

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ МАТЕРИАЛА В ПОТОКЕ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

*Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail: np-2006@ukr.net*

На основании проведенных экспериментальных исследований создана установка определения размера частиц материала в потоке. Цель работы – разработать регрессионную модель установки для определения дисперсности материала в потоке с учетом ее геометрических параметров. Определены основные факторы, влияющие на характеристики записываемых акустических сигналов в процессе транспортирования материала. Получена величина влияния каждого принятого фактора и их взаимное влияние на максимальную амплитуду акустических сигналов с коэффициентом детерминации $R = 0,9$. Построенная регрессионная модель позволяет усовершенствовать устройство для определения дисперсности сыпучего материала в потоке.

На підставі проведених експериментальних досліджень створено установку для визначення розміру часток матеріалу в потоці. Мета роботи – розробка регресійної моделі визначення дисперсності матеріалу в потоці для модернізації установки з урахуванням її геометричних параметрів. Визначено основні фактори, що впливають на характеристики акустичних сигналів, що записуються в процесі транспортування матеріалу. Отримано величину впливу кожного прийнятого фактора і їх взаємний вплив на максимальну амплітуду акустичних сигналів з коефіцієнтом детермінації $R = 0,9$. Побудована регресійна модель дозволяє вдосконалити пристрій для визначення дисперсності сипучих матеріалів в потоці.

Based on the experimental researches the device for determination of the material particle size in a flow is created. The purpose of the paper is regression model development of the determination process of material dispersion in a flow taking into account geometrical parameters of the device. The pacing factors influencing on characteristics of recorded acoustic signals in the material transportation are defined. The influence of each accepted factor and their cross impact on the maximum amplitude of acoustic signals are received with determination coefficient of $R = 0,9$. The constructed regression model allows improving the device for determination of bulk material dispersion in a flow.

Ключевые слова: *гранулометрический состав, акустические сигналы, фактор, амплитуда, регрессионная модель.*

Введение. Перерабатываемые на обогатительных фабриках полезные ископаемые и получаемые из них продукты представляют собой смесь частиц неправильной формы и различного размера с зёрнами ценных компонентов. При обогащении полезных ископаемых для извлечения полезных компонентов используются процессы дробления и измельчения. Основное внимание уделяется полному раскрытию минеральных сростков с образованием свободных зёрен компонентов для дальнейшего их разделения по физико-химическим свойствам. При этом должен соблюдаться главный принцип рудоподготовки: не дробить и не измельчать ничего лишнего, ибо нарушение его ведет к перерасходу электроэнергии и ухудшению качества готовой продукции. Контроль крупности исходного сырья и полученного продукта осуществляется на основе анализа их гранулометрического состава. Гранулометрический состав сыпучих материалов является важной характеристикой, которая определяет качество готовой продукции во многих отраслях промышленности, например, таких как керамическая, химическая, строительная промышленность, получение огнеупорного сырья, производство абразивных порошков, порошковая металлургия.

Определение гранулометрического состава руды и продуктов обогащения проводят следующими методами: ситовый анализ, седиментационный или дисперсионный, микроскопический и т. д. Существующие методы опре-

деления грансостава продуктов обогащения, как правило, трудоемкие и требуют сложного оборудования, а погрешность при их использовании достаточно высока [1]. Особенно это относится к мелким классам крупности. Поэтому создание устройства для определения гранулометрического состава сыпучих материалов в потоке без деформации и нарушений свойств материала, при сохранении его в сухом виде является актуальным.

Состояние вопроса. Разработанные методы анализа гранулометрического состава материала в основном направлены на определение его в жидкости, в потоке пульпы, что невозможно для большого количества материалов. В связи с этим была поставлена задача определения и дальнейшего контроля гранулометрического состава сыпучих материалов в потоке без нарушений свойств материала и при сохранении его в сухом виде.

В Институте технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины предложен новый подход к анализу процесса измельчения в струйной мельнице. На основе исследования характеристик акустических сигналов, записываемых в зоне измельчения и классификации [2], создана методика оптимизации процесса измельчения, повышения эффективности загрузки струй материалом [3] и контроля дисперсности продуктов измельчения [4]. На основе полученных результатов предложен способ определения гранулометрического состава продуктов измельчения и сыпучих материалов, транспортируемых в потоке энергоносителя [5]. Для реализации предложенного и заявленного способа создано устройство для определения грансостава материала в потоке [6].

Целью работы является построение на основании полученных экспериментальных результатов регрессионной модели процесса определения гранулометрического состава материала в потоке с учетом геометрических параметров устройства.

