

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРООСМОСА В ГЕОЛОГОРАЗВЕДКЕ И НА НЕФТЕПРОМЫСЛАХ

Е. Г. Порсев¹, Д. П. Кравченко¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация: Проблема рекультивации шламовых амбаров в геологоразведке и на нефтепромыслах до сих пор решается ресурсозатратным методом. Смысл технологии рекультивации шламовых амбаров заключается в том, что необходимо шлам-отходы бурения обезвредить любым способом и вернуть земли в сельскохозяйственный оборот. Предлагается ускоренная технология обезвоживания шлама электроосмотическим воздействием. Отходы бурения, разбавленные водой, представляющие по фракционной структуре тестообразную массу, из-за содержания токсичных веществ являются угрозой для агроэкосистемы. Существующие технологии являются затратными как по времени и ресурсоемкости, так и по финансам. Рекомендуется снимать отрицательные эффекты от релаксации электрической поляризации электродов питанием переменным асимметричным током, от релаксации гидростатической поляризации дисперсионной среды – импульсной подачей электропитания, а от релаксации сил термовлажностности – подачей электропитания «бегущим импульсом». Вводится понятие «удельные энергосатраты на массоперенос». Для устранения влияния релаксации градиентных полей предлагается изменять параметры электрической энергии. Установлено, что оптимальным физическим процессом для обезвоживания шлама может быть электроосмос. Для сокращения времени процесса рекультивации шламовых амбаров целесообразно релаксацию различных силовых градиентных полей снимать изменением параметров электроэнергии, подаваемой на электроды. Обоснован технологический цикл рекультивации, осуществляемый за один летний сезон, в течение которого с помощью электроосмоса понижается влажность шлама и концентрация химических загрязнений до приемлемого уровня, что актуально в геологоразведке и на нефтепромыслах.

Ключевые слова: геологоразведка, нефтепромыслы, горное дело, электроды для электроосмоса, игло-фильтры, источник электропитания процесса электроосмоса, тепловлажностные поля, градиент силовых тепловлажностных полей

Для цитирования: Порсев Е. Г., Кравченко Д. П. Применение электроосмоса в геологоразведке и на нефтепромыслах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12–2. – С. 229–240. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_229.

Application of electrosmos in the oil field

E. G. Porsev¹, D. P. Kravchenko¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: The problem of reclamation of sludge pits in oil fields is still being solved using the resource-intensive method. An accelerated technology of sludge dewatering by electro-osmotic action is proposed. The concept of specific energy consumption for mass transfer is introduced. To eliminate the influence of relaxation of gradient fields, it is proposed to change the parameters

of electrical energy. It has been established that electroosmosis can be the optimal physical process for sludge dewatering. To reduce the time of the process of reclamation of sludge pits, it is advisable to remove the relaxation of various force gradient fields by changing the parameters of the electricity supplied to the electrodes. The technological cycle of reclamation, carried out in one summer season, is substantiated, during which, with the help of electroosmosis, the moisture content of the sludge and the concentration of chemical contaminants are reduced to an acceptable level.

Key words: electroosmosis, oil fields, sludge pits, reclamation of sludge pits, relaxation of force gradient fields.

For citation: Porsev E. G., Kravchenko D. P. Application of electroosmosis in the oil field. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-2):229–240. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_229.

1. Введение

Неотъемлемым элементом в геологоразведке и на нефтепромыслах являются шламовые амбары. Размеры их могут достигать несколько десятков метров в диаметре. Они используются для складирования отходов бурения: отработанных растворов, с нефтью или без нее, измельченной горной породы, глины, воды, различных химических реагентов. Объем каждого амбара позволяет разместить до нескольких сот кубометров различных отходов, образующихся в ходе бурения скважины. Отходы бурения похожи на разведенную большим количеством воды глину и достаточно токсичны.

