

УДК 622.734:621.926.3-9

Сухарев В.В., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ВНУТРИВАЛКОВОЙ КОНУСНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ВИБРАЦИОННОГО ТИПА

Сухарєв В.В., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ИГТМ НАН України)

МОДЕРНІЗАЦІЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ВНУТРІШНЬОВАЛКОВОГО КОНУСНОГО МЛИНА ВІБРАЦІЙНОГО ТИПУ

Sukharev V.V., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

MODERNIZATION OF VERTICAL INTRA-ROLLER CONE MILL OF VIBRATORY TYPE

Аннотация. Уменьшение затрат на измельчение горной массы требует разработки новых методов и технологий для повышения эффективности процессов измельчения. С этой целью создана конструкция вертикальной внутривалковой мельницы вибрационного типа, использующей сдвиговые усилия при измельчении, также выполнена ее модернизация, заключающаяся в вертикальном расположении валков, изменении высоты и шага винтовой навивки, которые увеличиваются в сторону загрузки материала. Для подтверждения работоспособности предложенной конструкции и определения ее технологических характеристик проведены экспериментальные исследования по установлению зависимости производительности мельницы от ее основных параметров, влияющих на процесс измельчения: частоты вращения вала вибровозбудителя, зазора разгрузочного отверстия, высоты винтовой навивки. В дальнейшем, для выявления воздействия вышеперечисленных факторов на производительность мельницы, была выполнена идентификация экспериментальных данных и рассчитана обобщенная математическая модель мельницы. Полученные результаты позволяют определить характер зависимости производительности мельницы от переменных параметров, математическая модель дает возможность выбирать рациональные параметры мельницы и доказывает эффективность проведенной модернизации, позволившей увеличить производительность внутривалковой мельницы в 1,8 раза.

Ключевые слова: мельница, модернизация, производительность, навивка, зазор, вибрация, математическая модель.

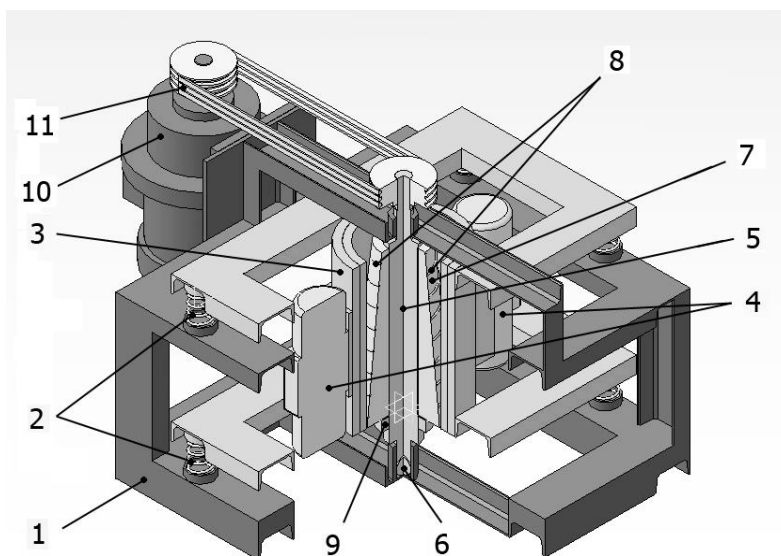
Введение. В горной промышленности одной из самых энергозатратных операций является измельчение горной массы, которое осуществляется преимущественно на барабанных шаровых мельницах различной конструкции, имеющих низкую удельную производительность и большую энергоемкость, недостаточно полно раскрывающих рудные материалы, не позволяя оперативно регулировать грансостав получаемого продукта. Поэтому возникла необходимость повышения эффективности процессов измельчения. Среди тенденций по решению данной задачи можно отметить новые методы и технологии, заключающиеся в рациональном использовании сдвиговых, растягивающих и других усилий, создании энергонапряженных измельчительных аппаратов, позволяющих существенно увеличивать удельные показатели по сравнению с традиционными мельницами [1].

