

**Надуть В. П.**

д.т.н., профессор

Елисеєв В. И.

к.т.н., старший научный сотрудник

Луценко В. И.

к.т.н., старший научный сотрудник

Костыря С. В.

аспирант

Институт**геотехнической механики****им. Н.С. Полякова****НАН Украины****Naduty V. P.****Yeliseyev V. I.****Lutsenko V. I.****Kostyrya S. V.****M. S. Polyakov Institute of
Geotechnical Mechanics
of the NAS of Ukraine****УДК 622/794:621-1/-9****ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ И
ЭЛЕКТРООСМОСА НА
ОБЕЗВОЖИВАНИЕ
ВЛАГОНАСЫЩЕННОЙ ГОРНОЙ
МАССЫ**

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по комбинированному обезвоживанию горной массы и результаты экспериментов, когда электрическое воздействие используют в неподвижных влагонасыщенных дисперсных слоях. Определена степень физического воздействия вибрации и электроосмоса на обезвоживающий материал и даны некоторые физические соображения, способствующие математической обработке этих результатов.

Ключевые слова: вибрация, электроосмос, обезвоживание, комплексный метод, капиллярная жидкость, математическая модель.

Введение. Электроосмос давно привлекает внимание исследователей при создании механизмов влияния на влагонасыщение в дисперсных средах [1, 2]. Теория электроосмоса [3] показала, что в насыщенных поровых каналах создание электрических полей приводит, практически к линейному увеличению расхода жидкости. Полученные в [4] экспериментальные данные и сделанные в [5] теоретические оценки полностью подтверждают известные закономерности влияния электроосмоса на движение жидкости в каналах.

Для решения проблем с повышенной влажностью в конечном продукте авторами разработано устройство, которое позволяет выполнять комплексное обезвоживание горной

массы, поскольку в нем одновременно используются три механизма обезвоживания (вибрационный, вакуумный и электрокинетический) [6]. При этом вибрационный метод позволяет эффективно отбирать из горной массы внешнюю воду, вакуумный способ ускоряет этот процесс и дополнительно обезвоживает поровые каналы в горной массе, а также убирает перетяжки влаги между частицами. Использование электроосмоса позволяет частично извлекать капиллярную влагу, т. к. другими механическими способами удалить ее сложно. Для определения эффективности использования комплексного метода потребовалось провести ряд экспериментов, результаты которых представлены на рис. 1.

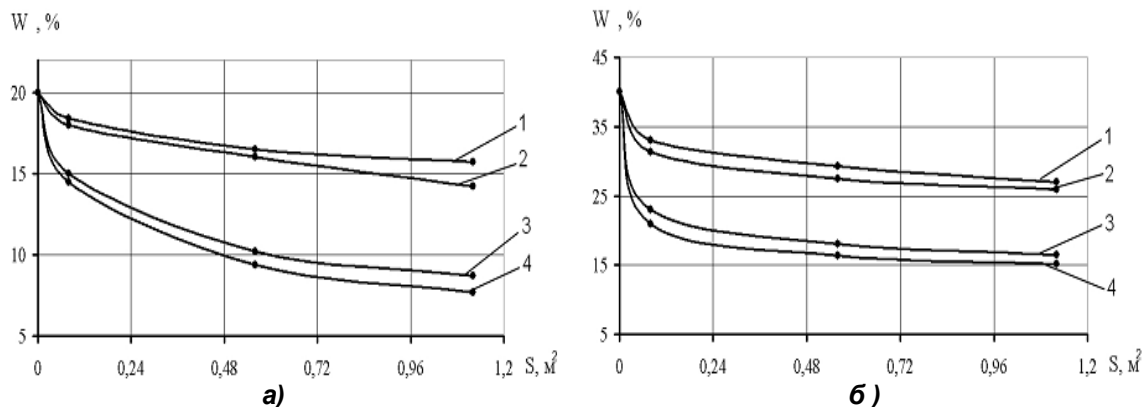


Рис. 1 - Зависимость изменения конечной влажности от площади поверхности в угле при варьируемых факторах для различной крупности: а) крупность (-0,63 мм; +0,25 мм); б) крупность (-1,6 мм; +0,63 мм) 1 – вибрация; 2 – вибрация + электроосмос; 3 – вибрация + вакуум; 4 – вибрация + вакуум + электроосмос



В результате анализа полученных данных, очевидно, что по отдельности каждый из механических способов с определенной степенью осуществляет обезвоживание, но в результате комплексного воздействия всех способов на горную массу можно достичь минимума влажности в конечном продукте.

