

УДК 622/794:621-1/-9

**Надутый В.П.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Левченко П.В.**, канд. техн. наук,  
**Костыря С.В.**, аспирант  
(ИГТМ НАН Украины)

## **РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ**

**Надутый В.П.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Левченко П.В.**, канд. техн. наук,  
**Костыря С.В.**, аспирант  
(ИГТМ НАН Украины)

## **РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ КОМПЛЕКСНОГО ЗНЕВОДНЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ**

**Naduty V.P.**, D. Sc. (Tech.), Professor,  
**Levchenko P. V.**, Ph.D. (Tech.),  
**Kostyrya S. V.**, Doctoral Student  
(IGTM NAS of Ukraine)

## **REGRESSION ANALYSIS OF COMPLEX IRON ORE DEHYDRATION**

**Аннотация.** Целью работы является определение эффективности обезвоживания железной руды путём варьирования параметрами обезвоживающего устройства и получение многофакторных регрессионных уравнений.

Предварительные исследования обезвоживания по данному комплексному методу показали обнадеживающие результаты.

В статье отражены результаты комплексного обезвоживания железной руды. В установке для обезвоживания используется три механических методов обезвоживания - вибрационный, вакуумный и электроосмотический. Определена степень влияния каждого метода на процесс обезвоживания. Установлены зависимости остаточной влаги и производительности обезвоживающего устройства от семи факторов: исходной влажности железной руды, площади поверхности обезвоживания, изменение давления в вакуумной камере, напряжения на электродах, частоты колебаний и угла наклона рабочего органа, а также от величины возмущающей силы. Значение работы состоит в определении наиболее эффективного режима обезвоживания измельченной железной руды и получение многофакторных регрессионных уравнений.

**Ключевые слова:** вибрация, железная руда, электроосмос, обезвоживание, комплексный метод, вакуумирование.

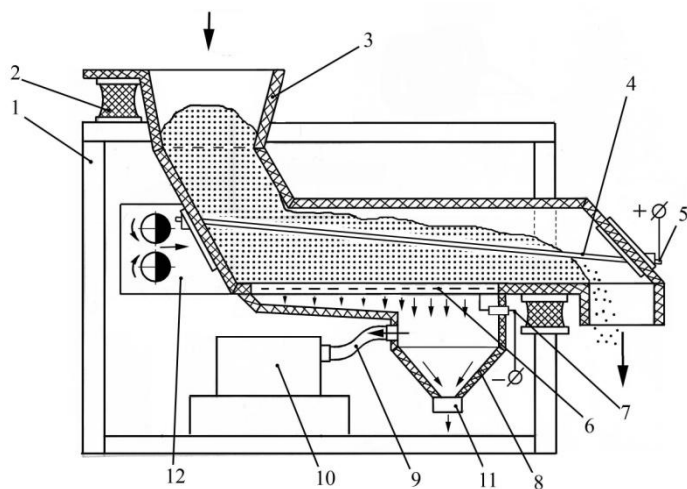
**Введение.** Разнообразные технологии обогащения предусматривают переработку полезных ископаемых в виде пульпы и последующее ее обезвоживание. В частности, в цикле переработке железной руды перед операцией агломерации необходимо снизить влажность исходного материала с целью уменьшения энергетических затрат, для этого создаются новые устройства и методы обезвоживания горной массы.

Вибрационный метод позволяет эффективно отбирать из горной массы внешнюю воду [1,2], вакуумный способ ускоряет этот процесс и дополнительно обезвоживает поровые каналы в горной массе [3], 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 [4].

**Целью данной работы** является определение эффективности обезвоживания железной руды по двум классам крупности: (+0,25-0,63мм) и (+0,63-1,6мм) путём варьирования параметрами обезвоживающего устройства и получение многофакторных регрессионных уравнений.

Разработанное авторами устройство позволяет выполнять комплексное обезвоживание 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 [5,6]. Предварительные исследования обезвоживания по данному комплексному методу показали обнадеживающие результаты [7].

Экспериментальный образец установки для обезвоживания горной массы комплексным методом представлен на рис. 1 [8].



- 1 – опорная рама; 2 – упругие элементы; 3 – диэлектрический корпус; 4 – электропроводящий стержень; 5 – катод; 6 – перфорированная поверхность; 7 – анод; 8 – вакуумная камера; 9 – гибкий шланг; 10 – вакуумный насос; 11 – сливной патрубок

Рисунок 1 – Общий вид вибрационного устройства для комплексного обезвоживания горной массы

Принцип его работы следующий: в диэлектрический корпус 3 непрерывно поступает влажный материал, который постоянно контактирует с электрическим стержнем 4, к которому подключен катод 5. Благодаря постоянному контакту с электропроводящим стержнем, под воздействием постоянного тока, избыточная влага движется к перфорированной поверхности 6, которая также является анодом 7. Из-за разницы потенциалов обеспечивается движение воды и происходит электроосмотическое обезвоживание материала. На корпусе 3 установлен вибровозбудитель 12, с помощью которого производится непрерывное движение обезвоживаемого материала по перфорированной поверхности 6.

Так как перфорированная поверхность 6 расположена по всей длине устройства, увеличивается процесс удаления избыточной влаги. Разреженная среда создается в вакуумной камере 8 вакуумным насосом 10 соединенным с ней гибким

шлангом 9. Избыточная влага выводится из вакуумной камеры 8 с помощью устройства для слива воды 11.

Для двух классов крупности ((+0,25-0,63 мм) и (+0,63-1,6 мм)) были проведены экспериментальные исследования по установлению влияния параметров обезвоживающего устройства на его основные технологические показатели – конечную влажность ( $W_{кон}$ , %) и производительность ( $Q$ , т/ч). При этом в качестве переменных факторов задавались следующие: исходная влажность материала ( $W_{исх}$ , %), угол наклона ( $\alpha$ , град.) и площадь поверхности обезвоживания ( $S$ , м<sup>2</sup>), возмущающая сила ( $F$ , кН) и частота вращения вала вибровозбудителя ( $\omega$ , об/мин), напряжение электропроводящего стержня ( $U$ , В), давление в вакуумной камере ( $P$ , МПа).

При работе предлагаемого устройства для комплексного обезвоживания железной руды с заданными технологическими показателями необходим правильный подбор режимных и конструктивных параметров, при которых бы удовлетворялись технологические требования. Поэтому возникла необходимость в разработке обобщённых регрессионных зависимостей технологических показателей работы устройства от всех доминирующих факторов и их комбинаций.

В ходе проведения опытов регулировался один из параметров при постоянных значениях других, а затем эксперименты повторялись при других значениях фиксированных переменных. Такой подход позволяет провести множественный регрессионный анализ (объём выборки составил 112 измерений) для установления статистической зависимости показателей процесса от всех переменных факторных признаков [9].

В качестве искомой многофакторной зависимости задавалось уравнение в следующем виде

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i \cdot x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j,$$

где  $Y$  – функция отклика ( $W_{кон}$  и  $Q$ );  $a_0$  – свободный член уравнения;  $a_i$ ,  $x_i$ ,  $a_{ii} \cdot x_i^2$  – линейные и квадратичные слагаемые в виде произведений коэффициентов регрессии  $a_i$  на факторы  $x_i$ ;  $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$  – слагаемые парных произведений факторов;  $n$  – число переменных факторов. Расчёт данной модели методом наименьших квадратов производился средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции “Шаговый отбор”. При работе данного алгоритма независимые переменные ( $x_i$ ), которые имеют наибольшие коэффициенты частичной корреляции с зависимой переменной ( $Y$ ), пошагово включаются в регрессионное уравнение [10]. После каждого шага оценивалась адекватность полученной модели  $F$  (статистика Фишера) и коэффициент детерминации  $R^2$ , а факторы, коэффициенты регрессии которых по статистике Стьюдента оказывались незначимыми ( $t_{tabl} \geq t_{ai}$ ), исключались из регрессионной зависимости без особого влияния на результативный признак. По знаку коэффициента регрессии  $a_i$  можно определить влияния соответствующего фактора  $x_i$  на функцию: положительный знак свидетельству-

ет о возрастании функции при увеличении фактора  $x_i$ , отрицательный – о снижении, а абсолютное значение коэффициента  $a_i$  показывает, на сколько изменится результирующий признак при изменении соответствующего фактора на единицу.

В результате расчёта были получены следующие многофакторные регрессионные уравнения:

– для крупности +0,25-0,63мм:

$$W_{kon} = -7,147 - 4,52 \cdot S - 0,0082 \cdot \omega - 0,012 \cdot V + 88,142 \cdot F - 0,0066 \cdot W_{ucx}^2 + R^2=0,991; \\ + 2,618 \cdot S^2 + 4438,222 \cdot p^2 - 0,132 \cdot W_{ucx} \cdot S + 0,0002 \cdot W_{ucx} \cdot \omega + 0,06 \cdot S \cdot p - F=563,5 \\ - 1365,368 \cdot F \cdot p + 0,767 \cdot \alpha \cdot p$$

$$Q = -0,222 - 2,522 \cdot F + 0,001 \cdot \omega + 0,112 \cdot \alpha + 2,199 \cdot F^2 - 0,002 \cdot \alpha^2 - R^2=0,996; \\ - 9,94 \cdot 10^{-8} \cdot \omega^2 F=864,7$$

– для крупности +0,63-1,6мм:

$$W_{kon} = -2,151 + 0,361 \cdot W_{ucx} - 0,287 \cdot S - 0,003 \cdot \omega - 0,01 \cdot V + 56,596 \cdot F - R^2=0,98; \\ - 0,003 \cdot W_{ucx}^2 - 0,01 \cdot \alpha^2 + 2712,41 \cdot p^2 - 0,038 \cdot W_{ucx} \cdot S - 0,0008 \cdot W_{ucx} \cdot \omega + F=257,4 \\ + 0,044 \cdot S \cdot \alpha - 870,215 \cdot F \cdot p + 5,827 \cdot \alpha \cdot p$$

$$Q = -1,39 + 0,001 \cdot \omega - 9,37 \cdot 10^{-8} \cdot \omega^2 + 1,737 \cdot F^2 - 0,003 \cdot \alpha^2 + 0,31 \cdot F \cdot \alpha R^2=0,994; \\ F=763,8$$

На рисунке 2 представлены экспериментальные значения (точки) конечной влажности железной руды двух классов крупности от суммарной площади поверхности обезвоживания и полученные расчетным путём кривые данной зависимости.

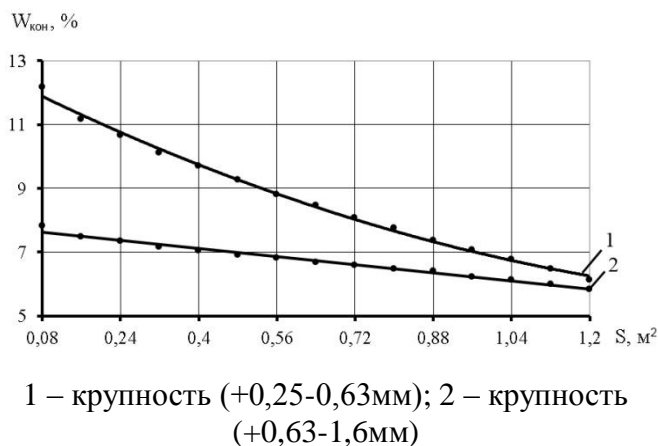
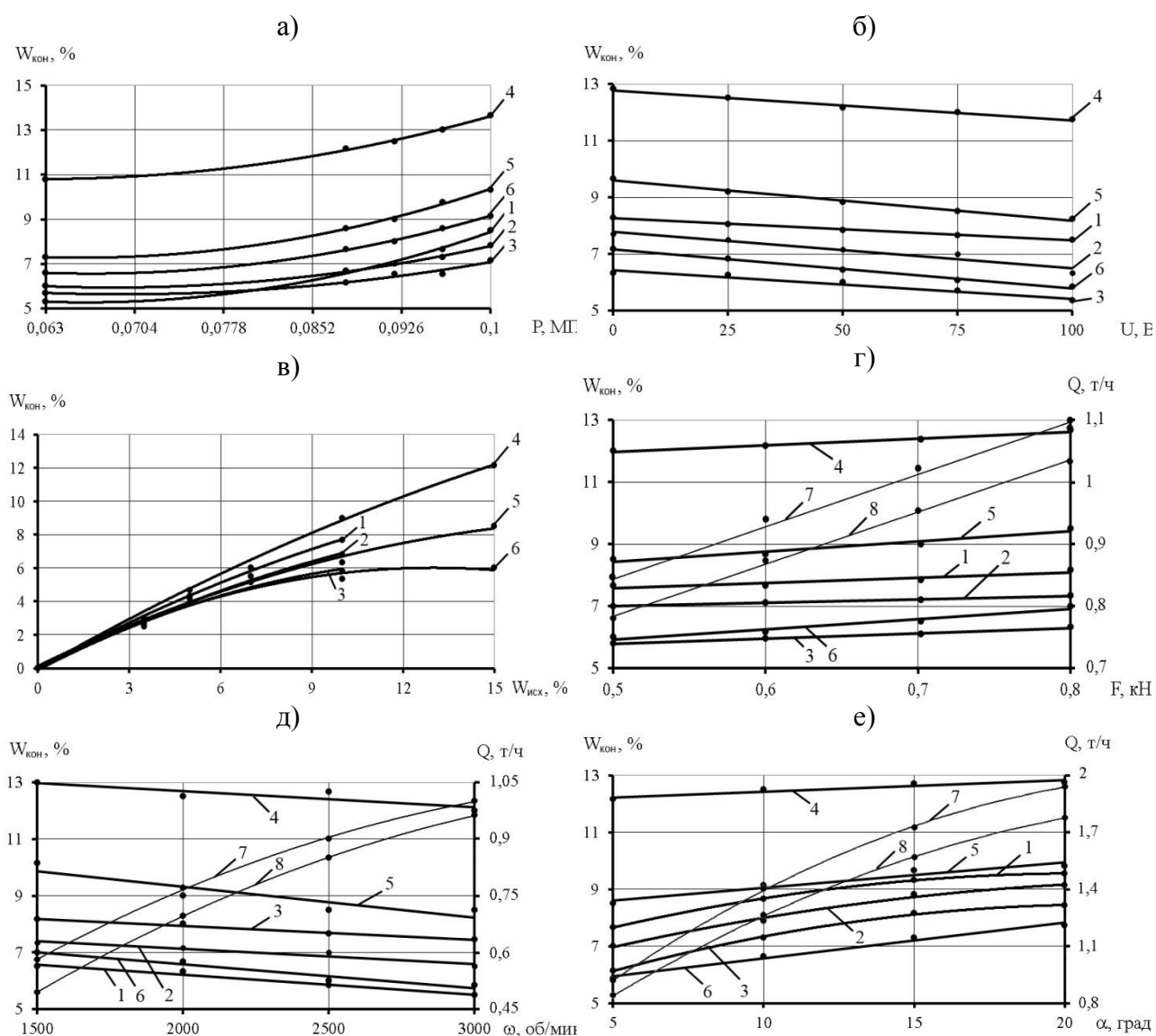


Рисунок 2 – Зависимость остаточной влажности от площади поверхности обезвоживания

Экспериментальные и рассчитанные значения остаточной влажности и производительности устройства от комплекса переменных параметров при обезвоживании железной руды представлен на рис. 3. В сериях экспериментов постоянными значениями факторов были следующие:  $\omega=3000$  об/мин;  $F=0,5$  кН;  $\alpha=5$  град.;  $P=0,063$  МПа;  $U=75$  В;  $W_{ucx}=15$  % для крупности (+0,25-0,63мм) и  $W_{ucx}=10$  % для крупности (+0,63-1,6мм).



крупность (+0,63-1,6мм): 1 –  $S=1,2 \text{ м}^2$ ; 2 –  $S=0,56 \text{ м}^2$ ; 3 –  $S=0,08 \text{ м}^2$ ; 7 –  $f(Q)$   
 крупность (+0,25-0,63мм): 4 –  $S=1,2 \text{ м}^2$ ; 5 –  $S=0,56 \text{ м}^2$ ; 6 –  $S=0,08 \text{ м}^2$ ; 8 –  $f(Q)$

Рисунок 3 – Зависимость остаточной влажности от комплекса параметров

Полученные регрессионные зависимости второго порядка с перекрестными членами с высоким уровнем достоверности и адекватности описывают полученные экспериментальные данные, что подтверждает высокие значения расчётных статистик Фишера  $F$  и коэффициенты детерминации  $R^2$ . Таким образом, данные модели позволяют подбирать рациональные конструктивные и режимные параметры устройства для обезвоживания при адаптации его к промышленным условиям эксплуатации, а также на стадии проектирования.

**Выводы.** Научное значение результатов исследований заключается в определении эффективности использования устройства для комплексного обезвоживания измельченной влажной железной руды и определение возможности обезвоживания с помощью электрокинетического метода с использованием электроосмоса.

Практическое значение состоит в определении влияния семи факторов на процесс обезвоживания: изменения площади перфорированной, изменение давления в вакуумной камере и напряжения на, влияние исходной влажности и изменение частоты, величина возмущающего усилия и угол наклона рабочего органа влияют на процесс обезвоживания.

Установлена зависимость производительности от варьируемых параметров (угла наклона, частоты вращения и возмущающей силы).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надутый, В.П. Исследование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин, А.И. Шевченко // Збагачення корисних копалин : Наук.-техн. зб. / Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ. - 2012. – Вип. 49(90). – С. 112-120.
2. Надутый, В.П. Влияние вибраций на статическое положение мениска движущейся в капилляре жидкости / В.П. Надутый, В.И. Елисеев, В.И. Луценко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" : Зб. наук. праць. Тематичний випуск "Хімія, хімічна технологія та екологія". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2011. – № 59. – С. 104-111.
3. Антипов, С.Т. Кинетика процесса вакуумной сушки в непрерывном режиме / С.Т. Антипов, С.В. Шахов, И.О. Павлов // Вестник Международной академии холода. – 2000. – № 1. – С. 8-12.
4. Голикова, Е.В. О корреляции агрегативной устойчивости и интегральных поверхностных характеристик / Е.В. Голикова, Ю.М. Чернобережский, О.М. Иогансон // Коллоидн. Журнал. - 2000. - Т. 62. № 5. С. 596-605.
5. Надутый, В.П. Результаты комплексного обезвоживания горной массы на вибрационном устройстве / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, С.В. Костыря // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журнал. – Вінниця. - 2014. – Вип. 1(73). – С. 88-93.
6. 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.
7. Надутый, В.П. Обоснование эффективности использования комплексного метода обезвоживания мелкой влажной горной массы / В.П. Надутый, В.В. Сухарев, С.В. Костыря // Геотехническая механика: Межвед. сб.науч.тр. ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2014. – Вып. 119. - С. 63-69.
8. Патент на корисну модель № 92897, UA, МПК В 01 D 61/56 (2006.1). Пристрій для зневоднення. Надутый В.П., Сухарев В.В., Костира С.В. – Заявка № 2014 03 312; Заявл. 01.04.2014, Опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. – 4 с.
9. Фролов, В.С. Приготовление, дозирование и подача порошкообразных флокулянтов в технологическом процессе углеобогащения // В.С. Фролов // Обезвоживание. Техника. - 2002. - №5. - С. 30-31.
10. Бююль, А. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. / А. Бююль, П. Цефель – СПб.: ООО «ДиасофтЮП», 2005. – 608 с.

#### REFERENCES

1. Nadutyu, V.P., Lapshin, Ye. S. and Shevchenko, A.I. (2012), " Kinetics of dehydration during vibratory screening of ", *Zbahachennya korysnykh kopalyn*, no. 49(90), pp. 112-120.
2. Nadutyu, V.P., Yeliseyev, V.I. and Lutsenko, V.I. (2011), " Influence of vibrations on the static position of the meniscus in the capillary fluid moving ", *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu "Kharkivsky politekhnichny instytut"*, no. 59, pp. 104-111.
3. Antipov, S.T., Shakhov, S.V. and Pavlov, I.O. (2000), " Kinetics vacuum drying process in a continuous mode ", *Vestnik Mezhdunarodnoy Akademii Kholoda*, no. 1, pp. 8-12.
4. Golikova E.V., Chernoberejskiy U.M., Ioganson O.M. (2000), "Correlation aggregate stability and integral surface characteristics", *Kolloidn. Jurnal*, vol. 62, №5, pp. 596-605.
5. Nadutyu, V.P., Sukharev, V.V. and Kostyrya, S.V. (2014), "The results of complex dehydration of the rock mass on the vibrating device ", *Vibratsiyi v tekhnitsi ta tekhnologiyakh*, no. 1(73), pp. 88-93.
6. Tihomolova, K.P. and Urakhova, I.N. (2002 ), "Electrosurface properties of quartz in solutions with different contact times", *Vestnik SPGU, Ser. 4, no 3(20)*, pp. 913-919.
7. Nadutyu, V.P., Sukharev, V.V. and Kostyrya, S.V. (2014), " Substantiation of efficiency of a complex method of dehydration shallow wet rock mass", *Geotekhnicheskaya Mekhanika [Geo-Technical Mechanics]*,

no. 119, pp. 263-69.

8. Naduty, V.P., Sukharev, V.V. and Kostyrya, S.V., M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2014), *Prystryy dlya znevodnennya* [Device for dewatering], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 92897.

9. Frolov, V.S. (2002), "Cooking, dispensing powdered flocculants in the process of coal preparation", *Obezvozhivanie. Tekhnika*, no. 5, pp.30-31.

10. Buul, A. and Tsefel, P. (2005), *SPSS: iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovleniye skrytykh zakonornostey*, [SPSS: Art processing. Analysis of statistical data and restore hidden patterns], ООО "Dia-SoftYuP", Sankt-Peterburg, Russia.

### Об авторах

**Надутьий 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, [nadutyvp@yandex.ua](mailto:nadutyvp@yandex.ua).

**Левченко Павел Владимирович**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела Механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, [prodvnutiy2005@ukr.net](mailto:prodvnutiy2005@ukr.net).

**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), Днепропетровск, Украина, [kostyrya81@gmail.com](mailto:kostyrya81@gmail.com).

### About the authors

**Naduty Vladimir Petrovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [nadutyvp@yandex.ua](mailto:nadutyvp@yandex.ua).

**Levchenko Pavel Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.C. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [prodvnutiy2005@ukr.net](mailto:prodvnutiy2005@ukr.net).

**Kostyrya Sergey Vladimirovich**, Doctoral Student, Engineer in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [kostyrya81@gmail.com](mailto:kostyrya81@gmail.com).

**Анотація.** Метою роботи є визначення ефективності зневоднення залізної руди шляхом варіювання параметрами зневоднює пристрою та отримання багатofакторних регресійних рівнянь.

Попередні дослідження зневоднення з даного комплексного методу показали обнадійливі результати.

У статті представлені результати комплексного зневоднювання залізної руди. В установці для зневоднювання використовується три механічні методи зневоднювання - вібраційний, вакуумний та електроосмотичний. Установлено залежності залишкової вологи і продуктивності зневоднюючого пристрою від семи факторів: вихідної вологості залізної руди, площі поверхні зневоднювання, зміна тиску у вакуумній камері, напруги на електродах, частоти коливань і кута нахилу робочого органа, а також від величини збуджуючої сили. Значення роботи складається у визначенні найбільш ефективного режиму зневоднювання здрібненої залізної руди та одержання багатofакторних регресійних рівнянь.

**Ключові слова:** вібрація, залізна руда, електроосмос, зневоднювання, комплексний метод, вакуумування.

**Abstract.** Objective of the study was to determine effectiveness of the iron ore dehydration with different parameters of the dewaterer and to formulate multiple regression equations.

Preliminary studies of dehydration by the complex method have shown promising results.

The article presents results of the complex iron ore dehydration. The dewaterer used three mechanical methods of dehydration - vibration, vacuum and electroosmosis. Effect of each of the methods was determined. The dependences of residual moisture and dewaterer performance on the following seven factors were formulated: initial moisture content in the iron ore, surface area for dehydration, changed pressure in the vacuum chamber, voltage across the electrodes, frequency of oscillation, angle of the working member inclination, and power of disturbing force.

Basing on the findings, it has become possible to determine the most effective method of the milled iron ore dehydration and to formulate multiple regression equations.

**Keywords:** vibration, iron ore, electroosmosis, dehydration, complex method, vacuuming.

*Статья поступила в редакцию 13.08.2015.*

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

УДК 622.271.4

**Слободянюк В.К.** , канд.техн.наук, доцент,  
**Турчин Ю.Ю.**, аспирант  
(Государственное ВУЗ «КНУ»)

**РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ  
СТРОИТЕЛЬСТВА ВЪЕЗДНЫХ ТРАНШЕЙ В СЛОЖНЫХ  
ГОРНТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ КАРЬЕРОВ**

**Слободянюк В.К.** , канд.техн.наук, доцент,  
**Турчин Ю.Ю.**, аспирант  
(Державний ВНЗ «КНУ»)

**РОЗРОБКА РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СХЕМ  
БУДІВНИЦТВА В'ЇЗНИХ ТРАНШЕЙ В СКЛАДНИХ  
ГІРНИЧОТЕХНІЧНИХ УМОВАХ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ**

**Slobodyanyuk V.K.** , Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
**Turchin Yu.Yu.**, Doctoral Student  
(State HEI «KNU»)

**DEVELOPMENT OF RATIONAL METHODS FOR CONSTRUCTION OF  
HAULAGE INCLINES IN A COMPLEX MINING ENVIRONMENT OF THE  
DEEP OPEN PITS**

**Аннотация.** Анализ работы горнодобывающих предприятий показал, что в последние годы с увеличением глубин карьеров и их размеров по дневной поверхности возросло число случаев периодического затопления нижних горизонтов ливневыми и подземными водами. В таких условиях существующие схемы проходки траншей с использованием прямых механических лопат являются не эффективными и небезопасными.

Актуальной является разработка и обоснование новых ресурсосберегающих и безопасных технологий вскрытия глубоких горизонтов, допускающих частичное или полное затопление дна карьера. В статье выполнен анализ факторов, влияющих на скорость вскрытия уступов. Определена скорость проходки траншей в условиях их подтопления карьерными