося элемента – ротора 2, образующего с внутренней стенкой корпуса (стакана) 3 щелевой капилляр (рис. 1). Благодаря определенной ширине ротора и расположению измерительных электродов 4, 5 на внутренней стенке стакана на них формируется переменный измерительный сигнал. Штуцеры 1 предназначены для организации обмена исследуемой среды. Резистор R1 формирует сигнал тока течения, который усиливается электронным усилителем 6. Пара электродов 5 служит для контроля потенциала течения, который нормируется усилителем 7.

Образование ротором с корпусом нескольких щелевых капилляров с расположением двух и более пар измерительных электродов на внутренних стенках стакана позволяеткратно повысить конечную частоту измерительного сигнала без увеличения влияния межэлектродной емкости (рис. 2). Согласно [17], электрокинетические преобразователи работают в области относительно низких частот (до 10 Гц), поэтому известные детекторы тока течения работают на частоте 4 Гц [10, 11]. Частотные ограничения усложняют процессы фильтрации измерительного сигнала и быстродействие самого преобразователя.

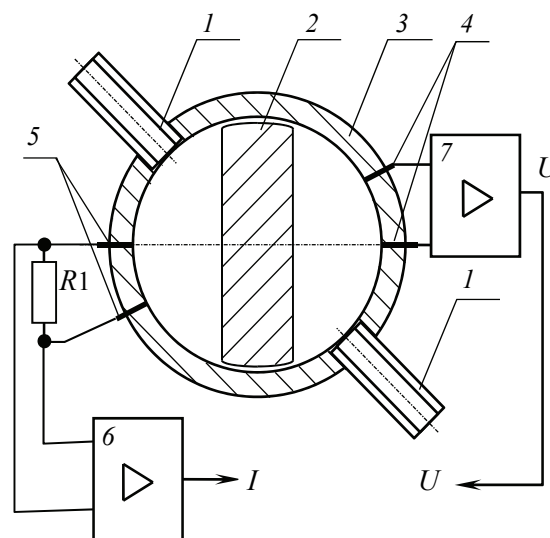


Рис. 1. Структурная схема измерительного преобразователя ЭКП:

1 – штуцеры; 2 – ротор; 3 – корпус; 4, 5 – электроды; 6, 7 – усилители

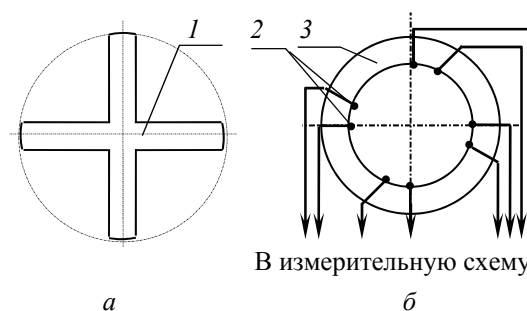


Рис. 2. Конструктивные способы увеличения частоты измерительного сигнала:

а – посредством геометрии ротора; б – за счет увеличения количества пар измерительных электродов; 1 – ротор; 2 – электроды; 3 – корпус

Модель электрокинетических процессов в сдвиговом потоке для предлагаемого преобразователя требует учета влияния свойств исследуемой среды, геометрических и коллоидных характеристик поверхностей материалов ячейки,

параметров согласующих цепей. Проведение измерений с помощью предложенного преобразователя и сравнение с известными литературными данными подтвердили наличие прямой зависимости между электрокинетическими характеристиками поверхности раздела фаз и сигналом, генерируемым на измерительных электродах. Для правильной интерпретации результатов измерений возникла необходимость в приблизительной оценке основных геометрических и электрофизических факторов, оказывающих влияние на измерительный сигнал. Это предполагает решение задачи о перераспределении зарядов при наличии в щелевом капилляре сдвигового потока и перепада давления. Первоначально была решена стационарная задача о перераспределении вещества и зарядов в щелевом капилляре в условиях сдвигового потока с использованием известного подхода, который был применен для нахождения коэффициентов переноса для круглых капилляров [17].

Измерительный сигнал при постоянном сдвиговом потоке. Рассмотрим щелевой капилляр с шириной $2h$ (рис. 3), формируемый вращающимся с частотой ω ротором и неподвижной поверхностью, который заполнен нежидкой ньютоновской жидкостью с динамической вязкостью η и относительной диэлектрической проницаемостью ϵ . Каждая из образующих капилляра поверхностей равномерно заряжена, но удельные плотности зарядов и значения ЭКП на поверхности скольжения ζ_1 и ζ_2 различны, что приводит к неодинаковым функциям распределения потенциалов φ_1 и φ_2 . Учитывая, что радиус ротора $R_0 \gg 2h$, можно рассматривать течение жидкости между двумя параллельными стенками. На стенках капилляра отсутствует шероховатость, а плоскость скольжения жидкости относительно твердого тела лежит за пределами плотной адсорбированной части ДЭС и смещена в область диффузной ионной атмосферы. Движение жидкости в щелевом капилляре обусловлено действием вдоль него постоянного градиента давления, движением одной из стенок и электрическим полем E . Напряжение на электродах при измерении не влияет на работу механической части, так как электроосмотическим давлением, увеличивающим гидравлическое сопротивление (электровязкостный эффект), можно пренебречь [17]. Градиент концентрации вдоль капилляра и диффузия униполярных заряженных ионов не влияют на процесс электрокинетического преобразования и на ионный ток, а также сохраняется суммарный поверхностный заряд в капилляре [18].

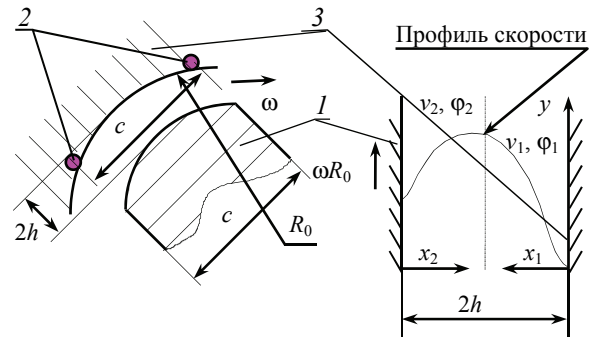


Рис. 3. Щелевой капилляр:
1 – ротор; 2 – электроды; 3 – корпус

Из-за неравноценности вклада в результирующий эффект стенок капилляра его ширину следует разбить на два участка, введя для каждой половины отдельные декартовы системы координат (x_1, y) и (x_2, y) , с последующим сращиванием решений на границе участков. Уравнения Навье – Стокса для скоростей $v_1(x_1)$, $v_2(x_2)$ при стационарном течении жидкости через капилляр и низких числах Рейнольдса могут быть записаны в виде [19]:

$$\begin{cases} \eta \frac{d^2 v_1(x_1)}{dx_1^2} = -\Delta P - E\rho(x_1); \\ \eta \frac{d^2 v_2(x_2)}{dx_2^2} = -\Delta P - E\rho(x_2), \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho_1(x_1)$ и $\rho_2(x_2)$ – плотность заряда в щелевом капилляре на участках $0 < x_1 < h$ и $0 < x_2 < h$ соответственно.

Уравнения Пуассона для каждой полуплоскости, разделяющей капилляр, можно представить как:

$$\rho_1(x_1) = -\epsilon\epsilon_0 \frac{d^2 \varphi_1}{dx_1^2}; \quad \rho_2(x_2) = -\epsilon\epsilon_0 \frac{d^2 \varphi_2}{dx_2^2}. \quad (2)$$

Функции $v_1(x_1)$, $v_2(x_2)$, $\varphi_1(x_1)$ и $\varphi_2(x_2)$ должны удовлетворять следующим граничным условиям:

$$\begin{cases} \varphi_1|_{x_1=0} = \zeta_1; & v_1|_{x_1=h} = v_2|_{x_2=h}; \\ \varphi_1|_{x_1=h} = 0; & \frac{dv_1}{dx_1}|_{x_1=h} = -\frac{dv_2}{dx_2}|_{x_2=h}; \\ \varphi_2|_{x_2=0} = \zeta_2; & \frac{d\varphi_1}{dx_1}|_{x_1=h} = 0; \\ \varphi_2|_{x_2=h} = 0; & \frac{d\varphi_2}{dx_2}|_{x_2=h} = 0; \\ v_1|_{x_1=0} = 0; & \\ v_2|_{x_2=0} = \omega R_0; & \end{cases} \quad (3)$$

Подставляя $\rho_1(x_1)$ и $\rho_2(x_2)$ из (2) в (1) и интегрируя их с использованием граничных условий с учетом того, что

$$-\frac{dp}{dy} = \Delta P = \text{const};$$

$$E = \frac{\Delta U}{c},$$

получаем формулы

$$v_1(x_1) = \frac{\omega R_0 x_1}{2h} + \frac{hx_1 - x_1^2/2}{\eta} \Delta P - \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{c\eta} \left(\zeta_1 - \frac{(\zeta_1 - \zeta_2)}{2h} x_1 - \varphi_1(x_1) \right) \Delta U; \quad (4)$$

$$v_2(x_2) = \frac{\omega R_0 (2h - x_2)}{2h} + \frac{hx_2 - x_2^2/2}{\eta} \Delta P - \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{c\eta} \left(\zeta_2 - \frac{(\zeta_2 - \zeta_1)}{2h} x_2 - \varphi_2(x_2) \right) \Delta U. \quad (5)$$

Первые два члена в (4), (5) выражают конвективный, а третий – электроосмотический перенос жидкости. Объемный расход жидкости через капилляр на единицу его высоты:

$$q = \int_0^h v(x_1) dx_1 + \int_0^h v(x_2) dx_2$$

определится выражением

$$q = \frac{2h^2}{\eta c} \Delta N + \frac{2h^3}{3\eta} \Delta P - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 h (\zeta_1 + \zeta_2) (1 - (G_1 + G_2))}{\eta c} \Delta U, \quad (6)$$

где

$$G_{1,2} = \frac{1}{(\zeta_1 + \zeta_2)h} \int_0^h \varphi_{1,2}(x_{1,2}) dx_{1,2}; \quad (7)$$

$$\Delta N = -\text{grad}(N) = -\frac{\eta R_0 c \omega}{2h}. \quad (8)$$

Примем, что носителями заряда в жидкости являются однозарядные катионы и анионы с одинаковой подвижностью. С учетом того, что в предлагаемом устройстве диффузия не оказывает существенного влияния на перенос ионов в капилляре, плотность электрического тока в аксиальном направлении можно представить в виде

$$J_{1,2}(x_{1,2}) = \lambda_0 E ch(\tilde{\varphi}_{1,2}) + \rho_{1,2}(x_{1,2}) v_{1,2}(x_{1,2}), \quad (9)$$

где λ_0 определяется выражением

$$\lambda_0 = \frac{2F^2 DC_0}{RT}; \quad (10)$$

$$\tilde{\varphi}_{1,2} = \frac{F \varphi_{1,2}(x_{1,2})}{RT}. \quad (11)$$

(11) – это приведенный электрический потенциал ДЭС.

Электрический ток I в растворе между стенками капилляра на единицу его высоты обусловлен действием электрического поля, градиента давления и движением ротора:

$$I = \int_0^h J_1(x_1) dx_1 + \int_0^h J_2(x_2) dx_2 - \omega R_0 \int_0^h \rho(x_2) dx_2. \quad (12)$$

Последнее слагаемое в уравнении (12) учитывает перенос связанного и противоположно-го по знаку заряда движущейся стенкой.

Подставляя в (12) значения $J_1(x_1)$ и $J_2(x_2)$ из (10), а $v_1(x_1)$, $v_2(x_2)$, $\varphi_1(x_1)$ и $\varphi_2(x_2)$ из (3), (4), (6), (7) и проводя интегрирование, получаем:

$$I = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\zeta_1 - \zeta_2)}{\eta c} \Delta N + \frac{2h\lambda_0 (1 - (G_1 + G_2))}{c} \frac{\Delta U}{L} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 h (\zeta_1 + \zeta_2) (1 - (G_1 + G_2))}{\eta} \Delta P, \quad (13)$$

где

$$L = \frac{2h(1 - (G_1 + G_2))}{\sum_{i=1}^2 \left[Q_i + \beta \left(F_i + (-1)^i \frac{\zeta_i (\zeta_1 - \zeta_2) + K_i \zeta_i}{2h} \right) \right]};$$

$$\beta = \frac{(\varepsilon \varepsilon_0)^2}{\eta \lambda_0};$$

$$F_{1,2} = \int_0^h \left(\frac{d\varphi_{1,2}(x_{1,2})}{dx_{1,2}} \right)^2 dx_{1,2}; \quad K_{1,2} = 2h \frac{d\varphi_{1,2}}{dx_{1,2}} \Big|_{x_{1,2}=0};$$

$$Q_{1,2} = \int_0^h ch(\tilde{\varphi}_{1,2}(x_{1,2})) dx_{1,2}.$$

Значения $K_{1,2}$, $G_{1,2}$, $F_{1,2}$, $Q_{1,2}$, а вместе с ними и L , могут быть рассчитаны лишь после нахождения распределений электрических потенциалов $\varphi_{1,2}(x_{1,2})$ внутри капилляра.

При условии $\Delta N = 0$ и равенстве электрокинетических характеристик поверхностей, образующих щелевой капилляр, уравнения (6), (13) приобретают вид, аналогичный выражениям для круглых капилляров [18]:

$$q = \frac{2h^3}{3\eta} \Delta P - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 h (\zeta_1 + \zeta_2) (1 - (G_1 + G_2))}{c\eta} \Delta U;$$

$$I = -\frac{\varepsilon \varepsilon_0 h (\zeta_1 + \zeta_2) (1 - (G_1 + G_2))}{\eta} \Delta P + \frac{2h\lambda_0 (1 - (G_1 + G_2))}{c} \frac{\Delta U}{L}.$$

Для описания гидродинамических и электрических потоков при несовпадении градиентов давления и силы по направлению в уравнениях (6), (13) следует поменять на противоположные знаки перед ΔP . При условии $\Delta P = 0$, $\varphi_1(x_1) = \varphi_2(x_2) = \varphi(x)$, $\zeta_1 = \zeta_2$ возможность возникновения электрического тока при сдвиговом потоке исключается. В то же время при разнице электрокинетических свойств поверхностей может вносить существенное влияние на формирование измерительного сигнала на электродах.

Измерительный сигнал при переменном сдвиговом потоке. В предложенном устройстве для водных растворов только при большом отношении между длиной и шириной капилляра может наблюдаться стационарное состояние, поэтому была рассмотрена нестационарная задача возникновения тока течения в процессе развития гидродинамического течения в щелевом капилляре при резком сдвиге одной из границ капилляра.

Из литературы [20] известно решение о развитии течения в щелевом капилляре:

$$v(x, t) = V \left(1 - \frac{x}{2h} \right) - \frac{2V}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \eta t}{\rho_0 (2h)^2}} \sin \left(\frac{n\pi x}{2h} \right),$$

где $V = \omega R_0$.

Для расчета используется допущение метода тока течения, что $\Delta U \rightarrow 0$ и на гидродинамическое поле наличие ДЭС не оказывает существенного влияния. Тогда конвективную составляющую плотности можно определить как $v(y, t)\rho(y)$, т. е.

$$v(x, t)\rho(x) = V \left(1 - \frac{x}{2h} \right) \rho(x) - \frac{2V\rho(x)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp \left(-n^2 \pi^2 \frac{\eta t}{\rho_0 (2h)^2} \right) \sin \left(\frac{n\pi x}{2h} \right),$$

где ρ_0 – плотность раствора.

Для нахождения амплитуды тока по длине капилляра необходимо проинтегрировать по ширине конвективную составляющую плотности тока. Для первого стационарного слагаемого решение уже получено, поэтому в дальнейшем будет рассматриваться только нестационарный член.

Для первой половины капилляра может быть получено следующее решение с учетом

$$\tilde{i}_2(t) = \int_0^h v_2(x_2, t) \rho_2(x_2) dx_2 = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \eta t}{\rho_0 (2h)^2}} \left[\zeta_2 \frac{n\pi}{2h} + \int_0^h \varphi_2 \sin \left(\frac{n\pi x_2}{2h} \right) dx_2 \right].$$

Для дальнейшего интегрирования была принята аппроксимация:

$$\varphi_2(x_2) = \zeta_2 \exp(-\chi_2 x_2),$$

что привело к следующему решению:

$$\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \eta t}{\rho_0 (2h)^2}} \zeta_2 \frac{n\pi}{2h} \left[1 + \frac{(n\pi)^2}{(n\pi)^2 + (2h\chi_2)^2} \right].$$

Для второй половины щелевого канала имеем:

$$\tilde{i}_1(t) = \int_0^h v_1(x_1, t) \rho_1(x_1) dx_1 = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V}{\pi} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \eta t}{\rho_0 (2h)^2}} \zeta_1 \frac{n\pi}{2h} (-1)^n \left[1 - \frac{(n\pi)^2}{(n\pi)^2 + (2h\chi_1)^2} \right].$$

Если учитывать, что

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^2 \pi^2}{n^2 \pi^2 + d^2 \chi^2} = 1,$$

то мгновенное значение электрического тока по сечению канала можно определить по следующей формуле:

$$\tilde{i}(t) = \tilde{i}_1(t) = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 V \zeta_2}{h} \sum_{n=1}^{\infty} \exp \left(-n^2 \pi^2 \frac{\eta t}{\rho_0 (2h)^2} \right).$$

Для нахождения интегральной составляющей тока, формируемой между электродами, один из которых помещен в точку начала движения движущейся стенки капилляра, а другой в бесконечности, необходимо проинтегрировать уравнение (6):

$$I(t) = \frac{8\varepsilon\varepsilon_0 V h \rho_0 \zeta_2}{\eta \pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n^2} \left[1 - e^{-\frac{n^2 \pi^2 \eta t}{\rho_0 (2h)^2}} \right] \right\}.$$

Если учитывать, что

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6},$$

то окончательно получается следующее выражение:

$$I(t) = \frac{4 \varepsilon \varepsilon_0 V h \rho_0 \zeta_2}{3 \eta} \left[1 - \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n^2} e^{-\frac{n^2 \pi^2 \eta t}{\rho_0 (2h)^2}} \right\} \right].$$

Полученное уравнение для $I(t)$ имеет отличия от результатов, описанных [22] для The Streaming Current Detector. Хотя следует отметить наличие особенностей в возникновении переменного токового сигнала у двух преобразователей.

Последняя формула была использована для исследования электрокинетических свойств поверхности при различных концентрациях солей и показала хорошую корреляцию с литературными данными (рис. 4) [23].

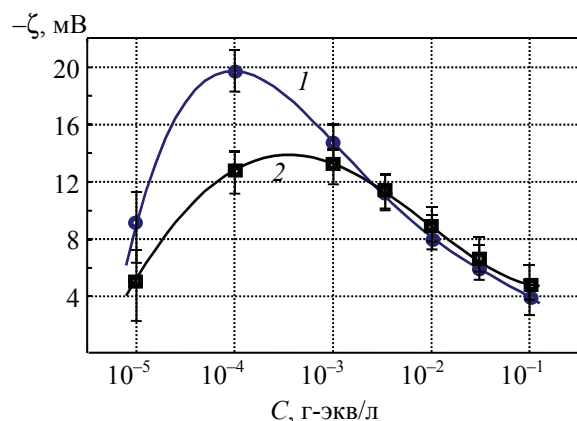


Рис. 4. Зависимость ζ -потенциала для фторопластовой поверхности от концентрации:
1 – NaCl; 2 – KCl

Также следует отметить, что расчетная формула использует идеализированные условия гидравлики. В реальном преобразователе будут наблюдаться различные эффекты, которые приведут к расхождению. Проведенные исследования показали прямо пропорциональное влияние скорости движения и ширины щелевого капилляра на амплитуду измерительного сигнала.

Заключение. Результаты совместного решения уравнений Навье – Стокса и Пуассона для щелевого капилляра показали, что измерительный сигнал на электродах может формироваться только в результате нестационарного сдвига, разности электрокинетических свойств поверхности или искривления профиля скоростей вследствие возникновения перепада давления. Приближенная аппроксимация распределения зарядов в двойном электрическом слое позволила оценить значения величины электрического тока.

Таким образом, предлагаемая концепция построения первичных преобразователей с использованием сдвигового потока может быть применима при разработке приборов измерения электрокинетических свойств, а полученная система уравнений использована для оптимизации конструктивных параметров преобразователей в зависимости от особенности области применения.

