

УДК 621.926

Л. Л. Сотник

Учреждение образования «Барановичский государственный университет», Министерство образования
Республики Беларусь, ул. Домейко, 17, 225406 Барановичи, Республика Беларусь,
+375 (163) 62 54 61, Sotnikdin037@gmail.com

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОТ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ ВИБРОВАЛКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

Повышение производительности при измельчении материалов является весьма актуальной задачей. С этой целью автором был изучен вопрос влияния технологических факторов процесса измельчения на производительность в измельчителе принципиально новой конструкции. Установлено, что наиболее существенное влияние на производительность процесса измельчения оказывают такие факторы, как величина зазора, относительная скорость вращения валков и величина эксцентриситета.

В исследовании использован полный факторный эксперимент. С помощью критерия Кохрена математически доказана воспроизводимость опытов на заданных уровнях варьирования. Получено уравнение регрессии, связывающее параметры процесса измельчения и производительности; адекватность полученной математической модели проверена с помощью F -критерия Фишера. Графически представлены поверхности отклика критерия оптимизации, показывающие влияние факторов на параметр оптимизации.

Ключевые слова: вибровалковый измельчитель; измельчение материалов; факторы; эксцентриситет; производительность; планирование эксперимента; уравнение регрессии.

Рис. 4. Библиогр.: 15 назв.

L. L. Sotnik

Baranovichi State University, the Ministry of Education of the Republic of Belarus, 17 Domeyko Str.,
225406 Baranovichi, the Republic of Belarus, +375 (163) 62 54 61, Sotnikdin037@gmail.com

ANALYSIS OF THE RESULTS OF RESEARCH OF DEPENDENCE OF PRODUCTIVITY ON THE MAIN FACTORS OF VIBRATING-ROLLING GRINDER

Increasing productivity in grinding materials is a very urgent task. The authors examined the influence of the technological factors of the grinding process on productivity in an installation of completely new design. It is established that the most significant effect on the grinding process productivity is due to the factors such as gap size, relative rotation speed of the rolls and eccentricity value. A full factorial experiment was used in the study. The reproducibility of experiments at specified levels of variation has been mathematically proven with the Kohren criterion. The regression equation is received; it connects the parameters of the grinding process and productivity. The adequacy of the obtained mathematical model was verified with the help of the Fisher's F -criterion. The response surface of the optimization criterion is represented by the graph to show the influence of factors on the optimization parameter.

Key words: vibrating-rolling grinder; grinding materials; factors; eccentricity; productivity; planning an experiment; regression equation.

Fig. 4. Ref.: 15 titles.

Введение. Природные материалы составляют основу сырьевой базы промышленности строительных материалов. Измельчение является подготовительной стадией переработки материалов к участию их в последующих физико-химических взаимодействиях с целью получения новых продуктов и изделий. Процесс измельчения — один из самых массовых и энергоемких, но при этом самый несовершенный из всех, используемых в технике [1; 2].

В последние годы во многих отраслях промышленности для дезинтеграторной переработки материалов с различными физико-механическими характеристиками широко

используются пресс-валковые агрегаты (ПВА), реализуемые по различным технологическим схемам [3—6]. Разрушение исходного продукта в таких агрегатах происходит путем прохода слоя материала между цилиндрическими измельчающими поверхностями, где образуется критическая зона и развивается сжимающее усилие, превосходящее предел прочности материала [7; 8].

Постановка проблемы. Одним из перспективных направлений как у нас в стране, так и за рубежом, является разработка высокопроизводительного оборудования для измельчения материалов.

Внедрение вибротехники в горнорудной промышленности является перспективным направлением, так как существующие средства механизации оказались неконкурентоспособными в сравнении с новой вибрационной техникой [9; 10].

Однако отсутствие научно обоснованных рекомендаций по расчету энергосиловых, конструктивно-технологических и выходных параметров вибрационных агрегатов тормозит их внедрение в промышленность.

