

ПРОБЛЕМА СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ В ГОРНОПРОХОДЧЕСКИХ РАБОТАХ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МЕТРОПОЛИТЕНА

Е. Г. Порсев¹, Р. Н. Латышев¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: приведен анализ процесса электроосмотического водопонижения в грунтах, окружающих путевую структуру при строительстве метрополитена. Установлено, что в связи с тем, что при строительстве метро с применением горнопроходческих машин (проходческого щита) нарушается структура грунтов и обнажаются водоупорные и водонасыщенные пласты, электроосмотическое водопонижение в них имеет свои особенности. Целесообразно оптимизировать процесс по критерию удельных энергозатрат на массоперенос. В данной работе на основе теорий электрокинетических явлений и тепломассопереноса развита идея об использовании релаксационных явлений ионной атмосферы дисперсной частицы, дисперсионной среды и тепловлажностных полей в объеме влажного дисперсного материала полей для снижения энергозатрат на отрыв рыхлосвязанной дисперсионной среды. Исходя из анализа совокупности всех физических явлений, идущих при электроуплотнении грунта, можно предложить для устранения перехода энергии заменить электропитание постоянным электрическим током на обработку грунта другими видами электрической энергии, то есть изменить параметры электрической энергии и снизить релаксационные потери. Предложены отличающиеся от известных энергетический баланс процесса и энергетическая диаграмма, зависимость удельных энергозатрат не только от величины действующих факторов, но и от длительности их наложения, методика исследования процесса электроосмотического разделения влажного дисперсного материала, основанная на критерии оценки эффективности по удельным энергозатратам на единицу массы выделенной дисперсной среды или твердой фракции – дисперсной фазы, методики расчета электрокинетических устройств с использованием коэффициента удельных энергозатрат, что особенно важно учитывать в горнопроходческих работах.

Ключевые слова: горнопроходческие работы, электроуплотнение грунта, электроосмос, электрофорез, путевая структура метрополитена, метротоннель, водопонижение в грунте, релаксация тепловлажностной полей при электроосмосе, удельные энергозатраты на массоперенос.

Для цитирования: Порсев Е. Г., Латышев Р. Н. Проблема снижения энергозатрат в горнопроходческих работах при строительстве метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 217–228. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_217.

The problem of reducing energy consumption in mining operations during the construction of the subway

E. G. Porsev¹, R. N. Latyshev¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The analysis of the process of electroosmotic water deposition in the soils surrounding the track structure during the construction of the subway is given. It is established that due to the fact that during the construction of the metro with the use of mining machines (tunneling shield), the structure of soils is violated and water-resistant and water-saturated layers are exposed, electroosmotic water deposition in them has its own characteristics. It is advisable to optimize the process according to the criterion of specific energy consumption for mass transfer. In this paper, based on the theories of electrokinetic phenomena and heat and mass transfer, the idea of using relaxation phenomena of the ionic atmosphere of a dispersed particle, a dispersion medium and heat-moisture fields in the volume of wet dispersed material fields to reduce energy consumption for the separation of loosely bound dispersion medium is developed. Based on the analysis of the totality of all physical phenomena occurring during the electrical compaction of the soil, it can be proposed to eliminate the energy transition to replace the power supply with direct electric current for the treatment of soil with other types of electrical energy, that is, to change the parameters of electrical energy and reduce relaxation losses. The energy balance of the process and the energy diagram, which differ from the known ones, the dependence of specific energy consumption not only on the magnitude of the active factors, but also on the duration of their superimposition, the methodology for studying the process of electroosmotic separation of wet dispersed material based on the criteria for evaluating the efficiency of specific energy consumption per unit mass of the separated dispersed medium or solid fraction are proposed – dispersed phase, methods for calculating electrokinetic devices using the coefficient of specific energy consumption, which is especially important to take into account in mining operations.

Key words: mining operations, electro-compaction of soil, electroosmosis, electrophoresis, subway track structure, metro tunnel, water reduction in the ground, relaxation of heat and moisture fields during electroosmosis, specific energy consumption for mass transfer.