Для снижения влияния отходов на окружающую среду производится рекультивация шламовых амбаров. Существует ряд способов рекультивации: засыпка песком, естественное испарение, термическая и химическая обработка, закачка в сухие поглощающие пласты, «выдавливание» в узкие траншеи, вывоз на поля испарения. Все они очень затратные, как по времени, так и по финансам.

В процессе рекультивации амбара для его засыпки необходимо от 4 тыс. кубометров песка, который нужно доставить на объект. Отметим, что транспортировка песка требует высоких финансовых вложений, ввиду его трудной доступности в местах поблизо-

сти. Для добычи песка рядом с нефтепромыслом потребуется вырубка леса или его извлечение из озера или болота.

Цель работы с точки зрения критерия общественной полезности — ускорение процесса рекультивации шламовых амбаров в геологоразведке углеводородов и на нефтепромыслах, экономия первичных энергоносителей и повышение экологической безопасности нефтепромыслов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

а) найти оптимальный способ обезвоживания шлама;

б) рассчитать технологический цикл системы рекультивации на новой основе;

в) разработать принципиальные схемы технологии и электрическую схему системы электроосмотической рекультивации шламовых амбаров нефтепромыслов.

Анализ патентной ситуации в области технологии рекультивации шламовых амбаров в геологоразведке и на нефтепромыслах за период с 1996 по 2020 год с целью определения тенденции развития техники показал, что проблемная ситуация заключается в том, что в этой области отсутствуют радикальные революционные решения, которые помогли бы преодолеть проблему традиционными способами. В связи с этим авторами в данной

работе предлагается рабочая гипотеза возможности решения вышеозначенной проблемы электротехнологическим способом, а именно применением электроосмотического водопонижения.

Исходя из анализа патентной ситуации можно сказать, что до настоящего времени электроосмос для обезвоживания шламовых амбаров не применялся, несмотря на широкое использование этой технологии в других областях техники [1]. По нашему мнению, причина — в сложности прогнозирования результата и отсутствии практических рекомендаций.

Направление развития техники в области рекультивации шламовых амбаров в геологоразведке и на нефтепромыслах, по результатам анализа опубликованных научных статей по годам, позволяет не только прогнозировать теоретически понижение влажности дисперсного материала, но и проектировать технологию водопонижения и вывода вместе с влагой и солей жесткости, что также способствует ускорению процесса рекультивации.

Изучение электроосмоса началось в середине XIX века. Установлено, что ток I пропорционален объемной скорости V электроосмоса при постоянстве других условий, при этом отношение V / I не зависит от геометрических размеров диафрагмы [2]. Объемная скорость, демонстрирующая расход воды к единице общего сечения обезвоживаемого материала, была первым количественным показателем электроосмотического процесса [3]. Развитие науки и техники в дальнейшем привело к концептуальным изменениям в этой области, и главной характеристикой электрокинетических свойств материала стал потенциал ξ (В) [4]. Потенциал отражает суть физических явлений, но практическое его применение сопряжено с высокими требованиями

к точности измерений диэлектрической проницаемости и вязкости.

К середине XX века для определения КПД электроосмотических процессов предложили ввести новый показатель — коэффициент электроосмоса K_3 ($\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$) [5]. Указанный коэффициент позволяет описать влияние агрегатного состояния компонентов на объемную скорость и определяется величиной фиктивной скорости движения воды под действием внешнего электрического поля напряженностью E (В/см). Коэффициент рассчитывается по формуле

$$K_3 = \frac{\rho \xi \varepsilon}{4\pi\eta}, \quad (1)$$

где ρ — плотность обезвоживаемого материала, $\text{кг}/\text{м}^3$; ε — диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м; η — вязкость обезвоживаемого материала, $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$; K_3 — коэффициент пропорциональности между V_3 (м/с) и E .

$$V_3 = K_3 \cdot E. \quad (2)$$

Отметим, что коэффициент электроосмоса K_3 — вспомогательная характеристика, позволяющая определить объемную скорость. В дальнейшем описание электроосмотических процессов выразилось в коэффициенте тока — K_{3i} ($\text{м}^3/\text{А}\cdot\text{с}$) [6]. Основное отличие такого подхода в том, что K_{3i} является коэффициентом пропорциональности между V_3 — объемной скоростью, и σ — плотностью тока, $\text{А}/\text{м}^2$:

$$V_3 = K_{3i} \sigma. \quad (3)$$

Коэффициент электроосмоса пропорционален коэффициенту по току в зависимости от удельной электропроводности материала γ ($\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$):

$$K_3 = \gamma K_{3i}. \quad (4)$$

На этапе проектирования прогнозирование расхода жидкости и затрат

на электроэнергию при условии использования системы постоянного тока осуществляется благодаря представленным в (4) коэффициентам. Однако сложность такого расчета при работе на переменном или на переменном асимметричном токе значительно возрастает.

Использование переменного асимметричного тока при проведении работ требует оценки энергетических показателей, учитывающих всю затраченную энергию. В результате предложена оценка энергетической эффективности посредством удельных энергозатрат на экстрагирование жидкости [7]:

$$w_3 = W / M \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг}, \quad (5)$$

где W — электроэнергия, затраченная в процессе обезвоживания, кВт·ч; M — масса выделенной электроосмотической давлением воды, кг.

Возможна также оценка в удельной мощности:

$$P_{\vartheta} = \frac{w_{\vartheta}}{\tau} = \frac{W}{M\tau}; \text{ кВт}/\text{кг}, \quad (6)$$

где τ — время обработки, ч.

В дальнейшем представленная система описания процесса была принята исследователями [8–10]. Ее достоинством является простота расчета требуемых для установки мощности и тока по удельным энергозатратам, степени обезвоживания и времени обработки. Очевидно, что в каждом случае требуется экспериментальное определение удельных энергозатрат, так как экспериментальных данных по определению удельных энергозатрат для буровых шламов в геологических работах нет.

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;

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

в) отличие водородного показателя среды — рН — от нейтрального 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 твердой фазы; вторые — из-за большого дипольного момента» [11–13]. Для дисперсионной среды почвогрунтов отклонение рН в кислую или щелочную сторону представляется частым явлением;

г) обусловленность концентрацией дисперсной фазы. Дисперсное разведение системы увеличивает χ -потенциал, так как толщина ДЭС увеличивается. Вместе с тем разбавление приводит к экстракции потенциалопределяющего иона с поверхности дисперсной фазы. Это 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 интенсивно-

сти теплового движения противоположных и увеличения потенциального барьера ДЭС. По мере порождения процесса высока вероятность развития десорбции потенциалопределяющих ионов, при которой χ -потенциал уменьшится;

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

Из описанного выше 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.

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

В ходе исследований авторами были проведены электроосмотические эксперименты с несколькими видами материалов для проверки влияния электрического поля на поток воды внутри них. Небольшие образцы как фарфоровой глины (каолин), так и красной художественной глины оставляли высыхать в одной и той же среде (примерный состав используемых глин см. в таблице). 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. Второй образец имел отрицательное напряжение, приложенное к верхнему электроду. К третьему образцу напряжение не прикладывалось. Потерю веса изучали путем пери-

одической 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 точно такое же поведение. Испытание было повторено на каолине и красной глине. Обе глины 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. В случае отрицательного верхнего электрода вода просачивалась вблизи соединительного провода и краев контейнера. Это можно интерпретировать как воду, перекачиваемую вниз (в ожидаемом направлении) ко дну контейнера, а затем просачивающуюся вверх из-за ее более высокого давления вверх через трещины, образовавшиеся вокруг проволоки и вокруг стенок контейнера. На рис. 2 показана схема процесса.

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

Был проверен эффект нагревания Джоуля–Томсона [11], и подводимой

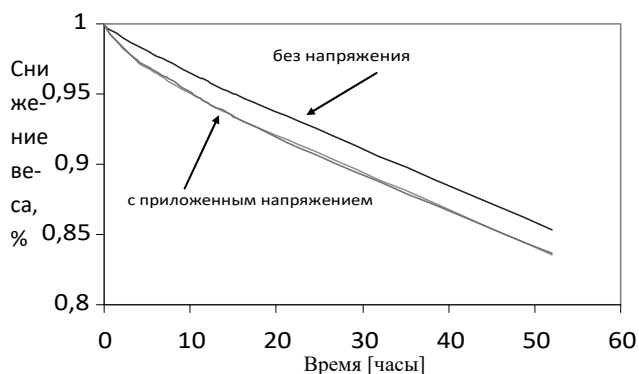


Рис. 1. Процентное уменьшение веса с течением времени для образцов каолина с приложением напряжения и без него

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

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 | - |

электроэнергии оказалось недостаточно для испарения воды, что вызвало значительную разницу в потере веса. Например, через 15 часов образцы с приложенным напряжением потеряли примерно на 0,4 грамма воды больше, чем без ввода напряжения. Подведенная энергия испарит только 0,001 грамма. Влияние нагрева проверяли также на температуре образца. Подводимой электрической мощности было недостаточно для существенного повышения температуры образца (менее 0,2 °C за весь эксперимент).

Таким образом, было доказано, что полезная работа осуществляется работой электроосмоса и термовлагопроводности, остальные лишь увеличивают удельные энергозатраты и являются паразитными. На основе анализа описанных процессов возможно сформулировать следующую рабочую гипотезу:

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

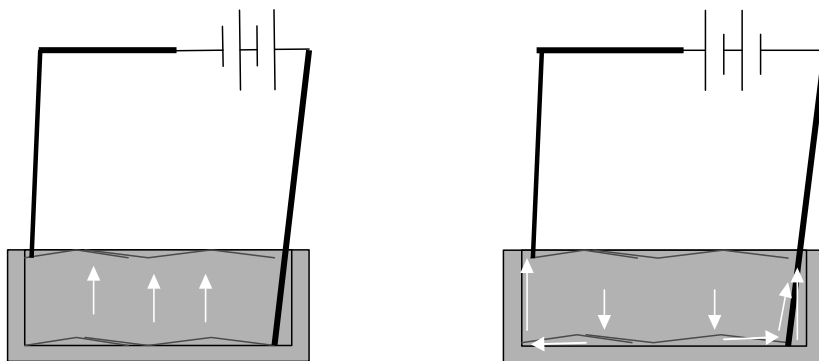


Рис. 2. Интерпретация поведения глины при подаче напряжения различной полярности на основе наблюдений (стрелки обозначают направление потока воды)

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

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.

Давление и массоперенос зависят от пьезометрического напора и могут как добавить давления, так и оказать противодействие массопереносу. Упомянутое положение эмпирически подтверждается согласно [15,16] и не противоречит теории.

3. Результаты и обсуждение

Распределение потоков энергии, характеризующее термодиффузионные и электродиффузиофоретические процессы, сопряжено с тем, что только часть электрической энергии параллельных процессов, связанных со свойствами бурового шлама, при геологоразведке и нефтепромыслах будет уходить в потери, остальное является полезной работой, выражающейся в виде термо-влажнопроводности, ионоосмоса и ионофореза, как и распределение для иных диффузионных процессов.

Энергетическая характеристика электрокинетического процесса является системой ряда физических, электрофизических, электрохимических, термодиффузионных и диффузионных процессов. Электрофизические и электрохимические процессы выражаются в электролизе, а также поляризации на молекулярном и ионном уровнях, они приводят к снижению КПД при использовании постоянного тока. В качестве рабочего решения, позволяющего избавиться от поляризации, возможно принять переход на переменный асимметричный ток.

При электроосмосе перенос жидкости ввиду поляризации обычно сопровождается «ориентационным упорядочением частиц» и образованием «цепочечных структур». В свою очередь переменное асимметричное питание усиливает снижение ослабляющего поле влияния релаксации диффузионного слоя, и, как следствие, происходит увеличение расхода жидкости при неизменных энергозатратах.

Следует отметить важность уменьшения значения диэлектрических потерь путем согласования времени релаксации ДЭС и периодичности изменения электрического поля.

Период колебаний напряженности электрического поля в этом случае не должен превышать время релаксации. Процессы поляризации имеют конечное время релаксации, поэтому при использовании сравнительно высоких частот, в случае приближенного равенства периода поля и времени релаксации, становится заметным смещение по фазе между поляризацией и полем, снижающее КПД процесса. В источнике [14] время релаксации двойного электрического слоя лежит в пределах 10^{-2} ... 10^{-4} сек. Эмпирически установлено, что диапазон используемой частоты должен быть в пределах 20...320 Гц, так как на нем менее всего сказывается релаксация ДЭС. Этот факт известен из лабораторных исследований [17], проведенных для монодисперсий, для реальных гетеродисперсий — буровых шламов. В геологоразведке — исследование не проводилось.

Работа установок электроосмотического обезвоживания сопровождалась «нагревом и пересушиванием грунта, прилегающего к анодам», что подтверждают наблюдения исследователей [3]. Указанное явление при электроосмосе приводит к значительному увеличению удельного сопротивления материала, а также просадке напряжения в прилегающей к аноду области. Рост сопротивления и напряжения в свою очередь сопровождается увеличением интенсивности нагрева, что приводит к еще большему пересушиванию материала. Таким образом, имеется риск пересушивания материала в анодной области, ввиду непрерывно возрастающего процесса перегрева, что не только снижает КПД установки, но и приводит к ограничению ее возможностей.

Следовательно, осушка прианодной зоны сопряжена с ростом удельных энергозатрат в процессе работы установки. Оптимальный режим работы

каждого анода возможен только при достижении переключений положительного полюса источника с анода на анод, расположенных на линии, соединяющей максимально удаленный анод с катодом. Такой процесс переключения производится до появления осушенной зоны, что благоприятно влияет на тепловые потери в прианодной зоне. В этом случае необходимо непрерывно измерять величину электрического тока, проходящего через материал, и подключать анод к источнику питания в направлении электрического поля, а первый анод отделять от положительного полюса источника питания. Другой анод подключается в зависимости от силы принимаемого тока. Уставка токового реле должна оптимизировать удельные энергозатраты до требуемого уровня с позиции финансовых вложений.

В разделах механики, исследующих движения и деформации тел, для конечного объема указано, что электроосмос является процессом с диффузией, в котором влага и твердый диэлектрик движутся в противоположных направлениях. Изучение движения многокомпонентных смесей требует синергетического подхода, в котором законы механики сплошной среды коррелируют с законами физики и химии для изменения массы компоненты.

Таким образом, электрокинетические явления должны рассматриваться совместно с позициями механики сплошной среды геопород, в особенности при работе с замкнутыми объемами обрабатываемых материалов, так как из теории следует, что масса каждого из компонентов в локальных объемах подвержена изменению, и поэтому подвержены изменению электрокинетические (коэффициент электроосмоса), электрические (удельная электропроводность) и электроэнер-

гетические (удельный расход энергии на выделение влаги) характеристики материалов. Теория непрерывности рассматривает движение всех компонентов относительно исходного объема одновременно — принцип суперпозиции, который не рассматривался в предыдущих работах по электродинамике, так как процесс считается происходящим в бесконечном объеме, что бывает только при обезвоживании грунтов [3]. При обезвоживании дисперсных материалов электроосмосом в замкнутых объемах шламмовых амбаров в геологоразведке и на нефтяных промыслах, имеющих вполне конкретный объем, ограниченный обвалкой, имеет место непрерывное изменение физико-химических свойств, выражающееся в перераспределении удельного электросопротивления материала в областях электродов. Очевидно, что увеличение удельного электросопротивления приводит к повышенным энергозатрам. На практике рост удельных энергозатрат, потеря электропроводности и остановка процесса обезвоживания являются следствием обезвоживания прианодной зоны.

Ускоренное осушение прианодной зоны и скачок тепловых потерь на возросшем электросопротивлении прианодной зоны составляют основную часть энергозатрат при электроосмосе в замкнутом объеме. Образованная в результате осушенная зона, способная остановить электроснабжение, имеет размер 0,05... 0,1 м. Основная часть напряжения питания в описанных условиях приходится на зону вблизи анода из-за высокого электрического сопротивления и небольшой доли размера органических материалов. В это время напряженности электрического поля недостаточно для отделения жидкости, поэтому электричество используется только для нагрева области

анода и электроосмотический процесс прекращается. Для того, чтобы запустить процесс, необходимо увеличить напряженность электрического поля выше потенциального барьера, что возможно с помощью ряда способов: использованием заанодного эффекта, переключением электропитания с анода на анод — «бегущий импульс», повторно-кратковременным режимом работы источника электроэнергии [18].

В то же время у специалистов сложилось мнение, что электроосмос при геологоразведке следует проводить на постоянном токе — логика работы сил электроосмотического давления говорит именно об этом, но никто не обращал внимания на возможность протекания одновременно с электроосмосом других физических процессов, идущих одновременно, и, кроме того, не учитывалась возможность релаксации всех силовых градиентных полей. Учет явлений, идущих попутно с электроосмосом, приводит к идее проводить обезвоживание на переменном асимметричном электрическом токе, это позволяет снимать отрицательный эффект от электрической поляризации электродов [15], эффект от релаксации гидростатической поляризации дисперсионной среды снимается импульсной подачей электропитания [16,19,20], а эффект от релаксации сил термо-влагопроводности снимается подачей электропитания «бегущим импульсом» [17,20]. Суммарно эти три приема дают выигрыш по затратам электроэнергии по сравнению с электроосмосом на постоянном токе до 10–11 раз.

4. Заключение

1. Установлено, что оптимальным физическим процессом для обезвоживания пород в геологоразведке и на нефтепромыслах может быть электроосмос.

2. Для сокращения времени процесса рекультивации шламовых амбаров целесообразно релаксацию различных силовых градиентных полей снимать изменением параметров электроэнергии, подаваемой на электроды.

3. Предполагается технологический цикл рекультивации осуществлять за один летний сезон, в течение которого с помощью электроосмоса понижается влажность шлама и концентрация химических загрязнений до приемлемого уровня, а затем

производится засев амбара сидератами и таким образом возвращается территория в сельскохозяйственный оборот.

4. Шламовый амбар в геологоразведке и на нефтепромыслах рекомендуется выполнять круглым по форме с устройством иглофильтра-катода по центру круга и рядов анодов, связанных по концентрическим окружностям вокруг катода, подключаемых поочередно к положительному полюсу источника электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панкова Г. А., Клементьев М. Н. Опыт эксплуатации канализационных тоннелей Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. — 2015 — № 3: — С. 55–61.

2. Васильев В. М., Панкова Г. А., Столбихин Ю. В. Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии // Водоснабжение и санитарная техника. — 2013 — № 9 — С. 67–76.

3. Wells T., Melchers R. E. Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations // Cement and Concrete Research. 2015, vol. 77, pp. 82–96. DOI:10.1016/j.cemconres.2015.07.003.

4. Tanveer A., Mahmood S., Hayat T., Alsaedi A. On electroosmosis in peristaltic activity of MHD non-Newtonian fluid // AEJ — Alexandria Engineering Journal. 2021, vol. 60, no. 3, pp. 3369–3377. DOI:10.1016/j.aej.2020.12.051.

5. Zhang W., He M., Yuan T., Xu W. A two-step method for rapid characterization of electroosmotic flows in capillary electrophoresis // Electrophoresis. 2017, vol. 38, no. 24, pp. 3130–3135.

6. Waheed S., Noreen S., Hussanan A. Study of Heat and Mass Transfer in Electroosmotic Flow of Third Order Fluid through Peristaltic Microchannels // Applied Sciences. 2019, vol. 9, no. 10, p. 2164. DOI:10.3390/app9102164.

7. Perminov N. A. Application of electroosmosis and monitoring for the management of geotechnical processes in underground construction. Int J Hydro. 2018, no.2(4): pp. 498–502. DOI: 10.15406/ijh.2018.02.-

8. Perminov A. N., Safonov I. P., Perminov N. A. Innovative Technology for Repair of Culverts in Conditions of Constant Intense Water Flow // Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 505–510. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.081.

9. Perminov N. A., Perminov A. N. Geotechnical Aspects of Security for Long-operated Underground Collectors in Conditions of Weak Soils and Increasing Technogenic Influences // Procedia Engineering. 2017, vol. 189, pp. 759–766. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.119.

10. Shabanov E. Study of the Processes of Electroosmotic Cleaning of Soils from Oil Pollution on a Three-dimensional Physical Model // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 174, pp. 1–8. DOI:10.1051/e3sconf/202017401054.

11. Pieranski P., Godinho M. H. Electro-osmosis and flexo-electricity in the dowser texture // The European Physical Journal E. 2019, vol. 42, no. 69. DOI:10.1140/epje/i2019-11832-9.

12. *Aristov A. O.* Quasi-cellular nets based on models of flow-systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1392, no. 1, pp. 1–5. DOI:10.1088/1742–6596/1392/1/012064.
13. The Technical Conditions for Conducting Planned and Preventive Repairs of Railway Engineering Structures in Russia for the Central Track Service. 2008, p. 622.
14. *Pinto A., Tomasio R., Pita X.* et al. Gutter soil mixing solutions in Portugal on hard soil and weak rocks // *Proceeding of the 15th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Athina, IOS Press. 2011, pp. 1037–1042.
15. *Serebryakov D. V., Lebedeva V. G., Govorov V. V.* Transport Interchanges Design Features in Seismically Dangerous and Densely Built-Up Areas // *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 716–720. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.113.
16. *Kolos A. F., Konon A. A.* Test results of railway ballast for bearing capacity calculations // *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017, vol. 9, no. 3, pp. 312–316. DOI: 10.3724/SP. J.1226.2017.00312.
17. *Müller W. W., Wöhlecke A.* Influence of Rib Stiffness and Limited Long-Term Junction Strength on Geogrid Performance // *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2020, vol. 7, no. 2, pp. 1–16. DOI:10.1007/s40515-019-00095-6.
18. *Сычев Ю. А., Аладьин М. Е., Зимин Р. Ю.* Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства в комбинированных системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2022. – № 7. – С. 164–179. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164.
19. *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.
20. *Бельский А. А., Моренов В. А., Купавых К. С., Сандыга М. С.* Электроснабжение станции нагрева нефти в скважине от ветроэлектрической установки // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. – 2019. – Т. 62. – № 2. – С. 146–154. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154. **ГИАБ**

REFERENCES

1. *Pankova G. A., Klementiev M. N.* Experience in the operation of sewer tunnels in St. Petersburg. *Water supply and sanitary engineering*. 2015, no. 3, pp. 55–61. [In Russ].
2. *Vasiliev V. M., Pankova G. A., Stolbikhin Yu. V.* Destruction of sewer tunnels and structures on them due to microbiological corrosion. *Water supply and sanitary engineering*. 2013, no. 9, pp. 67–76. [In Russ].
3. *Tanveer A., Mahmood S., Hayat T., Alsaedi A.* On electroosmosis in peristaltic activity of MHD non-Newtonian fluid. *AEJ – Alexandria Engineering Journal*. 2021, vol. 60, no.3, pp. 3369–3377. DOI:10.1016/j.aej.2020.12.051.
5. *Zhang W., He M., Yuan T., Xu W.* A two-step method for rapid characterization of electroosmotic flows in capillary electrophoresis. *Electrophoresis*. 2017, vol. 38, no.24, pp.3130–3135.
6. *Waheed S., Noreen S., Hussanan A.* Study of Heat and Mass Transfer in Electroosmotic Flow of Third Order Fluid through Peristaltic Microchannels. *Applied Sciences*. 2019, vol. 9, no.10, p. 2164. DOI:10.3390/app9102164.
7. *Perminov N. A.* Application of electroosmosis and monitoring for the management of geotechnical processes in underground construction. *Int J Hydro*. 2018, no.2(4): pp. 498–502. DOI: 10.15406/ijh.2018.02.00117.-
8. *Perminov A. N., Safonov I. P., Perminov N. A.* Innovative Technology for Repair of Culverts in Conditions of Constant Intense Water Flow. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 505–510. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.081.

9. Perminov N. A., Perminov A. N. Geotechnical Aspects of Security for Long-operated Underground Collectors in Conditions of Weak Soils and Increasing Technogenic Influences. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 759–766. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.119.

10. Shabanov E. Study of the Processes of Electroosmotic Cleaning of Soils from Oil Pollution on a Three-dimensional Physical Model. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 174, pp. 1–8. DOI:10.1051/e3sconf/202017401054.

11. Pieranski P., Godinho M. H. Electro-osmosis and flexo-electricity in the dowser texture. *The European Physical Journal E*. 2019, vol. 42, no. 69. DOI:10.1140/epje/i2019-11832-9.

12. Aristov A. O. Quasi-cellular nets based on models of flow-systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1392, no. 1, pp. 1–5. DOI:10.1088/1742-6596/1392/1/012064.

13. The Technical Conditions for Conducting Planned and Preventive Repairs of Railway Engineering Structures in Russia for the Central Track Service. 2008, p. 622.

14. Pinto A. Tomasio R. Pita X. et al. Gutter soil mixing solutions in Portugal on hard soil and weak rocks. *Proceeding of the 15th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering*. Athina, IOS Press. 2011, pp. 1037–1042.

15. Serebryakov D. V., Lebedeva V. G., Govorov V. V. Transport Interchanges Design Features in Seismically Dangerous and Densely Built-Up Areas. *Procedia Engineering*. 2017, vol. 189, pp. 716–720. DOI:10.1016/j.proeng.2017.05.113.

16. Kolos A. F., Konon A. A. Test results of railway ballast for bearing capacity calculations. *Sciences in Cold and Arid Regions*. 2017, vol. 9, no. 3, pp. 312–316. DOI: 10.3724/SP.J.1226.2017.00312.

17. Müller W. W., Wöhlecke A. Influence of Rib Stiffness and Limited Long-Term Junction Strength on Geogrid Performance. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. 2020, vol. 7, no. 2, pp. 1–16. DOI:10.1007/s40515-019-00095-6.

18. Sychev Y. A., Aladin M. E., Zimin R. Y. Multi-function filter compensation devices in composite power supply systems in mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 164–179. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_164

19. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. 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.

20. Belsky A. A., Morenov V. A., Kupavykh K. S., Sandyga M. S. Power supply of an oil heating station in a well from a wind power plant. *Energetika. News of higher educational institutions and energy associations of the CIS*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. 146–154. [In Russ]. DOI: 10.21122/1029-7448-2019-62-2-146-154.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Порсев Евгений Георгиевич¹ — профессор, докт. техн. наук, e-mail: porseve@ngs.ru;

Кравченко Даниил Павлович¹ — ассистент, аспирант, e-mail: kravchenko@corp.nstu.ru;

¹ Новосибирский государственный технический университет.

Для контактов: Кравченко Даниил Павлович, e-mail: kravchenko@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Porsev E. G.¹, professor, Doctor of Technical Sciences, e-mail: porseve@ngs.ru;

Kravchenko D. P.¹, assistant, postgraduate student, e-mail: kravchenko@corp.nstu.ru;

¹ Novosibirsk State Technical University.

For contacts: Kravchenko D. P., e-mail: kravchenko@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.