Несколько иными могут быть результаты, когда электрическое воздействие используют в неподвижных влагонасыщенных дисперсных слоях. В этом случае истечение жидкости из порового пространства должно приводить к ее разрывам и образованиям газовых пузырей. Это в свою очередь должно изменять электрические поля в поровом пространстве и, соответственно, изменять его воздействие на жидкость. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по обезвоживанию и даны некоторые физические соображения, способствующие математической обработке этих результатов.

Математическая модель. В [7] было принято, что при гравитационном истечении жидкости из поровых каналов дисперсной среды вся область делится на две подобласти: вверху образуется газожидкостная среда со сложной геометрией (область I), а внизу

(область II) остается прослойка сплошной жидкости (см. рис. 2).

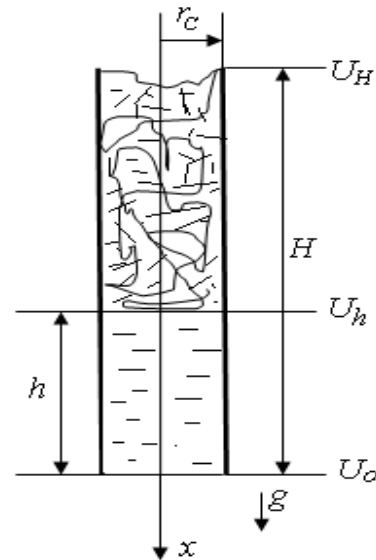


Рис. 2. Схема расчетной области

В этом случае уравнения движения в рамках модели узкого канала можно записать в виде

$$\alpha \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \alpha \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \alpha \rho g + \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha \mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \alpha \rho \rho_E E_X^\Sigma, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha \rho)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha \rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha \rho v r)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

где x, r – цилиндрическая система координат; u, v – компоненты скорости, соответствующие координатам; ρ – плотность жидкости; p – давление; g – ускорение свободно падающего тела; ρ_E – плотность зарядов; α – объемная доля жидкости в поровом канале (в области II $\alpha = 1$). Примем, согласно [3], что суммарная напряженность электрического поля состоит из внешней напряженности E , направленной вдоль оси трубки и внутренней, созданной двойным электрическим слоем (ДЭС), при этом

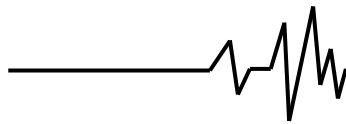
$$4\pi\alpha\rho_E = -\varepsilon_0\varepsilon_f \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad (3)$$

$$8\mu\alpha S(H-h) \frac{dh}{dt} = 2\pi\sigma(R_C - r_C) - \rho g \alpha S(H-h) - 8\rho S \frac{\varepsilon_0\varepsilon_f}{2\pi R_C^4} \int_h^H \alpha \left[\int_0^{r_C} r(\varphi^I - \varphi_0^I) dr \right] \frac{dU}{dx} dx, \quad (4)$$

в области

где ε_0 – диэлектрическая постоянная вакуума; ε_f – коэффициент диэлектрической проницаемости газожидкостной среды (при $\alpha = 1$ $\varepsilon_f = \varepsilon = 81$).

Далее, учитывая, что в узких каналах скорости жидкости должны быть небольшими, отбросим нестационарные члены в уравнениях (1, 2), а также нелинейные члены в уравнении (1). Интегрируя, как и в [5, 7] оставшиеся члены уравнений сначала по радиусу, а затем по продольной координате x , получим: в области



$$8\mu Sh \frac{dh}{dt} = 2\pi\sigma R_C - \rho g Sh - 8\rho S \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2\pi R_C^4} \int_0^h \left[\int_0^{r_c} r(\varphi^{II} - \varphi_0^{II}) dr \right] \frac{dU}{dx} dx \quad (5)$$

Здесь h – высота слоя сплошной жидкости (см. рис. 1), H – длина порового канала или длина капиллярной трубки, S – площадь порового канала (трубки). Рассмотрим теперь интегралы в правых частях уравнений. Т.к. в области поровое пространство полностью занято жидкостью, то согласно [3], как это уже отмечалось выше, подтверждено и в [5],

положим $\left[\int_0^{r_c} r(\varphi^{II} - \varphi_0^{II}) dr \right] = K$, тогда

интеграл в выражении (5) будет равен $K(U_h - U_0)$. Подинтегральное выражение в уравнении (4) можно представить в виде ряда, т.е.

$$\alpha \left[\int_0^{r_c} r(\varphi' - \varphi_0') dr \right] = K + K_1 \frac{dU}{dx} + K_2 \left(\frac{dU}{dx} \right)^2 + \dots$$

Если ограничиться только двумя членами этого

ряда, то положив $\frac{dU}{dx} = \frac{U_H - U_h}{H - h}$, можно

записать, что интеграл в правой части (4) будет равен $\left(K + K_1 \frac{U_H - U_h}{H - h} \right) (U_H - U_h)$.

Величину U_h можно определить из граничного условия для потенциала на границе областей I и II [8]: $\varepsilon(dU/dx)_{h-0} = \varepsilon_f(dU/dx)_{h+0}$, которое перепишем в виде:

$$\varepsilon \frac{U_h - U_0}{h} = \varepsilon_f \frac{U_H - U_h}{H - h} \quad (6)$$

Из (6) следует, что

$$U_h = \frac{\varepsilon(H - h)U_0 + \varepsilon_f h U_H}{\varepsilon(H - h) + \varepsilon_f h} \quad (7)$$

Объединяя теперь уравнения (4) и (5) можно записать

$$8\mu\alpha SH \frac{dh}{dt} = 2\pi\sigma R_C - \rho g S [h + \alpha(H - h)] - 8\rho S \cdot \frac{\varepsilon_0}{2\pi R_C^4} \times \left\{ K + \frac{\varepsilon(H - h)}{\varepsilon(H - h) + \varepsilon_f h} K_1 \frac{(U_H - U_0)}{H} \right\} \frac{\varepsilon \varepsilon_f H}{\varepsilon(H - h) + \varepsilon_f h} (U_H - U_0) \quad (8)$$

Остановимся теперь на важном вопросе, связанном с электрокапиллярными явлениями. Известно, что поверхностное натяжение согласно закону Липмана [3, 9] может изменяться при наложении электрического поля, т.к. на межфазных поверхностях могут адсорбироваться поверхностные заряды. При их отсутствии кривая электрокапиллярности достигает максимума. Из электродинамики известно, что поверхностные заряды также входят в граничное условие для градиентов потенциалов, которое использовано выше при пренебрежении величиной этих зарядов. Учет их, возможно, должен повлиять и на величину σ в уравнениях (4), (5) и (8). В работах по устойчивости межфазовых поверхностей, поверхностное натяжение, как правило, принимается постоянным, например, [10-12], но при этом учитываются поверхностные заряды, которые варьируются в задачах. В обзорной работе [10] даются некоторые оценки влияния электрических поле на σ , однако это

относится к неполярным жидкостям, для которых такое влияние незначительно. В условиях наших экспериментов этот вопрос представляет значительные сложности, т.к. не ясен ионный состав самой жидкой среды. Кроме того, необходимо отметить, что влияние на поверхностное натяжение оказывает именно та структура ионов, которая локализуется в окрестности верхней поверхности жидкости, вследствие чего это практически неопределимая задача, т.к. связь локальных электродинамических и электрохимических характеристик с общим перепадом потенциала далеко неоднозначна. В объеме газожидкостной среды, находящейся в области I этот вопрос косвенно учтен коэффициентом K_1 . В работе [13], посвященной поднятию мениска при задании электрического поля, отмечается, что влияние внешнего электрического поля значительно влияет на поднятие мениска в капиллярной трубке, когда



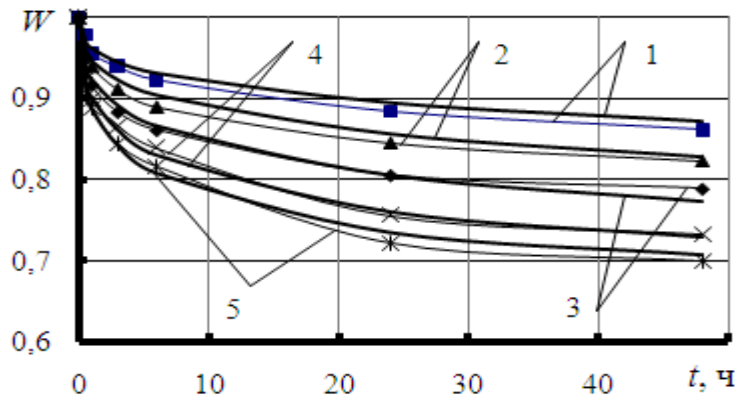
гидростатическое давление соизмеримо с капиллярным или даже больше лапласовского давления. Однако это относится к величинам градиентов потенциала порядка 10^6 В/м, что соответствует разрядным явлениям с очень резкими перепадами параметров. Вследствие этого величину σ будем считать обычной, соответствующей величине без поверхностных зарядов.

Из (8) видно, что процесс обезвоживания, заканчивается тогда, когда правая часть становится равной нулю. Принимая во внимание, что $w = S[h + \alpha(H - h)]$ – это объем жидкости в поровом канале, разделим правую часть уравнения (8) на $\rho g S H$, тогда будем иметь в конце процесса

$$W_c = 2\pi\sigma \frac{R_c}{\rho g S H} - 8 \cdot \frac{\varepsilon_0}{2\pi R_c^4} \times \left\{ K + \frac{\varepsilon(H - h_c)}{\varepsilon(H - h_c) + \varepsilon_f h} K_1 \frac{(U_H - U_0)}{H} \right\} \frac{\varepsilon \varepsilon_f H}{\varepsilon(H - h_c) + \varepsilon_f h_c} \frac{(U_H - U_0)}{gH} \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что количество остаточной жидкости в слое дисперсного материала может быть представлено, по крайней мере, в виде полинома второй степени, при этом первый член должен быть равным единице.

Результаты экспериментов и аппроксимационные кривые. На рис. 3 показаны кривые изменения относительной влажности ($W = w/w_N, w_N$ – начальная влажность) во времени в зависимости от подаваемого потенциала



1 – $\Delta U = 25$ В; 2 – 35 В; 3 – 50 В; 4 – 65 В; 5 – 75 В

Рис. 3. Изменение относительной влажности в зависимости от времени и подаваемого напряжения (тонкие кривые с маркерами – эксперимент; сплошные кривые – аппроксимация)

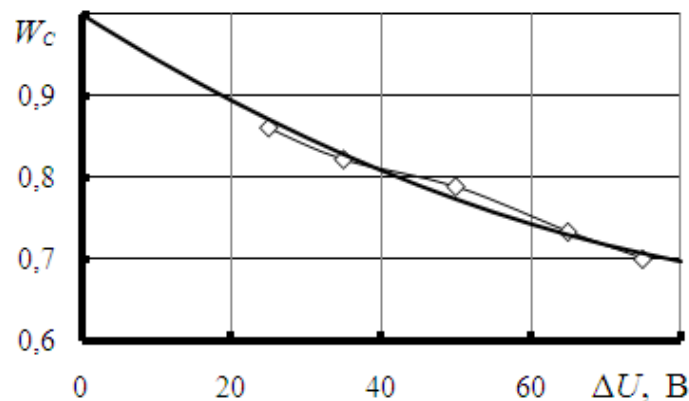


Рис. 4. Изменение конечной относительной влажности в зависимости от подаваемого потенциала (тонкая кривая с маркерами – эксперимент; сплошная кривая – аппроксимация)



Если принять, что последние точки этих кривых соответствуют стационарным положениям газожидкостных слоев в поровом пространстве, то их расположение должно быть близким к структуре формулы (9). На рис. 4 показана кривая конечной относительной влажности в зависимости от подаваемого потенциала и ее аппроксимационная кривая.

Аппроксимационная кривая, показанная на рис. 4 описывается выражением

$$W_C = 1 - 0,462 \left(1 - 0,344 \frac{\Delta U}{80} \right) \frac{\Delta U}{80}. \quad (10)$$

$$W_C = 2\pi\sigma \frac{R_C}{\rho g S H} - 8 \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_f}{2\pi R_C^4} \cdot \left\{ K + K_1 \frac{(U_H - U_0)}{H} \right\} \frac{(U_H - U_0)}{gH}, \quad (11)$$

откуда следует, что

$$2\pi\sigma \frac{R_C}{\rho g S H} = 1, \quad 640 \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_f}{2\pi R_C^4} \cdot \frac{K}{gH} = 0,462, \quad (12)$$

$$5,12 \cdot 10^4 \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_f}{2\pi R_C^4} \cdot \frac{K_1}{gH} = 0,159.$$

Эти соотношения можно проверить и, соответственно, подправить для различных пористых и дисперсных материалов при экспериментальном исследовании в конкретных ситуациях.

Максимальная относительная ошибка здесь не превышает 2 %, что указывает на справедливость тех допущений, которые были приняты при выводе выражения (9).

Сравнивая формулу (10) с зависимостью (9) можно определить некоторые важные параметры. В частности, если принять, что в формуле (9) высота слоя со сплошной жидкостью значительно меньше, чем H , то пренебрегая этой величиной, можно записать

Формула (10) теперь подсказывает вид аппроксимирующих кривых, которые показаны на рис. 2. Его можно записать, как

$$W_C = 1 - 0,462 \left[1 - 0,344 \frac{\Delta U}{80} \left(\frac{t}{48} \right)^{0,5} \right] \frac{\Delta U}{80} \left(\frac{t}{48} \right)^{0,33}. \quad (13)$$

В точке $t = 48$ ч выражение (13) переходит в формулу (10). Здесь максимальная относительная ошибка аппроксимации для всех кривых по абсолютной величине составляет 2,81 %, что также говорит об удачном выборе формы представления аналитической зависимости (13) и о справедливости тех физических представлений, которые легли в ее основу.

Список использованных источников

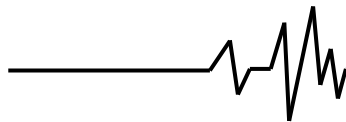
1. Бейлин М. И. Теоретические основы процессов обезвоживания углей / М. И. Бейлин. – М.: Недра, 1969. – 240 с.
2. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов / Б. М. Тареев. – М., 1982. – 320 с.
3. Ньюмен Дж. Электрохимические системы / Дж. Ньюмен. – М.: Мир, 1977. – 462 с.
4. Надутый В. П. Результаты комплексного обезвоживания измельченной

горной массы / В. П. Надутый, П. В. Левченко, С. В. Костыря // Вібрації в техніці та технологіях. – 2015. – № 2(78). – С. 97–102.

5. Надутый В. П. Теоретические оценки влияния некоторых параметров процесса комплексного обезвоживания измельченной горной массы / В. П. Надутый, В. И. Елисеев, В. И. Луценко, С. В. Костыря // Геотехнічна механіка. – Вып. 126. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 36–42.

6. Патент на корисну модель № 92897, UA, МПК В 01 D 61/56 (2006.1). Пристрій для зневоднення/ Надутый В.П., Сухарев В.В., Костыря С.В. – Заявка № 2014 03 312; Заявл. 01.04.2014, Опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. – 4 с.

7. Надутый В. П. Математическая модель опускания слоя жидкости в пористой среде / В. П. Надутый, В. И. Елисеев, В. И. Луценко // Геотехнічна механіка : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН України. – Д., 2011. – Вып. 92. – С. 3–14.



8. Левич В. Г. Курс теоретической физики. Т. II. Электромагнитные процессы в веществе. Квантовая механика / В. Г. Левич, Ю. А. Вдовин, В. А. Мямлин. – М.: Физматлит, 1962. – 819 с.

9. Дамаскин Б. Б. Электрохимия / Б. Б. Дамаскин, О. А. Петрий, Г. А. Цирлина. – М.: Химия. Колосс, 2006. – 337 с.

10. Григорьев О. А. Неустойчивость заряженной плоской поверхности тангенциального разрыва двух несмешивающихся жидкостей различных плотностей / О. А. Григорьев, С. О. Щиряева // Журнал технической физики. – Т. 66, вып. 2. – С. 23–34.

11. Жакин А. И. Исследование заряженных струй: сравнение теории с экспериментом / А. И. Жакин, П. А. Белов // Электронная обработка материалов. – 2013. – 49(4). – С. 24–29.

12. Жакин А. И. Электродинамика / А. И. Жакин // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 5. – С. 495–520.

13. Полищук Н. В. Влияние электрических полей на капиллярные постоянные / Н. В. Полищук // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 1 – С. 32–41.

Список источников в транслитерации

1. Beylin M.I. Teoreticheskie osnovy protsessov obezvozhvaniya / M.I. Beylin. – М. : Nedra, 1969. – 240 с.

2. Tareev V.M. Fizika dielektricheskikh materialov / V.M. Tareev. – М., 1982. – 320 с.

3. Nyunen Dzh. Elektrokhimicheskie sistemy / Dzh. Nyunen. – М. : Mir, 1977. – 462 с.

4. Naduty V. P. Rezultaty kompleksnogo obezvozhvaniya izmelchennoy gornoy massy / V. P. Naduty, P.V. Levchenko, S.V. Kostyrya // Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – 2015. – N 2(78). – S. 97–102.

5. Naduty V. P. Teoreticheskie otsenki vliyaniya nekotorykh parametrov protsessa kompleksnogo obezvozhvaniya izmelchennoy gornoy massy / V. P. Naduty, V. I. Yeliseyev, V. I. Lutsenko, S.V. Kostyrya // Geotekhnichna mekhanika. – Vyp. 126. – Dnipropetrovsk, 2016. – S. 36–42.

6. Patent na korysnu model № 92897, UA, MPK V 01 D 61/56 (2006.1). Prystriy dlia znevodnennia/ Naduty V.P., Sukharyev V.V., Kostyrya S.V. – Zayavka № 2014 03 312; Zayavl. 01.04.2014, Opubl. 10.09.2014. Biul. № 17. – 4 s.

7. Naduty V. P. Matematicheskaya model opuskaniya sloya zhidkosti v poristoy srede / V. P. Naduty, V. I. Yeliseyev, V. I. Lutsenko // Geotekhnicheskaya mekhanika : Mezhd. sb. nauch. tr. / IGTМ NAN Ukrainy. – Dnepropetrovsk, 2011. – Vyp. 92. – S. 3–14.

8. Levich V.G. Kurs teoreticheskoy fiziki. T. II. Elektromagnitnye protsessy v veshchestve. Kvantovaya mekhanika / V.G. Levich, Yu.A. Vdovin, V.A. Myamlin. – М.: Fizmatlit, 1962. – 819 s.

9. Damaskin B.B. Elektrokhiimiya / B.B. Damaskin, O.A. Petriy, G.A. Tsirlina. – М.: Khimiya. KolosS, 2006. – 337 s.

10. Grigorev O.A. Neustoychivost zaryazhennoy ploskoy poverkhnosti tangentsialnogo razryva dvukh nesmeshivayushchikhsya zhidkostey razlichnykh plotnostey / O.A. Grigorev, S.O. Shchiryayeva // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. – Т. 66. – Vyp. 2. – S. 23–34.

11. Zhakin A.I. Issledovanie zaryazhennykh struy: sravnenie teorii s eksperimentom / A.I. Zhakin, P.A. Belov // Elektronnyaya obrabotka materialov. – 2013. – 49(4). – S. 24–29.

12. Zhakin A.I. Elektrogidrodinamika / A.I. Zhakin // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 2012. – Т. 182, N 5. – S. 495–520.

13. Polishchuk N.V. Vliyanie elektricheskikh poley na kapillyarnye postoyannye / N.V. Polishchuk // Elektronnyaya obrabotka materialov. – 2004. – N 1. – S. 32-41.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ ТА ЕЛЕКТРООСМОСУ НА ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГОНАСИЧЕНОЇ ГІРСЬКОЇ МАСИ

Анотація. У даній роботі наведені результати експериментальних досліджень з комбінованого зневоднення гірської маси і результати експериментів, коли електричне вплив використовують в нерухомих вологонасичених дисперсних шарах. Визначено ступінь фізичного впливу вібрації і електроосмосу на зневоднюється матеріал і дані деякі фізичні міркування, що сприяють математичної обробки цих результатів.

Ключові слова: вібрація, електроосмос, зневоднення, комплексний метод, капілярна рідина, математична модель.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF VIBRATION AND ELECTROOSMOS ON DEHYDRATION OF MOISTURE MASS

Annotation. In this paper, we present the results of experimental studies on combined dehydration of rock mass and the results of experiments where the electric effect is used in immobile moisture-saturated dispersed layers. The degree of physical impact of vibration and electroosmosis on the dewatering material is determined and some physical considerations are given to facilitate the mathematical processing of these results.

Key words: vibration, electroosmosis, dehydration, complex method, capillary fluid, mathematical model.