

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В АВТОНОМНОМ ГЕНЕРИРОВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ

Е.Г. Порсев¹, А.Н. Борзенков¹, Е.Ю. Абрамов¹, А.А. Чернов¹, М.В. Рожкова¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20,
г. Новосибирск, 630073, Россия

Аннотация: Невозможность регулярного применения накопительных устройств при геологоразведке (аккумулятора, блока питания) делает актуальным использование возобновляемых источников энергии. В статье приведено теоретическое исследование электрокинетических явлений, заключающееся в том, что в дисперсных материалах диэлектрической природы на границах раздела твёрдый диспергированный диэлектрик – вода возникает двойной электрический слой, причиной возникновения которого являются полиненасыщенные связи на поверхности раздробленного диэлектрика, притягивающие молекулы воды из окружающего пространства. Толщина двойного электрического слоя составляет не более 3–5 диаметров молекулы воды. При наложении на эту систему внешнего электрического поля двойной электрический слой приходит в движение, увлекая за собой окружающую воду – происходит массоперенос воды в неподвижной пористой «диафрагме». Это явление создания гидравлического напора под действием электрического поля называют электроосмосом. Явление, обратное электроосмосу, называют осмо-ЭДС. Для оценки потенциальной возможности извлечения электрической энергии из водоносных пластов необходимо определить не только коллоидные характеристики дисперсной фазы мембраны, но и фильтрационные характеристики этого грунта. Для выбора электроэнергопроизводящего пласта, очевидно, необходимо задаваться электрической мощностью источника и необходимой ЭДС. Предложена схема электроосмотического генератора, с помощью которой можно получать разность потенциалов электрической энергии ЭДС для электропитания различных приборов геологической экспедиции в походных условиях. Полученные в процессе исследования результаты возможно применять в практических ситуациях, основываясь на данных, приведённых в таблицах, а также на выполненных расчётах.

Ключевые слова: электрокинетика, потенциал течения, осмо-ЭДС, влажные дисперсные материалы, поверхностные явления, двойной электрический слой, безмашинная гидроэлектростанция.

Для цитирования: Порсев Е.Г., Борзенков А.Н., Абрамов Е.Ю., Чернов А.А., Рожкова М.В. Использование электрокинетических явлений в автономном генерировании электрической энергии при геологоразведке // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 141–155. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_141.

The use of electrokinetic phenomena in the autonomous generation of electrical energy in geological exploration

E. G. Porsev¹, A. N. Borzenkov¹, E. Yu. Abramov¹, A. A. Chernov¹, M. V. Rozhkova¹

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia

Abstract: Abstract The impossibility of regular use of storage devices during geological exploration (battery, power supply) makes the use of renewable energy sources relevant. The article presents a theoretical study of electrokinetic phenomena, which consists in the fact that in dispersed materials of dielectric nature, a double electric layer appears at the interface of a solid dispersed dielectric – water, the cause of which is polyunsaturated bonds on the surface of a fragmented dielectric, attracting water molecules from the surrounding space. The thickness of the double electric layer is no more than 3-5 diameters of the water molecule. When an external electric field is applied to this system, the double electric layer moves, dragging the surrounding water with it – water mass transfer occurs in a stationary porous «diaphragm». This phenomenon of creating hydraulic pressure under the action of an electric field is called electroosmosis. The reverse phenomenon of electroosmosis is called osmo-EMF. To assess the potential possibility of extracting electrical energy from aquifers, it is necessary to determine not only the colloidal characteristics of the dispersed phase of the membrane, but also the filtration characteristics of this soil. To select an electricity-producing reservoir, it is obviously necessary to set the electrical power of the source and the necessary EMF. A scheme of an electroosmotic generator is proposed, with the help of which it is possible to obtain a potential difference of electric energy EMF for powering various instruments of a geological expedition in field conditions. The results obtained in the course of the study can be applied in practical situations, based on the data given in the tables, as well as on the calculations performed.

Key words: electrokinetics, flow potential, osmotic emf, wet dispersed materials, surface phenomena, double electric layer, machine-less hydroelectric power plant.

For citation: Porsev E. G., Borzenkov A. N., Abramov E. Yu., Chernov A. A., Rozhkova M. V. The use of electrokinetic phenomena in the autonomous generation of electrical energy in geological exploration. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):141–155. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_141.

1. Введение

Совокупность электрокинетических явлений включает: электроосмос, электрофорез, осмо-ЭДС и форо-ЭДС. Явления эти были открыты в начале 19 века и продолжают изучаться до настоящего времени [1, 2].

Суть электрокинетических явлений заключается в том, что в дисперсных материалах диэлектрической природы на границах раздела твёрдый диспергированный диэлектрик – вода возникает двойной электрический слой, причиной возникновения которого являются полиненасыщенные связи

на поверхности раздробленного диэлектрика, которые и притягивают молекулы воды из окружающего пространства [3]. Как известно, дипольные молекулы воды выстраиваются таким образом, что притягиваются одноимёнными полюсами к поверхности диэлектрика (дисперсной частицы) – таким образом, в воде вдоль границы раздела возникают электроразряженные слои, имеющие поочерёдно положительный и отрицательный заряды (двойной электрический слой) [4, 5]. Часто толщина двойного электрического слоя составляет не более 3–5 диаметров молекулы

воды. При наложении на эту систему внешнего электрического поля двойной электрический слой приходит в движение, увлекая за собой окружающую воду — происходит массоперенос воды в неподвижной пористой «диафрагме». Это явление создания гидравлического напора под действием электрического поля называют электроосмосом [6].

Установлено, что явление, обратное электроосмосу, может продуцировать электрическое поле под действием гидравлического напора, это явление называют потенциалом течения. В силу сложившихся в физике традиций следовало бы назвать это явление осмо-ЭДС. К этому же классу явлений можно отнести электрофорез и форо-ЭДС [7].

В связи с тем, что влажные сплошные среды минерального происхождения (влажные дисперсные материалы) состоят из дисперсной фазы [8] — диспергированных скальных пород и дисперсионной среды (слабых растворов электролитов в воде), процесс электрокинетического энергопереноса в них имеет свои особенности:

1) неоднородность размеров капилляров, которая обусловлена большим диапазоном поперечных размеров дисперсных частиц — это приводит к перерасходу электрической энергии, затрачиваемой на нагрев дисперсионной среды в крупных капиллярах;

2) наличие в растворе (дисперсионной среде) индифферентных и неиндифферентных электролитов (многокомпонентность среды), приводит к падению электрокинетического потенциала, то есть к росту удельных энергозатрат на массоперенос;

3) отличие водородного показателя среды (рН) от нейтральной, приводит к снижению электрокинетического потенциала по разным причинам;

4) зависимость удельных энергозатрат на массоперенос от содержания

в системе влажного дисперсного материала;

5) зависимость удельных энергозатрат на массоперенос от температуры системы влажного дисперсного материала; как правило, электрокинетический потенциал уменьшается с ростом температуры;

6) нестабильность электрофизических и электрохимических характеристик, зависящих от множества природных факторов;

7) наличие в обрабатываемой системе большого количества попутных явлений и процессов, которые приводят к появлению релаксации всех силовых градиентов полей и, соответственно, к дополнительным потерям энергии.

Иллюстрацией гетеропористости реальных сплошных сред могут быть экспериментальные данные, полученные Ломизе Г. М. и Нетушилом А. В. [9] для грунтов.

Отсюда — главной особенностью процесса электрокинетической обработки дисперсных материалов минерального происхождения являются относительно высокие удельные энергозатраты на процесс, зависимость удельных энергозатрат от большого числа неуправляемых и трудно контролируемых факторов вследствие многокомпонентности и гетерогенности дисперсной фазы. По этой причине в материале могут происходить сразу несколько явлений: электроосмос и электрофорез и т.д. По этой причине найти оптимальный режим работы системы для генерирования электроэнергии — непростая задача.

Цели научного исследования:

1) проведение обзора и анализа электрокинетических явлений (электроосмос, электрофорез, осмо-ЭДС, форо-ЭДС);

2) описание материалов и методов, проведение электроосмотических экс-

периментов, обработка экспериментальных данных на основе расчётов и графиков;

3) обсуждение полученных результатов экспериментальных исследований с помощью математического описания;

4) подведение итогов исследования в разделе «Выводы».

2. Материалы и методы

Во многих дисперсных материалах почвогрунтов присутствуют минеральные частицы, представляющие дисперсную фазу, а в качестве среды выступает вода. Процесс электрокинетического энергопереноса выражается следующими особенностями:

а) разность объемов капилляров. Гетеропористость зависит от большой дисперсии частиц и приводит к увеличенному потреблению энергии средой для собственного объема;

б) многокомпонентность электролитного состава дисперсионной среды. Наличие потенциалобразующих электролитов приводит к снижению дзета-потенциала по нескольким причинам. В первую очередь — ввиду способности ионов электролита достраивать кристаллическую решётку дисперсной фазы, а также в результате роста количества неадсорбирующихся ионов.

в) отличие водородного показателя среды — pH от нейтральной влияет на электрокинетический потенциал дисперсных частиц, так как «водородные и гидроксильные ионы обладают высокой способностью адсорбироваться; первые — благодаря малому радиусу, что позволяет им близко подходить к поверхности твёрдой фазы; вторые — из-за большого дипольного момента» [10–13]. Для дисперсионной среды почвогрунтов отклонение pH в кислую или щелочную сторону представляется частым явлением;

г) обусловленность концентрацией дисперсной фазы. Дисперсное разведение системы увеличивает χ -потенциал, так как толщина двойного электрического слоя (ДЭС) увеличивается. Вместе с тем разбавление приводит к экстракции потенциалопределяющего иона с поверхности дисперсной фазы, что в свою очередь вызывает падение дзета-потенциала. Это типичное явление при электрофорезе высококонцентрированных сточных вод;

д) температура обработки. Повышение температуры сопровождается ростом χ -потенциала. Это наблюдается в ходе увеличения интенсивности теплового движения противоионов и увеличения потенциального барьера ДЭС. По мере порождения процесса высока вероятность развития десорбции потенциалопределяющих ионов, при котором χ -потенциал уменьшится [14];

е) неустойчивость свойств дисперсной фазы, выводимая логически из физической природы частиц дисперсной фазы и химической активности дисперсионной среды.

Из описанного возможно выделить две отличительные черты электрокинетической обработки. Это существенные удельные энергозатраты на электроосмос и их зависимость от большого числа неуправляемых и трудноконтролируемых факторов ввиду допущений существующих моделей и теории [15, 16].

Рассогласование воздействия извне и оси капилляра формулирует задачу в пространственной системе координат, относящейся к реальному физическому пространству [17].

В ходе исследований авторами были проведены электроосмотические эксперименты с несколькими сортами глинозема для проверки влияния электрического поля на поток воды внутри этих материалов. Небольшие образцы как фарфоровой глины (каолин), так

и красной художественной глины оставляли высыхать в одной и той же среде (примерный состав используемых глин — в табл. 1). Из каждого материала было изготовлено по три равновесных образца. Каждый образец помещали в неглубокую пластиковую чашку с алюминиевым экраном с каждой стороны глины.

На верхний электрод одного из образцов подавалось положительное напряжение. Другой имел отрицательное напряжение, приложенное к верхнему электроду. К третьему образцу напряжение не прикладывалось. Потерю веса изучали путем периодической перекодировки веса трех образцов.

Поскольку ионы, несущие ток, представляют собой катионы, ожидалось, что образец с отрицательным электродом сверху будет сохнуть быстрее всего, а образец с отрицательным электродом внизу — медленнее. Полученные результаты показали, что образцы с приложенными перепадами напряжения теряли вес быстрее. Образцы с противоположной полярностью показали

обратное поведение. Каолин и красная глина показали одинаковые тенденции. Пример результатов показан на рис. 1.

Возможная интерпретация результатов основана на эмпирическом опыте. В случае положительного нижнего электрода воду, как и предполагалось, накачивали, так что верхний экран намокал и разрыхлялся (рис. 2, а). В случае отрицательного верхнего электрода вода просачивалась вблизи соединительного провода и краев контейнера (рис 2, б). Это можно интерпретировать как воду, перекачиваемую вниз (в ожидаемом направлении) к дну контейнера, а затем просачивающуюся вверх из-за ее более высокого давления вверх через трещины, образовавшиеся вокруг проволоки и вокруг стенок контейнера [18].

Уменьшение размера пор может привести к аналогичным результатам за счет выдавливания воды из пор. В обоих случаях наличие большего количества водных участков на поверхности вызывает более высокую скорость испарения воды и, следовательно, более быстрое снижение веса образца.

Таблица 1
Примерный состав глинозема
Approximate clay composition

Соединения	Белая глина, %	Красная глина, %
SiO ₂	44,72	64,27
Al ₂ O ₃	39,20	16,41
Fe ₂ O ₃	0,36	7,04
TiO ₂	1,76	1,06
CaO	0,22	0,23
MgO	0,01	1,55
K ₂ O	0,01	4,07
Na ₂ O	0,01	0,40
SO ₃	0,02	–
P ₂ O ₅	0,10	0,17
F ₂	–	–
Потери при сжигании	13,55	4,78
Другие	0,22% влаги	–

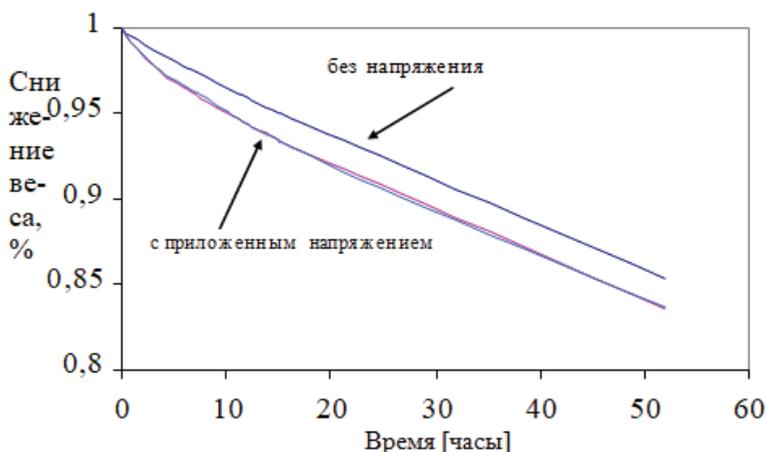


Рис. 1. Процентное уменьшение веса с течением времени для образцов каолина с приложением напряжения и без него

Fig. 1. Percent weight loss over time for kaolin samples with and without stress

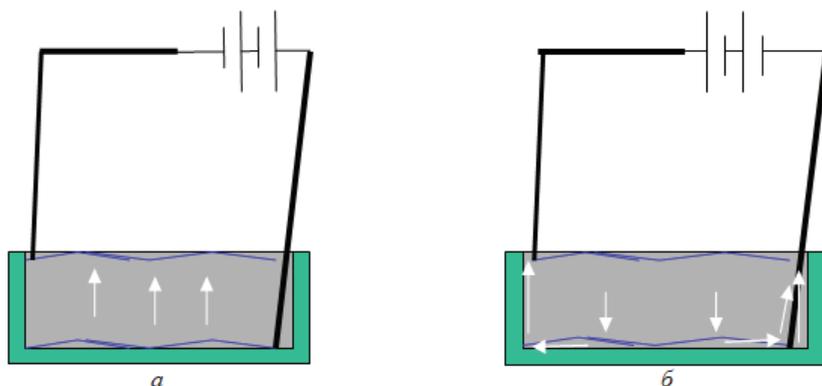


Рис. 2. Интерпретация поведения глины при подаче напряжения различной полярности на основе наблюдений (стрелки обозначают направление потока воды)

Fig. 2. Interpretation of the behavior of clay when applying voltage of different polarity based on observations (arrows indicate the direction of water flow)

Этому объяснению способствует тот факт, что разница возникает в первые несколько часов.

Был проверен эффект нагревания Джоуля – Томсона [14], и подводимой электроэнергии оказалось недостаточно для испарения воды, что вызвало значительную разницу в потере веса. Например, через 15 часов образцы с приложенным напряжением потеряли около 0,4 грамма воды больше, чем без ввода напряжения. Подведенная

энергия испарила только 0,001 грамма. Влияние нагрева проверяли также на температуру образца. Подводимой электрической мощности было недостаточно для существенного повышения температуры образца (менее 0,2 °С за весь эксперимент).

Таким образом, было доказано, что полезная работа осуществляется работой электроосмоса и термовлагопроводности, остальные процессы лишь увеличивают удельные энергозатраты

и являются паразитными [19, 20]. На основе анализа описанных процессов возможно сформировать следующую рабочую гипотезу:

а) физические процессы: потери пьезометрического напора, потери влагонепроводности, потери осмоса — оказывают влияние на энергетику обезжелезивания, но выделить их эффекты очень сложно;

б) паразитные электрические процессы составляют большую долю суммарных потерь энергии;

в) минимизация паразитных электрических процессов на энергозатраты возможна при изменении параметров энергии, т.е. замене постоянного тока на обработку другими видами электрической энергии [21, 22].

Давление и массоперенос зависят от пьезометрического напора и могут как добавить давление, так и оказать противодействие массопереносу. Упомянутое положение эмпирически подтверждается согласно [23] и не противоречит теории.

3. Результаты и обсуждение

Реальная картина электрокинетических явлений должна описываться уравнениями удельных энергозатрат и производства электрической энергии в абстрагированном математическом пространстве (рис. 3).

Необходимость решения задачи в пространственной системе координат, соответствующей реальному физическому пространству, возникает при рассогласовании внешнего силового воздействия и оси капилляра, а также при гармоническом внешнем силовом воздействии [20], что наиболее адекватно реальным условиям процесса.

$$E - V_{cp} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 3 \text{квadrанты} - \text{электроосмос} \\ 2 + 4 \text{квadrанты} - \text{осмо-ЭДС} \end{array} \right\}$$

плоскость электроосмоса;

$$E - V_{\phi} \left\{ \begin{array}{l} 5 + 7 \text{квadrанты} - \text{электрофорез} \\ 6 + 8 \text{квadrанты} - \text{форо-ЭДС} \end{array} \right\}$$

плоскость электрофореза;

$V_{cp} - V_{\phi}$ — плоскость энергомассопереноса под действием механических сил при отсутствии двойного электрического слоя.

В свете вышеописанной физической картины явления гипотеза о производстве электрической энергии безмашинным способом очень привлекательна. Поэтому, начиная со времени открытия явления потенциала течения, делались попытки освоить это направление. Так, были проведены [2] измерения потенциала течения, электрического сопротивления и адсорбции ионов на образцах рутила в водных растворах в зависимости от состава и концентрации электролита. Вычислены значения ζ — потенциала, поверхностной проводимости k_s и подвижности ионов. Обнаружены высокие значения поверхностного заряда и k_s по сравнению с $x k_s$, а также заметные величины k_s в изоэлектрической точке.

Проводились также теоретические исследования преобразования энергии в электрокинетических процессах с участием многокомпонентных смесей [3]. Установлено, что течение жидкости через пористое тело с заряженной поверхностью может быть использовано для преобразования механической энергии (имеется в виду потенциальная энергия перепада давлений и кинетическая энергия движения потока воды в объеме водонасыщенного пласта) в электрическую. Эффективность преобразования η может быть определена теоретически. Максимальное значение η_m рассчитывалось по теории Моррисона и Остерле [9]. Найдено $\eta_m \approx 10^{-6}$ — это значит, что большая часть подводимой механической энергии диссипирует, превращаясь в теплоту.

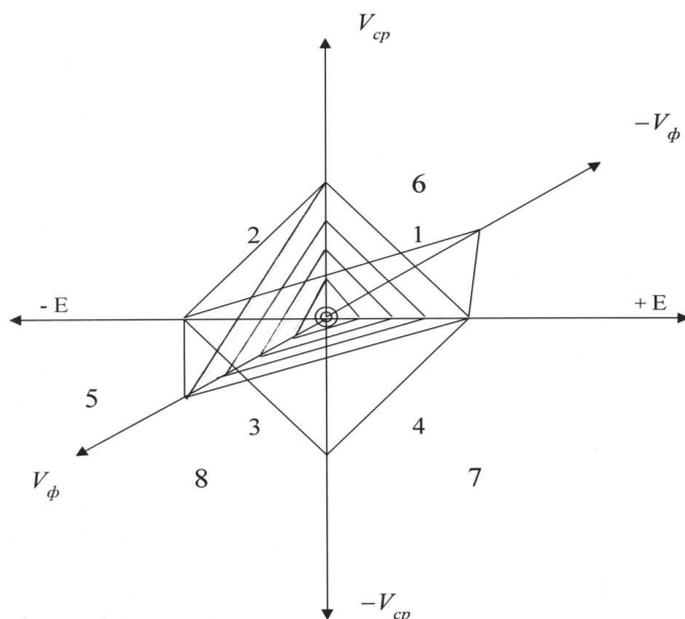


Рис. 3. Пространство совокупности явлений энергопереноса в дисперсных материалах: E — напряжённость электрического поля; V_{cp} — направление и скорость движения дисперсионной среды; V_{ϕ} — направление и скорость движения дисперсной фазы
 Fig. 3. The space of the totality of energy and mass transfer phenomena in dispersed materials: E — electric field strength; V_{cp} — direction and speed of motion of the dispersed medium; V_{ϕ} — direction and speed of motion of the dispersed phase