Анализ литературных источников выявил следующее: проблема влияния конструктивно-технологических параметров оборудования на процесс измельчения материалов, имеющих различную структуру и физико-механические характеристики, изучены недостаточно, а вопрос влияния режимных параметров ряда оборудования остается открытым. Все это подтверждается противоречивостью известных данных в этих областях. Так как в современных условиях возрастает важность производительности при дроблении, помоле, измельчении и переработке материалов, изучение вопросов о влиянии этих факторов является актуальным направлением.

Целью данной работы является изучение влияния параметров процесса измельчения в вибровалковом измельчителе на величину производительности.

Результат исследования и их обсуждение. В данной работе анализируется производительность лабораторной установки вибровалкового измельчителя. Он относится к группе кинематических вибрационных машин, т. е. таких, у которых ведущее звено имеет вполне определенное абсолютное или относительное движение, зависящее только от геометрических размеров ведущего механизма [11—13].

Вибрационные воздействия, реализуемые в измельчителе, обладают рядом достоинств по сравнению с постоянными воздействиями, используемыми в ПВА: во-первых, это эффект облегчения преодоления сил трения, который понимается как особое свойство вибраций уничтожать, хотя бы частично, силы трения; во-вторых, это эффект выигрыша в силе, т. е. возможность преодоления сопротивления с меньшими усилиями при разрушении (деформации) исходного продукта.

На процесс механического разрушения материала оказывают влияние как входные, так и выходные параметры (рисунок 1). Первую категорию составляют: режимные показатели процесса измельчения (окружная скорость неподвижного вала v_b , окружная скорость вибровалка v_{bb} , частота колебаний вибровалка n_{bb}), конструктивно-технологические параметры измельчителя (эксцентриситет e , межвалковый зазор b , длина вала l , диаметр вала D) и физико-механические параметры измельчаемого материала (прочность материала $\sigma_{сж}$, максимальный диаметр фракции d_{max} , степень разрыхленности материала μ). Вторую — качественно-энергетические показатели (производительность Q , однородность выходной фракции $d_{\%}$, энергоёмкость N).

Вышеуказанные характеристики и параметры полностью реализуются в разработанной нами конструкции вибровалкового измельчителя и определяются режимами его работы.

Провести анализ и исследование одновременного влияния всех параметров на процесс измельчения либо теоретически невозможно, либо практически не приемлемо. Поэтому из всего ряда факторов были выявлены наиболее значимые и влияющие на производительность в процессе измельчения, а именно величина эксцентриситета e , величина зазора b , и отношение окружных скоростей валков $K_{фр} = v_b/v_{bb}$.



Рисунок 1. — Модель механического разрушения материалов

Для выявления основных факторов, влияющих на процесс измельчения, а также для установления параметров оптимизации были проведены эксперименты.

Для проведения физических опытов по определению влияния величины зазора b , отношения скоростей вращения валков $v_в$ и $v_{вв}$, а также величины эксцентриситета e на производительность Q была использована лабораторная установка, принцип действия которой описан в [11; 14].

Установка имеет следующие параметры:

- конструктивно-технологические — диаметр валков $d = 0,24$ м, ширина валков $b = 0,05$ м;
- режимные — частота колебаний эксцентрикового вала $n_{вв} = 1\,440 \text{ мин}^{-1}$, окружная скорость неподвижного вала $v_в = 1,82 \text{ м/с}$.

В качестве измельчаемого материала для исследований был использован пенобетон 1 100 прочностью 6,3 МПа (ГОСТ 21520-89). Измельчаемый материал имел средневзвешенный диаметр частиц $d_{0ср} = 0,012$ м.

По результатам исследований получена выборка данных о производительности Q .

При статистической обработке результатов проведенных экспериментов нами получено следующее уравнение регрессии в кодированном виде:

$$y = 195,75 + 45,25x_1 + 53,5x_2 - 7,5x_3 + 0,5x_1x_2 - 2x_1x_3 - 0,25x_2x_3.$$

После определения оценок коэффициентов регрессии b_i была проверена гипотеза об их значимости. Если выполняется условие $|b_i| \geq t \cdot s_{b_i}$, то данный коэффициент является статистически значимым.

Находим дисперсию коэффициентов по формуле

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_y^2}{\sum (x_{ij})^2}$$

и оцениваем значимость коэффициентов уравнения регрессии. Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости $\alpha = 0,05$ и степени свободы $f = N(m - 1) = 8 (3 - 1) = 16$ равно $t_{0,05; 16} = 2,12$ [10].

Коэффициенты $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{13}$ по абсолютной величине превышают это значение, следовательно, мы должны признать их значимыми. Коэффициенты b_{12}, b_{23} , являются незначимыми.

Таким образом, было получено уравнение регрессии (модель) первого порядка:

$$y = 195,75 + 45,25x_1 + 53,5x_2 - 7,5x_3 - 2x_1x_3.$$

Адекватность модели проверялась с помощью F -критерия Фишера:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} = \frac{35,0}{16,75} = 2,09,$$

где s_{ad}^2 — дисперсия адекватности математической модели;

s_y^2 — средняя дисперсия эксперимента.

Табличное значение F -критерия Фишера для 5%-го уровня значимости $F_{0,05} = 3,24$ при степенях свободы $f_1 = 16$ и $f_2 = 3$ превышает величину опытного значения этого критерия. Поэтому гипотезу об адекватности представления результатов эксперимента можно принять.

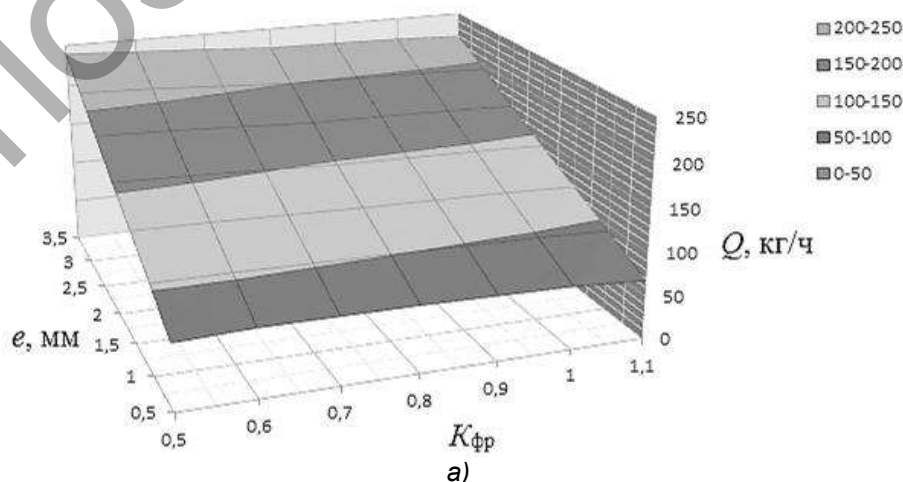
Выполняем переход от кодированных значений факторов к натуральным по уравнению

$$Q = 195,75 + 45,25\left(\frac{b-2}{1}\right) + 53,5\left(\frac{e-2}{1}\right) - 7,5\left(\frac{K_{\text{фр}} - 0,8}{0,2}\right) - 2\left(\frac{b-2}{1}\right)\left(\frac{K_{\text{фр}} - 0,8}{0,2}\right) =$$

$$= 12,25 + 53,25b + 53,5e - 17,5K_{\text{фр}} - 10bK_{\text{фр}}.$$

Обработка модели показала, что достоверность аппроксимации модели полиномом второго порядка составила $R_2 = 97,11\%$.

Представим графики поверхности отклика критерия оптимизации Q , показывающие влияние факторов величины эксцентриситета e , величины зазора b и относительной скорости вращения $K_{\text{фр}}$, которые наглядно отображают область оптимальных значений данных факторов (рисунок 2).



а — величина зазора $b = 1$ мм; б — величина зазора $b = 2$ мм;
в — величине зазора $b = 3$ мм

Рисунок 2. — График поверхности отклика критерия оптимизации Q

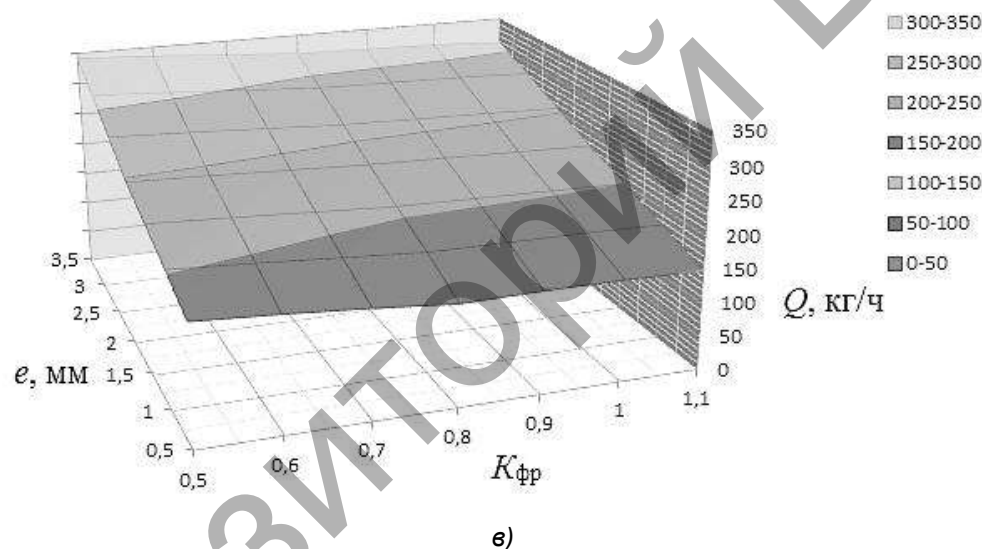
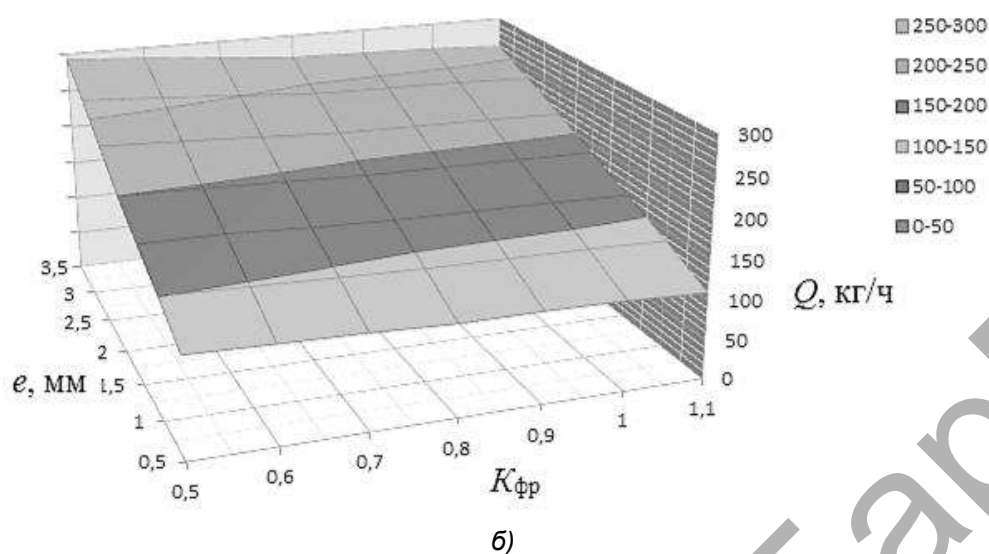


Рисунок 2. — Окончание

Для проверки достоверности результатов был проведен контрольный эксперимент при оптимальных значениях факторов. Относительная ошибка в сравнении с предыдущими значениями составила $\sim 3,8\%$.

Анализ модели показывает, что увеличение значений факторов b и e ведет к увеличению значения критерия оптимизации Q , а увеличение фактора $K_{фр}$ — к уменьшению. Совместное влияние факторов b и $K_{фр}$ также приводит к уменьшению Q . Характер влияния факторов на критерий оптимальности Q достаточно полно описывается представленной моделью.

Заключение. Разработанная лабораторная установка вибровалкового измельчителя обеспечивает повышение производительности по сравнению с ПВА.

Анализ полученных результатов позволил обосновать рациональные параметры процесса измельчения на установке принципиально новой конструкции. Оптимальные значения технологических параметров процесса измельчения пенобетона определяются требуемыми размерами выходной фракции.

Результаты проведенных экспериментов по полученным оптимальным значениям факторов согласуются с результатами расчета по предложенной модели, а сама модель достоверно описывает процесс измельчения рассмотренных образцов. Полученные результаты могут служить основой для проектирования вибровалковых измельчителей промышленного назначения.

Список использованных источников

1. Лесовик, В. С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород / В. С. Лесовик. — М. : Ассоциация строит. вузов, 2006. — 526 с.
2. Селективное измельчение минералов / В. И. Ревнивцев [и др.]. — М. : Недра, 1988. — 286 с.
3. Романович, А. А. Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов : монография / А. А. Романович, А. В. Колесников. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2011. — 165 с.
4. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement. — 2003. — Vol. 34. — № 4. — P. 15.
5. Poliadi, M. A look at internal grinding shop / M. Poliadi, P. Coonet // World Cement. — 1990. — № 9. — P. 395—399.
6. The world's largest roller mills // International cement review. — 2000. — № 1. — P. 43—44.
7. Bogdanov, V. S. The Power Consumption Calculation of a Ball Drum Mill / N. E. Bogdanov, S. I. Antsiferov // Middle-East Journal of Scientific Research. — 2013. — Т. 18. — № 10. — С. 1448—1454.
8. Богданов, В. С. Уравнение кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице / В. С. Богданов, В. С. Романенко // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. — 2013. — № 1. — С. 53—57.
9. Гончаревич, И. Ф. Вибротехника в горном производстве / И. Ф. Гончаревич. — М. : Недра, 1992. — 319 с.
10. Богданов, В. С. Процессы в производстве строительных материалов / В. С. Богданов, А. С. Ильин, И. А. Семикопенко. — Белгород : Вевелита, 2007. — 512 с.
11. Сиваченко, Л. А. Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник // Вестн. БарГУ. Сер. Технические науки. — 2017 — Вып. 5. — С. 87—92.
12. Сотник, Л. Л. Кинематический анализ эксцентрикового вибровалкового измельчителя / Л. Л. Сотник, С. И. Русан, Л. А. Сиваченко // Ударно-вибрационные системы и машины для строительной и горной отраслей : материалы VI Междунар. науч. симп., Орел, 26—27 апр. 2017 г. — Орел, 2017. — С. 233—241.
13. Сиваченко, Л. А. Оценка эффективности дробления вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, А. Н. Хустенко, Л. Л. Сотник // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. — 2017. — С. 89—97.
14. Сиваченко, Л. А. Основы проектирования вибровалкового агрегата для дезинтеграторной обработки минеральных материалов / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // Научные технологии и инновации : сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. : 4 ч. — Белгород : БГТУ, 2016. — Ч. 4. — С. 179—185.
15. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. — М. : Наука, 1976. — 280 с.

Поступила в редакцию 06.04.2018