

УДК 622.7:532.6

**Надутый В.П.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Чельшикина В.В.**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,  
**Костыря С.В.**, аспирант  
(ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

## **ОБЕЗВОЖИВАНИЕ ВЛАЖНОЙ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ МАССЫ В ПОЛЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СИЛ**

**Надутый В.П.**, д-р техн. наук, професор,  
**Челишкіна В.В.**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,  
**Кости́ря С.В.**, аспірант  
(ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України)

## **ЗНЕВОДНЕННЯ ВОЛОГОЇ ЗАЛІЗОРУДНОЇ МАСИ В ПОЛІ КОМБІНОВАНИХ ФІЗИЧНИХ СИЛ**

**Naduty V.P.**, D. Sc. (Tech.), Professor,  
**Chelyshkina V.V.**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,  
**Kostyrya S.V.**, Doctoral Student  
(N.S. Polyakov IGTM NAS of Ukraine)

## **HUMID IRON-ORE MASS DEHYDRATION IN THE FIELD OF COMBINED PHYSICAL FORCES**

**Аннотация.** Представлены результаты анализа комплексного обезвоживания железной руды на устройстве, в котором используется три фактора воздействий: вибрационный, вакуумный и электроосмотический. Методом парных корреляций исследовано изменение влажности для узких классов дробленой железной руды от семи параметров: исходной влажности, площади поверхности обезвоживания, давления в вакуумной камере, напряжения на электродах, частоты колебаний и угла наклона рабочего органа, величины возмущающей силы вибровозбудителя. В исследуемом диапазоне изменения параметров определены их рациональные значения. Разработаны регрессионные зависимости конечной влажности от семи параметров обезвоживания с высокой адекватностью описывающие процесс для узких классов крупности. Получена обобщенная регрессионная модель, пригодная для практической оценки снижения влажности дробленой железной руды.

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

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], вакуумный способ ускоряет этот процесс и дополнительно обезвоживает поровые каналы в горной массе [2], 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 [3].

В ИГТМ НАН Украины разработано устройство для обезвоживания или сушки горных пород и материалов, в котором применяется три вида воздействий - вибрационное, вакуумирование и наложение электрического поля для изменения движения жидкости через капилляры и пористые диафрагмы (электроосмос) [4-6]. При проведении испытаний этого устройства исследовался процесс снижения влажности различных горных пород и материалов. При этом переменными являлись семь независимых параметров: исходная влажность сырья  $W_{ish}$  (%), площадь поверхности сушки  $S$  (м<sup>2</sup>), давление в вакуумной камере  $P$  (МПа), напряжение на электродах  $U$  (В), частота  $\omega$  (об/мин) и величина возмущающей силы вибровозбудителя  $F$  (кН), угол наклона рабочего органа  $\alpha$  (град).

В данной статье изложены результаты исследований изменения влажности двух проб железной руды: крупностью  $-0,25+0,63$  мм, далее обозначенных как "мелкий класс", его средняя крупность  $0,44$  мм и  $0,63+1,6$  мм и "крупный класс", средней крупностью  $1,115$  мм. Крупный и мелкий классы имели разную начальную влажность, мелкий  $W_{ish} - 15\%$ , крупный  $W_{ish} - 10\%$ . Экспериментальные исследования при варьировании параметров включали 91 измерение.

Целью работы являлось провести анализ базы экспериментальных данных и построить обобщенную регрессионную зависимость конечной влажности от всех семи параметров процесса.

Характер связи каждого переменного параметра с влажностью определялся методом парных корреляций с использованием программы Microsoft Office Excel. Для каждой зависимости методом подбора выбирался определенный тренд (линейный, экспоненциальный, параболический и др.), такой, чтобы зависимость имела наиболее высокое значение коэффициента детерминации. Этот коэффициент, далее обозначенный как  $R$ -квадрат, представляет собой квадрат коэффициента корреляции двух множеств - расчетного и экспериментального значений влажности. При выборе тренда учитываем, что зависимость должна иметь ясный физический смысл.

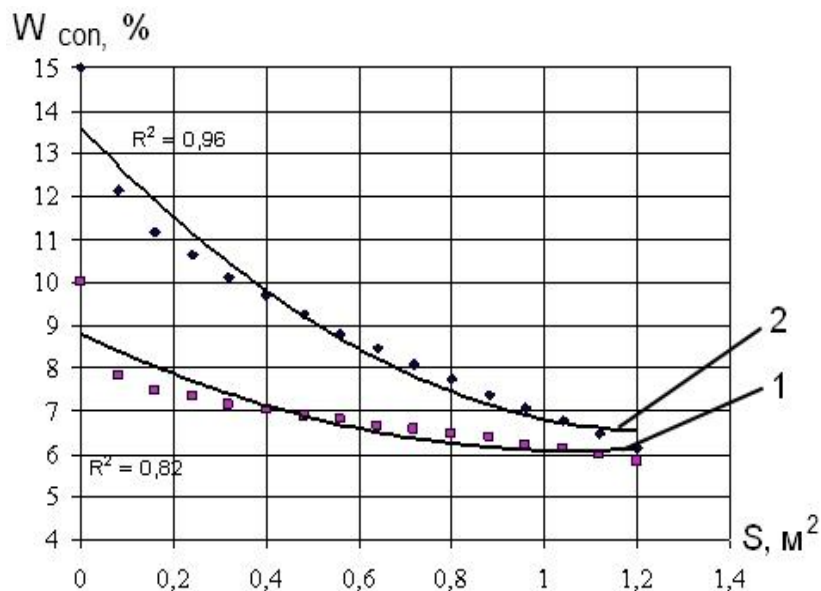
Построение указанных парных корреляций решает следующие задачи:

- позволяет установить характер зависимостей влажности от каждого из параметров - линейная, нелинейная. Это важно для построения обобщенной регрессионной модели, поскольку определяет в каком виде включать данный параметр в модель - в виде линейной функции или нелинейной;

- позволяет определить возрастает ли влажность с увеличением данного параметра или убывает. Это указывает на знак слагаемых в регрессионном уравнении;

- дает возможность оценить рациональные значения параметров, при которых величина конечной влажности минимальна.

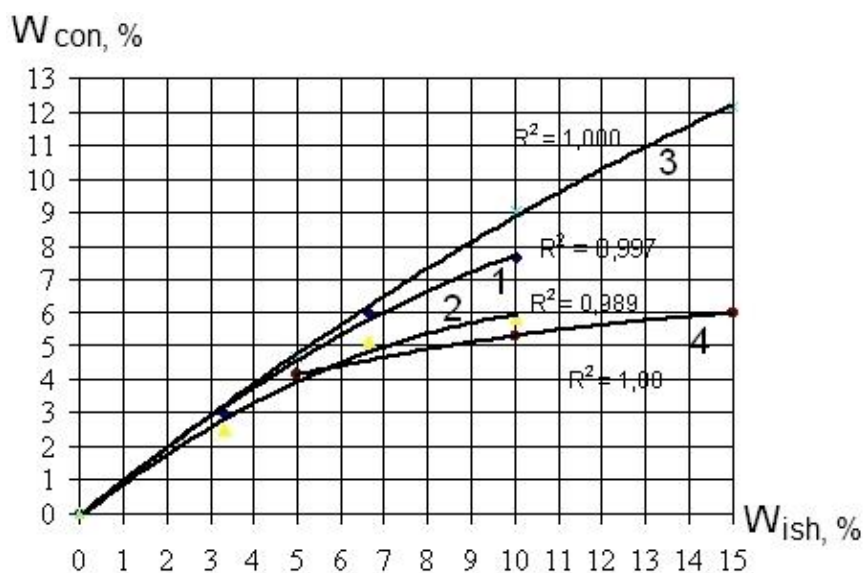
Вначале исследовалось влияние на влажность площади поверхности обезвоживания. Прямая линейная фильтрация экспериментальных данных показала, что эта зависимость нелинейна. Выбор параболического тренда дает значение  $R$ -квадрат для мелкого класса - 0,96, для крупного  $R$ -квадрат - 0,82 (рис.1).



1- класс – 1,6 +0,63 мм (средний кл. 1,115 мм).  $W_{ish}$  10%;  
2-класс – 0,63 + 0,25 мм (средний кл. 0,44 мм).  $W_{ish}$  15%.

Рисунок 1 – Зависимости влажности железной руды от площади обезвоживания

Рис. 2. показывает, что конечная влажность обезвоживания нелинейно зависит от начальной влажности образцов.



крупность: 1, 2 – 1,6 +0,63 мм,  $W_{ish}$  =10%; 3, 4 – 0,63 + 0,25 мм,  $W_{ish}$  =15%;  
площадь обезвоживания: 1, 3 – 0,08 м²; 2, 4 – 1,12 м².

Рисунок 2 - Зависимости изменения влажности от исходной влажности образца

Очевидно, что чем ниже начальная влага, тем труднее высушить образец. Так, для площади обезвоживания  $1,12 \text{ м}^2$  достигнуто снижение влажности для мелкого класса (0,44 мм) с 15 до 6 % и с 5 до 4,16%, для более крупного (средней крупности 1,115 мм) – с 10 до 5,83% и с 3,33 до 2,5 %.

Далее, для двух значений площади обезвоживания: малой -  $0,08 \text{ м}^2$  и большой  $1,12 \text{ м}^2$ , исследовалось влияние на влажность какого-то одного из показателей при остальных фиксированных на уровне постоянных значений, таких как:  $P=0,063 \text{ МПа}$ ;  $U = 75\text{В}$ ;  $F = 0,5 \text{ кН}$ ;  $\omega = 3000 \text{ об/мин}$ ;  $\alpha = 5 \text{ град}$ .

Эти зависимости приведены на рис. 3 (а, б, в, г, д), где приняты те же обозначения, что и на рис. 2: зависимости 1, 2 относятся к крупной фракции, 3, 4 – к мелкой, зависимости 1, 3 соответствуют меньшей площади обезвоживания, 2, 4 – большей, числовые значения приведены в обозначениях рис. 2.

Рис. 3 показывает, что зависимости конечной влажности от:

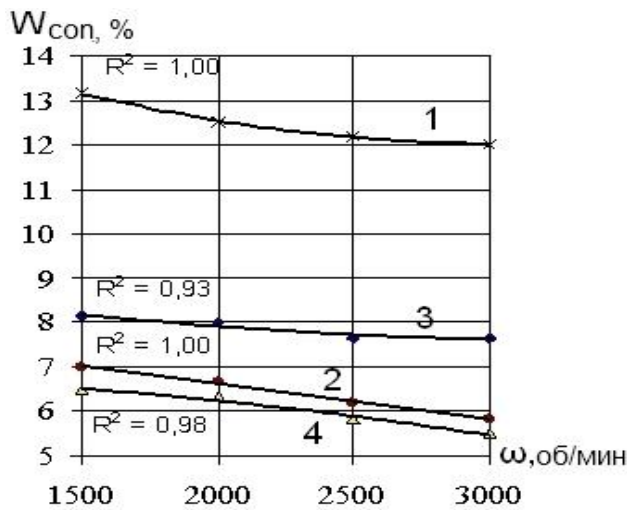
- $\omega$  слабо нелинейные при малой площади обезвоживания (1, 3), линейные при большой (2, 4), имеют нисходящий характер;
- $U$  линейные при высоких значениях  $R$ -квадрат, нисходящие;
- $P$  нелинейные, имеют восходящий характер;
- $F$  нелинейные при малой площади обезвоживания (1, 3), линейные при большой (2, 4), имеют восходящий характер;
- $\alpha$  нелинейные, имеют восходящий характер;

Как видно из рис. 3 увеличение параметров  $\omega$ ,  $U$  ведет к снижению конечной влажности, поэтому в экспериментах их фиксировали на уровне рациональных значений: 3000 об/мин и 75В. Увеличение параметров  $P$ ,  $F$ ,  $\alpha$  ведет к увеличению конечной влажности, поэтому рациональными являются  $P=0,063 \text{ кПа}$ ,  $F=0,5\text{кН}$ ,  $\alpha=5\text{град}$ .

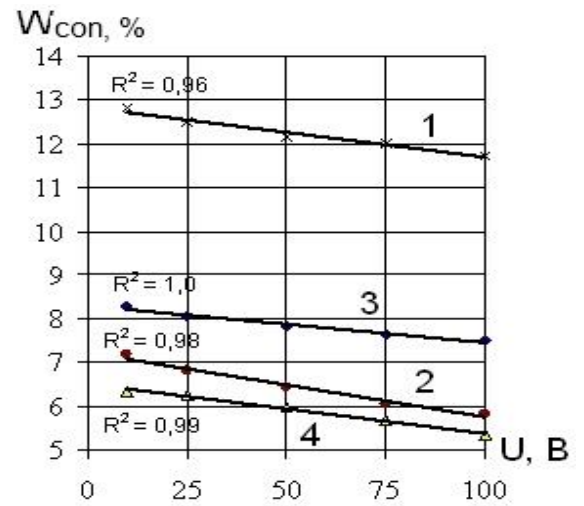
Установлено, что из семи параметров только  $U$  связан с конечной влажностью линейно, остальные в той или иной степени нелинейно. Это говорит о том, что в обобщенную регрессионную модель нужно вводить линейную зависимость от  $U$  и нелинейные (квадратичные, согласно рис. 1, 2, 3) зависимости от всех остальных параметров.

Однако, прежде чем строить обобщенное *нелинейное* регрессионное уравнение, имеет смысл рассмотреть простую линейную модель, в которую входят константа и все семь параметров со своими коэффициентами. Это позволит качественно оценить степень влияния каждого из параметров, и далее, при построении нелинейной модели, оценить вклад от введения в уравнение регрессии нелинейных членов (по изменению  $R$ -квадрат).

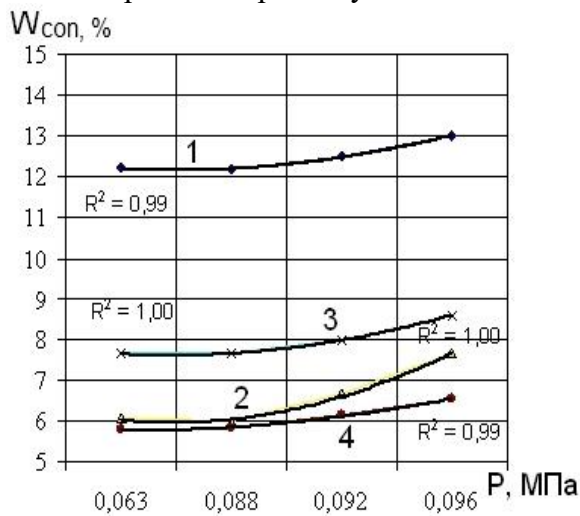
Для расчета коэффициентов обобщенной *линейной* модели использовалась программа Microsoft Office Excel, встроенная функция «Анализ данных. Регрессия».



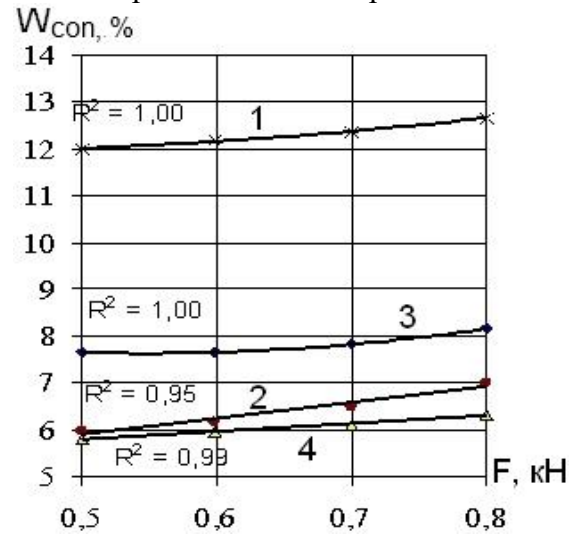
а) зависимость конечной влажности от оборотов вибровозбудителя



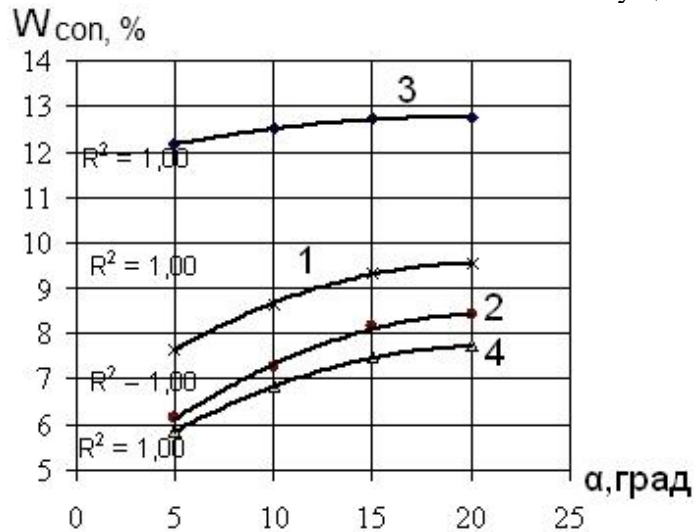
б) зависимость конечной влажности от напряжения на электроде



в) зависимость конечной влажности от разряжения в вакуумной камере



г) зависимость конечной влажности от возмущающего усилия



д) зависимость конечной влажности от угла наклона устройства

Рисунок 3 - Зависимости влажности железной руды от параметров процесса обезвоживания

Доверительный интервал задавался на уровне 0,95. Получены следующие уравнения:

- класс -1,6+0,63 мм,  $W_{ish} = 10\%$ :  

$$W_{con} = 2,37 + 0,64W_{ish} - 1,49S - 0,0003\omega - 0,009U + 1,24F + 0,17\alpha + 18,7P, \quad (1)$$

$$R^2 = 0,963, \quad F = 251;$$

- класс -0,63+0,25 мм,  $W_{ish} = 15\%$ :

$$W_{con} = 2,532 + 0,538W_{ish} - 4,8S - 0,001\omega - 0,013U + 2,43F + 0,09\alpha + 38,3P, \quad (2)$$

$$R^2 = 0,922, \quad F = 113$$

Анализ коэффициентов показывает, что на снижение влажности  $W_{con}$  влияет увеличение параметров  $S$ ,  $U$ ,  $\omega$ , что согласуется с данными рис.1 и рис. 3 а, б, в. Увеличение же параметров  $P$ ,  $F$ ,  $W_{ish}$ ,  $\alpha$ , ведет к возрастанию  $W_{con}$ , что согласуется с результатами рис. 2 и рис. 3, г, д.

Таким образом, уравнения (1), (2) отражают физическую сущность протекания процесса при изменении независимых параметров. Однако точность моделирования в оценке по коэффициенту детерминации не высока, так для мелкого класса  $R^2$  - лишь 0,92. R-квадрат можно повысить введением в уравнения (1), (2) нелинейных членов.

Обобщенная регрессионная модель, как следует из анализа парных корреляций, должна включать линейную зависимость от  $U$  и квадратичные зависимости от остальных параметров, то есть должна иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} W_{con} = & a_0 + a_1S + a_2W_{ish} + a_3U + a_4\omega + a_5F + a_6\alpha + a_7P + \\ & + a_8S^2 + a_9W_{ish}S + a_{10}US + a_{11}\omega S + a_{12}FS + a_{13}\alpha S + a_{14}PS + \\ & + a_{15}W_{ish}^2 + a_{16}W_{ish}U + a_{17}W_{ish}\omega + a_{18}W_{ish}F + a_{19}W_{ish}\alpha + \\ & + a_{20}W_{ish}P + a_{21}\omega^2 + a_{22}\omega U + a_{23}\omega F + a_{24}\omega\alpha + a_{25}\omega P + a_{26}\alpha^2 + \\ & + a_{27}\alpha U + a_{28}\alpha F + a_{29}\alpha P + a_{30}P^2 + a_{31}PU + a_{32}PF + a_{33}F^2 + a_{34}FU \end{aligned} \quad (3)$$

Для расчета коэффициентов уравнения (3) для каждого класса крупности подготовлена таблица исходных данных. С помощью программы Microsoft Office Excel каждому значению конечной влажности (зависимая переменная) согласно 75 опытам соответствовали свои параметры, их квадраты и произведения - всего 34 независимых переменных, всего в базе данных 2550 независимых переменных для крупного класса и столько же для мелкого. Эти базы данных обрабатывались средствами программы обработки статистических данных "IBM SPSS Statistics.v.22" [7]. Использовалась встроенная функция: "Линейная регрессия", критерий: "Использовать вероятность  $F$  - включение 0,05, исключение 0,1".

В программу SPSS встроены два метода отбора переменных для линейной регрессии: прямой метод ввода "Enter", когда все переменные вводятся на

одном шаге, и пошаговый: “Stepwise”(Шаговый отбор), либо “Forward”(Переадресовать), когда на каждом шаге в уравнение включается новая независимая переменная с наименьшей вероятностью  $F$  или с наибольшим модулем корреляции с  $W_{кон}$ . Если эта переменная удовлетворяет критерию ввода, она включается в модель. Переменные, уже введенные в регрессионное уравнение, исключаются из него, если их вероятность  $F$  становится достаточно большой (или модуль корреляции малым). Алгоритм останавливается, когда не остается переменных, удовлетворяющих критерию включения по  $F$  или по модулю корреляции.

Используя эти методы можно построить ряд регрессионных моделей для одного и того же набора переменных. При этом каждый метод, как правило, дает несколько регрессионных уравнений с разными величинами  $R$ -квадрат.

Критерием выбора одного уравнения регрессии являлось:  $R^2 = 0,9$  и выше, при этом в уравнении должны быть “задействованы” все семь параметров (независимых переменных) в том или ином виде. Кроме того, для простоты использования, желательно, чтобы коэффициенты уравнения имели порядок не ниже 0,0001, а количество слагаемых было как можно меньше.

На первом этапе выполнялся анализ баз данных методом “Enter”, затем “Stepwise”. Для крупного класса получено, что метод “Enter” дает одну модель с  $R^2=0,995$ . Эта модель довольно громоздкая, она включает константу и 19 слагаемых, величина коэффициентов при слагаемых имеет порядок от  $10^3$  до  $10^{-7}$ .

Метод шагового отбора “Stepwise” предлагает 7 моделей. Среди них седьмая имеет наибольшее значение  $R^2 = 0,983$ . Она включает константу и 7 слагаемых, из которых шесть имеют вид произведений параметров, что затрудняет физическую интерпретацию. Точность аппроксимации по седьмой модели, по сравнению с линейной моделью (1), где  $R^2 = 0,963$ , повышена не достаточно.

В целом, для крупного класса оба метода дают не удовлетворительные результаты. Поэтому применялся комбинированный метод, когда база данных разбивалась на два блока: в первый параметры входят в виде линейной зависимости, во второй - нелинейной. К первому блоку применялся метод отбора на одном шаге, затем в полученную регрессионную модель включался второй блок переменных, к которому применялся метод шагового отбора, а именно:

*/DEPENDENT  $W_k$*

*/METHOD=ENTER  $W_i, S, w, U, F, a, P,$*

*/METHOD=STEPWISE  $W_i^2, S^2, w^2, F^2, a^2, P^2, W_iS, W_iw, W_iU, W_iF, wa, wP, UF, Ua, UP, FP, aP.$*

В результате применения комбинированного метода для класса -1,6+0,63 мм получено 6 моделей, из которых выбрана шестая, имеющая наибольшее значение  $R^2$ . В эту модель в виде линейной зависимости вошли все семь параметров процесса, а пять дополнительных слагаемых учитывают

нелинейность связи параметров с конечной влажностью и повышают адекватность линейной модели по уравнению (1) с  $R^2 = 0,963$  до 0,994:

класс -1,6+0,63 мм:

$$W_{con} = 16,223 - 0,138S + 1,158W_{ish} - 0,01U - 0,0004\omega + 1,539F + 0,357\alpha - \\ -458,67P - 0,182W_{ish}S - 0,037W_{ish}^2 + 3030,1P^2 - 0,009\alpha^2 + 0,05\alpha S \\ R^2 = 0,994 \quad (4)$$

Аналогичная методика построения обобщенной регрессионной модели применялась для мелкого класса -0,62+0,25 мм. Опуская анализ использования разных методов, приведем итоговое регрессионное уравнение, полученное комбинированным методом:

класс -0,63+0,25 мм:

$$W_{con} = 35,624 - 3,64S + 1,164W_{ish} - 0,012U - 0,001\omega + 2,148F + 0,086\alpha - \\ -971,73P - 0,402W_{ish}S - 0,022W_{ish}^2 + 5950,4P^2 - 2,416S^2 + 20,82SP \\ R^2 = 0,989 \quad (5)$$

Уравнения (4) и (5) качественно отличаются двумя последними слагаемыми, это говорит о том, что на более крупный класс сильнее влияет угол наклона рабочего органа, а на мелкий - площадь зоны сушки.

В заключение приведем объединенную регрессионную модель - для обоих узких классов крупности, полученную аналогично комбинированным методом. Коэффициент детерминации этой модели составляет лишь 0,972, но, в ряде случаев, для практического использования этого достаточно.

Крупность -1,6+0,25 мм:

$$W_{con} = 28,311 - 0,934S + 0,967W_{ish} - 0,01U - 0,0004\omega + 1,51F + 0,282\alpha - \\ -753,5P - 0,417W_{ish}S - 0,017W_{ish}^2 + 4571,77P^2 - 1,372S^2 + 16,687SP - \\ -0,016W_{ish}\alpha + 3,7W_{ish}P + 0,068S\alpha + 16,687SP \\ R^2 = 0,972 \quad (6)$$

Разработанные регрессионные модели (4), (5), (6) пригодны для оценки снижения влажности дробленой железной руды при изменении параметров процесса в диапазоне:  $S=0,08\div1,2$  м<sup>2</sup>,  $U=10\div100$  В,  $F=0,5\div0,8$  кН,  $P=0,063\div0,1$  мПа,  $\alpha = 5\div20$  град.,  $\omega=1500\div3000$  об/мин.

**Выводы.** В устройстве для обезвоживания горных пород и материалов используются комбинированные физические поля, включающих действие вибрации, электроосмоса и вакуумирование. Процесс характеризуют семь независимых параметров. Исследовался процесс снижения влажности для узких классов дробленой железной руды -1,6+0,063 мм и -0,063+0,25 мм с начальной влажностью 10 и 15% в диапазоне изменения параметров:  $S=0,08\div1,2$  м<sup>2</sup>,



$U=10\div 100$  В,  $F=0,5\div 0,8$  кН,  $P=0,063\div 0,1$  мПа,  $\alpha = 5\div 20$  град.,  $\omega=1500\div 3000$  об/мин.

Анализ базы экспериментальных данных методом парных корреляций показал, что все параметры, кроме напряжения на электродах, нелинейно связаны с конечной влажностью. Рациональными значениями являются:  $S=1,2$  м<sup>2</sup>,  $U=75$  В,  $F=0,5$  кН,  $P=0,063$  мПа,  $\alpha = 5$  град.,  $\omega=3000$  об/мин.

Разработаны регрессионные зависимости конечной влажности от семи параметров обезвоживания с высокой адекватностью описывающие процесс для узких классов крупности. Получена обобщенная регрессионная модель с коэффициентом детерминации  $R^2=0,972$  для крупности  $-1,6+0,25$  мм, пригодная для практической оценки снижения влажности дробленой железной руды.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

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. Антипов, С.Т. Кинетика процесса вакуумной сушки в непрерывном режиме / С.Т. Антипов, С.В. Шахов, И.О. Павлов // Вестник Международной академии холода. – 1999. – № 1. – С. 8-12.
3. Радушкевич, В.Л. Интенсификация фильтрационного обезвоживания угольных флотошламов с помощью электроосмоса / В.Л. Радушкевич, Г.Ю. Гольберг // Вестник ИОТТ. – Люберцы, 1994. – Вып. 2. – С. 70-76.
4. 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.
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., Уракова И.Н. Электроповерхностные свойства кварца в растворах при разном времени контакта//Вестн. СПбГУ. Сер. 4. 2002. Вып. 3 (20). С.913-919.
7. Бююль, А., Цефель, П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей: Пер. с нем. – СПб.: ООО «Диа-СофтЮП», 2005. – 608 с.

#### REFERENCES

1. Nadutyu, V.P., Lapshin E.S. and Shevchenko A.I. (2012), "The study of the kinetics of dehydration during vibration screening", *Zbagachennya korysnykh kopalyn. National Mining University*, Vol. 49(90), pp. 112-120.
2. Antipov, S.T., Shakhov S.V. and Pavlov I.O., (1999), "Kinetics of the vacuum drying process in continuous mode", *Bulletin of International Academy of Refrigeration*, Vol. 1, pp. 8-12.
3. Radushkevich, V.L. and Golberg G.Yu., (1994) "Intensification of filtration dehydration of coal flotation sludge by means of electroosmosis", *Bulletin of Institute of Solid Fuel Enrichment*, Vol. 2, pp. 70-76.
4. Nadutyu, V.P., Suharev V.V. and Kostiryu S.V., Zayavnyk i patentovolodar IGTM NAN Ukrainy (2014), *Pristryi dlya znevodnennya*, [Device for dehydration], State Register of Patents of Ukraine, Dnipropetrovsk, UA, Pat.# 92897.
5. Nadutyu, V.P., Sukharev V.V. and Kostiryu S.V., (2014), "Results of complex dewatering of rock mass on a vibrating device", *Vibration in technique and technology*, Vol. 1(73), pp.88-93.
6. Tikhomolova, K.P. and Urakova I.N. (2002), "Electrosurface properties of quartz in solutions at different contact times", *Bulletin of St. Petersburg University*, Vol. 3(20), pp. 913-919.
7. Buyul, A. and Tsefel P., (2005), "SPSS: the art of information processing. Analysis of statistical data and restoration of hidden patterns", "Dia-SoftYuP", St. Petersburg, RU.

---

### 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 им. Н.С. Полякова НАН Украины), Днепр, Украина, [nadutyvp@gmail.com](mailto:nadutyvp@gmail.com).

**Чельшикина Валентина Васильевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики НАН Украины (ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины), Днепр, Украина, [chel.valenti@gmail.com](mailto:chel.valenti@gmail.com).

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

### About the authors

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

**Chelyshkina Valentina Vasilievna**, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (M.C. Polyakov IGTM NASU), Dnepr, Ukraine, [chel.valenti@gmail.com](mailto:chel.valenti@gmail.com).

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

---

**Анотація.** Представлено результати аналізу комплексного зневоднення залізної руди на пристрої, в якому використовується три фактори впливів: вібраційний, вакуумний і електроосмотичний. Методом парних кореляцій досліджено зміну вологості для вузьких класів роздробленої залізної руди від семи параметрів: початкової вологості, площі поверхні зневоднення, тиску у вакуумній камері, напруги на електродах, частоти коливань і кута нахилу робочого органу, величини вимушених коливань вібробудника. У досліджуваному діапазоні зміни параметрів визначені їх оптимальні значення. Розроблено регресійні залежності кінцевої вологості від семи параметрів зневоднення з високою адекватністю описують процес для вузьких класів крупності. Отримано узагальнену регресійну модель, придатну для практичної оцінки зниження вологості роздробленої залізної руди.

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

**Abstract.** The authors present results of analysis of iron-ore complex dehydration by the device with three factors of effect: vibration, vacuum and electroosmosis. Moisture content change in the narrow classes of the crushed iron ore was studied by the following seven parameters with the help of the pair correlation method: initial humidity, dehydration surface area, vacuum chamber pressure, electrode voltage, the working member oscillation frequency and slope angel, and magnitude of perturbing force in the exciter. In the investigated range of parameter changes, their rational values were determined. Regression dependences between final moisture content and seven parameters of dehydration were developed, which, with high adequacy, describe the process for narrow classes of size grade. Generalized regression model was obtained for practical assessing of moisture content reduction in the crushed iron ore.

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

*Статья поступила в редакцию 25.06.2017*

*Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Л.М. Васильевым*