Материалы исследования. Разработанная установка «Гранулометр» позволяет в процессе измельчения или транспортировки материала определять гранулометрический состав без остановки оборудования. Общий вид конструкции для определения грансостава материала в потоке энергоносителя показан на рис. 1. Устройство работает следующим образом: после запуска эжектора поток несущего рабочего тела эжектирует поток частиц (6) в зону измерений – в корпус устройства, частицы соударяются с износостойкой пластиной (1), на определенном расстоянии от которой устанавливается волновод (2), фиксирующий акустические сигналы потока частиц. Волновод соединен с акустическим датчиком (3), который в свою очередь связан с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) (4), подключенным к компьютеру (5). Далее частицы улавливаются с помощью бункера-улавливателя (7). Полученные сигналы анализируются, вычисляются необходимые акустические параметры (амплитудно-частотные характеристики) и сравниваются с эталонными сигналами для данного материала [2].

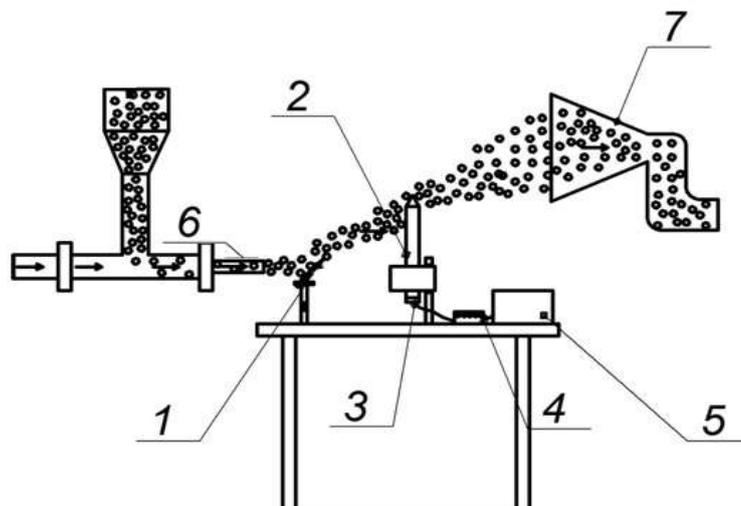


Рис. 1 – Схема установки «Гранулометр» с установленной пластиной
 1 – пластина, 2 – волновод, 3 – пьезокерамический датчик,
 4 – АЦП, 5 – компьютер, 6 – разгонная трубка, 7 – бункер-улавливатель

Для построения регрессионной модели процесса определения гранулометрического состава материала в потоке на основании полученных экспериментальных результатов работы установки «Гранулометр» необходимо установить факторы влияния, при этом функцией отклика от каждого фактора или от комплекса факторов влияния является максимальная амплитуда A_{max} сигналов, записываемых гранулометром при транспортировке продукта.

На описанном устройстве экспериментально получен ряд зависимостей максимальной амплитуды от величины геометрических параметров устройства: расстояния l_m от среза разгонной трубки до пластины; расстояния L_b от пластины до волновода; угла наклона пластины α ; высоты h расположения волновода относительно нижнего края разгонной трубки. Это основные факторы влияния при определении гранулометрического состава материала на рассматриваемом устройстве.

При проведении экспериментальных исследований варьировался один из параметров при фиксированных значениях других, а затем эксперименты повторялись при других значениях фиксированных переменных. Такой подход позволил провести как парный регрессионный анализ для установления вида зависимости параметров гранулометра от конкретного параметра, так и множественный, в котором учтено взаимное влияние рассматриваемых факторов.

Перед проведением регрессионного анализа необходимо провести нормирование факторов. Этот процесс позволяет перевести натуральные значения факторов в безразмерные величины, что обеспечивает возможность сравнительной оценки влияния на процесс различных параметров независимо от их размерности, а также позволяет построить стандартную ортогональную план-матрицу эксперимента.

Связь между нормированным и натуральным значением фактора задается формулой:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i},$$

где x_i – нормированное значение i -го фактора; X_i – натуральное значение фактора; X_{i0} – значение i -го фактора на нулевом уровне; ΔX_i – интервал варьирования i -го фактора. Значения факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные значения факторов

Фактор	Уровни факторов				
	-2	-1	0	+1	+2
L_b , мм	100	130	160	190	220
l_m , мм	110	120	130	140	150
h , мм	30	40	50	60	70
α , °	0	7,5	15	22,5	30

Обобщенные регрессионные зависимости максимальной амплитуды A_{max} от четырех варьируемых факторов для расчета задавались в виде полинома второй степени с учетом взаимного влияния переменных:

$$Y = a_0 + \sum_i^n a_i x_i + \sum_i^n a_{ii} \cdot x_i^2 + \sum_{i < j}^n a_{ij} \cdot x_i \cdot x_j \quad (1)$$

где Y – функция отклика (A_{max}); 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; $n = 4$ – число переменных факторов при выборке – $2^4 + 8$.

Коэффициенты заданной зависимости определялись методом наименьших квадратов средствами прикладного пакета обработки статистических данных Statgraphics Plus. После каждого цикла оценивается адекватность F (статистика Фишера) полученной модели экспериментальным данным. Вычисляется коэффициент детерминации R , который показывает, на сколько процентов изменчивость функции объясняется влиянием учтенных в модели факторов. По знаку коэффициентов регрессии a_i , a_{ii} 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 коэффициентов показывает, на сколько изменится результативный признак при изменении соответствующего фактора. Коэффициенты взаимодействий (a_{ij}) 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 была установлена обобщенная регрессионная зависимость максимальной амплитуды сигналов, записываемых при транспортировании продукта, от четырех варьируемых параметров.

Например, для смеси кварцевого песка Вольногорского месторождения исходной крупности менее 1,0 мм:

$$\begin{aligned}
A_{\max} = & 138 - 6,70833 \cdot L_b - 3,04167 \cdot l_m + 7,79167 \cdot h + 21,7917 \cdot \alpha \\
& - 6,59375 \cdot L_b^2 - 1,1875 \cdot L_b \cdot l_m - 0,4375 \cdot L_b \cdot h - 2,3125 \cdot L_b \cdot \alpha \\
& - 3,21875 \cdot l_m^2 - 1,5625 \cdot l_m \cdot h - 1,4375 \cdot l_m \cdot \alpha - 7,21875 \cdot h^2 + \\
& + 2,8125 \cdot h \cdot \alpha - 3,09375 \cdot \alpha^2.
\end{aligned}
\tag{2}$$

Данная регрессионная зависимость в пределах исследуемых параметров имеет коэффициент детерминации $R = 0,9$, который показывает, что изменчивость функции A_{\max} на 90 % объясняется влиянием учтенных в модели факторов.

При расчете парных регрессионных зависимостей варьировался каждый из четырех параметров при фиксированных значениях других переменных, которые принимались равными их средним значениям, т. е. уровни соответствующих факторов принимались равными 0. На рис. 2 – 5 представлены трехмерные графики зависимостей A_{\max} от рассматриваемых факторов.

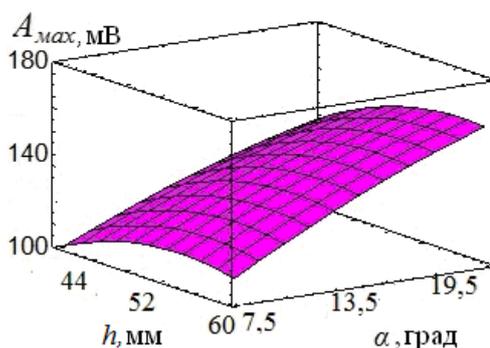


Рис. 2 – Поверхность отклика A_{\max} при $L_b = 0$ и $l_m = 0$

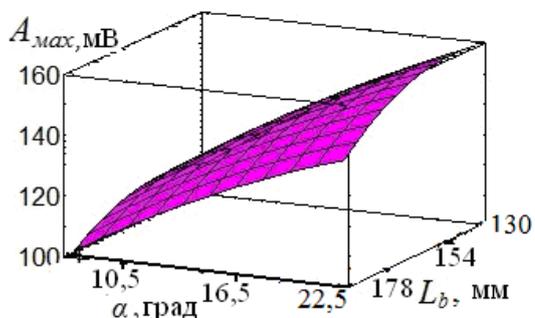


Рис. 3 – Поверхность отклика A_{\max} при $h = 0$ и $l_m = 0$

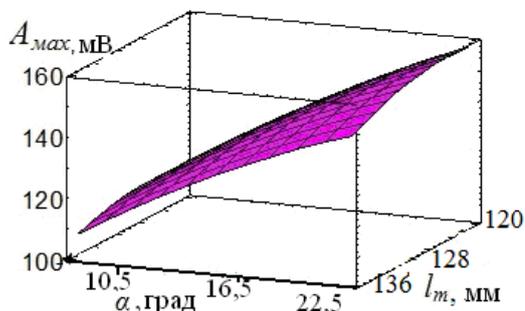


Рис. 4 – Поверхность отклика A_{\max} при $L_b = 0$ и $h = 0$

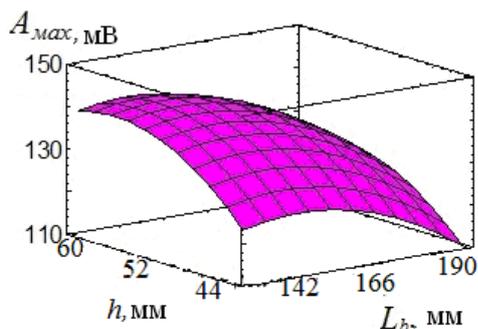


Рис. 5 – Поверхность отклика A_{max} при $\alpha = 0$ и $l_m = 0$

Определено, что для получения значений A_{max} , характерных для исследуемых фракций материала, необходимо установить следующие величины факторов: $L_b = 139$ мм; $l_m = 141$ мм; $h = 60$ мм; $\alpha = 30^\circ$. На графике 6 показано влияние ψ , % каждого фактора и группы факторов на функцию отклика A_{max} .

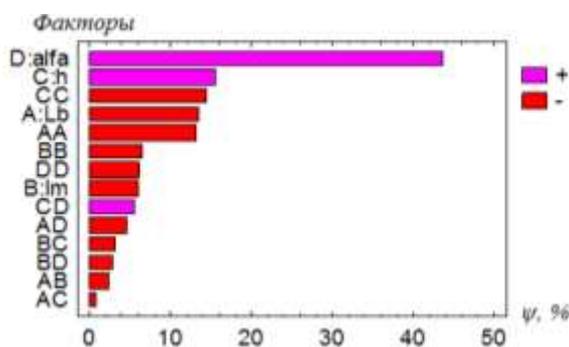


Рис. 6 – Парето-график для функции отклика A_{max}

Из графика видно, что наибольшее влияние на величину A_{max} оказывает фактор D , т. е. угол наклона пластины α , а также факторы C и A , соответственно h (высота расположения волновода) и L_b (расстояние от пластины до волновода). Так, изменение угла наклона пластины почти в три раза существеннее (44%) влияет на величину максимальной амплитуды фиксируемых акустических сигналов, чем изменение высоты расположения конца волновода относительно нижнего края разгонной трубки (16%). Однако увеличение этих параметров вызывает рост значения максимальной амплитуды сигналов, тогда как увеличение расстояний от пластины до волновода и от среза разгонной трубки до пластины (l_m) ведет к уменьшению величины контролируемой максимальной амплитуды сигналов, хотя влияние последнего параметра не является преобладающим и составляет всего 6,5%. Интересно отметить, что парное взаимодействие высоты расположения волновода меняет свой характер, приобретая коэффициент с отрицательным знаком, и становится приблизительно равным влиянию расстояния от пластины до волновода (и его парному взаимодействию). Совместное воздействие всех варьируемых факторов не оказывает существенного влияния на изменение функции отклика.

Выводы. Полученные регрессионные зависимости отображают высокую степень корреляции между геометрическими параметрами установки и максимальной амплитудой акустических сигналов, записываемых в зоне транспортирования материалов. Определено, что для получения значений A_{max} , характерных для исследуемой фракции, необходимо установить следующие величины параметров (факторов): $L_b = 139$ мм; $l_m = 141$ мм; $h = 60$ мм; $\alpha = 30^\circ$.

1. Терновая Е. В. Оценка современных способов гранулометрического анализа измельченного продукта. Збагачення корисних копалин. 2014. № 58 (99). – 59 (100). С. 71 – 78.
2. Прядко Н. С. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2012. № 6. С. 46 – 52.
3. Прядко Н. С. Развитие теории тонкого измельчения полезных ископаемых: автореферат дисс. д-ра техн. наук: 05.15.08 НГУ. Днепропетровск, 2015. 36 с.
4. Пилов П. И., Горобец Л. Ж., Прядко Н. С. Закономерности изменения акустических сигналов от дисперсности при струйном измельчении руд. Збагачення корисних копалин. НГУ: Дн-ск. 2013. №54 (95). С. 52 – 61.
5. Заявка а2015 07099 Україна, МПК В 02 С 19/06. Спосіб визначення гранулометричного складу сипучого матеріалу в потоці / Пилов П. І., Горобець Л. Ж., Прядко Н. С., Тернова К. В.; заявник і патентовласник Інститут технічної механіки НАН України и ДКА України, подана 16.07.2015.
6. Прядко Н. С., Терновая Е. В. Экспериментальные исследования характеристик акустических сигналов при транспортировании материалов в установках «Гранулометр». Збагачення корисних копалин. 2016. № 64 (105). С. 111 – 118.

Получено 04.01.2017,
в окончательном варианте 15.03.2017