For citation: Porsev E. G., Latyshev R. N. The problem of reducing energy consumption in mining operations during the construction of the subway. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):217–228. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_217.

1. Введение

Метрополитен — система перевозки пассажиров, популярная во всем мире. По состоянию на 2020 год пассажирооборот новосибирского метрополитена составил 98,4 млн человек, при этом среднесуточная перевозка составляла 281,4 тыс. пассажиров. Именно из-за высокого пассажирооборота к метрополитену предъявляются повышенные требования по безопасности. Повышенные требования предъявляются не только к системам электроснабжения, подвижным составам, квалификации обслуживающего персонала, но и к подземным тоннельным сооружениям. Одно из главных требований, предъявляемых к тоннельным сооружениям — срок эксплуатации.

Нормативный эксплуатационный срок метротоннеля — 100 лет, согласно СП 1230,13330.

В связи с тем, что при строительстве метро с применением горнопроходческих машин (проходческого щита) нарушается структура грунтов и обнажаются водоупорные и водонасыщенные пласты, электроосмотическое водопонижение в них имеет свои особенности. Целесообразно оптимизировать процесс по критерию удельных энергозатрат на массоперенос.

Применяемая в горнопроходческих работах для облицовки тоннеля тубинговая обделка бывает чугунной либо железобетонной. В случае с чугунной обделкой при соблюдении технологии строительства за ней наносится

защитный слой бетона, который защищает сооружение от коррозии и от проникновения грунтовых вод в тоннель. Уменьшение толщины стенок и снижение прочности конструкции под воздействием влаги проходит очень медленно. В случае с железобетонным тубингом очень многое зависит от исходного качества компонентов бетона при изготовлении блоков и выдержки изделия. Известен факт, что бетон со временем набирает прочность. Известно также, что в агрессивных средах железобетон стремительно разрушается. Часто проблемой при строительстве метрополитена является наличие агрессивных грунтовых вод, содержащихся в дисперсной фазе грунтов вокруг тоннельных сооружений, причиной агрессивного движения грунтовых вод часто является обнажение водоупорных и водонасыщенных пластов грунта при проходке с применением горнопроходческих машин.

В практике строительства гидротехнических сооружений и фундаментов зданий сложилась электрокинетическая технология водопонижения и электроуплотнения грунтов [1].

Электрокинетические явления представляют собой взаимодействие между относительным движением частиц двух различных фаз и электрическими свойствами границы их раздела. Данное явление появляется тогда, когда одна фаза диспергирована в другой, то есть описана как микрогетерогенная. Бывает 4 группы электрокинетических явлений. Первая — электрофорез, вторая — электроосмос, третья представляет собой потенциал течения, или осмо-ЭДС, четвертая — потенциал осаждения (форо-ЭДС).

Пренебрежение термовлагопроводностью возможно в системах неограниченного объема, где имеют место подвод влаги в анодную область

и отсутствие разницы температур между анодной и катодной областями [2]. Практика же показывает, что в строительном производстве, особенно в горнопроходческих работах при строительстве метрополитена на этапе проходки с применением проходческого щита, имеют место замкнутые объемы влажных материалов, и вследствие этого возникает градиент температурного поля, что влечет за собой появление термовлагопроводности [3, 4]. Как вывод, в процессе оценивания процессов энергетики в реальных производственных условиях горнопроходческих работ учитывать влияние попутных процессов не только целесообразно, но необходимо.

2. Материалы и методы

По современным представлениям, в горнопроходческих работах, связанных со строительством метрополитена, процесс электрокинетического энерго-массопереноса представляет собой массоперенос в коллоидных системах. Данный процесс возникает только в случае наложения внешнего электрического поля, а также в коллоидной системе может сопровождаться генерированием собственного электрического поля. В настоящее время различают две фазы коллоидных систем — это дисперсная фаза и дисперсионная среда. Потенциальная энергия ненасыщенных связей может запасаться на границе раздела фаз, которая возникает при дроблении вещества, а именно разрыва связей между молекулами. Данная энергия в случае большой площади поверхности вещества может достигать огромных величин. В связи с этим вещество в нераздробленном состоянии будет иметь меньшую энергию по сравнению с веществом в коллоидном состоянии.

Основной причиной электрокинетического энерго-массопереноса является

наличие двойного электрического слоя (ДЭС) в электропроводной дисперсионной среде вокруг диспергированной частицы диэлектрического материала. С помощью дисперсных сил происходит адсорбция ионов на незаряженных поверхностях, которые возникают вследствие флуктуации электронных оболочек атомов. Данное явление характерно для горнопроходческого дела и называется силами специфической адсорбции. Заметим, что поляризирующая сила иона вещества зависит от силы электрического поля [5, 6]. При этом воздействии иона на атомы деформируются его электронные оболочки, находящиеся на поверхности.

Основная классификация электрокинетических явлений при горнопроходческих работах представлена в табл. 1 [7, 10].

Уравнивание теплового движения ионов среды происходит за счет элект-

ростатического притяжения ионов к поверхности при разноименном заряде и отталкивание при одноименном заряде. Аналогично атмосферному распределению плотности газов рядом с поверхностью раздела образуется «облако» электрических зарядов. В данном электрическом поле противоионы перемещаются к электроду, неся за собой дисперсионную среду. Противоионы энергетически слабо связаны с мембраной. С увеличением напряженности электрического поля, а также ширины диффузионного слоя, линейно возрастает количество переносчиков заряда и скорость перемещения жидкости в пористом теле [8]. При электроосмосе объемная скорость жидкости (V , л/с) рассчитывается по формуле Гельмгольца–Смолуховского:

$$V = \frac{I \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \xi}{4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \gamma}, \quad (1)$$

Таблица 1

Основная классификация электрокинетических явлений при горнопроходческих работах
Basic classification of electrokinetic phenomena during mining operations

Явление	Особенности явления	Причина явления
Электроосмос	Движение частиц дисперсионной среды (V_{cp} , м/с) относительно частиц дисперсной фазы при скорости движения дисперсной фазы равной 0 ($V_{\phi} = 0$ м/с)	Напряженность электрического поля (E , В/м), оказывающая влияние на дисперсионную систему
Электрофорез	Движение частиц (V_{ϕ} , м/с) дисперсной фазы, диспергированных в частицах дисперсионной среды при скорости движения дисперсионной среды равной 0 ($V_{cp} = 0$ м/с)	Напряженность электрического поля (E , В/м), оказывающая влияние на дисперсионную систему
Осмо-ЭДС	В движении потока частиц дисперсионной среды возникает разность потенциалов между точками этого потока	Под действием гидродинамической силы происходит перемещение частиц дисперсионной среды относительно неподвижной дисперсной фазы ($V_{\phi} = 0$ м/с)
Форо-ЭДС (потенциал седиментации)	В движении потока частиц дисперсионной фазы возникает разность потенциалов в точках неподвижной дисперсионной среды	Под действием сил тяжести, Архимеда и других происходит перемещение дисперсных частиц фазы относительно неподвижной дисперсионной среды ($V_{cp} = 0$ м/с)

где I — сила тока, А; ε — диэлектрическая постоянная дисперсионной среды, Ф/м; ε_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; ξ — электрокинетический потенциал, В; η — коэффициент внутреннего трения, Па·с; γ — удельная электропроводность жидкости, см/м.

Формулу (1) можно записать в другом виде, который используется очень часто. Данная формула выражена относительно электрокинетического потенциала:

$$\xi = \frac{\eta \cdot V_0}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E}, \quad (2)$$

где V_0 — постоянная линейная скорость жидкости через мембрану, м/с; E — напряженность электрического поля, В/м.

Для реализации стационарного потока жидкости в капиллярах необходимо и достаточно при увеличении радиуса капилляров гомеопористой мембраны сохранять постоянство градиента потенциала внешнего поля этой мембраны. Данное явление может возникать при больших силах инерции, при этом соотношение объемной скорости жидкости к току и электрокинетический потенциал должны обратиться в 0. Наиболее часто гомеопористая мембрана встречается в горно-строительном и горно-обогатительном производствах, где присутствует однородная дисперсная фракция. При строительстве метрополитенов встречается реальная гетеропористая мембрана [9]. Данная мембрана содержит капилляры разного радиуса и имеет кривую зависимости распределения размеров пор. Для гетеропористой мембраны электродвижущая сила может оказаться недостаточной для поддержания стационарного потока, следствием этого станет остановка электроосмотического переноса. Это связано с увеличением радиуса пор

данной мембраны. Однако скорость движения ионов в электрическом поле не изменяется при несущественном изменении пористости мембраны, тем самым сохраняя постоянство электрического тока.

