

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВИБРАЦИОННОГО ГРОХОЧЕНИЯ ТУФА ПО КРУПНОСТИ 5,0-0,1 ММ

¹Надутый В.П., ¹Чельшикина В.В., ¹Логина А.А.

¹Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІБРАЦІЙНОГО ГРОХОЧЕННЯ ТУФУ ПО КРУПНОСТІ 5,0-0,1 ММ

¹Надутий В.П., ¹Чолишкіна В.В., ¹Логінова А.О.

¹Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

RESULTS OF INVESTIGATIONS OF VIBRATIONAL SCREENING OF TUFF BY SIZE 5,0-0,1 MM

¹Nadutyi V.P., ¹Chelyshkina V.V., ¹Loginova A.A.

¹Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine

Аннотация. Запасы туфов в Украине очень велики, туфы простираются в виде полос шириной 1-10 км на глубине от 5 до 200 м вдоль западного крыла Полесской седловины и западного склона Украинского щита. В Ровенской и Волынской областях туфы содержатся в породах вскрыши базальтовых карьеров, а также в подошве базальтового массива, где мощность слоя туфа составляет от 1-2 до 140 метров. Туфы используют в сельском хозяйстве, как удобрение, для подкормки птиц и животных, при хранении зерна, а также в качестве связующего, теплоизолятора, сорбента в медицине, химии, строительстве. Особый интерес туфы привлекают в связи с наличием в них ценных металлов. Так, содержание меди составляет до 0,7-1,0%, железа - до 50 %, титана - до 4,0 %. Поэтому актуальна разработка комплексной безотходной технологии переработки туфов. Важным элементом такой технологии является классификация сырья, например, с помощью вибрационного грохочения. Среди известных виброгрохотов наиболее эффективными считаются грохоты с резиновыми ленточно-струнными ситами РЛСС. Целью работы являлось установить аналитические зависимости эффективности вибрационного грохочения туфа по классам 5 - 0,1 мм от режимных и конструктивных параметров грохота РЛСС, что ранее не исследовалось. Использовались методы парного корреляционного и множественного регрессионного анализа. Анализ парных корреляционных зависимостей показал, что с уменьшением крупности грохочения частота колебаний рабочего органа должна повышаться. Для крупности грохочения 5 - 2 мм рекомендована частота -1300 об/мин, для 0,5 - 0,1 мм - 1500 об/мин, рациональным является угол наклона возмущающей силы вынужденных колебаний 45 - 55°. Разработаны регрессионные модели эффективности от переменных параметров для каждой отдельной крупности грохочения 5; 3; 2; 0,5 и 0,1 мм, а также обобщенные модели для классов 5 - 2 мм и 0,5 - 0,1 мм. Установлено, что с уменьшением размера сита для крупности 5, 3, 2 мм растет влияние на эффективность грохочения угла наклона вибровозбудителя вынужденных колебаний, удельной нагрузки на грохот и угла наклона грохота. При уменьшении размера сита от 0,5 мм до 0,1 мм увеличивается влияние на эффективность угла наклона вибровозбудителя и удельной нагрузки и снижается влияние остальных параметров, порядке уменьшения степени влияния: угла наклона грохота, его длины, частоты колебаний рабочего органа. Представленные модели позволяют решать частные задачи выбора параметров и определения эффективности виброгрохочения туфа на этапе рудоподготовки в комплексной технологии переработки туфов.

Ключевые слова: виброклассификация, туф, корреляция, регрессия

В настоящее время ведутся исследования по разработке комплексной технологии переработки пород базальтовых месторождений Волынского Полесья [1]. Особое внимание привлекают цеолит-сметитовые туфы, широко используемые в сельском хозяйстве, химии, строительстве, медицине [2].

Установлено, что туфы являются ценным сырьем, поскольку содержат медь, железо, титан в объемах, представляющих промышленный интерес [1].

Технология комплексной переработки туфов предполагает извлечение ценной металлической фракции и силикатной массы для традиционного использования. Одной из основных операций технологии является классификация туфа по крупности. Известны исследования вибрационного грохочения смеси пород базальтового карьера – базальта, туфа и лавобрекчии [3]. Однако виброгрохочение туфа отдельно не исследовалось.

Целью работы является определение зависимостей эффективности виброгрохочения туфа по крупности 5,0 - 0,1 мм от основных режимных и конструктивных параметров.

Исследования выполнялись на виброгрохоте РЛСС оснащенный резиновым ленточно-струнным ситом и частотным регулятором оборотов вибровозбудителя [4]. В грохоте над резиновым динамически активным ситом с регулируемыми параметрами привода, в специальных подситниках грохота устанавливалась металлическая классифицирующая сетка с диаметром отверстий d , вначале $d = 5, 3, 2$ мм - мелкое грохочение, на втором этапе - $d = 0,5$ и $0, 1$ мм – тонкое грохочение. Постоянными являлись амплитуды колебаний: коробка грохота $A_k = 2,0$ мм, эластичного резонирующего ленточно-струнного сита $A_c = 6,0$ мм. Переменными параметрами являлись: β – угол наклона возмущающей силы вибровозбудителя, α – угол наклона рабочего органа грохота, d – размер ячейки сита, q – удельная нагрузка на грохот, ω – частота возмущений привода грохота, L – его длина. Отметим, что грохота типа РЛСС на сегодня считаются одними из наиболее эффективных [5].

Методика работы состояла в том, что вначале устанавливались корреляционные зависимости эффективности виброгрохочения от каждого отдельного параметра при остальных фиксированных на уровне рациональных значений. Далее, с помощью множественного регрессионного анализа, определялись зависимости эффективности от совокупности переменных факторов. При этом регрессионные модели строились отдельно для каждого размера сетки и обобщенные модели - для определенного диапазона крупности. Парный корреляционный анализ выполнялся с использованием программы Microsoft Excel, множественный регрессионный анализ - с применением программы SPSS Statistics [6]. Оценка достоверности выполнялась по величине квадрата коэффициента корреляции R^2 и критерию Фишера F . Отметим, что во всех приведенных ниже уравнениях величина F превышала табличное критическое значение, тип уравнений подбирали для максимального высокого значения R^2 .

Материалом для исследований являлся туф, отобранный на Рафаловском базальтовом карьере. При грохочении для каждого размера сетки 2, 3 и 5 мм получена база экспериментальных данных из 27 измерений. При этом один из параметров являлся переменным, остальные имели следующие фиксированные значения: $\beta = 45^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\omega = 1300$ об/мин, $q = 1$ т/чм², $L = 5$ м. Исходное питание грохота во всех случаях включало 50 % контролируемого класса. Общий диапазон изменения эффективности E для всех трех размеров сетки составил 28 – 84 %.

Корреляционные зависимости эффективности E от одного из параметров при остальных фиксированных показаны на рис.1, из которого видно, что все

зависимости E носят нелинейный характер, влияние параметров существенно, R^2 - не ниже 0,92.

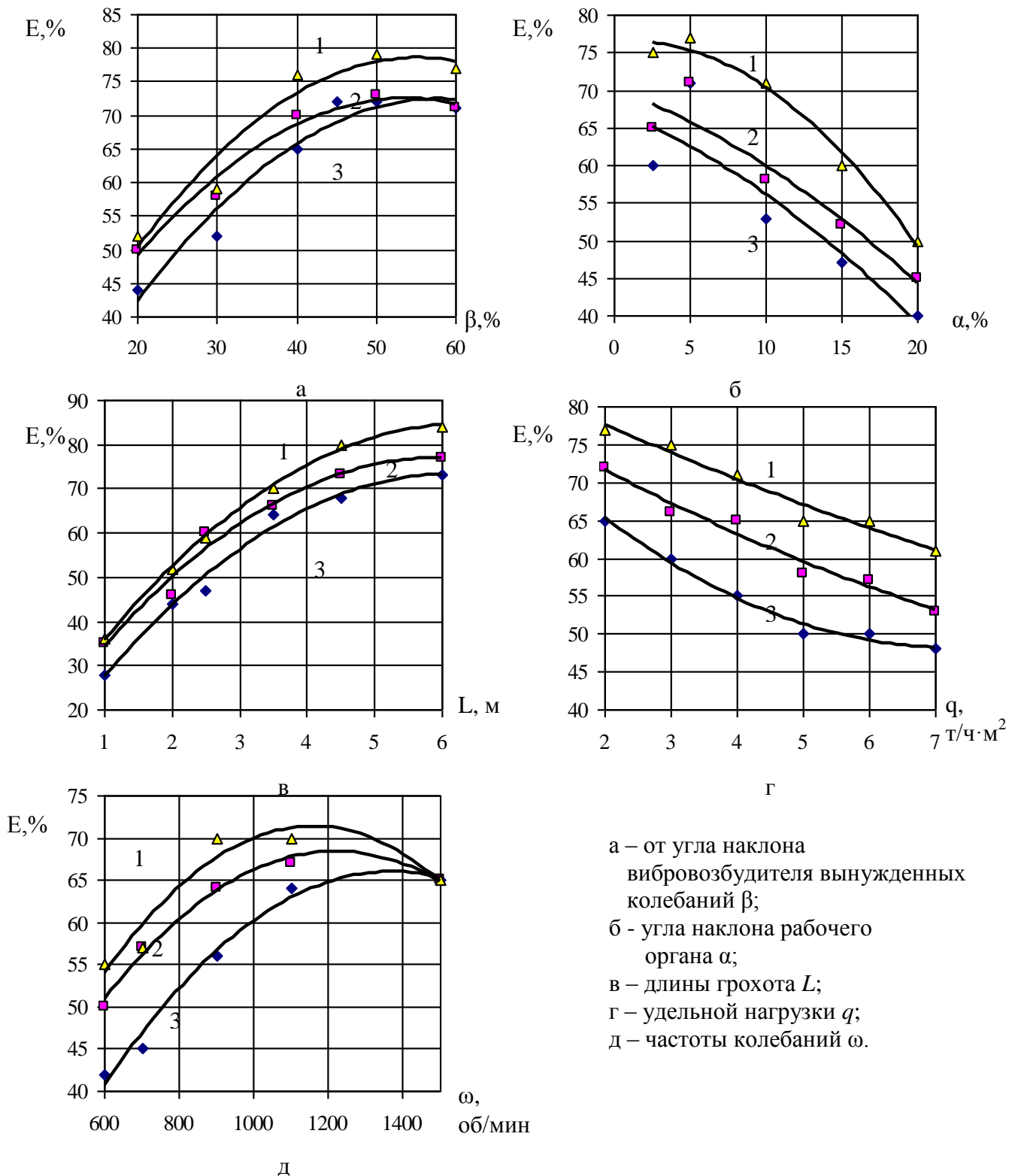


Рисунок 1 – Зависимости эффективности виброгрохочения E от режимных и конструктивных параметров при размерах сита: 1 - 5 мм, 2 - 3 мм, 3 - 2 мм

Также из рис.1 видно, что зависимости E от β и ω имеют выраженный экстремум. Эффективность максимальна при угле наклона направленной возмущающей силы вибровозбуждения 45° , частоте колебаний – 1300 об/мин.

При проектировании виброгрохота остальные параметры рекомендуется выбирать с учетом обеспечения необходимой производительности. Например, при удельной нагрузке на грохот 5 - 6 т/ч·м² рекомендуется угол наклона рабочей поверхности грохота $\alpha = 15 - 20^\circ$, длина рабочей поверхности 4,5 - 5,0 м. Из рис.1 видно, что зависимости E от влияющих параметров для крупности 2, 3 и 5 мм имеют сходный нелинейный характер. На основании этого можем построить обобщенную модель, в которую, наряду с остальными параметрами, включить размер ячейки сита грохота d как один из переменных факторов.

Для качественной оценки вначале было построено приближенное линейное регрессионное уравнение вида $E = f(d, \beta, \alpha, w, q, L)$. При этом выбрана модель регрессии проходящей через начало координат - модель без свободного члена. Ее преимуществом является возможность попарного сравнения коэффициентов для идентичных уравнений с разными диаметрами сит. Также, такая регрессия отражает тот факт, что при обнулении параметров, эффективность E тоже равно нулю.

$$\begin{aligned} \text{METHOD} &= \text{ENTER} (d, \beta, \alpha, w, q, L), \\ E &= 3,13 \cdot d + 0,504 \cdot \beta - 1,542 \cdot \alpha + 0,016 \cdot w - 1,83 \cdot q + 6,098 \cdot L, \\ R^2 &= 0,99, F = 1206 \end{aligned} \quad (1)$$

По знаку при коэффициентах, видно, что положительно влияние на эффективность грохочения оказывает увеличение d, β, w, L , тогда как увеличение α и q снижает эффективность. Эти результаты согласуются с данными рис.1.

Однако модель (1) – приближенная, она не отражает E нелинейную зависимость E от каждого из параметров согласно рис.1. Учет этого факта повысит точность аппроксимации. При этом использование метода пошагового отбора слагаемых *STEPWISE*, позволяет минимизировать число членов уравнения. Получено:

$$\begin{aligned} \text{METHOD} &= \text{STEPWISE} (d, \beta, \alpha, w, q, L, d^2, d\beta, d\alpha, dw, dq, dL, \beta^2, \beta\alpha, \beta w, \beta q, \beta L, \alpha^2, \alpha w, \alpha q, \alpha L, \\ &w^2, wq, wL, q^2, qL, L^2), \\ E &= 2,186 \cdot \beta + 0,014 \cdot w \cdot L - 0,21 \cdot \alpha^2 - 0,402 \cdot q^2 + 0,708 \cdot d \cdot L - \\ &- 1,829 \cdot L^2 - 0,00003 \cdot w^2 - 0,019 \cdot \beta^2 + 0,003 \cdot \alpha \cdot w, \\ R^2 &= 0,996, F = 2060 \end{aligned} \quad (2)$$

В модели (2) из 27 переменных слагаемых отобрано лишь 9, при этом в модель входят все базовые исходные переменные: $d, \beta, \alpha, w, q, L$. Точность модели (2) по сравнению с (1) в оценке по R^2 повысилась с 0,99 до 0,996. Учитывая это, обобщенная модель (2) рекомендована для практического использования.

При грохочении туфа в процессе рудоподготовки возникает потребность расчета эффективности для конкретного размера сита грохота. Для этого получены регрессионные уравнения, в которых параметр d не участвует, здесь тоже используем метод пошагового отбора:

$$\begin{aligned}
 \text{METHOD} &= \text{STEPWISE} (\beta, \alpha, w, q, L, d^2, \beta^2, \beta\alpha, \beta w, \beta q, \beta L, \alpha^2, \alpha w, \alpha q, \alpha L, w^2, wq, wL, q^2, qL, L^2), \\
 d = 5 \text{ мм}, \quad E &= 0,96 \cdot \beta + 0,006 \cdot w \cdot L - 0,071 \alpha^2 - 0,264 \cdot q^2, \\
 &R^2 = 0,993, F = 814, \\
 d = 3 \text{ мм}, \quad E &= 0,605 \cdot \beta + 0,005 \cdot w \cdot L - 0,186 \alpha^2 - 0,35 \cdot q^2 + 2,899 \cdot \alpha, \\
 &R^2 = 0,994, F = 774, \\
 d = 2 \text{ мм}, \quad E &= 1,719 \cdot \beta + 0,006 \cdot w \cdot L - 0,225 \alpha^2 + 3,772 \cdot \alpha \cdot q - 41,082 \cdot q - 0,012 \cdot \beta^2, \\
 &R^2 = 0,995, F = 655
 \end{aligned} \tag{3}$$

Из сравнения уравнений (3) видно, что чем меньше размер сита, тем сильнее на эффективность виброгрохочения туфа влияют β , α , q - угол наклона возмущающей силы вибровозбудителя, угол наклона рабочего органа и удельная нагрузка на грохот.

Модели (1), (2) и (3) имеют коэффициент детерминации R^2 больше 0,95 и критерий Фишера F больше табличного значения. Это свидетельствует о наличии сильной корреляционной связи между эффективностью грохочения и факторами, включенными в регрессионные модели и о высокой адекватности принятых моделей.

Таким образом, модели (1), (2) и (3) могут служить для прогноза эффективности и обоснования параметров вибрационного грохочения туфа по классам 2, 3 и 5 мм при рудоподготовке туфового сырья к комплексной переработке.

Поскольку технология комплексной переработки туфов предусматривает использование магнитной и электрической сепарации для извлечения меди, титаномагнетита, железа [2], то возникает необходимость более тонкой классификации туфа по крупности 0,5 и 0,1 мм. Грохочение по этим классам исследовалось аналогично изложенному выше по классам 2, 3 и 5 мм.

Корреляционные зависимости эффективности E от каждого из параметров показаны на рис.2, где тип аппроксимирующих кривых подбирали из условия максимально высокого значения R^2 .

Из рис. 2 видно, что зависимости E от α и q могут считаться линейными. Например, для q , и линейная, и параболическая аппроксимация дают примерно одинаковую величину $R^2 = 0,96$.

Зависимости E от остальных параметров – нелинейные, параболические. Для β и ω они имеют выраженный экстремум, который для крупности 0,5 мм составляет: $\beta = 55^\circ$, $\omega = 1350$ об/мин, для 0,1 мм: $\beta = 45^\circ$, $\omega = 1500$ об/мин. Эти параметры являются оптимальными для обеспечения высокой эффективности и рекомендуются при проектировании и эксплуатации.

При регрессионном моделировании вначале для каждой крупности 0,5 и 0,1 мм построены приближенные модели, в которых подразумевается линейная связь каждой переменной с эффективностью. Это дает возможность качественного анализа влияния переменных. В программе SPSS Statistics используем функцию *ENTER* - принудительного включения всех переменных, когда в регрессионное уравнение последовательно включаются переменные с наибольшими коэффициентами частной корреляции с зависимой переменной E .

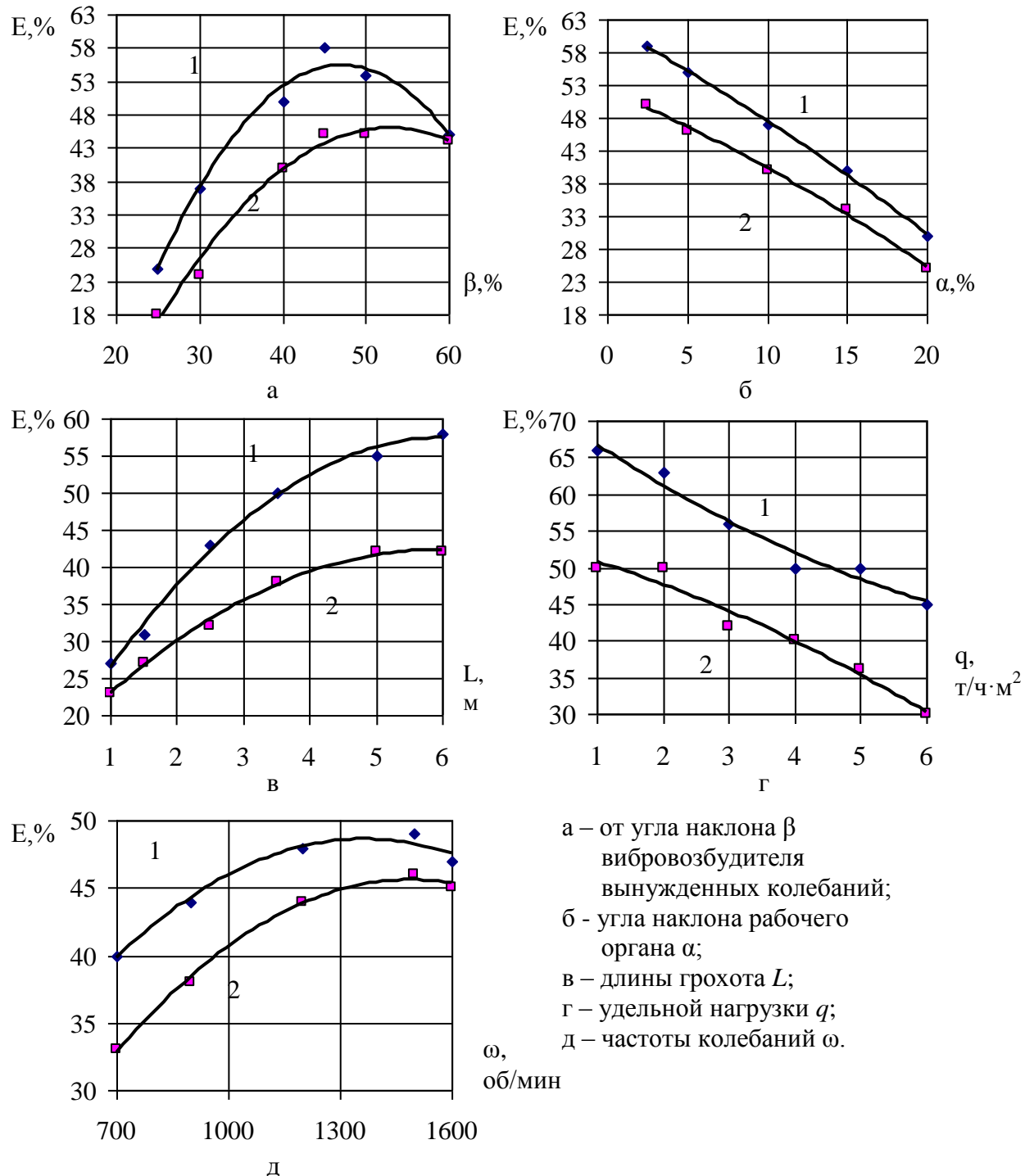


Рисунок 2 – Зависимости эффективности грохочения E от режимных и конструктивных параметров при размерах сита: 1 – 0,5 мм, 2 – 0,1 мм

При построении таких приближенных моделей получены уравнения:

METHOD=ENTER (β, a, ω, q, L)

$$d=0,5 \text{ мм}; \quad E = 0,92 \cdot \beta - 1,473 \cdot \alpha + 0,014 \cdot \omega - 5,98 \cdot q + 5,266 \cdot L, \\ R^2=0,988, F=350$$

$$d=0,1 \text{ мм}; \quad E = 1,077 \cdot \beta - 1,199 \cdot \alpha + 0,008 \cdot \omega - 7,144 \cdot q + 4,227 \cdot L, \\ R^2=0,984, F=270$$

(4)

По знаку при коэффициентах уравнений (4) видно, что увеличение α , q ведет к снижению эффективности, а увеличение β , ω , L – к ее повышению. Сравнивая уравнения для $d=0,5$ мм и $d=0,1$ мм между собой по величине коэффициентов, видим, что при уменьшении размера сита от 0,5 мм и менее возрастает влияние на эффективность β и q и уменьшается влияние α , L , ω .

Однако уравнения (4), хотя и имеют достаточно высокие значения R^2 , являются приближенными. Они не учитывают, что некоторые из параметров связаны с E нелинейно (рис. 2). Учет этого позволит повысить точность аппроксимации.

Из рис.2 видно, что E зависит линейно от двух из пяти переменных - от α и q . Поэтому при построении регрессионных уравнений исключим их квадратичные формы, оставив только линейную зависимость.

При построении регрессии менялся метод *ENTER*, поскольку *STEPWISE* хотя и позволял существенно уменьшить число слагаемых, но не обеспечивал достаточную точность аппроксимации (разница расчетных и истинных значений E доходила до 20 %). Получено:

$$\begin{aligned} \text{METHOD}=\text{ENTER} (\beta, \alpha, \omega, q, L, \beta^2, \beta\alpha, \beta\omega, \beta q, \beta L, \alpha\omega, \alpha q, \alpha L, \omega^2, \omega q, \omega L, qL, L^2), \\ d = 0,5 \text{ мм}; \quad E = 5,965 \cdot \alpha + 14,643 \cdot q - 0,049 \cdot \beta^2 + 0,002 \cdot \beta \cdot \omega + 0,36 \beta \cdot L - \\ - 1,368 \cdot \alpha \cdot q - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^2 - 0,002 \cdot \omega \cdot L - 0,776 \cdot L^2, \quad (5) \\ R^2 = 0,995, F=366 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d = 0,1 \text{ мм}; \quad E = 4,07 \cdot \alpha + 9,89 \cdot q - 0,029 \cdot \beta^2 + 0,001 \cdot \beta \cdot \omega - 1,368 \cdot \alpha \cdot q - \\ - 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot \omega^2 - 0,002 \cdot \omega \cdot L - 0,776 \cdot L^2, \quad (6) \\ R^2 = 0,996, F=458 \end{aligned}$$

Модели (5), (6) в оценке по R^2 и F являются более точными, чем (4). Поскольку на рис. 2 для крупности 0,5 и 0,1 мм парные корреляции носят идентичный характер, то модели (5) и (6) можно объединить в одну обобщенную модель. Здесь также учтем, что парные корреляции E от α и q являются линейными. Для обобщенной модели при $d = 0,5-0,1$ мм получено:

$$\begin{aligned} \text{METHOD}=\text{STEPWISE} (d, \beta, \alpha, \omega, q, L, d^2, d\beta, d\alpha, d\omega, dq, dL, \beta^2, \beta\alpha, \beta\omega, \beta q, \beta L, \alpha\omega, \alpha q, \alpha L, \omega^2, \\ \omega q, \omega L, qL, L^2): \\ E = 1,334 \cdot \beta + 4,767 \cdot d \cdot L - 0,424 \cdot \alpha \cdot q + 0,002 \cdot \omega \cdot L - 0,009 \cdot \beta^2, \quad (7) \\ R^2=0,990, F=870 \end{aligned}$$

Обобщенная модель (7) включает все базовые переменные d , β , α , ω , q , L , имеет высокую степень аппроксимации и пригодна для прогноза эффективности вибрационного грохочения при размерах ячейки сита в диапазоне 0,5 - 0,1 мм.

Выводы. Изложены результаты аналитических исследований эффективности виброклассификации туфа для мелкого грохочения по крупности 5, 3 и 2 мм и тонкого по классам 0,5 и 0,1 мм от влияющих режимных и конструктивных параметров грохота типа РЛСС. Переменными факторами являлись: угол наклона вибровозбудителя вынужденных колебаний

β , угол наклона грохота α , частота колебаний рабочего органа ω , об / мин., удельная нагрузка q , т/ч·м², длина грохота L , м, размер ячейки сита d , мм.

Установлены парные корреляционные зависимости эффективности грохочения E от отдельных параметров при остальных фиксированных. При этом получено, что для крупности грохочения 5, 3 и 2 мм наблюдается нелинейная зависимость E от каждого из параметров. Для крупности 0,5 и 0,1 мм E зависит линейно от двух параметров – α и q , что учтено при построении регрессионных моделей. Установлено, что для всех указанных размеров сита грохота существует экстремальная зависимость E от частоты колебаний рабочего органа ω и от угла наклона α возмущающей силы вынужденных колебаний. С уменьшением крупности грохочения частота колебаний рабочего органа должна повышаться, рекомендовано для крупности 2 - 5 мм $\omega = 1300$ об/мин, для 0,5 - 0,1 мм - $\omega = 1500$ об/мин, рациональным является угол наклона возмущающей силы вынужденных колебаний $\beta = 45-55^\circ$ и, с учетом достижения высокой производительности, угол наклона грохота $\alpha = 15-20^\circ$.

Получены регрессионные модели зависимости E от совокупности параметров – отдельно для каждой крупности, а также две обобщенные модели – для крупности 5-2 мм и 0,5-0,1 мм. Обобщенные модели в качестве одного из параметров включают крупность грохочения и представлены в виде параболических уравнений без свободного члена. При этом установлено, что для крупности грохочения 5, 3, 2 мм с уменьшением размера сита растет влияние на эффективность грохочения параметров β , q , α . Для крупности грохочения 0,5 и 0,1 мм, чем меньше размер сита, тем больше влияние на эффективность β , q и тем меньше влияют остальные параметры, порядке уменьшения степени влияния: α , L , ω .

Полученные парные корреляционные зависимости и регрессионные модели рекомендуются для управления процессом виброгрохочения туфа и выбора рациональных параметров оборудования при переработке туфов на этапе рудоподготовки и использования в комплексной технологии по извлечению из туфов ценных металлов и силикатной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Надутый В.П., Маланчук З.Р., Прокопюк О.Н. Обоснование необходимости комплексной переработки цеолит - смектитовых туфов Волыни, Матер. Междунар. конф. "Форум горняков-2010", Днепропетровск : НГУ, 2010, С. 50-55.
2. Бурденюк І.П., Ковбаса Ш.М., Волощук А.Г. [та ін.] Природний мінерал – базальтовий туф, перспективи застосування в харчовій промисловості, біології та медицині, Клін. та експерим. патол, 2013.-Т. XII, № 2 (44), С.35-41.
3. Надутый В.П. Эрперт А.М., Маланчук З.Р. Результаты исследований зависимости эффективности тонкого вибрационного грохочения базальтового сырья от параметров процесса рудоподготовки, Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. пр. 2012. Вып. 99. С. 151-157.
4. Пат. 39362 UA, МПК В 07 В 1/40. Грохот вібраційний / В.П. Надутый, В.Ф. Ягнюков, І.П. Хмеленко. - U200810796; заявл 01.09.2008; опубл. 25.02.2009, Бюл. № 4.
5. Бардовский А.Д., Бибииков П.Я., Вержанский П.М., Воронин Б.В. Эффективность сухого виброгрохочения отходов нерудных карьеров на просеивающих поверхностях различной конструкции, Горный информационно-аналитический бюлетьень. 2015. №6. С. 182-188.
6. Бюльер, А., Цефель П. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: ООО «Диа-СофтЮП», 2005. 608 с.

REFERENCES

1. Nadutyi V.P., Malanchuk Z.R. and Prokopyuk O.N. (2010), «Justification of the need for complex processing tseolite-smectite tufts of Volyn», *Mater. of the Intern. conf. "Miners Forum-2010"*, NGU, Dnepropetrovsk, UA, pp. 50-55.

2. Burdenyuk I.P., Kovbasa Sh.M., Voloshchuk A.G., Petryuk A.Ye. and Shepherd Ye.P. (2013), «Natural mineral–basalt tuff, prospects for use in the food industry, biology and medical», *Clinical and experimental pathology*. Т. XII, No. 2 (44), pp.35-41.

3. Nadutyi V.P., Erpert A.M. and Malanchuk Z.R. (2012), «The results of studies of the dependence of the effectiveness of thin vibratory screening of basalt raw materials on the parameters of the ore preparation process», *Geo-Technical Mechanics*, no.99, pp. 151-157.

4. Nadutyi V.P., Yagnyukov V.F. and Khmelenko I.P., (2009). *Vibratsiynyy grokhot* [Vibrating riddle], Kyiv, Ukraine, Pat. 39362 UA.

5. Bardovsky A.D., Bibikov P.Ya., Verzhansky P.M. and Voronin B.V.(2015), «Efficiency of dry vibration screening of nonmetallic quarry waste on screening surfaces of various designs», *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, No. 6, Pp. 182-188.

6. Buyul A. and Tsefel P. (2005), *SPSS: iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh I vosstanovleniye skrytykh zakonomernostey* [SPSS: the art of information processing. Analysis of statistical data and restoration of hidden patterns], "Dia-SoftYuP", St. Petersburg, Russia.

Об авторах

Надутьїй Володимир Петрович, доктор технічних наук, професор, завідує відомою механікою машин і процесів переробки мінерального сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, nadutyvp@gmail.com

Чельшкіна Валентина Васильевна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відомою механікою машин і процесів переробки мінерального сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, chel.valenti@gmail.com

Логінова Анастасія Александровна, кандидат технічних наук, науковий співробітник відомою механікою машин і процесів переробки мінерального сировини, Інститут геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України (ІГТМ НАН України), Дніпро, Україна, logan.anlim@gmail.com

About the authors

Nadutyi Volodymyr Petrovych, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov NAS of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, nadutyvp@gmail.com

Chelyshkina Valentyna Vasylivna, Ph.D. (Tech.), Senior Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov NAS of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, chel.valenti@gmail.com

Loginova Anastasiia Oleksandrivna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Researcher of Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Science of Ukraine (IGTM NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, logan.anlim@gmail.com.

Анотація. Запаси туфів в Україні дуже великі, туфи простягаються у вигляді смуг шириною 1-10 км на глибині від 5 до 200 м уздовж західного крила Поліської сідловини і західного схилу Українського щита. У Рівненській та Волинській областях туфи містяться в породах розкриття базальтових кар'єрів, а також в підшві базальтового масиву, де потужність шару туфу становить від 1-2 до 140 метрів. Туфи використовують в сільському господарстві, як добриво, для підгодівлі птахів та тварин, при зберіганні зерна, а також в якості в'язучого, утеплювача, сорбенту в медицині, хімії, будівництві. Особливий інтерес туфи викликають в зв'язку з тим, о вони містять цінні метали. Так, вміст міді становить до 0,7-1,0%, заліза - до 50%, титану - до 4,0%. Тому актуальна розробка комплексної безвідходної технології переробки туфів. Важливим елементом такої технології є класифікація сировини, наприклад, з використанням вібраційного грохочення. Серед відомих віброгрохотів найбільш ефективними вважаються грохоти з гумовими стрічково-струнними ситами - РЛСС. Метою роботи було встановити аналітичні залежності ефективності вібраційного грохочення туфу по класах 5 - 0,1 мм від режимних і конструктивних параметрів грохоту типу РЛСС, що раніше не досліджувалось. Використовувалися методи парного кореляційного і множинного регресійного аналізу. Встановлено, що зі зменшенням крупності просівання частота коливань робочого органу повинна підвищуватися. Для крупності 5 - 2 мм рекомендована частота 1300 об / хв, для 0,5 - 0,1 мм - 1500 об / хв, раціональним є кут нахилу вимушених коливань вимушених коливань 45-55 °. Розроблено регресійні моделі ефективності від змінних параметрів для кожної окремої крупності грохочення 5; 3; 2; 05 і 01 мм, а також узагальнені моделі для класів 5-2 мм і 0,5-0,1 мм. Встановлено, що зі зменшенням розміру сита для крупності 5, 3, 2 мм зростає вплив на ефективність грохочення кута нахилу вібробудника вимушених коливань, питомого навантаження і кута нахилу грохота. При зменшенні розміру сита від 0,5 мм до 0,1 мм зростає вплив на ефективність кута нахилу вібробудника вимушених коливань і питомого навантаження і знижується вплив інших параметрів, в порядку зменшення ступеня впливу: кута нахилу грохота, його довжини, частоти коливань робочого органу. Представлені моделі дозволяють вирішувати приватні завдання вибору

параметрів і визначення ефективності віброхочення туфу на етапі рудопідготовки в комплексній технології переробки туфів.

Ключові слова: віброкласифікація, туф, кореляція, регресія.

Annotation. Tuff reserves in Ukraine are very great; tuffs extend in the form of strips 1-10 km wide at a depth of 5 m to 200 m along the Western wing of the Polesie saddle and the Western slope of the Ukrainian shield. In Rovno and Volyn regions, tuffs are found in overburden rocks in basalt quarries and in the basalt massif bed, where thickness of the tuff layer varies from 1-2 m to 140 meters. Tuff is used in agriculture as a fertilizer and feed for birds and animals, for grain storage, as well as a binder, heat insulator, sorbent in medicine, chemistry, construction. Tuffs attract particular interest due to the presence of precious metals: copper content is up to 0.7-1.0%, iron - up to 50 %, titanium - up to 4.0%. Therefore, it is urgent to develop a comprehensive waste-free technology for processing tuffs, an important element of which is the classification of raw materials. It is considered that among the known vibratory screens the most effective are screens with rubber band-string sieves RBSS. The aim of this work was to establish analytical dependences of the efficiency of tuff vibration screening by classes 5 - 0.1 mm on the regime and design parameters of the RBSS screens, which had not been investigated before. The methods of pair correlation and multiple regression analysis were used. The analysis of pair correlation dependencies showed that with a decrease in the size of the screen the frequency of oscillations of the working body should increase. For screening the size of 5-2 mm, rotary speed 1300 rpm is recommended and 1500 rpm for the size 0.5-0.1 mm; the rational angle of the exciting force of forced vibration is 45-55°. Regression models of efficiency dependence on variable parameters are obtained for each of the screening sizes: 5; 3; 2; 05 and 01 mm, as well as for classes 5-2 mm and 0.5-0.1 mm. It is established that with decreasing sieve size for the sizes 5 mm, 3 mm and 2 mm, the dependence between the screening efficiency, tilt angle of the forced vibration exciter, specific load on the screen and the screen tilt angle increases. When reducing the size of the sieve from 0.5 mm to 0.1 mm, the dependence of the efficiency on the angle of the exciter inclination and specific load increases, while the influence of the rest parameters decreases in the following order of decreasing degree of the influence: angle of the screen inclination, its length, frequency of oscillations of the working body. The presented models make it possible to solve particular problems of selecting parameters and determining efficiency of the tuff vibroscreening at the stage of ore preparation in the complex technology of tuff processing.

Keywords: vibro-classification, tuff, correlation, regression.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Б.О. Блюссом