Исходя из этого, в ИГТМ НАН Украины была разработана внутривалковая мельница вибрационного типа [2], с горизонтальным расположением валков, позволившая в значительной степени решить многие технические проблемы измельчения материалов, заменяя энергоемкий процесс измельчения с помощью раздавливания на разрушение горной массы с участием сдвиговых усилий, используя многократное силовое воздействие на измельчаемый материал и положительные стороны вибрационного воздействия.

Авторами разработки были созданы алгоритм и модельное представление процесса измельчения частицы во внутривалковой мельнице, определены условия защемления частицы и геометрические размеры измельчительной конусной камеры мельницы, а также угол конусности [3, 4]. При дальнейшем рассмотрении данной конструкции возник вопрос повышения эффективности ее работы за счет взаимодействия различных классов и продуктов в процессе измельчения, а также изменения геометрических параметров мельницы [5, 6].

Целью данной работы является модернизация внутривалковой мельницы вибрационного типа путем изменения ее конструкции, проведение экспериментальных исследований для подтверждения эффективности произведенных изменений, а также получение математической модели мельницы для выбора ее рациональных параметров.

После анализа возможных путей повышения эффективности работы мельницы была предложена новая конструкция вертикальной внутривалковой конусной мельницы вибрационного типа, представленная на рис. 1. На данную конструкцию был получен патент [7].



- 1 – основание; 2 – упругие элементы; 3 – цилиндрический корпус;
 4 – вибровозбудители; 5 – вал; 6 – опора вала; 7 – конусный валок;
 8 – навивка; 9 – устройство регулирования смещения конусного валка;
 10 – мотор-редуктор; 11 – система передачи вращающегося момента.

Рисунок 1 – Общий вид с $\frac{1}{4}$ разрезом вертикальной внутривалковой мельницы вибрационного типа

Мельница состоит из основания 1, на которое с помощью упругих элементов 2 установлен цилиндрический корпус 3 с вибровозбудителями 4, вала 5, опоры вала 6, конусного валка 7 с многозаходной винтовой навивкой 8, устройства 9 для регулировки смещения конусного валка 7 вдоль вала 5, мотор-редуктора 10, системы передачи вращающегося момента 11 на вал мельницы 5. Отличительными особенностями данной конструкции внутривалковой мельницы от предыдущих является вертикальное расположение валков, а также высота и шаг винтовой навивки, которые увеличиваются в сторону загрузки материала, что позволяет повысить эффективность работы мельницы. Принцип работы мельницы заключается в следующем: сверху в рабочую камеру мельницы засыпается горная масса, под воздействием вращающегося конусного валка с навивкой и вибрации материал транспортируется вниз, подвергаясь при этом измельчению.

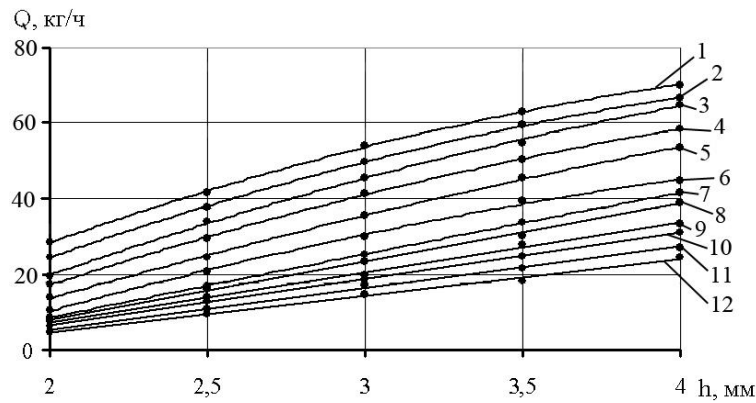
Для определения зависимости производительности внутривалковой мельницы от ее параметров были изучены основные факторы, влияющие на процесс измельчения [8]. Для данной конструкции мельницы такими факторами являются изменение частоты вращения вала вибровозбудителя, зазора разгрузочного отверстия и средней высоты винтовой навивки. После этого был выполнен комплекс экспериментальных исследований, позволивший установить характер зависимости производительности мельницы от ее основных параметров. В качестве варьируемых параметров были приняты следующие:

- частота вращения вала вибровозбудителя ω , об/мин (0,700...1000).
- средняя высота винтовой навивки h , мм (2...4) с уменьшающимся шагом навивки к разгрузочному отверстию;
- зазор разгрузочного отверстия Δ , мм (3...5);

Обороты вала мельницы (n) были постоянной величиной и составляли 60 об/мин. В качестве исследуемого материала использовался отсев гранита с крупностью $-10+5$ мм. (рис. 2).

Для выявления воздействия вышеперечисленных факторов на производительность мельницы был выполнен множественный регрессионный анализ с применением прикладного пакета обработки статистических данных SPSS Statistics. Был выполнен расчет обобщенной модели зависимости производительности внутривалковой конусной мельницы вибрационного типа от переменных факторов в виде регрессионной зависимости второго порядка с учётом взаимного влияния частоты вращения вала вибровозбудителя, высоты винтовой навивки и зазора разгрузочного отверстия:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + \dots + a_n \cdot x_n + b_1 \cdot x_1^2 + \dots + b_n \cdot x_n^2 + c_1 \cdot x_1 \cdot x_2 + \\ + c_2 \cdot x_1 \cdot x_3 + \dots + c_k \cdot x_{n-1} \cdot x_n,$$



№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Δ	4	4	4	4	4	4	4	5	4,5	4	3,5	3
ω	1000	950	900	850	800	750	700	0	0	0	0	0

Рисунок 2 – Зависимость производительности мельницы от высоты навивки при разных зазорах и частоте вращения вала вибровозбудителя

где a_0 – свободный член; $a_n \cdot x_n$ и $b_n \cdot x_n^2$ – линейные и квадратичные слагаемые, соответственно; $c_k \cdot x_{n-1} \cdot x_n$ – слагаемое в виде парных произведений факторов; y – целевая функция (производительность).

Анализ математической модели выполнялся средствами SPSS Statistics методом “Исключение”, при котором расчет начинался с результата, содержащего все независимые переменные, и затем исключаются независимые переменные с наименьшими частичными корреляционными коэффициентами пока соответствующий регрессионный коэффициент оказывался значимым [9].

Регрессионная модель получена для двух случаев: с наличием вибрационной составляющей ($\omega = 700 \dots 1000$ об/мин) и без нее ($\omega = 0$). Обобщенная регрессионная зависимость производительности мельницы без учета влияния вибрации на процесс измельчения (объем выборки – 25 измерений) имеет вид:

$$Q = 2,95 - 4,2577 \cdot \Delta + 2,755 \cdot \Delta \cdot h$$

Статистика Фишера $F = 3213,8$ подтверждает адекватность полученной модели, а коэффициент детерминации $R^2 = 0,997$ свидетельствует о высоком описании функции Q учтенными в уравнении факторами. Коэффициенты надежности $t_{\Delta} = 23,1$ и $t_{\Delta \cdot h} = 75,5$ больше критического значения Стьюдента [10].

Объем выборки модели с наличием вибрационного привода составил 91 измерение, а расчетная зависимость следующая:

$$Q = -159,644 + 21,894 \cdot h + 0,198 \cdot \omega - 2,3947 \cdot h^2 - 0,00012 \cdot \omega^2 + 0,0126 \cdot \Delta \cdot \omega + 0,0124 \cdot h \cdot \omega$$

Полученная регрессионная зависимость с высоким уровнем адекватности описывает экспериментальные данные $F = 1273,9$. При этом изменение функции Q на 98,9 % характеризуется изменением включенных в модель факторов ($R^2 = 0,989$). Статистика коэффициентов регрессии и уровень их надежности (статистика Стьюдента) представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчётные значения коэффициентов регрессии и их надёжности

Переменная	h	ω	h^2	ω^2	$\Delta \cdot \omega$	$h \cdot \omega$
Коэффициент регрессии	21,894	0,198	-2,3947	-0,00012	0,0126	0,0124
t_{rasch}	4,96	5,34	4,04	5,79	36,88	4,46

Следует отметить, что в уравнении слагаемое $\Delta \cdot \omega$ приняло на себя влияние фактора Δ , который был исключён при расчете, т. к. имел низкий корреляционный коэффициент ($t_{\Delta} = 1,19$).

Выводы. Научное значение результатов исследований заключается в определении зависимости производительности мельницы от переменных параметров (частоты вращения вала вибровозбудителя, зазора разгрузочного отверстия, высоты винтовой навивки), а также получении обобщенной математической модели мельницы.

Практическое значение работы состоит в модернизации конструкции вертикальной внутривалковой мельницы вибрационного типа, что позволило увеличить производительность мельницы в 1,8 раза. Полученная математическая модель вертикальной внутривалковой мельницы позволяет выбирать рациональные параметры мельницы и подтверждает целесообразность проведенной модернизации внутривалковой мельницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржевский, В.В. Основы физики горных пород / В.В. Ржевский, Г.Я Новик. – М.: Недра, 1978. – 368 с.
2. Пат. № 42114 UA, МКИ⁷ В02С 2/00, В02С 15/00 (2009). Внутрішньовалковий конусний млин / В.П. Надутый, В.В. Сухарев; заявник і патентовласник ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України; заявл. 05.01.2009, опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12. – 3 с. : іл.
3. Надутый, В.П. Оценка распределения сил при защемлении измельчаемой частицы в конусной валковой мельнице / В.П. Надутый, В.А. Остапенко, В.В. Сухарев // Сб. науч. тр. НГУ. – Днепропетровск, 2009. – Вып. № 32. – С. 35-41.
4. Сухарев, В.В. Особенности кинематической схемы и результаты исследований работоспособности внутривалковой конусной мельницы вибрационного типа / В.В. Сухарев //

Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. журнал) // МГГУ. – М.: Горная книга, 2013. – Вып. 11. – С. 171-175 .

5. Keisall, D., Reid, K. The Derivation of the Mathematical Model for Breakage in a Small, Continuous, Wet Ball Mill. Paper 4, 2. Joint American Institute of Chemical Engineers – Institution of Chemical Engineers Meeting. London, June. 1965.

6. Gaudin, A. Model and Comminuting Distribution Equation for Single Fracture / Gaudin A., Meloy T. // Trans. AIME. – 1962. – 223. – № 3.

7. Пат. № 67950 UA, МКИ⁷ B02C 2/00, B02C 15/00 (2012.01) Вертикальний внутрішньовалковий млин вібраційного типу / В.П. Надутий, В.В. Сухарев ; заявник і патентовласник ІГТМ ім. М.С. Полякова НАН України; заявл. 08.08.2011, опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. – 3 с.: іл.

8. Линч, А. Дж. Циклы дробления и измельчения / Линч А. Дж. – М. : Недра, 1981. – 272 с.

9. 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.

10. Грушко, И.М. Основы научных исследований. 3-е изд., перераб. и доп. / И.М. Грушко, В.М. Сиденко // Харьков: Вища школа, 1983. – 224 с.

REFERENCES

1. Rzhavskiy V.V. and Novik G.Ya. (1978), *Osnovy fiziki gornykh porod* [Fundamentals of physics rocks], Nedra, Moscow, SU.

2. Nadutyu, V.P. and Sukharev, V.V., M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2009), *Vnutrishniovalkovyy konusnyy mlyn* [Intra-roller cone mill], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 42114.

3. Nadutyu, V.P., Ostapenko, V.A. and Sukharev, V.V. (2009,) "Assessment of the distribution of forces when in jamming milled particles tapered roller mill", *Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnoho hirnychohoho universytetu*, no. 32, pp. 35-41.

4. Sukharev, V.V. (2013), "Properties the kinematic scheme and research performance within the Intra-roller cone mill vibration type", *Gornyy informatsionnyy analiticheskiy zhurnal*, no. 11, pp. 171-175

5. Keisall D. and Reid K. ((1965), The Derivation of the Mathematical Model for Breakage in a Small, Continuous, Wet Ball Mill. Paper 4, 2. Joint American Institute of Chemical Engineers – Institution of Chemical Engineers Meeting. London, GB.

6. Gaudin A. and Meloy T. (1962), «Model and Comminuting Distribution Equation for Single Fracture», *Trans. AIME*,. Vol. 223, no.3.

7. Nadutyu, V.P. and Sukharev, V.V., M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine (2012), *Vertykalnyy vnutrishniovalkovyy mlyn vibratsiynoho typu* [Vertical intra-roller vibrating mill], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 67950.

8. Linch, A. (1981), *Tsikly drobleniya i izmelcheniya* [Cycles of crushing and grinding], Nedra, Moscow, RU.

9. Buul, A. and Tsefel, P.(2005), *SPSS: iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovleniye skrytykh zakonornostey: Perevod s nemetskogo* [SPSS: Art of treatment of information. Statistical data analysis and renewal of the hidden conformities to the law: Trudged. with is mute.], ООО "Dia-SoftYuP", SPb, RU

10. Grushko, I.M. and Sidenko, V.M. (1983), *Osnovy nauchnykh issledovaniy* [Bases of scientific researches], Vyshcha Shkola, Kharkov, Ukraine.

Об авторе

Сухарев Виталий Витальевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела механики машин и процессов переработки минерального сырья, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, agnivik@ukr.net.

About the author

Sukharev Vitaliy Vitalievich, Candidate of Technical Sciences (Rh.D), Senior Researcher in Department of Mechanics of Mineral Processing Machines and Processes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, agnivik@ukr.net.

Анотація. Зменшення витрат на подрібнення гірської маси вимагає розробки нових методів і технологій для підвищення ефективності процесів подрібнення. З цією метою створена конструкція вертикального внутрішньовалкового млина вібраційного типу, що використовує зсувні зусилля при подрібненні, також виконана його модернізація, яка полягає в вертикальному розташування валків, зміні висоти і кроку гвинтової навивки, які збільшуються в сторону завантаження матеріалу. Для підтвердження працездатності запропонованої конструкції і визначення її технологічних характеристик проведені експериментальні дослідження по встановленню залежності продуктивності млина від його основних параметрів, що впливають на процес подрібнення: частоти обертання валу віброзбуджувача, зазору розвантажувального отвору, висоти гвинтової навивки. Надалі, для виявлення впливу перерахованих вище факторів на продуктивність млина, була виконана ідентифікація експериментальних даних і розрахована узагальнена математична модель млина. Отримані результати дозволяють визначити характер залежності продуктивності млина від змінних параметрів, математична модель дає можливість вибирати раціональні параметри млина і доводить ефективність проведеної модернізації, що дозволила збільшити продуктивність внутрішньовалкового млина в 1,8 рази.

Ключові слова: млин, модернізація, продуктивність, навивка, зазор, вібрація, математична модель.

Abstract. Reduce the cost of crushing the rock mass requires the development of new methods and technologies to improve the efficiency of the grinding process. To this end, created the design of vertical vibrating intra-roller mill using shear forces during grinding, also made its modernization, which consists in a vertical arrangement of the rollers, changing the height and pitch helical winding, which increases in the direction of material feed. To confirm the performance of the proposed design and the definition of its technological characteristics of experimental studies to establish the dependence of the performance of the mill from its main parameters affecting the grinding process: frequency of rotation of the vibration, the backlash of the discharge opening, the height of the helical winding. Subsequently, to identify the impact of these factors on the performance of the mill, the identification of the experimental data was carried out and the calculated generalized mathematical model of the mill. These results allow us to determine the dependence of the performance of the mill variables, mathematical model makes it possible to choose rational parameters of the mill and proves the effectiveness of the modernization will increase the intra-roller mill productivity by 1.8 times.

Keywords: mill, modernization, productivity, winding, backlash, vibration, mathematical model.

Стаття постуила в редакцію 20.01.2016

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом