

ЭНЕРГО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Т.Г. Гурская, И.Ю. Петрова

В статье описаны энерго-информационные модели электрокинетических эффектов, использование которых позволит инженерам-конструкторам значительно сократить время при проектировании новых устройств.

Потребность в первичных преобразователях-датчиках неуклонно растет в связи с ростом промышленного производства. Одно из направлений в развитии техники связано с конструированием приборов и устройств, действие которых основано на электрокинетических эффектах.

Механизм электрокинетических явлений основан на существовании двойного электрического слоя на границе раздела фаз. Разноименность зарядов фаз приводит в случае неподвижного пористого тела в электрическом поле к перемещению подвижных противоионов вместе с жидкой фазой к соответствующему полюсу (одноименного с твердой фазой знака). Действие внешней механической силы (давления) вызывает вынос подвижного заряда диффузного слоя и, следовательно, возникновение градиента потенциала в направлении смещения.

Явления относительного движения фаз вдоль поверхности раздела, обусловленные внешним электрическим полем или приводящие к возникновению электрического поля, называются *электрокинетическими*. К ним относятся:

- 1) электроосмос, т.е. движение жидкости относительно неподвижной твердой фазы под действием внешнего электрического поля;
- 2) электрофорез, т.е. движение свободных частиц дисперсной фазы под действием электрического поля;
- 3) потенциал течения, т.е. возникновение электрического поля при механическом движении жидкости относительно неподвижной твердой фазы (под действием внешнего давления);
- 4) потенциал оседания (седиментации), т.е. возникновение электрического поля при механическом движении свободных частиц дисперсной фазы (под действием силы тяжести)¹.

В результате изучения патентной документации за 1950–2007 гг. ведущих стран мира в этой области (России, США, Великобритании, Японии, Польши, Австрии, Германии) было выявлено свыше 200 изобретений, в которых используются электрокинетические эффекты. Это различные электрокинетические и электроосмотические преобразователи, датчики давления, седиментационные преобразователи, которые находят применение в разнообразных сферах – от технологической и строительной до производства медицинского оборудования.

Таким образом, актуальной становится разработка единой модели описания физического принципа действия электрокинетических эффектов.

Для создания единой классификации всех известных физико-технических эффектов и технических реализаций физических эффектов профессором М.Ф. Зариповым и его школой была разработана энерго-информационная модель цепей (ЭИМЦ) различной физической природы, позволяющая описывать физические процессы внутри каждой цепи однотипными уравнениями (критериями ЭИМЦ) с помощью величин-аналогов и параметров-аналогов².

Энерго-информационная модель оперирует следующими величинами: P – величина импульса, Q – величина заряда, U – величина воздействия, I – величина реакции и параметрами: R – сопротивление, $G = I/R$ – проводимость, C – емкость, $W = I/C$ – жесткость, L – индуктивность, $D = I/L$ – дедуктивность.

На основе ЭИМЦ были созданы энерго-информационные модели описания физического принципа действия электрокинетических эффектов.

Рассмотрим энерго-информационную модель эффекта электроосмоса. Принцип действия электроосмотических преобразователей основан на преобразовании входного электрического напряжения в механическое движение жидкости.

Согласно ЭИМЦ аналогом электрического напряжения и, соответственно, входной величиной эффекта электроосмоса является величина воздействия электрической природы цепей, которая выражается формулой:

$$U_{\varepsilon} = \varphi_1 - \varphi_2 [B], \quad (1)$$

где U_{ε} – величина воздействия электрической природы, $\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов.

Выходной величиной эффекта электроосмоса является величина реакции механической природы цепей, выраженная формулой:

$$I_{\text{мл}} = u [м/с], \quad (2)$$

где $I_{\text{мл}}$ – величина реакции механической природы, являющаяся аналогом механической скорости движения u .

В энерго-информационной модели входные и выходные величины между собой связаны коэффициентом передачи. В данной работе ставится задача нахождения значения этих коэффициентов для электрокинетических эффектов.

Уравнение Гельмгольца-Смолуховского³, связывающее объемную скорость электроосмотического движения и силу электрического тока, можно записать в виде:

$$\varepsilon \varepsilon_0 I \zeta = \eta \kappa q, \quad (3)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость, ε_0 – электрическая постоянная, I – сила электрического тока, ζ – электрокинетический или дзета-потенциал, η – коэффициент вязкости, κ – удельная электропроводность жидкости, q – объемная скорость электроосмотического движения.

Объемная скорость электроосмотического движения равна

$$q = S \cdot u, \quad (4)$$

где S – эффективная площадь сечения, а u – линейная скорость движения жидкости.

Удельная электропроводность жидкости равна

$$\kappa = \frac{1}{\rho}, \quad (5)$$

где ρ – плотность электрического тока.

Используем закон Ома для однородного участка цепи

$$I = \frac{U}{R}, \quad (6)$$

где I – сила электрического тока, R – сопротивление участка цепи, U – напряжение на участке цепи.

Учитывая, что $R = \rho \frac{l}{S}$, где l – эффективная длина сечения, проведем преобразования выражения (3), получим (7):

$$u = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta l} U \quad (7)$$

Основой создания ЭИМЦ явилась термодинамика необратимых процессов, которая базируется на феноменологических уравнениях и законах⁴, связывающих обобщенные потоки и силы, действующие в системе:

$$J_i = \sum_j L_{ij} X_j, \quad (8)$$

где J_i – обобщенные потоки, X_j – действующие обобщенные силы, L_{ij} – феноменологические коэффициенты связи потоков и сил.

В качестве потоков рассматривают плотность электрического тока (поток заряда), объемную скорость флюида (жидкости или газа), плотность потока ионов (массоперенос) и плотность потока тепла (теплоперенос). В качестве сил рассматриваются градиенты потенциальных функций системы (электрического потенциала, давления, химического потенциала и температуры).

В работе К.В. Титова⁵ дана феноменологическая характеристика электрокинетических явлений, используя ее, для электроосмоса уравнение (8) можно записать в следующей форме:

$$q = L_{21} \text{grad} U, \quad (9)$$

где q – объемная скорость электроосмотического движения, U – электрическое напряжение, L_{21} – феноменологический коэффициент.

Учитывая, что аналогом скорости в ЭИМЦ является величина реакции механической природы $I_{мл}$, равная (2), а аналогом электрического напряжения является величина воздействия электрической природы $U_{э}$, равная (1), и что $\Delta x = l$, из (9) получим (10):

$$I_{мл} = \frac{L_{21}}{lS} \Delta U_{э} \quad (10)$$

В выражении (10) величина, связывающая $I_{мл}$ и $U_{э}$, является коэффициентом передачи $k_{U_{э}I_{мл}}$, равным (11):

$$k_{U_{э}I_{мл}} = \frac{L_{21}}{lS} \quad (11)$$

Поэтому уравнение (10) можно записать в виде (12), который является формулой эффекта:

$$I_{мл} = k_{U_{э}I_{мл}} U_{э} \quad (12)$$

Учитывая выражения (1), (2) (3), (7) и (12), получаем выражение для искомого коэффициента передачи (13):

$$k_{U_{э}I_{мл}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta l} [A/H] \quad (13)$$

По результатам теоретических и экспериментальных исследований в области физики и техники, имеющимся в различных источниках научно-технической информации, было получено, что значение коэффициента передачи для эффекта электроосмоса находится в диапазоне от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $0,95 \cdot 10^{-6} \frac{A}{H}$.

Принцип действия любого технического устройства основан на взаимодействии цепей различной физической природы. Поэтому в любом техническом устройстве можно условно выделить участки, включающие несколько последовательных элементарных преобразований одной и той же физической природы. Между собой эти участки взаимосвязаны посредством межцепных физико-технических эффектов.

Все это позволяет формализовать описание принципа действия технического устройства в виде параметрической структурной схемы (ПСС), отражающей одно преобразование. Техническое устройство в общем случае представляет собой совокупность таких звеньев, соединенных между собой в определенном порядке, образующем ПСС. Для эффекта электроосмоса ПСС имеет вид (см. рис. 1).

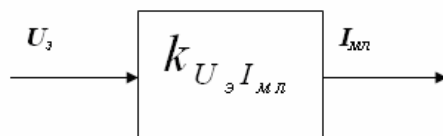


Рис. 1. Элементарное звено ПСС электроосмоса
(внутри прямоугольника записывается коэффициент передачи)

Для электрофореза уравнение Гельмгольца-Смолуховского (3) запишется следующим образом:

$$\zeta = \frac{\eta \nu}{\varepsilon \varepsilon_0} \quad (14)$$

где η – вязкость жидкости, ν – электрофоретическая подвижность частиц.

Учитывая формулы электрофоретической подвижности $v = \frac{h}{t \cdot E} = \frac{v}{E}$ и напряженности поля $E = \frac{U}{l}$, где v – линейная скорость частицы, h – путь, пройденный частицами, t – время, U – разность потенциалов на электродах, l – расстояние между ними, перепишем (14) в виде:

$$\zeta = \frac{\eta v l}{\varepsilon \varepsilon_0 U} \quad (15)$$

Полученная формула (15) идентична формуле (7), отличие состоит в том, что в формуле для эффекта электроосмоса используется линейная скорость движения жидкости u , а в формуле для эффекта электрофореза – линейная скорость частицы v .

Если по аналогии с электроосмосом выразить U через I и R , а линейную скорость частицы выразить через выражение $Q = v \cdot S$, где Q – объемная скорость частицы, S – площадь частицы, получается уравнение:

$$\zeta = \frac{\eta \kappa Q}{\varepsilon \varepsilon_0 I} \quad (16)$$

С учетом термодинамики неравновесных процессов уравнение (6) для электрофореза можно записать в следующей форме:

$$Q = L_{43} \text{grad} U \quad (17)$$

где Q – объемная скорость частицы, L_{43} – феноменологический коэффициент, U – разность потенциалов.

Выразим объемную скорость частицы через линейную скорость:

$$vS = L_{43} \text{grad} U \quad (18)$$

Входной величиной эффекта электрофореза в ЭИМЦ величина воздействия электрической природы, равная (1).

Выходной величиной эффекта электрофореза ЭИМЦ является величина реакции механической (линейной) природы цепей, которая равна скорости движения частицы, т.е.

$$I_{ml} = v.$$

С учетом этого можно записать формулу (18) в виде:

$$I_{ml} = \frac{L_{43}}{S} \text{grad} U = \frac{L_{43}}{S} \frac{\Delta U}{\Delta x} = \frac{L_{43}}{S \Delta x} U, \quad (19)$$

Формула эффекта электрофореза:

$$I_{ml} = k_{U, I_{ml}} U, \quad (20)$$

Формула коэффициента передачи для эффекта электрофореза:

$$k_{U, I_{ml}} = \frac{I_{ml}}{U} [A/H] \quad (21)$$

Используя аппарат параметрических структурных схем, представим эффект электрофореза в виде элементарного звена ПСС (рис. 2).

