

**В.П. НАДУТЫЙ**, д-р техн. наук

(Україна, Дніпропетровськ, Государственное ВУЗ "Национальный горный университет"),

**П.В. ЛЕВЧЕНКО**, канд. техн. наук,

**С.В. КОСТЫРЯ**

(Україна, Дніпропетровськ, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України)

## **РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ГОРНОЙ МАССЫ НА ВИБРАЦИОННОМ УСТРОЙСТВЕ**

Обезвоживание горной массы является важным технологическим процессом при добыче, переработке и обогащении полезных ископаемых. Существующие методы обезвоживания, как правило, энергоемкие и требуют сложного оборудования. Однако при их использовании (кроме термического) остаточная влага конечного продукта остается высокой, что не полностью удовлетворяет требованиям производства. Особенно это относится к мелким классам крупности. Поэтому создание неметаллоемкого, с низким потреблением энергии, и эффективного обезвоживающего устройства является актуальным.

Разработанное авторами устройство позволяет выполнять комплексное обезвоживание горной массы, поскольку в нем одновременно используются три механизма обезвоживания (вибрационный, вакуумный и электрокинетический) на основе электроосмоса [1-4]. 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 перемычки влаги между частицами (так называемые перетяжки). Однако капиллярную влагу извлечь этими методами не удастся, поскольку силы поверхностного натяжения воды в капиллярах довольно велики.

Одним из методов обезвоживания в этом случае является электроосмотический, основанный на процессах переноса влаги в обрабатываемом материале под влиянием электрического поля [4]. Непрерывность процесса обезвоживания на разработанном авторами устройстве обеспечивается вибрационным перемещением обезвоживаемой горной массы. Общий вид конструкции вибрационного обезвоживающего устройства показан на рис. 1. Устройство состоит из опорной рамы 1, на которой с помощью резиновых амортизаторов 2 установлен корпус вибрационной транспортирующей и обезвоживающей машины 3. Загрузка мелкой влажной горной массы производится в установленный на резиновые амортизаторы 4 бункер 5, к металлическому корпусу которого прикреплен контакт положительного полюса 6 источника постоянного тока. Верхняя часть транспортирующей машины покрыта слоем изоляционного материала 7, а в днище этой машины вмонтировано мелкое сито 8 с отрицательным контактом 9 от источника тока. Под ситом находится камера сбора 10 для мелкого отсева горной массы и дренажной влаги, периодически удаляемых через затвор 11. В камере 10 через канал 12 осуществляется вакуумирование вакуумным насосом

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

13. Непрерывное перемещение горной массы в вибромашине от загрузки к разгрузке осуществляется с помощью вибровозбудителя 14. Частота возмущений и амплитуда колебаний рабочего органа – регулируемые.

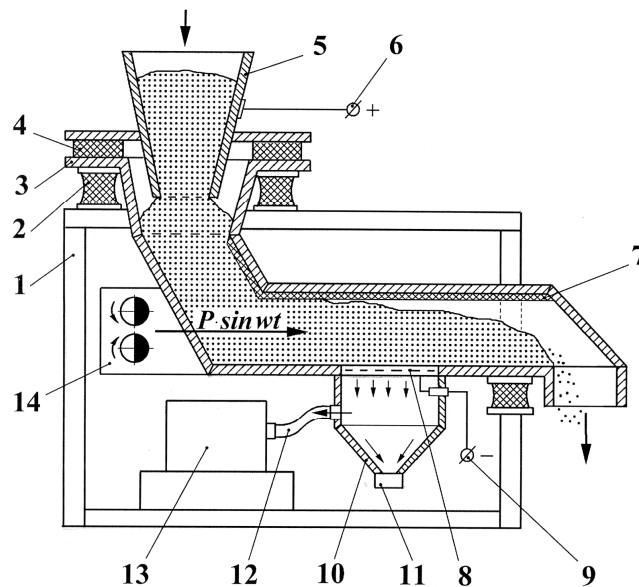


Рис. 1. Общий вид вибрационного устройства для комплексного обезвоживания горной массы

На описанном устройстве экспериментально получен ряд зависимостей изменения остаточной влаги в горной массе двух интервалов крупности горной массы в зависимости от: длины  $L$  рабочего органа устройства, по которому движется материал в процессе обезвоживания; угла наклона рабочего органа  $\alpha$ ; частоты его колебаний  $\omega$  и величины возмущающей силы  $F_e$  вибровозбудителя рабочего органа устройства; комбинации механизмов воздействия на горную массу. Это – основные факторы влияния при обезвоживании на рассматриваемом устройстве.

Для последующего анализа и прогнозирования эффективности обезвоживания возникает необходимость выполнения регрессионного анализа экспериментальных результатов, актуальность которого связана не только с прогнозом, но и с обоснованием параметров обезвоживающего устройства различных типов.

Целью работы является построение на основании полученных экспериментальных результатов регрессионной модели процесса обезвоживания с учетом установленных факторов влияния, функцией отклика которой является конечная влажность  $W_{\text{кон}}$  обезвоживаемого продукта от каждого фактора или от комплекса факторов влияния.

При проведении экспериментальных исследований варьировался один из параметров при фиксированных значениях других, а затем эксперименты повторялись при других значениях фиксированных переменных. Такой подход

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

позволил провести как парный регрессионный анализ для установления вида зависимости показателей грохочения от конкретного параметра, так и множественный, в котором учтено взаимное влияние рассматриваемых факторов.

После составления базы данных из экспериментальных значений общий объем статистических измерений составил  $k = 931$ . Обобщенные регрессионные зависимости изменения конечной влажности  $W_{\text{кон}}$  от шести варьируемых факторов для расчета задавались в виде полинома второй степени с учетом взаимного влияния переменных:

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

где  $Y$  – функция отклика ( $W_{\text{кон}}$ );  $a_0$  – свободный член уравнения;  $a_i \cdot x_i$ ,  $a_{ii} \cdot x_i^2$  – линейные и квадратичные слагаемые;  $a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$  – слагаемые парных произведений факторов;  $n = 6$  – число переменных факторов.

Коэффициенты заданной зависимости определялись методом наименьших квадратов средствами прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics с применением встроенной функции "Исключение", при котором расчет начинался с результата, содержащего все независимые переменные ( $x_i$ ), а затем исключались переменные факторы с наименьшими частичными корреляционными коэффициентами, пока соответствующий регрессионный коэффициент оказывался значимым [1]. После каждого цикла оценивалась адекватность  $F$  (статистика Фишера) полученной модели экспериментальным данным и коэффициентом детерминации  $R^2$ , который показывает, на сколько процентов изменчивость функции объясняется влиянием учтенных в модели факторов. Переменные факторные признаки, коэффициенты регрессии которых по статистике Стьюдента оказываются незначимыми ( $t_{\text{табл.}} \geq t_{ai}$ ), исключаются из регрессионной зависимости без особого влияния на результативный признак [2]. По знаку коэффициента регрессии  $a_i$  можно определить влияние соответствующего фактора  $x_i$  на функцию: положительный знак свидетельствует о возрастании функции при увеличении фактора  $x_i$ , отрицательный – о снижении. Абсолютное значение коэффициента  $a_i$  показывает, на сколько изменится результативный признак при изменении соответствующего фактора на единицу. Коэффициенты взаимодействий ( $\pm a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j$ ) оценивают влияние одного фактора в зависимости от уровня, на котором находится другой фактор. Знак плюс коэффициента  $a_{ij}$  указывает на то, что одновременное увеличение или уменьшение факторов  $x_i$  и  $x_j$  приводит к росту отклика. Если коэффициент взаимодействия имеет знак минус, то рост величины отклика (исследуемой функции) обеспечивается в том случае, если один из факторов будет уменьшаться, а другой увеличиваться.

Таким образом, в результате расчета были установлены обобщенные регрессионные зависимости изменения конечной влажности перерабатываемого продукта при варьировании шести параметров:

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

Для крупності 0,25-0,63 мм:

$$W_{\text{кон}} = -3,52 + 0,0009 \cdot \omega - 0,038 \cdot U + 0,016 \cdot W_{\text{исх}}^2 + 23,776 \cdot F^2 + 0,00049 \cdot U^2 + 0,114 \cdot L^2 + 0,917 \cdot W_{\text{исх}} \cdot F + 0,019 \cdot \alpha \cdot L - 0,019 \cdot \omega \cdot F - 0,00027 \cdot \omega \cdot L.$$

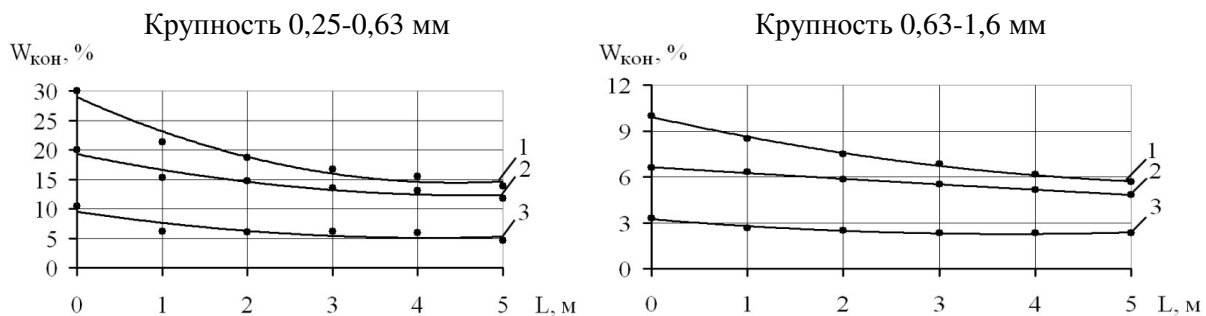
Основные статистические характеристики данной регрессионной зависимости: коэффициент детерминации  $R^2 = 0,991$ ; критерий адекватности Фишера  $F = 841,7$ .

Для крупності 0,63-1,6 мм:

$$W_{\text{кон}} = -0,12 + 0,003 \cdot \omega + 0,403 \cdot L + 0,023 \cdot W_{\text{исх}}^2 + 0,026 \cdot L^2 + 1,489 \cdot W_{\text{исх}} \cdot F - 0,054 \cdot W_{\text{исх}} \cdot L + 0,021 \cdot \alpha \cdot L - 0,005 \cdot \omega \cdot F - 0,00087 \cdot U \cdot L.$$

Данная регрессионная зависимость в пределах исследуемых параметров с высоким уровнем адекватности описывает полученные экспериментальные данные, что подтверждает расчетная статистика Фишера  $F = 1109,2$ . Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,993$  показывает, что изменчивость функции  $W_{\text{кон}}$  на 99,3% объясняется влиянием учтенных в модели факторов.

При расчете парных регрессионных зависимостей варьировался каждый из шести параметров при фиксированных значениях других переменных, которые принимались равными своим средним экспериментальным значениям ( $L=2,5$  м;  $\alpha=12,5$  град.;  $\omega=2250$  об/мин;  $F=0,65$  кН;  $U=37,5$  В;  $W_{\text{кон}}=15\%$  для крупности 0,25-0,63 мм и  $W_{\text{кон}}=5\%$  для крупности 0,63-1,6 мм). На рис. 2-7 представлены графики расчетных статистических уравнений (в виде точек показаны экспериментальные значения).



$$W_{\text{кон}}(L) = 10,792 - 0,655 \cdot L + 0,114 \cdot L^2$$

$$W_{\text{кон}}(L) = 9,332 - 0,0421 \cdot L + 0,026 \cdot L^2$$

Рис. 2. Зависимость изменения остаточной влажности горной массы от длины рабочего органа вибрационного устройства:

- 1 – при исходной влажности 30%; 2 – при исходной влажности 20%;  
3 – при исходной влажности 10%

## Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

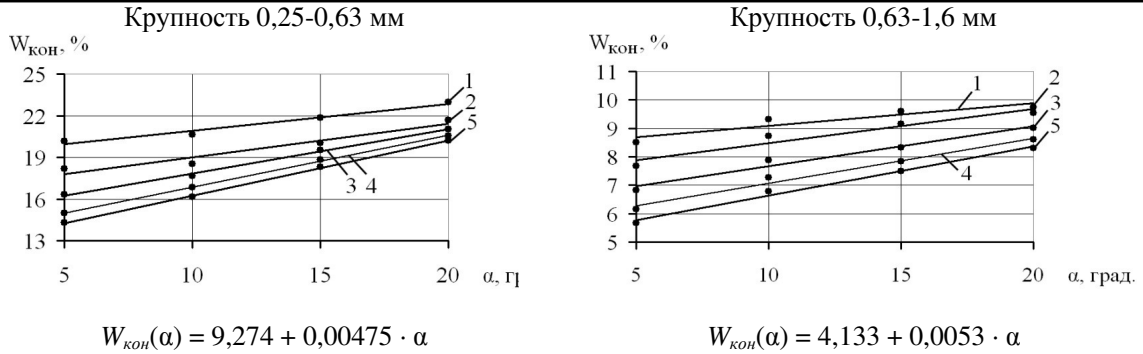


Рис. 3. Зависимость изменения остаточной влажности горной массы от угла наклона рабочего органа устройства:  
1 – при  $L = 1$  м; 2 – при  $L = 2$  м; 3 – при  $L = 3$  м;  
4 – при  $L = 4$  м; 5 – при  $L = 5$  м

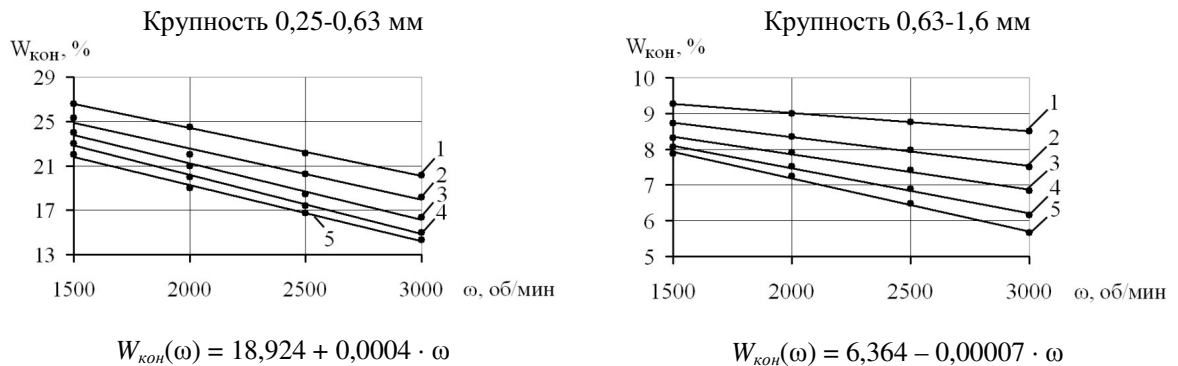


Рис. 4. Зависимость изменения остаточной влажности от частоты колебаний рабочего органа:  
1 – при  $L = 1$  м; 2 – при  $L = 2$  м; 3 – при  $L = 3$  м;  
4 – при  $L = 4$  м; 5 – при  $L = 5$  м

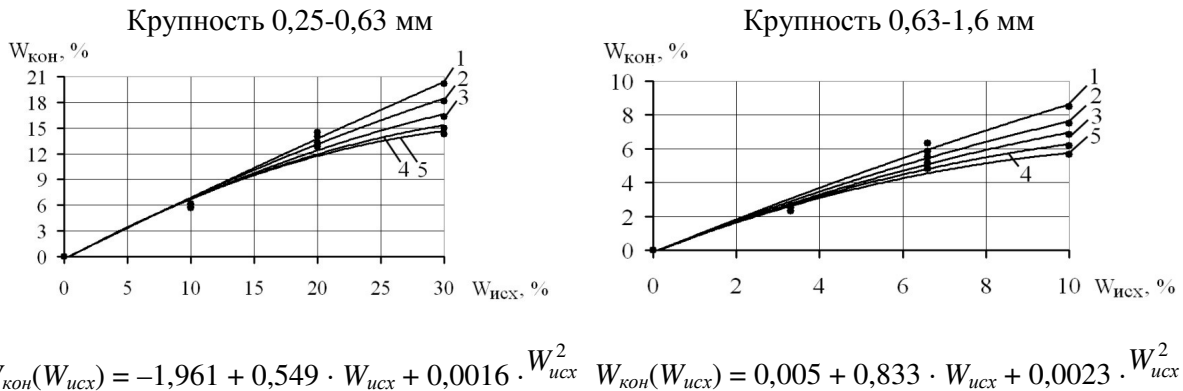


Рис. 5. Зависимость изменения остаточной влажности от исходной влажности перерабатываемого материала:  
1 – при  $L = 1$  м; 2 – при  $L = 2$  м; 3 – при  $L = 3$  м;  
4 – при  $L = 4$  м; 5 – при  $L = 5$  м

## Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

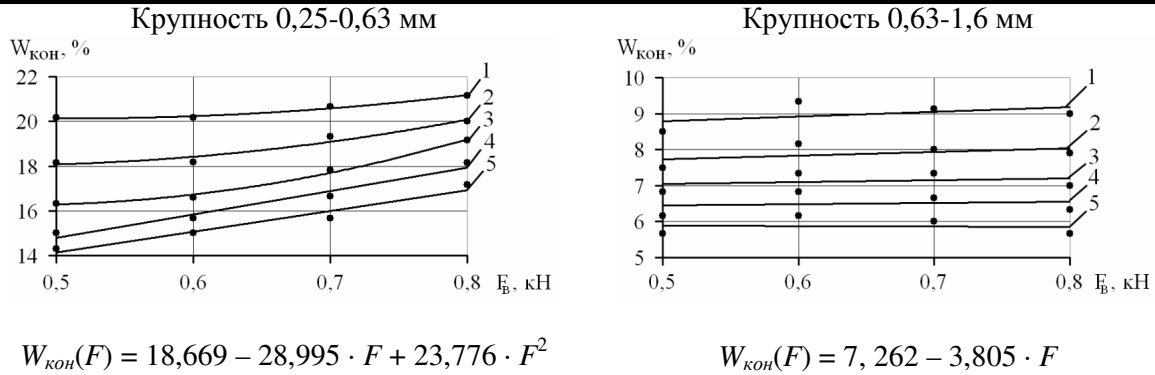


Рис. 6. Зависимость изменения остаточной влажности от величины возмущающей силы:  
1 – при  $L = 1$  м; 2 – при  $L = 2$  м; 3 – при  $L = 3$  м;  
4 – при  $L = 4$  м; 5 – при  $L = 5$  м

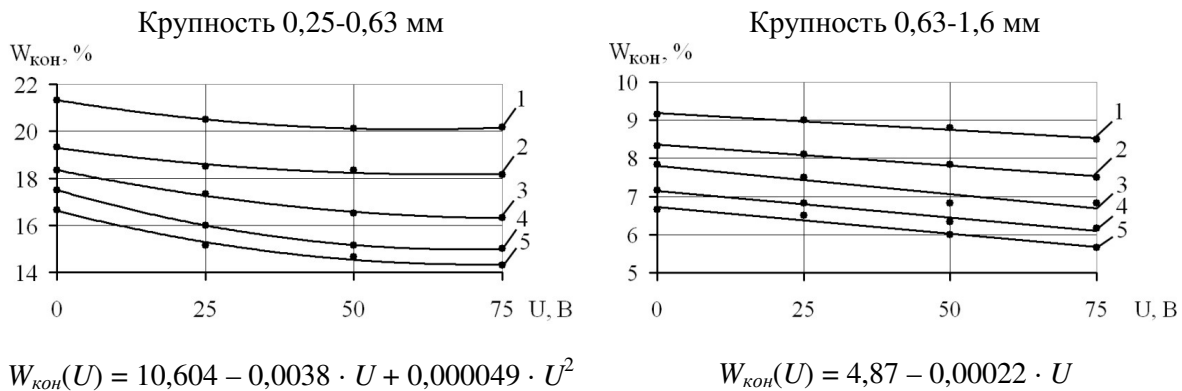


Рис. 7. Зависимость изменения остаточной влажности от напряжения:  
1 – при  $L = 1$  м; 2 – при  $L = 2$  м; 3 – при  $L = 3$  м;  
4 – при  $L = 4$  м; 5 – при  $L = 5$  м

### Вывод

Таким образом, полученные регрессионные зависимости влияния каждого принятого фактора на остаточную влажность горной массы, а также обобщенные регрессионные модели обезвоживания для двух категорий крупности горной массы адекватно описывают характер влияния на процесс обезвоживания и могут быть использованы при разработке вибрационного устройства для обезвоживания, исходя из технических требований.

### Список литературы

1. Патент на корисну модель № 89501, UA, МПК В 01 D 61/56. Пристрій для зневоднення сипких матеріалів. Надутий В.П., Сухарев В.В., Костира С.В. – З. № 2013 12 652; Заявл. 25.10.2013, Опубл. 25.04.2014. Бюл. № 8. – 4 с.
2. Надутый В.П., Лапшин Е.С., Шевченко А.И. Исследование кинетики обезвоживания при вибрационном грохочении // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2012. – Вип. 49(90). – С. 112-120.

### **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

3. Антипов С.Т., Шахов С.В., Павлов И.О. Кинетика процесса вакуумной сушки в не-прерывном режиме // Вестник Международной академии холода. – 1999. – № 1. – С. 8-12.

4. Радущкевич В.Л., Гольберг Г.Ю. Интенсификация фильтрационного обезвоживания угольных флотошамов с помощью электроосмоса // Вестник ИОТТ. – Люберцы, 1994. – Вып. 2. – С. 70-76.

5. 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.

6. Гришин В.К., Живописцев Ф.А., Иванов В.А. Математическая обработка и интерпретация физического эксперимента. – М.: МГУ, 1988. – 318 с.

© Надутый В.П., Левченко П.В., Костыря С.В., 2014

*Надійшла до редколегії 06.08.2014 р.*

*Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Франчуком*