

Анализ комплексного обезвоживания мелких фракций гранита

Владимир Надутый¹, Валентина Челышкина², Сергей Костыря³

Институт геотехнической механики имени Н.С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2а, Днепропетровск, Украина, 49005

¹nadutyvp@yandex.ua, orcid.org/0000-0002-2453-0351,

²orcid.org/0000-0003-3601-1572, ³orcid.org/0000-0001-5215-080X

Аннотация. В статье представлены результаты разработки математической модели для описания процесса комплексного обезвоживания мелких фракций гранита (+0,25...0,63 мм) и (+0,63...1,6 мм). В установке для обезвоживания используются три метода: вибрационный, вакуумный и электроосмотический. Независимыми переменными являются семь параметров: исходная влажность, площадь поверхности сушки, изменение давления в вакуумной камере, напряжение на электродах, частота колебаний и величина возмущающей силы вибровозбудителя, угол наклона рабочего органа. Значение работы состоит в разработке регрессионной модели для практического описания изменения конечной влажности гранита от указанных параметров.

Ключевые слова: комплексный метод, влажность, гранит, регрессионные уравнения.

ВВЕДЕНИЕ

Основой работы авторов является поиск технического решения для достаточно глубокого обезвоживания (4,0...6,0 % остаточной влаги) горной массы, исследование закономерностей массопереноса, обоснование его эффективности и работоспособности, в результате чего предложен метод комплексного обезвоживания влажной горной массы.

Разработанное авторами устройство позволяет выполнять комплексное обезво-

живание горной массы, поскольку в нем одновременно используются три механизма обезвоживания (вибрационный, вакуумный и электрокинетический) на основе электроосмоса, основанный на процессах переноса влаги в обрабатываемом материале под влиянием постоянного тока [1, 2]. Предварительные исследования обезвоживания по данному комплексному методу показали обнадеживающие результаты [3].

Вибрационный метод позволяет эффективно отбирать из горной массы внешнюю воду [4 – 6], вакуумный способ ускоряет этот процесс и дополнительно обезвоживает поровые каналы в горной массе [7], а также убирает перемычки влаги между частицами твердого остатка (так называемые перетяжки). Однако капиллярную влагу извлечь этими методами не удастся, поскольку силы поверхностного натяжения воды в капиллярах довольно велики [9].

Целью данной работы является определение эффективности обезвоживания мелкого гранита по двум классам крупности: (+0,25...0,63 мм) и (+0,63...1,6 мм) путём варьирования параметрами обезвоживающего устройства и получение многофакторных регрессионных уравнений. Снижение влажности таких материалов актуально в сферах торговли, транспорти-

ровки и применения в различных технологиях.

При проведении экспериментов на конечную влажность влияли семь не коррелирующих между собой показателей: площадь перфорированной поверхности, на которой размещался высушиваемый продукт, S (m^2), исходная влажность продукта $W_{исх}$ (%), давление в вакуумной камере P (МПа), напряжение электрического поля U (В), величина возмущающей силы (усилия) вибровозбудителя F (кН), частота колебаний вибровозбудителя ω ($мин^{-1}$) и угол наклона рабочего органа α (град) [9]. Указанные показатели варьировались в следующих диапазонах:

$S = 0,08 \dots 1,12 m^2$, с шагом $0,08 m^2$;
 $W_{исх} = 10 \dots 30 \%$, с шагом 10% ;
 $P = 0,088 \dots 0,1$ МПа, с шагом $0,04$ МПа;
 $U = 25 \dots 100$ В, с шагом 25 В;
 $F = 0,5 \dots 0,8$ кН, с шагом $0,1$ кН;
 $\omega = 1500 \dots 3000$ $мин^{-1}$, с шагом 500 $мин^{-1}$
 $\alpha = 5 \dots 20$ град, с шагом 5 град.

Общее количество экспериментальных измерений составило 88.

ЦЕЛЬ И МЕТОДЫ РАБОТЫ

Целью исследований: по результатам экспериментов оценить влияние каждого показателя и построить обобщенную регрессионную зависимость конечной влажности от всех семи показателей.

Вначале, методом построения парных

корреляций, исследовалось влияние на конечную влажность какого-то одного показателя при остальных фиксированных на уровне постоянных значений. Анализировалась база измерений влажности для трех значений площади обезвоживания: $0,08 m^2$, $0,56 m^2$ и $1,12 m^2$ и следующих фиксированных показателей: $W_{исх} = 30 \%$, $P = 0,063$ МПа; $U = 75$ В; $F = 0,5$ кН; $\omega = 3000$ $мин^{-1}$; $\alpha = 5$ град. Парные корреляции позволили установить характер взаимосвязи каждого из показателей с конечной влажностью (линейная, нелинейная).

Для оценки степени влияния каждого фактора была построена линейная регрессия вида:

$$W_{кон.} = f(a_0 + a_1W_{исх.} + a_2S + a_3W + a_4U + a_5F + a_6P + a_7\alpha) \quad (1)$$

При этом использовалась программа Microsoft Excel, позволяющая строить регрессионные зависимости с числом слагаемых 16 и менее. Получено, что квадрат коэффициента корреляции для этой зависимости имеет невысокое значение: $R^2 = 0,8751455$. Поэтому ее прямое использование нецелесообразно, и ниже мы получим более адекватные регрессионные модели. Однако величина коэффициентов в уравнении линейной регрессии ($a_0, a_1, \dots a_7$) позволяет ориентировочно оценивать насколько сильно влияет каждый из факторов на конечную влажность: чем больше величина коэффициента при данном фак-

Таблица 1. Коэффициенты уравнения (1)
Table 1. Equations (1) coefficients

Независимые факторы	Коэффициенты		Стандартная ошибка	t -статистика
	a_0			
$W_{исх}$	a_1	24,1049	3,014627	7,995982
S	a_2	0,353584	0,050874	6,950182
ω	a_3	-8,86693	0,476443	-18,6107
U	a_4	-0,00119	0,000623	-1,90659
F	a_5	-0,02418	0,0117	-2,06679
P	a_6	5,243971	3,112594	1,684759
α	a_7	-190,386	19,32261	-9,85301
		0,292498	0,062252	4,698629

торе, тем сильнее его влияние (Табл. 1).

Анализ результатов построения парных корреляций и линейной регрессии (1) позволил сделать следующие выводы:

1. Наиболее сильное влияние на процесс сушки оказывает давление в вакуумной камере P . Для максимальной площади поверхности $1,12 \text{ м}^2$ при исходной влажности 30 % имеет место снижение содержания влаги до 9 % при $P = 0,088 \text{ МПа}$ и до 6,3 % при $P = 0,1 \text{ МПа}$. Для мелкого класса гранита при любой площади зависимость $W_{\text{кон.}}$ от P имеет линейный характер.

2. На втором месте по степени влияния находится площадь поверхности сушки. Эта зависимость имеет выраженный нелинейный характер. Оптимальная площадь – наибольшая: $S = 1,12 \text{ м}^2$.

3. Зависимость $W_{\text{кон.}}$ от величины возмущающей силы F имеет линейный характер. Например, при $S = 1,12 \text{ м}^2$ увеличение F с 0,5 до 0,8 кН приводит к увеличению конечной влажности с 11,7 до 14%.

4. Зависимость $W_{\text{кон.}}$ от исходной влажности $W_{\text{исх.}}$ имеет выраженный нелинейный характер. Так, для $S = 1,12 \text{ м}^2$ при исходной влажности 30 % конечная влажность составляет 12 % и снижается на 18 единиц, а при малой исходной влажности (10 %) – лишь на 3 единицы (до 7 %).

5. Зависимость $W_{\text{кон.}}$ от угла наклона рабочего органа α имеет линейный характер. Увеличение α свыше 5 град. оказывает негативное влияние. Так при $\alpha = 5$ град. конечная влажность составляет 11,8 %, а при 20 град. – 16,9 %.

6. Зависимость $W_{\text{кон.}}$ от напряжения U линейная, слабая. Так, для площади $1,12 \text{ м}^2$ и прочих фиксированных параметрах при увеличении U от 0 до 100 В конечная влажность снижается на 2,5%: с 13,3 до 10,8%.

7. Зависимость $W_{\text{кон.}}$ от частоты колебаний вибровозбудителя ω – линейная, слабая. При $S = 1,12 \text{ м}^2$ и прочих фиксированных параметрах ($U = 75 \text{ В}$) увеличение ω с 1500 до 3000 мин^{-1} ведет к снижению влажности с 14,6 до 11,5% (на 3,1%).

Таким образом, выявлены пять линейных и две нелинейные зависимости $W_{\text{кон.}}$ от изменяемых факторов. Нелинейные зависимости – от площади сушки S и от исходной влажности $W_{\text{исх.}}$. Наличие нелинейных связей является основанием для того, чтобы при построении обобщенной регрессионной модели (от всех семи факторов) задать целевую функцию $W_{\text{кон.}}$ в виде полной квадратичной формы:

$$W_{\text{кон.}} = f(W_{\text{исх.}}, S, \omega, U, F, P, \alpha, W_{\text{исх.}}, S, W_{\text{исх.}}, \omega, W_{\text{исх.}}, U, W_{\text{исх.}}, F, W_{\text{исх.}}, P, W_{\text{исх.}}, \alpha, S\omega, SU, SF, SP, Sa, \omega U, \omega F, \omega P, \omega \alpha, UF, UP, U\alpha, FP, F\alpha, P\alpha, W_{\text{исх.}}^2, S^2, \omega^2, U^2, F^2, P^2, \alpha^2). \quad (2)$$

Минимизировать число членов уравнения (2) и получить адекватную регрессионную модель позволяет известная программа SPSS [10] при использовании опции «Пошаговый отбор». Программой SPSS предложено 13 регрессионных моделей, достоверность аппроксимации которых оценивалась по величине квадрата коэффициента корреляции двух множеств – расчетного и экспериментального значений конечной влажности (Табл. 2).

Ниже приведены переменные, включенные в уравнения моделей 1 – 13:

1. (const) SP
2. (const) SP, W
3. (const) SP, W, WP
4. (const) SP, W, WP, WS
5. (const) SP, W, WP, WS, S^2
6. (const) W, WP, WS, S^2
7. (const) $W, WP, WS, S^2, F\alpha$
8. (const) $W, WP, WS, S^2, F\alpha, S$
9. (const) $W, WP, WS, S^2, F\alpha, S, SP$
10. (const) $W, WP, WS, S^2, F\alpha, S, SP, \omega U$
11. (const) $W, WP, WS, S^2, F\alpha, S, SP, \omega U, W^2$
12. (const) $W, WP, WS, S^2, F\alpha, S, SP, \omega U, W^2, Sa$
13. (const) $W, WP, WS, S^2, F\alpha, S, SP, \omega U, W^2, Sa, \omega \alpha$.

Здесь и ниже обозначено $W = W_{\text{исх.}}$.

Таблица 2. Статистика регрессионных моделей 1 – 13

Table 2. Regression models 1 – 13 statistics

Модель	R	R^2	Скорректиров. R^2	Станд. ошибка оценки	Изменение R^2	Изменения F
1	0,788	0,622	0,617	3,10337	0,622	141,293
2	0,841	0,707	0,700	2,74772	0,085	24,703
3	0,892	0,795	0,788	2,31136	0,088	36,123
4	0,927	0,859	0,852	1,92915	0,064	37,582
5	0,951	0,905	0,899	1,59174	0,046	39,917
6	0,951	0,904	0,899	1,59300	0,001	1,131
7	0,965	0,931	0,927	1,35615	0,027	32,524
8	0,971	0,943	0,939	1,24065	0,012	16,979
9	0,978	0,957	0,953	1,08796	0,014	25,331
10	0,982	0,964	0,961	0,99466	0,008	16,712
11	0,983	0,966	0,962	0,97622	0,002	4,013
12	0,984	0,968	0,964	0,95753	0,002	4,075
13	0,985	0,970	0,965	0,93188	0,002	5,297

Из Табл. 2 видно, что модели 5 и 6 имеют близкое, но не высокое значение $R^2 \approx 0,90$, что недостаточно для адекватного описания. Модели 7, 8 также имеют недостаточно высокое значение R^2 . Модели 9 и 10 имеют примерно одинаковую величину $R^2 \approx 0,96$. Для моделей 11 –13 значение R^2 увеличивается, но не значительно $R^2 \approx 0,97$, то есть увеличение количества слагаемых в уравнении регрессии не оправданно. Таким образом, наиболее подходящими являются модели 9 и 10.

Коэффициенты уравнений регрессии для моделей 9 и 10 приведены в Табл. 3.

Модели 9 и 10 отличаются одним слагаемым ωU . Как видно из табл. 3 коэффициент при этом слагаемом близок к 0, поэтому для практического использования следует рекомендовать модель 9:

$$W_{\text{кон}} = 4,685 + 128,759SP + 1,207W - 9,396WP - 0,393WS + 10,056S^2 + 0,503F\alpha - 18,345S; \quad (3)$$

$$R^2 = 0,957$$

Отметим, что из семи показателей в модель 9 не вошли два – U и ω . Исходя из анализа парных корреляций, при эксплуатации установки для обезвоживания, эти параметры должны быть выбраны на уровне рациональных значений: $U =$

$75 \dots 100$ В и $\omega = 2500 \dots 3000$ мин⁻¹. Регрессионное уравнение (3) с высокой достоверностью описывает снижение влажности гранита крупностью $0,44 \pm 0,2$ мм с $10 \dots 30$ % до $7 \dots 9$ % и достигнутым минимумом $6,3$ %.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ экспериментальных данных по обезвоживанию мелких фракций гранита ($-0,63 \dots +0,25$ мм) на установке с комплексным воздействием вибрации, электроосмоса и вакуумирования. С помощью современных методов компьютерного анализа разработана регрессионная модель для практической оценки конечной влажности продукта. Регрессионное уравнение описывает процесс обезвоживания при двух показателях, фиксированных на уровне рациональных значений: напряжение $U = 75 \dots 100$ В, частота оборотов привода вибровозбудителя $\omega = 2500 \dots 3000$ об/мин. и включает пять варьируемых показателей: площадь поверхности обезвоживания, исходная влажность продукта, давление в вакуумной камере, величина возмущающей силы вибровозбудителя, угол наклона рабочего органа. Модель ох-

ватує діапазон зниження вологості с 10...30% до 7...9 %.

Таблиця 3. Коэффициенты уравнений регрессии
Table 3. Regression equations coefficients

№ моделі	Слагаемое	Коэффициент при слагаемом	t-критерий (Стьюдента)
9	(const)	4,685	3,201
	SP	128,759	5,033
	W	1,207	18,107
	WP	-9,396	-15,156
	WS	-0,393	-5,726
	S ²	10,053	10,979
	F α	0,503	7,035
	S	-18,345	-6,695
10	(const)	6,539	4,628
	SP	128,637	5,500
	W	1,176	19,155
	WP	-9,140	-16,028
	WS	-0,393	-6,259
	S ²	9,931	11,856
	F α	0,551	8,293
	S	-18,192	-7,262
	ωU	0, а точнее (-8·10 ⁻⁶)	-4,088

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент 92897 України, 2014. Пристрій для зневоднення. Надутый В.П., Сухарев В.В., Костыря С.В. Опубл. в Бюл.17, 4.
2. Патент 101478 України, 2015. Спосіб зневоднювання сипучої гірської маси. Надутый В.П., Сухарев В.В., Костыря С.В. Опубл. в Бюл.17, 4.
3. Надутый В.П., Сухарев В.В., Костыря С.В., 2014. Обоснование эффективности использования комплексного метода обезвоживания мелкой влажной горной массы. Днепропетровск, Геотехническая механика. Вып.119, 63-69.
4. Надутый В.П., Сухарев В.В., Костыря С.В., 2014. Результаты комплексного обезвоживания горной массы на вибрационном устройстве. Вінниця, Вібрації в техніці та технологіях. Вип.1(73), 88-93.

5. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И., 2012. Исследование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении. Днепропетровськ, Національний гірничий університет, Вип.49(90), 112-120.
6. Надутый В.П., Елисеєв В.И., Луценко В.И., 2011. Влияние вибраций на статическое положение мениска движущейся в капилляре жидкости. Харків, ХПІ, Вип.59, 104-111.
7. Гарковенко Е.Е., 2006. Интенсификация механического обезвоживания осадков тонкодисперсных углесодержащих материалов. Київ, Вісник КТУ, Вип.13, 90-94.
8. Надутый В.П., Елисеєв В.И., Луценко В.И., 2013. Эффект подъема влажных частиц в вертикальной вибрирующей трубе. Вінниця, Вібрації в техніці та технологіях. Вип.1(69), 31-36.
9. Тихомолова К.П., Уракова И.Н., 2002. Электроповерхностные свойства кварца в растворах при разном времени контакта. Санкт-Петербург, Вестник СПбГУ, Вып.3 (20), 913-919.
10. Бююль А., Цефель П., 2005. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей, 608.

REFERENCES

1. Patent 92897 Ukraine, 2014. Prystriy dlya znevodnennya. Naduty V.P., Sukharev V.V., Kostyrya S.V., Opubl. v Bjul.17, 4 (in Ukrainian).
2. Patent 101478 Ukraine, 2015. Sposib znevodnyuvannya sipuchoi girs'koї masi. Naduty V.P., Sukharev, V.V., Kostyrya S.V. Opubl. v Bjul. 17, 4 (in Ukrainian).
3. Naduty V.P., Sukharev V.V., Kostyrya S.V., 2014. Obosnovanie ehffektivnosti ispol'zovaniya kompleksnogo metoda obezvozhivaniya melkoj vlazhnoj gornoj massy. Dni-propetrovsk, Geo-Technical Mechanics, Vol.119, 63-69 (in Russian).
4. Naduty V.P., Sukharev V.V., Kostyrya S.V., 2014. Rezul'taty kompleksnogo obezvozhivaniya gornoj massy na vibracionnom ustrojstve. Vinnitsa, Vibratsiyi v tehniitsi ta tehnologiyah, Vol.1(73), 88-93 (in Russian).
5. Naduty V.P., Lapshin E.S., Shevchenko A.I., 2012. Issledovanie kinetiki obezvozhivaniya pri vibracionnom grohochenii. Dni-prope-

- trovsk, National Mining University, Vol.49(90), 112-120 (in Russian).
6. **Naduty V.P., Yeliseyev V.I., Lutsenko V.I., 2011.** Vliyanie vibracij na staticheskoe polozhenie meniska dvizhushchejsya v kapillyare zhidkosti. Kharkiv, Kharkiv Polytechnic Institute, Vol.59, 104-111 (in Russian).
 7. **Garkovenko E.E., 2006.** Intensifikaciya mekhanicheskogo obezvozhivaniya osadkov tonkodispersnyh uglesoderzhashchih materialov. Kiev, Visnik KTU, Vol.13, 90-94 (in Russian).
 8. **Naduty, V.P., Yeliseyev, V.I., Lutsenko, V.I., 2013.** Ehffekt pod"ema vlazhnyh chastic v vertikal'noj vibriruyushchej trube. Vinnitsa, Vibratsiyi v tehnitsi ta tehnologiyah, Vol.1, 31-36 (in Russian).
 9. **Tihomolova K.P., Urakova I.P., 2002.** Ehlektropoverhnostnye svojstva kvarca v rastvorah pri raznom vremeni kontakta. Vestn. St. Petersburg State University, Vol.3 (20), 913-919 (in Russian).
 10. **Buul A., Tsefel P., 2005.** SPSS: iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannyx i vosstanovleniye skrytykh zakonmernostey. SPb, OOO Dia-SoftYuP, 608 (in Russian).

Analysis of the integrated dewatering of fine fractions of granite

Vladimir Naduty¹, Valentina Chelyschkina², Sergey Kostyrya³

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine

Simferopolskaya, 2a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005, ¹nadutyvp@yandex.ua, orcid.org/0000-0002-2453-0351,

²0000-0003-3601-1572, ³0000-0001-5215-080X

Summary. The article presents the results of development of a mathematical model for description of the integrated dewatering (dehydration) process of the small fractions of granite ($0,44 \pm 0,2$) mm. Three methods are used in apparatus for dewatering: vibration, vacuum and electro-osmosis. The seven parameters are independent variables: the initial moisture content, the area of drying surface, change of the pressure in the vacuum chamber, the voltage on the electrodes, frequency and magnitude of the disturbing force of the vibration exciter, the angle of inclination of the working body. The importance of the work is the development of regression model for the practical description of changes of final moisture of granite from the specified parameters.

Key words: integrated method, moisture, granite, the regression equations.