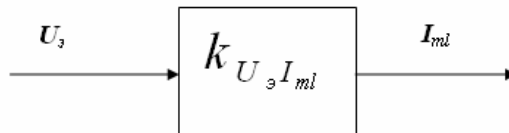


Рис. 2. Элементарное звено ПСС электрофореза

Из (19) и с учетом $\Delta x = l$ получаем формулу для коэффициента внутрицепной связи $k_{U, I_{ml}}$:

$$k_{U, I_{ml}} = \frac{L_{43}}{Sl} \quad (22)$$

Учитывая, что $I_{ml} = u$, перепишем формулу (15) в следующем виде:

$$I_{\text{мл}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta l} U_{\text{э}} \quad (23)$$

Получим выражение для коэффициента внутрицепной связи $k_{U_{\text{э}} I_{\text{мл}}}$

$$k_{U_{\text{э}} I_{\text{мл}}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta l} [A/H] \quad (24)$$

Значение коэффициента внутрицепной связи $k_{U_{\text{э}} I_{\text{мл}}}$ для эффекта электрофореза находится в диапазоне от $0,053 \cdot 10^{-8}$ до $17,83 \cdot 10^{-8}$ А/Н.

В ходе исследования было выяснено, что уравнения (13) и (24) для коэффициентов передачи в эффектах электроосмоса и электрофореза равны друг другу из-за идентичности уравнений (15) и (7), так как электрофорез – явление, обратное электроосмосу по характеру относительного движения фаз.

Подробное описание энерго-информационной модели для эффекта потенциала течения приведено в работе⁶, поэтому в данной статье ограничимся формулой эффекта (25), значением передаточного коэффициента (26) и параметрической структурной схемой (см. рис. 3).

$$I_{\text{э}} = k_{U_h I_{\text{э}}} U_h \quad (25)$$

где $I_{\text{э}}$ – величина реакции электрической природы, U_h – величина воздействия гидравлической природы, а $k_{U_h I_{\text{э}}}$ – коэффициент передачи, равный

$$k_{U_h I_{\text{э}}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta S}{\eta l} [A \cdot \text{м}^2/H] \quad (26)$$

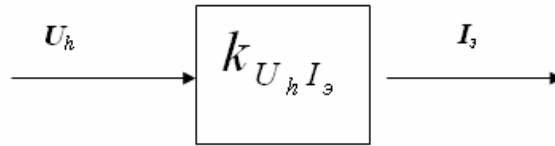


Рис 3. ПСС эффекта потенциала течения

Диапазон численного значения коэффициента передачи для эффекта потенциала течения находится в пределах от $0,012 \cdot 10^{-12}$ до $0,126 \cdot 10^{-12}$ $A \cdot \text{м}^2/H$.

Рассмотрим энерго-информационную модель эффекта потенциала седиментации. Формула Смолуховского для эффекта потенциала седиментации имеет вид:

$$\zeta = \frac{3\eta \kappa U_{\text{сед}}}{4\pi R^3 (\rho - \rho_0) n_0 g \varepsilon \varepsilon_0} \quad (27)$$

где R – радиус частиц, $U_{\text{сед}}$ – потенциал седиментации, ρ и ρ_0 – соответственно плотности частицы и среды, n_0 – число частиц в единице объема и g – ускорение силы тяжести.

С учетом термодинамики неравновесных процессов уравнение (8) для потенциала седиментации можно конкретизировать в следующей форме:

$$j = L_{34} \text{grad} W, \quad (28)$$

где W – удельная потенциальная энергия частиц в единице объема среды, равная $W = \frac{mgl}{V}$ [Дж/м³],

L_{34} – феноменологический коэффициент, j – плотность электрического тока оседания, равная $j = \frac{I}{S}$ [А/м²].

С учетом того, что свободные частицы дисперсной фазы двигаются под действием силы тяжести вдоль оси Y, можно записать:

$$I = L_{34} S \frac{dW}{dl} \approx L_{34} S \frac{\Delta W}{\Delta l} \quad (29)$$

Подставив значение величины удельной потенциальной энергии частиц в единице объема среды и учтя, что $V = Sl$, получим

$$I = \frac{L_{34}}{l} F \quad (30)$$

Входной величиной для данного эффекта является сила тяжести, равная

$$F = \frac{4}{3} \pi R^3 (\rho - \rho_0) n_0 g \quad (31)$$

Ее аналогом в ЭИМЦ служит величина воздействия механической (линейной) природы цепей, выраженная формулой

$$U_{мл} = F[H] \quad (32)$$

Выходной величиной для данного эффекта является величина реакции электрической природы цепей, равная

$$I_3 = \frac{dQ_3}{dt} [A] \quad (33)$$

Используя величины-аналоги ЭИМЦ и учитывая, что $U_{ce0} = I_3 R_3$, выражение (28) можно записать

$$I_3 R_3 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta}{\eta \kappa} U_{мл} \quad (34)$$

Учтем, что $R = \rho \frac{l}{S}$ и $\kappa = \frac{1}{\rho}$, получим

$$I_3 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta S}{\eta l} U_{мл} \quad (35)$$

Коэффициентом передачи является величина, равная

$$k_{U_{мл} I_3} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \zeta S}{\eta l} [A/H] \quad (36)$$

Формула эффекта для потенциала седиментации:

$$I_3 = k_{U_{мл} I_3} U_{мл} \quad (37)$$

Параметрическая структурная схема для эффекта потенциала седиментации представлена на рис. 4.

Значение коэффициента передачи для потенциала седиментации $k_{U_{мл} I_3}$ находится в пределах от $0,02 \cdot 10^{-10}$ до $6 \cdot 10^{-6} \text{ А} \cdot \text{м}^2/\text{Н}$.

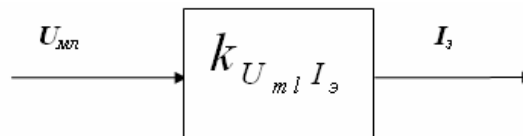


Рис. 4. ПСС для эффекта потенциала седиментации

Проведенное исследование позволяет создать формализованное описание электрокинетических эффектов в виде паспорта для каждого ФТЭ. Пример паспорта для эффекта потенциала течения приведен в статье⁶.

Подобного рода формализованные описания физико-технических эффектов позволяют получать скелетные конструкции соответствующих вариантов принципа действия и на их основе конструировать новые технические решения. Авторами статьи были созданы конструкции двух новых устройств под названием «Электрокинетический преобразователь» и «Электрокинетический датчик на МДП-транзисторе», на которые были получены патенты РФ на полезные модели в Федеральном институте промышленной собственности.

Таким образом, разработанные в процессе исследования энерго-информационные модели электрокинетических эффектов могут быть использованы в инженерно-конструкторских работах при создании различных датчиков давления, а также для пополнения автоматизированных банков данных описаний физических эффектов и явлений.

¹ **Григорьев О.Н., Карпова И.Ф., Козьмина З.П., Тихомолова К.П., Фридрихсберг Д.А., Чернобережский Ю.М.** Руководство к практическим работам по коллоидной химии. Л.: Химия, 1964. С. 175.

² **Зарипов М.Ф., Зайнуллин Н.Р., Петрова И.Ю.** Энерго-информационный метод научно-технического творчества: Учеб.-метод. пособие. М.: ВНИИПИ, 1988, 124 с.

³ **Фридрихсберг Д.А.** Курс коллоидной химии. Л.: Химия, 1974. С. 209–221.

⁴ **Пригожин И., Конденпури Д.** Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / Пер. с англ. Ю.А. Данилова и В.В. Белого. М.: Мир, 2002. С. 337–361.

⁵ **Титов К.В.** Электрокинетические явления в горных породах и их применение в геоэлектрике: Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. М.: Рос. гос. б-ка, 2003. 198 с.; <http://diss.rsl.ru>

⁶ **Гурская Т.Г., Зарипова В.М.** Энерго-информационная модель для эффекта потенциала течения // Известия Волгоград. гос. техн. ун-та: межвуз. сб. науч. ст. Волгоград: ВолгГТУ, 2007. № 9 (35). С. 100–103. (Сер. «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 3)