Для определения реального коэффициента преобразования энергии перепада давлений на мембране проводились эксперименты [4]. КПД преобразования энергии перепада давления в электрическую понимается как

$$\eta = -\frac{i_d \cdot \phi_d}{Q \cdot P} \quad (1)$$

где P — перепад давления между поверхностями мембраны; $i_d \phi_d$ — электрический ток и скачок потенциала в измерительном приборе; Q — объёмная скорость жидкости в мембране.

Экспериментально установлено [4], что $\eta \approx 1...4\%$.

Очевидно, что такие результаты настораживают и дают повод практикам не рассматривать подобный вариант автономного электроснабжения. В то же

время практиков интересует не общая эффективность процесса преобразования энергии, а интегральные характеристики получаемой электрической энергии на выходе. Исходя из этого предположения, можно абстрагироваться от энергетической эффективности (1) и перейти к производству электроэнергии, применяя известные зависимости.

Используя решение уравнения Пуассона — Больцмана [5] для малых потенциалов, можно получить зависимость между средней объёмной плотностью заряда в резервуарах ρ_0 и возникающей между резервуарами разностью потенциалов ΔU :

$$\Delta U = \frac{RT}{e^2 F^2 c} \cdot \rho_0, \quad (2)$$

где e — заряд основного потенциалопределяющего иона; c — концентрация

раствора электролита, моль/см³; F — число Фарадея; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

В ходе рассуждений предполагается, что в системе имеет место постоянный градиент давления $P = (p_1 - p_2)/l$ (перепад уровней воды между верхним и нижним бьефами плотины) и величина $E = \Delta U$ имеет постоянное установившееся значение. Выражение для суммарного электрического тока примет следующий вид:

$$I = \frac{1}{h} \int_0^h \rho v dy - \lambda(1+k)\Delta U, \quad (3)$$

где λ — электропроводность раствора; $\rho(y)$ — объёмная плотность заряда в порах; k — коэффициент, учитывающий поверхностную электропроводность; δ_s — поверхностная плотность заряда адсорбционного слоя; u_s — подвижность ионов в адсорбционном слое.

$$k = u_s \delta_s / h\lambda. \quad (4)$$

Учитывая, что срыв двойного электрического слоя возможен только при перетекании воды из верхнего бьефа в нижний, т.е. в объёме V , со скоростью v , можно учесть поперечное сечение мембраны из выражения

$$\frac{Vl}{AS_m} \cdot \Delta U = I; \quad (5)$$

$$v = \frac{1}{\eta} \left\{ \frac{Py}{2}(y-2h) + \frac{\varepsilon\phi_0}{4\pi} \left[\frac{ch\chi(h-y)}{ch\chi h} - 1 \right] \Delta U \right\}, \quad (6)$$

где y — координата, отсчитываемая от поверхности стенки пор, вглубь раствора (точнее поверхности скольжения); η — вязкость жидкости; ε — диэлектрическая постоянная жидкости; ϕ_0 — потенциал поверхности скольжения; χ — константа Дебая; h — средняя ширина поры.

Очевидно, что дальнейший расчёт можно вести исходя из механики грунтов [6], откуда из закона ламинарной фильтрации Дарси следует:

$$V = k_\phi \frac{H}{L}, \quad (7)$$

где L — длина пути фильтрации; k_ϕ — коэффициент фильтрации.

Очевидно, что для инженерной практики создания автономных электрогенерирующих устройств (например, для геологоразведочных партий) лучше подходит другая методика [1], основанная на электрофоретической подвижности коллоидных частиц (уравнение Гельмгольца — Смолуховского).

Приближённая теория электрокинетических явлений приводит к следующему уравнению для величины осмо-ЭДС в виде разности потенциалов электрического поля на мембране:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 P}{4\pi\eta} \zeta, \quad (8)$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; ε — диэлектрическая постоянная дисперсионной среды; η — коэффициент внутреннего трения — вязкости дисперсионной среды; γ — удельная электропроводность дисперсионной среды; P — давление, вызывающее относительное перемещение фаз по границе раздела между ними, в случае осмо-ЭДС это, чаще всего, гидростатическое давление на “мембрану” (разница высот анода и катода); ζ — потенциал течения (дзета-потенциал), определить из выражения (8);

Кроме того, уравнение (8) после учёта размеров взвешенных дисперсных частиц для форо-ЭДС или пор для осмо-ЭДС принимает вид по Антропову [8]:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 P}{4\pi\eta} SE\xi, \quad (9)$$

где S — сечение взвешенной частицы (или поры); E — напряжённость электрического поля в направлении, параллельном границе раздела дисперсной фазы и дисперсионной среды.

По Остерли [9], эта зависимость для установившегося режима имеет несколько иной вид:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon(-\phi)}{\eta\sigma} \Delta p - \frac{l}{\sigma S_{np}} I. \quad (10)$$

На рис. 4 представлена схема электроосмотического генератора, с помощью которой можно получать разность потенциалов электрической энергии (ЭДС) для электропитания различных приборов геологической экспедиции в походных условиях.

Проводя вычисления по формуле (10) и определяя разность потенциала между анодом и катодом (см. рис. 4) для грунта (тонкораздробленный кварц), найдем коэффициент электро-

Таблица 2

Характеристики водопроницаемых грунтов
Characteristics of permeable soils

№ п/п	Название грунта	Пористость	Удельная теплопроводность,	Автор
1	Ил слюдястый с прослоями супеси ненарушенной структуры	46,9	$0,5 \cdot 10^{-3}$	Рельтов Б. Ф.
2	То же нарушенной структуры	46,0	$1,0 \cdot 10^{-3}$	То же
3	Суглинок серый ненарушенной структуры	44,3	$0,51 \cdot 10^{-3}$	То же
4	Тяжелый моренный суглинок нарушенной структуры	43,0	$4,4 \cdot 10^{-3}$	Мухин А. Л.
5	То же	40,0	$4,0 \cdot 10^{-3}$	То же

Таблица 3

Электроосмотические характеристики грунтов
Electro-osmotic characteristics of soils

№ п/п	Название грунта	Коэффициент электро-осмоса $k_3 \cdot 10^{-5}$, см ² /сек	Коэффициент фильтрации k_f , см/сек	Влажность, %	Автор
1.	Фракция кварца 0,01 мм	3,2	—	30,6	Зиангиров Р. С., СССР, 1956 г.
2.	То же	2,2	—	47,6	То же
3.	Мелкораздробленная слюда	6,9	$2,9 \cdot 10^{-3}$	49,7	То же
4.	Тонкораздробленный кварц	4,3	$0,79 \cdot 10^{-4}$	23,5	То же
5.	Тонкозернистый песок	4,1	—	26,0	То же
6.	Тонкораздробленный кварц	6,8	$9,3 \cdot 10^{-4}$	—	Бернатчик Г. С. СССР, 1958 г.
7.	Мучнистый песок	$0,94 \cdot 10^{-5}$	—	—	То же

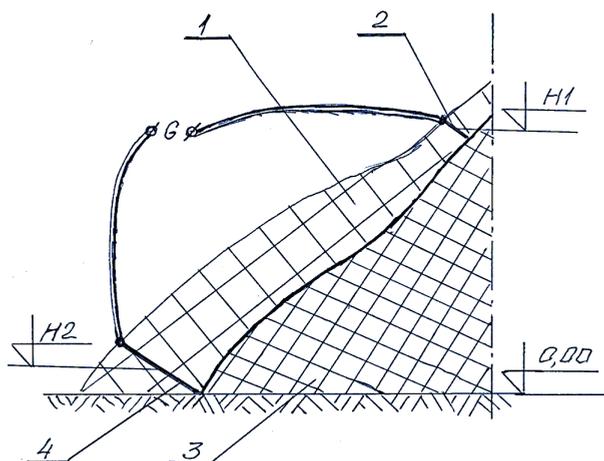


Рис. 4. Схема электроосмотического генератора: 1 – электрокинетический грунт – диафрагма, 2 – анод, 3 – скальная подложка, 4 – катод

Fig. 4. Scheme of an electro-osmotic generator: 1 – Electrokinetic soil – diaphragm, 2 – anode, 3 – rock substrate, 4 – cathode

осмоса – $4,3 \cdot 10^{-5}$ см²/с, коэффициент фильтрации – $0,79 \cdot 10^{-4}$ см/с, влажность – 23,5%.

Для проведения численного анализа определения потенциала течения (осмо-ЭДС) целесообразно использовать данные, полученные институтом гидротехнического строительства СССР [7]. В табл. 2 приведены характеристики водопроницаемых грунтов, в табл. 3 содержатся электроосмотические характеристики грунтов.

Преимущества представленной модели:

1) возможность исключить применение накопителей электроэнергии (аккумулятор, блок питания, портативное зарядное устройство);

2) простота конструктивного исполнения модели.

Недостатки:

1) отсутствие системы управления для плавной регулировки напряжения и тока;

2) крупногабаритные размеры конструкции модели.

4. Выводы

1. Установлено, что оптимальным физическим процессом для извлечения

электрической энергии из водоносных пластов в геологоразведке может быть электроосмос.

2. Для оценки потенциальной возможности извлечения электрической энергии из водоносных пластов необходимо определить не только коллоидные характеристики дисперсной фазы мембраны, но и фильтрационные характеристики этого грунта.

3. Для выбора электроэнергопроизводящего пласта, очевидно, необходимо задаваться электрической мощностью источника и требуемой ЭДС.

4. Предложена схема электроосмотического генератора, с помощью которой можно получать разность потенциалов электрической энергии (ЭДС) для электропитания различных приборов геологической экспедиции в походных условиях.

Практические результаты исследования: на основе полученной модели появилась возможность питания электроустановок (АКБ, освещение) от возобновляемых источников энергии.

Научные результаты исследования: получены зависимости на основе про-

странства совокупности явлений энерго-массопереноса в дисперсных материалах (величины, входящие в состав зависимо-

стей — напряжённость электрического поля, направление и скорость движения дисперсионной среды и фазы).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В.* Электропривод современных шахтных подъёмных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

2. *Рыжаков В. В., Холуденева А. О., Рыжаков М. В.* Исследования корреляционных связей процессов электроосмоса и сопутствующих // Межотраслевой научно-технический журнал «Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России». — 2015. — № 3. — С. 41–43.

3. *Серов А. Д., Аксенова И. В.* Применение явления электроосмоса для предохранения от увлажнения конструкций исторических зданий при реконструкции и реставрации // Промышленное и гражданское строительство. — 2014. — № 6. — С. 54–57.

4. *Письменская Н. Д., Никоненко В. В., Мельник Н. А., Пурселли Ж., Ларше К.* Влияние характеристик границы ионообменная мембрана/раствор на массоперенос при интенсивных токовых режимах // Электрохимия. — 2012. — Т. 48 — № 6. — С. 677–697.

5. *Сологаев В. И.* О применении электроосмоса при защите от подтопления земель // Вестник Омского ГАУ. — 2017. — Т. 27 — № 3. — С. 122–129.

6. *Kholudeneva A. O.* The study of the characteristics of electroosmotic porous waste dehydration subject to the influence of the physical model of osmosis and voltage dynamics // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018, vol. 10 (10), pp. 2142–2146.

7. *Ryzhakov V. V., Holudeneva A. O.* Drying processes of wet materials: Environmental problem and choice of the theoretical, circuitry and experimental directions of their solutions // International Journal of Applied Engineering Research. 2017, vol. 12 (14), pp. 4638–4643.

8. *Pai M. Y., Siddhartha S.* Effect of Building Orientation and Window Glazing on the Energy Consumption of HVAC System of an Office Building for Different Climate Zones // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015, vol. 4 (9), pp. 838–843. DOI: 10.17577/IJERTV4IS090754.

9. *Ломизе Г. М., Нетушил А. В.* Электроосмотическое водопонижение. — Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1958. — 176 с.

10. *Chan F. S., Tan C. K., Ratnayake P., Junaidi M. U. M., Liang Y. Y.* Reduced-order modelling of concentration polarization with varying permeation: Analysis of electro-osmosis in membranes // Desalination. 2020, vol. 495, p. 13. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114677.

11. *Godinez-Brizuela O. E., Niasar V. J.* Simultaneous pressure and electro-osmosis driven flow in charged porous media: pore-scale effects on mixing and dispersion // Journal of Colloid and Interface Science. 2019, vol. 561, pp. 162–172. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.11.084.

12. *Ratnayake P., Bao J.* Actuation of spatially-varying boundary conditions for reduction of concentration polarisation in reverse osmosis channels // Computers & Chemical Engineering. 2017, vol. 98, pp. 31–49. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.11.045.

13. *Hideyuki S., Koshi U.* Experimental demonstration of closing and opening motions of an elastic valve using induced charge electroosmosis in a flow // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021, vol. 628, p. 7. DOI.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127334.

14. Ling J., Han B., Xie Y., Dong Q., Sun Y., Huang B. Laboratory and field study of electroosmosis dewatering for pavement subgrade soil // *J. Cold Reg. Eng.* 2017, vol. 31, Issue 4, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CR.1943-5495.0000136](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000136).

15. Zhao X.-D., Liu Y., Gong W.-H. Analytical solution for one-dimensional electro-osmotic consolidation of double-layered system // *Computers and Geotechnics*. 2020, vol. 122, p. 10. DOI:10.1016/j.compgeo.2020.103496.

16. Sorokova, S. N.; Efremenkov, E. A.; Valuev, D. V.; Qi, M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics* 2023, 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.

17. Zhang Y., Lian G., Dong C., Cai M., Song Z., Shi Y., Wei Z. Optimizing and understanding the pressurized vertical electro-osmotic dewatering of activated sludge // *Process Safety and Environmental Protection*. 2020, vol. 140, pp. 392–402. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.016

18. Zhuang Y. Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics // *Geotextiles and Geomembranes*. 2021, vol. 49(3), pp. 757–770. DOI:10.1016/j.geotextmem.2020.12.006.

19. Cao B., Zhang Y., Shi Y., Ren R., Wu H., Zhang W., Wang D., Zhang T., Xiong J. Extracellular organic matter (EOM) distribution characteristic in algae electro-dewatering process // *Journal of Environmental Management*. 2020, vol. 265, p. 9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110541.

20. Степаненко В. П. К вопросу повышения ресурсосбережения на автономных электростанциях в республике Саха (Якутия) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 62–68. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-62-68.

21. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi, M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles // *Mathematics*. 2023, vol. 11, p. 536. <https://doi.org/10.3390/math11030536>.

22. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption // *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

23. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex // *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>. 

REFERENCES

1. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevryev Y. V. Electric drive of modern mine hoisting machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5–2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.

2. Ryzhakov V. V., Kholudeneva A. O., Ryzhakov M. V. Research correlations electro and related processes. *Intersectoral scientific and technical journal "Defence complex scientific and technological progress of Russia"*. 2015, no. 3, pp. 41–43. [In Russ].

3. Serov A. D., Aksenova I. V. The use of electroosmosis for protection of structures of historic buildings against humidification in the course of reconstruction and restoration. *Industrial and Civil Engineering*. 2014, no. 6, pp. 54–57 [In Russ].

4. Pis'menskaya N. D., Nikonenko V. V., Mel'nik N. A., Pourcelli G., Larchet G. Effect of the ion-exchange-membrane/solution interfacial characteristics on the mass transfer at severe current regimes. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2012, vol. 6(48), pp. 610–628. [In Russ].

5. Sologaev V. I. About of the application of electroosmosis in protecting against underflooding of land. *Bulletin of the Omsk SAU*. 2017, vol. 3(27), pp. 122–129. [In Russ].

6. Kholudeneva A. O. The study of the characteristics of electroosmotic porous waste dehydration subject to the influence of the physical model of osmosis and voltage dynamics. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018, vol. 10 (10), pp. 2142–2146.
7. Ryzhakov V. V., Holudeneva A. O. Drying processes of wet materials: Environmental problem and choice of the theoretical, circuitry and experimental directions of their solutions. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12 (14), pp. 4638–4643.
8. Pai M. Y., Siddhartha S. Effect of Building Orientation and Window Glazing on the Energy Consumption of HVAC System of an Office Building for Different Climate Zones. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2015, vol. 4 (9), pp. 838–843. DOI: 10.17577/IJERTV4IS090754.
9. Lomize G. M., Netushil A. V. Electroosmotic water reduction. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat. 1958, 176 p. [In Russ].
10. Chan F. S., Tan C. K., Ratnayake P., Junaidi M. U. M., Liang Y. Y. Reduced-order modelling of concentration polarization with varying permeation: Analysis of electro-osmosis in membranes. *Desalination*. 2020, vol. 495, p. 13. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114677.
11. Godinez-Brizuela O. E., Niasar V. J. Simultaneous pressure and electro-osmosis driven flow in charged porous media: pore-scale effects on mixing and dispersion. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019, vol. 561, pp. 162–172. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.11.084.
12. Ratnayake P., Bao J. Actuation of spatially-varying boundary conditions for reduction of concentration polarisation in reverse osmosis channels. *Computers & Chemical Engineering*. 2017, vol. 98, pp. 31–49. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.11.045.
13. Hideyuki S., Koshi U. Experimental demonstration of closing and opening motions of an elastic valve using induced charge electroosmosis in a flow. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021, vol. 628, p. 7. DOI.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127334.
14. Ling J., Han B., Xie Y., Dong Q., Sun Y., Huang B. Laboratory and field study of electroosmosis dewatering for pavement subgrade soil. *J. Cold Reg. Eng.* 2017, vol. 31. DOI.org/10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000136.
15. Zhao X.-D., Liu Y., Gong W.-H. Analytical solution for one-dimensional electro-osmotic consolidation of double-layered system. *Computers and Geotechnics*. 2020, vol. 122, p. 10. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103496.
16. Sorokova, S. N.; Efremenkov, E. A.; Valuev, D. V.; Qi, M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics* 2023, 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.
17. Zhang Y., Lian G., Dong C., Cai M., Song Z., Shi Y., Wei Z. Optimizing and understanding the pressurized vertical electro-osmotic dewatering of activated sludge. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020, vol. 140, pp. 392–402. DOI: 10.1016/j.psep.2020.05.016.
18. Zhuang Y. Large scale soft ground consolidation using electrokinetic geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*. 2021, vol. 49(3), pp. 757–770. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2020.12.006.
19. Cao B., Zhang Y., Shi Y., Ren R., Wu H., Zhang W., Wang D., Zhang T., Xiong J. Extracellular organic matter (EOM) distribution characteristic in algae electro-dewatering process. *Journal of Environmental Management*. 2020, vol. 265, p. 9. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110541.
20. Stepanenko V. P. On the issue of increasing resource saving at autonomous power plants in the Republic of Sakha (Yakutia). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 6, pp. 62–68. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-62-68.

21. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics*. 2023, vol. 11, p. 536. <https://doi.org/10.3390/math11030536>.

22. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

23. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Порсев Евгений Георгиевич*¹ – доцент, e-mail: porsev@corp.nstu.ru, РИНЦ AuthorId: 413591;

*Борзенков Алексей Николаевич*¹ – младший научный сотрудник,

*Абрамов Евгений Юрьевич*¹ – ассистент, e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5013-3288;

*Чернов Алексей Александрович*¹ – младший научный сотрудник;

*Рожкова Марина Викторовна*¹ – старший преподаватель, e-mail: rozhkova@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-5039-2039;

¹ Новосибирский государственный технический университет.

Для контактов: *Порсев Е. Г.*, e-mail: porsev@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Porsev E. G.*¹, assistant, e-mail: porsev@corp.nstu.ru, authorId: 413591;

*Borzenkov A. N.*¹, junior research assistant,

*Abramov E. Y.*¹, assistant, e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5013-3288;

*Chernov A. A.*¹, junior research assistant;

*Rozhkova M. V.*¹, senior lecturer, e-mail: rozhkova@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0001-5039-2039;

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: *Porsev E. G.*, e-mail: mbv5@mail.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 24.08.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 24.08.2023; accepted for printing 10.10.2023.