Уменьшение объемной скорости жидкости приведет к уменьшению соотношения V/I . Данное соотношение и электрокинетический потенциал должны уменьшаться пропорционально соотношению площади сечения крупных капилляров к живой площади сечения мембраны [5,19].

В выражениях (3) и (4) представлены формулы электроосмотического массопереноса для установившегося режима:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot \varepsilon_a \cdot (-\xi)}{r_0^2} \cdot \Delta \varphi - \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{S_{np} \cdot r_0^2} \cdot G, \quad (3)$$

$$I = \frac{\sigma \cdot S_{np}}{l} \cdot \Delta \varphi, \quad (4)$$

где Δp — электроосмотическое давление, Па; ε_a — диэлектрическая проницаемость дисперсной фазы, Ф/м; $\Delta \varphi$ — разность потенциалов электрического поля на мембране, В; r_0 — радиус цилиндрической поры в мембране, м; η — коэффициент динамической вязкости, Па·с; l — длина мембраны, м; S_{np} — живое сечение мембраны, м²; G — расход жидкости через капилляр, м³/с; σ — электропроводность жидкости, См.

По формуле (5) происходит расчет относительной напряженности электрического поля (U , В):

$$U = \frac{\varepsilon \cdot \xi \cdot E}{4 \cdot \pi \cdot \eta}. \quad (5)$$

При рассмотрении гомогенной дисперсии представленная формула идеально описывает реальные процессы. В случае гетерогенных систем, встречающихся в горнопроходческих рабо-

тах, присутствуют отклонения, которые необходимо корректировать поправками в электрокинетический потенциал [11, 18].

Разность потенциалов электрического поля на мембране для величины форо-ЭДС рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot P}{4 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \gamma} \cdot \xi, \quad (6)$$

где P — давление, Па.

Относительное перемещение фаз по границе раздела вызывает давление, рассчитываемое по формуле (7). При осмо-ЭДС — это гидростатическое давление, а при форо-ЭДС — давление с учетом силы Архимеда:

$$P = g \cdot M \cdot \left(1 - \frac{d_l}{d_s}\right), \quad (7)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; M — масса взвешенных частиц, проходящих через единицу сечения микрогетерогенной системы, кг; d_l — плотность дисперсионной среды, кг/м³; d_s — плотность взвешенных дисперсных частиц, кг/м³.

В формуле (8) учтены размеры взвешенных дисперсных частиц [12]:

$$\Delta\varphi = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot P}{4 \cdot \pi \cdot \eta} \cdot S \cdot E \cdot \xi, \quad (8)$$

где S — сечение взвешенной поры, м².

Осмо-ЭДС может применяться для генерирования электрической энергии маломощных потребителей, а также измерений электрокинетического потенциала и электропитания во время горнопроходческих работ при строительстве метро. Явление же форо-ЭДС электрической зарядки атмосферных

Таблица 2

Типы дисперсных систем (соли) в горнопроходческих работах при строительстве метрополитена

Types of dispersed systems (salts) in mining operations during the construction of the subway

№	Дисперсионная	Твердое	Жидкое	Газ	Примеры
1	Фаза	+	–	–	Минералы, сплав
	Среда	+	–	–	
2	Фаза	–	+	–	Опал
	Среда	+	–	–	
3	Фаза	–	–	+	Пемза, древесный уголь
	Среда	+	–	–	
4	Фаза	+	–	–	Коллоидные растворы, гидрозоли, органозоли
	Среда	–	+	–	
5	Фаза	–	+	–	Эмульсии, латексы
	Среда	–	+	–	
6	Фаза	–	–	+	Газовые эмульсии, пены
	Среда	–	+	–	
7	Фаза	+	–	–	Аэрозоли, дымы
	Среда	–	–	+	
8	Фаза	–	+	–	Туманы
	Среда	–	–	+	
9	Фаза	–	–	+	Газовые коллоиды
	Среда	–	–	+	

облаков может применяться для газо- и водочистки.

В табл. 2 [13,14] приведена классификация дисперсных систем, с помощью которых можно расширить сферу приложения законов электрокинетики и перечень новых технологий в горнопроходческих работах при строительстве метрополитена.

3. Результаты и обсуждение

Проанализированные современные классификации состоящих веществ в горнопроходческих работах позволили сделать вывод о том, что на данный момент упор делается в сторону микроуровня, и тем самым классификация дисперсных систем отражена в полном объеме. То же можно сказать и про классические уравнения электрокинетики, проанализировав дисперсные системы. Во многих дисперсных материалах при строительстве метрополитена, особенно с использованием горнопроходческого оборудования, присутствуют в качестве дисперсной фазы грунты нарушенной структуры, а в качестве дисперсионной среды — вода с растворенными в ней солями природного и техногенного происхождения. В таких материалах процесс электрокинетического энергопереноса имеет свои особенности. Так, например:

1) гетеропористость дисперсной фазы. Содержание капилляров разного радиуса, что приводит к излишнему расходу энергии на нагрев капилляров большого радиуса [15];

2) многокомпонентность электролитного состава дисперсионной среды. Увеличение концентрации индифферентных электролитов приводит к уменьшению электрокинетического потенциала, а также увеличению концентрации противоионов [16];

3) водородные ионы из-за малого радиуса, а гидроксильные ионы по при-

чине большого дипольного момента имеют высокую способность адсорбироваться. В связи с этим отличие водородного показателя среды — pH от нейтральной может сильно сказываться на электрокинетическом потенциале дисперсных частиц.

4) влияние концентрации дисперсной фазы. Уменьшение концентрации противоионов приводит к увеличению толщины двойного электрического слоя, а также к увеличению электрокинетического потенциала при разбавлении коллоидной системы;

5) отношение температуры обработки. Увеличение температуры способствует увеличению электрокинетического потенциала, а также есть вероятность увеличения десорбции потенциалов определяющих ионов, что приведет к уменьшению электрокинетического потенциала.

Таким образом, реальная картина электрокинетических явлений должна описываться в квазипространстве уравнениями для функций отклика, изображенного на рис. 1 [7,17].

Очевидно, что в пространстве электрокинетики возможны движения дисперсионной среды и дисперсной фазы навстречу друг другу, так как размеры дисперсных частиц и пор в гетерогенной структуре имеют широкий спектр размеров.

$$E - V_{cp} \left\{ \begin{array}{l} 1 + 3 \text{ октанты- электроосмос} \\ 2 + 4 \text{ октанты- осмо- э. д. с.} \end{array} \right\}$$

является октантом электроосмоса;

$$E - V_{\phi} \left\{ \begin{array}{l} 5 + 7 \text{ октанты- электрофорез} \\ 6 + 8 \text{ октанты- форо- э. д. с.} \end{array} \right\}$$

является октантом электрофореза;

Движение влаги в дисперсном материале выражено влиянием факторов на электроосмос. В формуле (9) [15,20] приведены факторы энергозатрат на электроосмос:

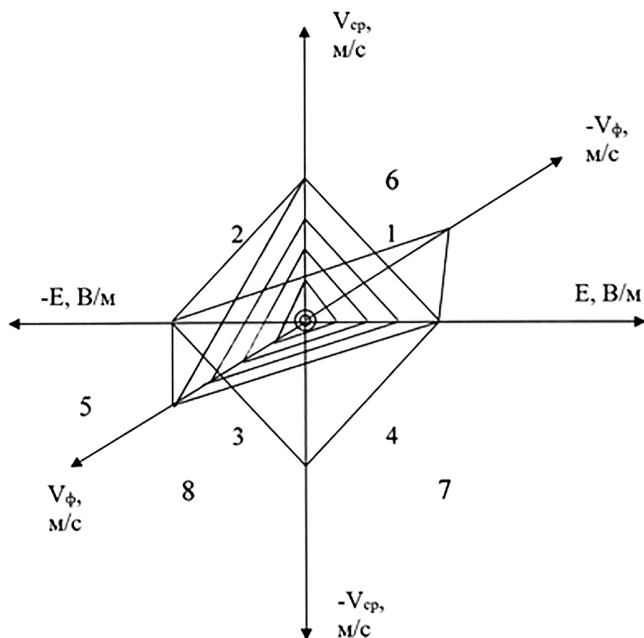


Рис. 1. Пространство совокупности явлений энергомассопереноса в дисперсных материалах: E — напряженность электрического поля; $V_{ср}$ — направление и скорость движения дисперсионной среды; V_{ϕ} — направление и скорость движения дисперсной фазы

Fig. 1. The space of the totality of the phenomena of energy and mass transfer in dispersed materials: E — electric field strength; $V_{ср}$ — direction and speed of movement of the dispersion medium; V_f — direction and speed of movement of the dispersed phase

$$\begin{aligned}
 W_2 = & \Delta H \cdot m \cdot g + a_1 \cdot \Delta B \cdot L \cdot \tau + \\
 & + a_2 \cdot \Delta C \cdot L \cdot \tau + k_3 \cdot m_3 + k_2 \cdot m_2 + \\
 & + k_n \cdot E^2 \cdot S \cdot L + I^2 \cdot R \cdot \tau + a_3 \cdot E \cdot \\
 & \cdot L \cdot \tau + a_4 \cdot \Delta T \cdot \tau + a_5 \cdot \Delta T \cdot \tau, \quad (9)
 \end{aligned}$$

где $\Delta H \cdot m \cdot g = W_1$ — потери напора, Дж;
 $a_1 \cdot \Delta B \cdot L \cdot \tau = W_2$ — потери влагопроводности, Дж;
 $a_2 \cdot \Delta C \cdot L \cdot \tau = W_3$ — потери осмоса, Дж;
 $k_3 \cdot m_3 = W_4$ — потери на электролитическое растворение электродов, Дж;
 $k_2 \cdot m_2 = W_5$ — потери на электролитическое газообразование, Дж;
 $k_n \cdot E^2 \cdot S \cdot L = W_6$ — потери на поляризацию диэлектрика дисперсной фазы, Дж;
 $I^2 \cdot R \cdot \tau = W_7$ — энергия электроннагрева, Дж;
 $a_3 \cdot E \cdot L \cdot \tau = W_8$ — потери при работе электроосмоса, Дж;

$a_4 \cdot \Delta T \cdot \tau = W_9$ — потери термовлагопроводности, Дж;

$a_5 \cdot \tau \cdot \Delta T = W_{10}$ — потери при работе термоосмоса, Дж.

На рис. 2 представлена энергетическая диаграмма потерь, в которой лишь некоторые выполняют полезную работу — это электроосмос и термо-влагопроводность, а остальные относятся к паразитным [20].

5. Заключение

Исходя из анализа физики паразитных процессов в горнопроходческих работах при строительстве метрополитена, предлагается следующая рабочая гипотеза.

1. Физические процессы: потери пьезометрического напора, влагопроводности, осмоса оказывают влияние

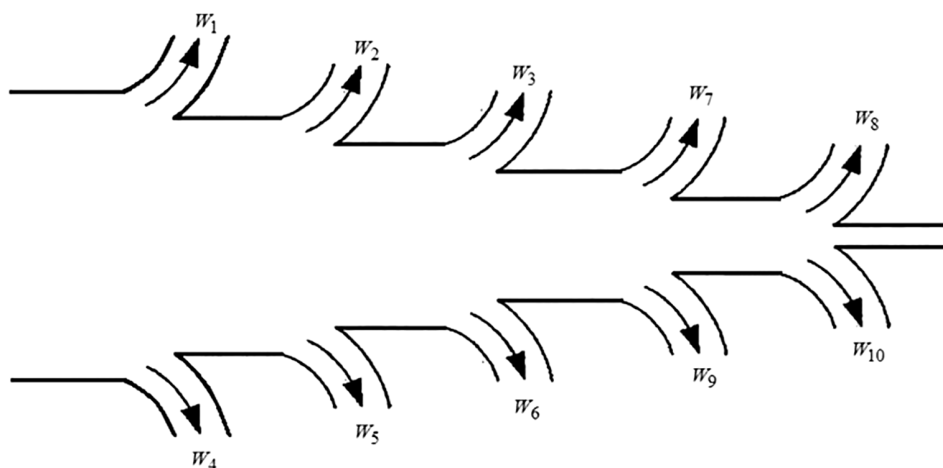


Рис. 2. Энергетическая диаграмма процесса электрокинетического массопереноса
 Fig. 2. Energy diagram of the process of electrokinetic mass transfer

на энергетику обезвоживания, но выделить их эффекты очень сложно.

2. Паразитные электрические процессы вносят решающий вклад в суммарные потери энергии.

3. Для устранения влияния паразитных электрических процессов на энергозатраты достаточно заменить обработку постоянным электрическим током на обработку другими видами электрической энергии, т.е. изменить параметры электроэнергии и снизить релаксационные потери.

4. Применение для электропитания процесса электроосмотического обезвоживания грунта во время строительства

метро переменного асимметричного тока позволит повысить эффект уплотнения грунта в горнопроходческих работах при строительстве метрополитена за счет наличия знакопеременного электрического поля.

Приглашаем к дискуссии

По предложению редколлегии ГИАБ статья открывает дискуссию на страницах журнала о применении новой технологии осмоса для борьбы с влагой и водой в тоннелях и шахтах, электроосмотического водопонижения в грунтах, окружающих путевую структуру при строительстве метрополитена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В. Электропривод современных шахтных подъемных 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. Сологавев В. И. О применении электроосмоса при защите от подтопления земель // Вестник Омского ГАУ. – 2017. – Т. 27 – № 3. – С. 122–129.
6. Kholudenevo 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. Mukherjee S., Dasgupta S., Chakraborty S., Dhar J. Patterned surface charges coupled with thermal gradients may create giant augmentations of solute dispersion in electro-osmosis of viscoelastic fluids // Proceedings of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences. 2019, vol. 2221 (475), p. 42.
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. Wang L., Wang Y., Liu S., Fu Z., Shen C., Yuan W. Analytical solution for one-dimensional vertical electro-osmotic drainage under unsaturated conditions // Computers and Geotechnics. 2019, vol. 105, pp. 27–36. DOI:10.1016/j.compgeo.2018.09.011.
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. **MIAB**

REFERENCES

1. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev 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., Kholudeneva 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. Mukherjee S., Dasgupta S., Chakraborty S., Dhar J. Patterned surface charges coupled with thermal gradients may create giant augmentations of solute dispersion in electro-osmosis of viscoelastic fluids. *Proceedings of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences*. 2019, vol. 2221 (475), p. 42.

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. Wang L., Wang Y., Liu S., Fu Z., Shen C., Yuan W. Analytical solution for one-dimensional vertical electro-osmotic drainage under unsaturated conditions. *Computers and Geotechnics*. 2019, vol. 105, pp. 27–36. DOI:10.1016/j.compgeo.2018.09.011.

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. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-62-68 [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Латышев Роман Николаевич*¹ — ассистент, младший научный сотрудник научно-исследовательской части, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728;

*Порсев Евгений Георгиевич*¹ — докт. техн. наук, ст. науч. сотр., профессор, e-mail: porsev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4807-5135;

¹ Новосибирский государственный технический университет.

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

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Latyshev R. N.*¹, Assistant, Junior Researcher of Research Unit, e-mail: latyshev @corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728;

*Porsev E. G.*¹, Dr. Sci. (Eng), senior research scientist, professor, e-mail: porsev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0003-4807-5135;

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

Corresponding author: *Porsev E. G.*, e-mail: porsev@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 24.01.2022; получена после рецензии 27.09.2022; принята к печати 10.11.2022.

Received by the editors 24.01.2022; received after the review 27.09.2022; accepted for printing 10.11.2022.

