

УДК 622.7: 532.6

Надутый В.П., д-р техн. наук, профессор,
Елисеєв В.И., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.,
Луценко В.И., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Костыря С.В., аспирант
(ИГТМ НАН Украины)

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОЦЕССА КОМПЛЕКСНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕННОЙ
ГОРНОЙ МАССЫ**

Надутый В.П., д-р техн. наук, професор,
Єлисеєв В.І., канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.,
Луценко В.І., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Костиря С.В., аспірант
(ИГТМ НАН України)

**ТЕОРЕТИЧНІ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ДЕЯКИХ ПАРАМЕТРІВ
ПРОЦЕСУ КОМПЛЕКСНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ПОДРІБНЕНОЇ
ГІРСЬКОЇ МАСИ**

Naduty V.P., D.Sc. (Tech.), Professor,
Yeliseev V.I., Ph. D.(Phys.-Math.), Senior Researcher,
Lutsenko V.I., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Kostyrya S.V., Doctoral Student
(IGTM of NAS of Ukraine)

**THEORETICAL IMPACT ASSESSMENT OF SOME PARAMETERS
OF COMPLEX DEHYDRATION GRINDING ROCK MASS**

Аннотация. Проведенные предварительные эксперименты по комплексному методу обезвоживания показали эффективность электроосмоса в сочетании с другими способами воздействия на влажное горное сырье. В данной работе для описания влияния внешнего электрического потенциала и перепада давления на эффективность процесса обезвоживания слоя сыпучего материала предложена упрощенная математическая модель, ограниченная рамками теории узкого канала. Получены аналитические выражения, из которых следует, что остаточная влажность слоя линейно зависит от перепада давления и напряжения. Средняя квадратичная ошибка аппроксимационной прямой по отношению к экспериментальным данным не превышает 2,5 %. Это свидетельствует о том, что сделанные в модели предположения и допущения правомерны и полученная теоретически линейная зависимость остаточной влажности от разрежения и разности электрических потенциалов достаточно точно выполняется при обезвоживании измельченной горной массы. Полученные результаты ограничены предположением высокой насыщенности пор жидкостью и требуют дополнительного теоретического и экспериментального обоснования для более глубоких степеней обезвоживания.

Ключевые слова. вибрация, электроосмос, обезвоживание, комплексный метод, математическая модель, электрическое поле.

Введение. Из литературы, например [1, 2], известно, что электрические поля оказывают заметное влияние на движение жидкости в каналах и, особенно, в дисперсных средах. Открытие электроосмоса давно уже нашло применение в практической деятельности. Оно также с успехом используется как при обезвоживании, так и при пропитке различных пористых и сыпучих материалов (Бейлин, М.И., 1969) и [3,4]. В [5,6] на экспериментальном материале показано как различные внешние силовые поля и их комплексное воздействие влияют на эффективность обезвоживания измельченного горного сырья. В данной работе с помощью несложных теоретических моделей даются объяснения и оценки полученных в [5,6] результатов.

Математическая модель.

Вследствие того, что целью работ [5,6] была экспериментальная оценка влияния некоторых технических приемов на эффективность обезвоживания базальтового отсева различных классов крупности, в ней не было предусмотрено достаточно четкой методологической постановки экспериментов для разработки теоретической модели. Однако полученные результаты позволяют построить некоторую упрощенную математическую модель для дальнейшего развития теоретических и экспериментальных исследований. В качестве схемы течения рассмотрим стационарное течение жидкости в цилиндрическом капилляре. Следуя [1] в рамках теории узкого канала запишем уравнения движения несжимаемой жидкости

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

$$0 = - \frac{\partial p}{\rho \partial r} - \rho_E E_R^\Sigma, \quad (2)$$

$$\frac{\partial ru}{\partial x} + \frac{\partial rv}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

где x, r - оси цилиндрической системы координат; u, v - компоненты скорости, соответствующие координатам x, r ; ρ - плотность жидкости; p - давление; g - ускорение свободно падающего тела; ρ_E - плотность зарядов.

Примем, что суммарная напряженность электрического поля состоит из внешней напряженности E , направленной вдоль оси трубки, и внутренней, созданной двойным электрическим слоем (ДЭС)

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

где ε_0 - диэлектрическая постоянная вакуума; ε - коэффициент

диэлектрической проницаемости жидкости. Так как ε_0 имеет порядок 10^{-12} , то, несмотря на возможные большие градиенты потенциала в ДЭС, можно принять, что давление поперек трубки постоянно. Тогда, учитывая постоянство расхода, уравнение (1) можно переписать в более простом виде

$$-\frac{dp}{\rho dx} + g + \nu \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + E \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{4\pi} \cdot \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0. \quad (5)$$

Принимая условия симметрии на оси трубки, а также равенства нулю скорости на стенке трубки, после двукратного интегрирования получим:

$$u = -\frac{1}{4\mu} \left(\frac{dp}{\rho dx} - g \right) (R_K^2 - r^2) - E \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{4\pi} (\varphi - \varphi_0). \quad (6)$$

Из (6) можно получить величину средней скорости

$$\bar{u} = \frac{2}{R_K^2} \int_0^{R_K} r u dr = -\frac{1}{8\mu} \left(\frac{dp}{\rho dx} - g \right) R_K^2 - E \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2\pi R_K^2} \int_0^{R_K} r (\varphi - \varphi_0) dr, \quad (7)$$

тогда, умножая на количество каналов, участвующих в процессе, получим расход

$$G = \frac{1}{8\mu} \left(\frac{\Delta p}{\rho L} + g \right) N_K R_K^2 + \frac{\Delta U}{L} N_K \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{2\pi R_K^2} \int_0^{R_K} r (\varphi - \varphi_0) dr. \quad (8)$$

В данной задаче много неизвестных параметров, однако структура формулы (8) показывает важные детали течения: расход линейно зависит от перепада давления (выполняется закон Дарси) и от электрического потенциала (при сделанном допущении, что структура ДЭС практически не зависит от подаваемого напряжения и степени обезвоживания). В соответствии с формулой (8) величина остаточной жидкости в слое будет равна:

$$Q = Q_0 - G \Delta t, \quad (9)$$

где Q_0 – начальная влажность слоя; Δt – время обезвоживания.

Таким образом, структура формулы (8) дает теоретическое обоснование для аппроксимации полученных экспериментальных результатов линейными зависимостями.

Аппроксимация результатов экспериментов.

Линейная зависимость описывается уравнением $W = a + kx$ (для случая с разрежением x это $-P$, а для случая с напряжением это $-U$). Поэтому при аппроксимации экспериментальных данных [4,5] наименьшими квадратами в каждом случае подбирались два коэффициента a и k . Значения этих

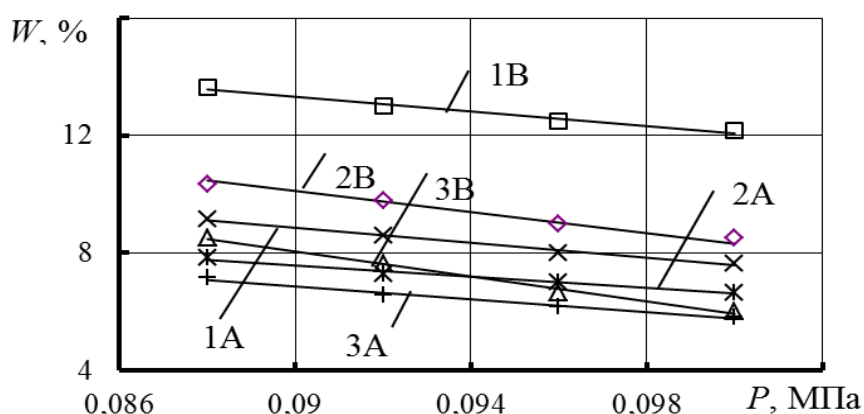
коэффициентов приведены в табл. 1 и в табл. 2 во втором и третьем столбцах. В последних столбцах таблиц показана средняя квадратичная ошибка при аппроксимации. Данные экспериментов и соответствующие аппроксимационные зависимости изображены на рис. 1 и рис. 2.

Таблица 1 – Коэффициенты и точность аппроксимации экспериментов с изменением степени разрежения

Площадь обезвоживания, S , м ²	A	K	o
Крупность 0,63-1,6 мм			
1,12 (A1)	20,34	127,5	0,00415
0,56 (A2)	16,15	95,25	0,00319
0,08 (A3)	16,72	109,5	0,00522
Крупность 0,25-0,63 мм			
1,12 (B1)	24,58	125,0	0,00615
0,56 (B2)	26,32	180,0	0,0142
0,08 (B3)	27,18	212,5	0,00515

Таблица 2 – Коэффициенты и точность аппроксимации экспериментов с изменением разности потенциала