Литература

- Hunter R. J. Introduction to Modern Colloid Science. Oxford: Oxford Univ. Press, 1993. 338 p.
- Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena / A. V. Delgado [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. 2007. Vol. 309, issue 2. P. 194–224.
- Sibiya S. M. Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control // Procedia Engineering. 2014. Vol. 70. P. 1211–1220.
- Jia-Qian Jiang. The role of coagulation in water treatment // Current Opinion in Chemical Engineering. 2015. Vol. 8. P. 36–44.
- Валендо П. Ф., Цмыг Н. Г. Совершенствование технологии производства бумаги и картона в БССР. Минск: БелНИИНТИ, 1979. С. 20–32.
- Controlling Coagulation Process: From Zeta Potential to Streaming Potential / D. Ghernaout [et al.] // American Journal of Environmental Protection. Special Issue: Cleaner and Sustainable Production. 2015. Vol. 4, no. 5-1. P. 16–27.
- Nollet L. M. L., Dekker M. Handbook of Food Analysis. Vol. 3: Methods and Instruments in Applied Food Analysis. New York: CRC Press, 2004. 2296 p.
- An Electrokinetic Potential Meter / I. O. Orobei [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. 2005. Vol. 48, no. 4. P. 531–534.
- Преобразователи электрокинетического потенциала гидродисперсных систем / Н. М. Богослав [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. 2011. Вып. 3. С. 106–110.
- Gerdes W. F. A new instrument – the streaming current detector // The 12th National ISA Analysis Instrument Symposium. Houston, Texas, May 11–13, 1966. P. 181–198.
- Dentel K., Thomas A. V., Kingery K. M. Evaluation of the streaming current detector – I. Use in jar tests // Water Research. 1989. Vol. 23, issue 4. P. 413–421.
- Dentel K., Thomas A. V., Kingery K. M. Evaluation of the streaming current detector – II. Continuous flow tests // Water Research. 1989. Vol. 23, issue 4. P. 423–430.
- Fei S. W., Martin F. Development and evaluation of an automated streaming potential measurement device // Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects. 2001. Vol. 194, no. 1-3. P. 221–232.

14. Lauer J. L., Antal P. G. Electrostatic Charge Generation during Nonuniform Flow of Hydrocarbons through Porous Insulators // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1970. Vol. 32, no. 3. P. 407–423.
15. A Low-Cost Automated Streaming Potential Measurement System / R. A. Smith [et al.] // *Journal of Laboratory Automation*. 2012. Vol. 17, no. 2. P. 125–133.
16. Grinyuk D. A., Kuz'mitskii I. F., Orobei I. O. Primary Transducer for Measuring Electrokinetic Characteristics // *Instruments and Experiments Techniques*. 1998. No. 3. P. 409–412.
17. Лидоренко Н. С., Ильин Б. И., Зайденман И. А. Введение в молекулярную электронику. М.: Энергоатомиздат, 1984. С. 217–226.
18. Духин С. С. Электропроводность и электрокинетические свойства дисперсных систем. Киев: Наукова Думка, 1975. С. 52–57.
19. Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries at high zeta-potentials / S. Levine [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1975. Vol. 52, no. 1. P. 136–149.
20. Batchelor G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge university press, 1973. 615 p.
21. Dentel S. K., Kingery K. M. Theoretical Principles of Streaming Current detection // *Water Science & Technology*. 1989. Vol. 21. P. 443–453.
22. Walker C. A., Kirby J. T., Dentel S. K. The Streaming Current Detector: A Quantitative Model // *Journal of Colloid and Interface Science*. 1996. Vol. 182. P. 71–81.
23. Грибанова Е. В., Григоров О. Н., Пасмурнова Г. И. Исследование фильтрационных и электрокинетических характеристик диафрагм из фторопласта-4 // *Журнал прикладной химии*. 1977. Т. 50, № 3. С. 558–563.

References

1. Hunter R. J. *Introduction to Modern Colloid Science*. Oxford, Oxford Univ. Press, 1993. 338 p.
2. Delgado A. V., González-Caballero F., Hunter R. J., Koopal L. K., Lyklema J. Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 309, issue 2, pp. 194–224.
3. Sibiyi S. M. Evaluation of the streaming current detector (SCD) for coagulation control. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 70, pp. 1211–1220.
4. Jia-Qian Jiang. The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2015, vol. 8, pp. 36–44.
5. Valendo P. F., Tsmyg N. G. *Sovershenstvovaniye tekhnologii proizvodstva bumagi i kartona v BSSR* [Improving the technology for the production of paper and cardboard in the BSSR]. Minsk, BelNIINTI Publ., 1979, pp. 20–32.
6. Ghernaout D., Al-Ghonamy A. I., Naceur M. W. Controlling Coagulation Process: From Zeta Potential to Streaming Potential. *American Journal of Environmental Protection. Special Issue: Cleaner and Sustainable Production*, 2015, vol. 4, no. 5-1, pp. 16–27.
7. Nollet L. M. L., Dekker M. *Handbook of Food Analysis. Vol. 3: Methods and Instruments in Applied Food Analysis*. New York, CRC Press, 2004. 2296 p.
8. Orobei I. O., Zharskii S. E., Grinyuk D. A., Kuz'mitskii I. F. An Electrokinetic Potential Meter. *Instruments and Experimental Techniques*, 2005, vol. 48, no. 4, pp. 531–534.
9. Bogoslav N. M., Sukhorukova I. G., Grinyuk D. A., Orobei I. O., Orobei O. I. Converters of electrokinetic potential of hydrodispersed systems. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki* [News Tula State University. Technical science], 2011, issue 3, pp. 106–110 (In Russian).
10. Gerdes W. F. A new instrument – the streaming current detector. *12th National ISA Analysis Instrument Symposium*, 1966, pp. 181–198.
11. Dentel K., Thomas A. V., Kingery K. M. Evaluation of the streaming current detector – I. Use in jar tests. *Water Research*, 1989, vol. 23, issue 4, pp. 413–421.
12. Dentel K., Thomas A. V., Kingery K. M. Evaluation of the streaming current detector – II. Continuous flow tests. *Water Research*, 1989, vol. 23, issue 4, pp. 423–430.
13. Fei S. W., Martin F. Development and evaluation of an automated streaming potential measurement device. *Colloids and Surfaces a Physicochemical and Engineering Aspects*, 2001, vol. 194, no. 1–3, pp. 221–232.
14. Lauer J. L., Antal P. G. Electrostatic charge generation during nonuniform flow of hydrocarbons through porous insulators. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1970, vol. 32, no. 3, pp. 407–423.
15. Smith R. A., Fissell W. H., Fleischman A. J., Zorman C. A. A low-cost automated streaming potential measurement system. *Journal of Laboratory Automation*, 2012, vol. 17, no. 2, pp. 125–133.

16. Grinyuk D. A., Kuz'mitskii I. F., Orobei I. O. Primary Transducer for Measuring Electrokinetic Characteristics. *Instruments and Experiments Techniques*, 1998, no. 3, pp. 409–412.
17. Lidorenko N. S., Il'in B. I., Zaydenman I. A. *Vvedeniye v molekulyarnuyu elektroniku* [Introduction to molecular electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, pp. 217–226.
18. Dukhin S. S. *Elektroprovodnost' i elektrokineticheskiye svoystva dispersnykh system* [Electrical Conductivity and Electrokinetic Properties of Dispersed Systems]. Kiyev, Naukova Dumka Publ., 1975, pp. 52–57.
19. Levine S., Marriot J., Neale G., Epstein N. Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries at high zeta-potentials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1975, vol. 52, no. 1, pp. 136–149.
20. Batchelor G. K. *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge, Cambridge university press, 1973. 615 p.
21. Dentel S. K., Kingery K. M. Theoretical Principles of Streaming Current detection. *Water Science & Technology*, 1989, vol. 21, pp. 443–453.
22. Walker C. A., Kirby J. T., Dentel S. K. The Streaming Current Detector: A Quantitative Model. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1996, vol. 182, pp. 71–81.
23. Griбанова E. V., Grigorov O. N., Pasmurnova G. I. Study of filtration and electrokinetic characteristics of fluoroplast-4 diaphragms. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of Applied Chemistry], 1977, vol. 50, no. 3, pp. 558–563 (In Russian).

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

Олиферович Надежда Михайловна – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

Оробей Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.by

Сухорукова Ирина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Information about the authors

Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

Oliferovich Nadezhda Mikhailovna – assistant lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

Orobei Igor' Olegovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

Suhorukova Irina Gennad'yevna – [Senior Lecturer](#), the Department of Information Systems and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Поступила 15.05.2019