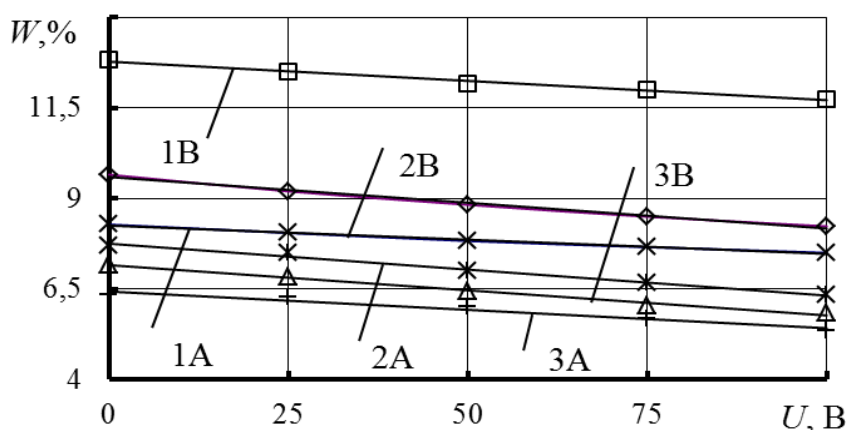
Площадь обезвоживания, S , м ²	A	K	o
Крупность 0,63-1,6 мм			
1,12 (A1)	8,254	0,0078	0,0103
0,56 (A2)	7,754	0,0143	0,025
0,08 (A3)	6,432	0,0101	0,0332
Крупность 0,25-0,63 мм			
1,12 (B1)	12,78	0,0106	0,0218
0,56 (B2)	9,596	0,0142	0,0226
0,08 (B3)	7,162	0,0139	0,0181



1 – $S = 1,12 \text{ м}^2$; 2 – $0,56 \text{ м}^2$; 3 – $0,08 \text{ м}^2$.

A – крупность 0,63 – 1,6 мм; B – крупность 0,25 – 0,63 мм

Рисунок 1 – Относительная остаточная влажность слоя в зависимости от разряжения (точки – эксперимент, линии – аппроксимация).



$$1 - S = 1,12 \text{ м}^2; 2 - 0,56 \text{ м}^2; 3 - 0,08 \text{ м}^2.$$

A – крупність 0,63 –1,6 мм; B – крупність 0,25 –0,63 мм

Рисунок 2 – Относительная остаточная влажность слоя в зависимости от напряжения (точки – эксперимент, линии – аппроксимация)

Из рисунков видно, что экспериментальные точки с хорошей точностью лежат на аппроксимационных прямых. А из данных последних столбцов таблиц следует, что средняя квадратичная ошибка аппроксимации, как при изменении степени разрежения, так и при изменении напряжения мала (хотя во втором случае она на порядок больше). Это свидетельствует о том, что сделанные в модели предположения и допущения правомерны и полученная теоретически линейная зависимость остаточной влажности от разрежения и разности потенциалов достаточно точно выполняется при обезвоживании измельченной массы базальта. Здесь необходимо только учитывать, что при очень глубоком обезвоживании, выходящем за границы области, в которой проведены эксперименты, к сделанным выше выводам нужно относиться с осторожностью, поскольку принятые в модели допущения перестанут выполняться, что может привести к возможным отклонениям от линейной зависимости.

Рассмотрим теперь найденные при аппроксимации значения параметров a и k . Из данных второго и третьего столбцов приведенных выше таблиц видно, что значения коэффициентов a и k существенно отличаются в различных сериях экспериментов. Следовательно, эти коэффициенты зависят и от природы внешнего воздействия, и от свойств горной массы, и от размерных параметров оборудования. Эти зависимости могут иметь достаточно сложный нелинейный характер, и для их определения нужны целенаправленные дополнительные комплексные исследования.

Выводы. Из точности линейной аппроксимации следует, что теоретические зависимости находятся, в целом, в хорошем согласовании с экспериментом, т. е. полученные в экспериментах линейные зависимости изменения степени обезвоживания от разрежения и от напряжения подтверждаются теоретически. Однако разброс коэффициентов a и k пока не позволяет делать определенные

выводы и строить более общие математические модели. Кроме того, данная математическая модель ограничена сделанными выше допущениями, что предполагает сплошное заполнение пор жидкостью. При более глубоком обезвоживании в поровом пространстве должны образовываться воздушные области, которые будут как нарушать структуру ДЭС, так и менять фазовое пространство, а также изменять, соответственно, воздействие электрического поля. Вследствие этого для дальнейшего обобщения необходимы дополнительные методические эксперименты и измерения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихомолова, К.П. Электроповерхностные свойства кварца в растворах при разном времени контакта / К.П. Тихомолова, И.Н. Уракова // Вестн. СПбГУ. Сер. 4. – 2002. – Вып. 3(20). – С. 913-919.
2. Ньюмен, Дж. Электрохимические системы / Дж. Ньюмен. – М.: Мир, 1977. – 463 с.
3. Тареев, Б.М. Физика диэлектрических материалов / Б.М. Тареев. – М., 1982. – 320 с.
4. Пат. на корисну модель № 92897 UA, МПК В02D 61/56 (2006.1). Пристрій для зневоднення / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, С.В. Костыря; заявник і патентовласник ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України. – и 2014 03 312; заявл. 01.04.2014, опубл. 10.09.2014, Бюл. № 17. – 4 с.
5. 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.
6. Jamil Sami Haddad. Complex Dehydration of Rock Mass: / Jamil Sami Haddad, Sukharev V.V., Kostyrya S.V. // International Journal of Engineering and Science: Vol.5, Issue 9 (September 2015), pp. 7-10.

REFERENCES

1. Tikhomolova, K.P. and Urakova, I.N. (2002), "Electrosurface properties of quartz in solutions with different contact times.", *Vestnik St.Petersburgskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser. 4*, no. 3(20), pp. 913-919.
2. Newman, G. (1977), *Elektrokhimicheskiye sistemy* [Electrochemical systems.], Mir, Moscow, SU.
3. Tareyev, B.M. (1982), *Fizika dielektricheskikh materialov* [Physics of dielectric materials.], Energoizdat, Moscow, SU.
4. Nadutyu, V.P., Sukharev, V.V. and Kostyrya, S.V., M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2006), *Prystriy dlia znevodnennia* [Device for dewatering.], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 92897.
5. Nadutyu, V.P., Levchenko, P.V. and Kostyrya, S.V. (2015), " The results of complex dewatering crushed rock mass.", *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, no. 2(78), pp. 97-102.
6. Jamil Sami Haddad, Sukharev V.V. and Kostyrya S.V. (2015), «Complex Dehydration of Rock Mass», *International Journal of Engineering and Science*, Vol.5, Issue 9 (September 2015), pp. 7-10.

Об авторах

Надутый Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, nadutyv@yandex.ua.

Елисеев Владимир Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, helgasobakagniyik@ukr.net.

Луценко Василий Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), lutsenko2@yandex.ru.

Костыря Сергей Владимирович, аспирант, инженер отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), kostyrya81@gmail.com.

About the authors

Nadutyi Vladimir Petrovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, nadutyvp@yandex.ua.

Yeliseev Vladimir Ivanovich, Candidate of Physics and Mathematics (Rh.D), Senior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, helgasobakagniyik@ukr.net.

Lutsenko Vasily Ivanovich, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Senior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, lutsenko2@yandex.ru.

Kostyrya Sergey Vladimirovich, Doctoral Student, Engineer in Department of Geodynamic Systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), kostyrya81@gmail.com.

Анотація. Для опису впливу зовнішнього електричного потенціалу і перепаду тиску на ефективність процесу зневоднення шару сипучого матеріалу запропоновано спрощену математичну модель, обмежену рамками теорії вузького каналу. Отримано аналітичні вирази, з яких випливає, що залишкова вологість шару лінійно залежить від перепаду тиску і напруги. Апроксимація експериментальних даних показала, що теорія якісно вірно відображає лінійний характер залежності залишкової вологості шару гірської маси від ступеня розрядження і електричного потенціалу.

Ключові слова: вібрація, електроосмос, зневоднення, комплексний метод, математична модель, електричне поле.

Abstract. The preliminary experiments on the integrated method of dehydration shown the effectiveness of electro-in conjunction with other methods of influence on the wet raw material mining. In this paper to describe the effect of an external electric potential and the differential pressure on the efficiency of the dewatering of bulk material layer process offered a simplified mathematical model, limited within a narrow channel theory. The analytical expressions, which indicate that the residual moisture layer is linearly dependent on the differential pressure and tension. The mean square error of approximation straight line in relation to the experimental data does not exceed 2.5%. This indicates that the model assumptions made and judgments are legitimate and theoretically obtained a linear dependence of the residual moisture from the vacuum and an electrical potential difference is performed accurately in the dewatering crushed rock mass. The results are limited by the high saturation assumption since the liquid and require further theoretical and experimental studies for deeper degrees of dehydration.

Keywords. vibration, electro-osmose, dehydration, complex method, mathematical model, electric field

Стаття поступила в редакцію 20.01.2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом