

Установление оптимальных параметров мелющей загрузки и рабочих параметров вибрационной мельницы с применением метода планирования многофакторного эксперимента

Ю.В. Дмитрак, А.А. Кравцов✉

Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук,
г. Москва, Российская Федерация
✉ havok.08@mail.ru

Резюме: Проведение экспериментальных исследований сопряжено с необходимостью реализации большого числа опытов, что требует больших временных затрат и увеличивает риск совершения невынужденных ошибок. В ходе исследований необходимо одновременно определять оптимальное значение целевой функции и следить за обеспечением заданной величины какого-либо важного параметра, известного в теории планирования эксперимента как контролирующий параметр. В статье рассмотрено применение метода планирования многофакторного эксперимента в исследованиях энергетических характеристик процесса вибрационного измельчения минерального сырья. Цель исследования – осуществить поиск оптимальных значений удельной энергоёмкости измельчения в вибрационной мельнице при минимальном количестве опытов и обосновать эффективность применения метода планирования многофакторного эксперимента. Исследования проводились с использованием метода симплекс-планирования при наличии контролирующего параметра – эффективности измельчения горной породы. Авторами были рассчитаны оптимальные рабочие параметры мельницы: амплитуда колебаний камеры – 3 мм, частота колебаний камеры – 22 Гц, отношение диаметра шара к диаметру камеры – 0,025 и отношение диаметра сердечника к диаметру камеры – 0,2. На основе полученных значений параметров мельницы были проведены серии опытов по измельчению 1) гранитной крошки, 2) мраморной крошки и 3) гипса. В результате исследований авторы получили данные, которые позволили построить графики изменения энергоёмкости измельчения разных горных пород в зависимости 1) от амплитуды и частоты колебаний помольной камеры, 2) от отношения диаметра шара к диаметру камеры, 3) от отношения диаметра шара к диаметру сердечника, заменяющего в помольной камере малоподвижное ядро.

Ключевые слова: метод симплекс-планирования, мелющая загрузка, амплитуда колебаний помольной камеры, частота колебаний помольной камеры, малоподвижное ядро, энергоёмкость измельчения, вибрационное измельчение

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-67-00009, <https://rscf.ru/project/25-67-00009/>

Для цитирования: Дмитрак Ю.В., Кравцов А.А. Установление оптимальных параметров мелющей загрузки и рабочих параметров вибрационной мельницы с применением метода планирования многофакторного эксперимента. *Горная промышленность*. 2026;(4):68–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-68-73>

Determining optimal parameters of the grinding media and operating parameters of the vibratory mill using multifactorial experiment designed with the simplex method

Yu.V. Dmitrak, A.A. Kravtsov ✉

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ havok.08@mail.ru

Abstract: Conducting experimental research involves carrying out a large number of experiments, which is time-consuming and increases the risk of making avoidable errors. During the research, it is necessary to simultaneously determine the optimal value of the target function and ensure that a specified value of a key parameter—known in experimental design theory as a control parameter—is maintained. This article examines the application of the multivariate experimental design method in studies of

the energy characteristics of the vibratory grinding process for mineral raw materials. The objective of the study is to identify the optimal values for the specific energy consumption of grinding in a vibratory mill with a minimum number of experiments and to demonstrate the efficiency of using the multivariate experimental design method. The research was conducted using the simplex planning method, with the rock grinding efficiency as the control parameter. The authors calculated the optimal operating parameters of the mill, i.e. the chamber oscillation amplitude of 3 mm, the chamber oscillation frequency of 22 Hz, the ratio of the ball diameter to the chamber diameter of 0.025, and the ratio of the core diameter to the chamber diameter of 0.2. A series of experiments was conducted on grinding 1) granite chips, 2) marble chips, and 3) gypsum based on the obtained values of the mill parameters. As a result of their research, the authors obtained data that allowed plotting graphs showing changes in the energy intensity of grinding for different rock types as a function of (1) the amplitude and frequency of the grinding chamber oscillations, (2) the ratio of the ball diameter to the chamber diameter, (3) the ratio of the ball diameter to the diameter of the core that replaces the stagnant zone in the grinding chamber.

Keywords: simplex method, grinding media, amplitude of grinding chamber oscillations, frequency of grinding chamber oscillations, stagnant zone, specific grinding energy intensity, vibration grinding

Acknowledgments: The study was supported by Russian Science Foundation grant No. 25-67-00009, <https://rscf.ru/project/25-67-00009/>

For citation: Dmitrak Yu.V., Kravtsov A.A. Determining optimal parameters of the grinding media and operating parameters of the vibratory mill using multifactorial experiment designed with the simplex method. *Russian Mining Industry*. 2026;(4):68–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4-68-73>

Введение

Проведение экспериментальных исследований практически всегда сопряжено с необходимостью реализации большого числа опытов, что требует от исследователя больших временных затрат и увеличивает риск совершения невынужденных ошибок, связанных с человеческим фактором. Кроме того, очень часто исследователю приходится не только определять оптимальное значение целевой функции, но и следить за тем, чтобы при этом обеспечивалась величина какого-либо важного параметра, известного в теории планирования эксперимента как контролирующий параметр. Поэтому дальнейшее изложение материала данной статьи посвящено описанию и применению метода симплекс-планирования при поиске минимальных значений энергоёмкости измельчения в вибрационной мельнице [1–6].

Материалы и методы

Для установления оптимальных параметров мелющей загрузки и рабочих параметры мельницы, при которых достигается максимальная энергоэффективность помола, была решена задача эмпирической оптимизации симплекс-методом [7]. Он заключается в следующем.

Наборы значений факторов образуют правильный симплекс в R^n – выпуклую оболочку $n + 1$ точек, где n – количество факторов, в которой все попарные расстояния L равны. Множество вершин обозначается как:

$$\mathcal{V} = \{v_0, v_1 \dots v_n\} \quad (1)$$

Сначала выбирается стартовая точка $v_0 \in R^n$, удовлетворяющая возможным ограничениям задачи. Остальные n вершин рассчитываются по формуле, гарантирующей равенство всех рёбер:

$$v_i = v_0 + \sum_{j=1}^n c_{ij} e_j, \quad i = 1 \dots n, \quad (2)$$

где e_j – единичные орты координатных осей, а элементы матрицы $C = [c_{ij}]$ имеют вид:

$$c_{ij} = \begin{cases} \frac{L}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1}-1), & i \neq j \\ \frac{L}{n\sqrt{2}}(\sqrt{n+1}+n-1), & i = j \end{cases} \quad (3)$$

Все последующие операции оперируют только с координатами вершин, оставляя длину ребра L неизменной вплоть до возможной процедуры сжатия.

Далее проводится итеративный поиск точки экстремума оптимизируемой функции. Каждая итерация k ($k = 0, 1, 2, \dots$) состоит из нескольких шагов. На первом шаге проводится измерение и ранжирование вершин. Проводятся эксперименты (вычисления) во всех $n + 1$ вершинах текущего симплекса $V^{(k)}$, находятся значения $f_i = f(v_i)$. Вершины упорядочиваются по возрастанию функции отклика f :

$$f(v_B) \leq f(v_2) \leq \dots \leq f(v_{W-1}) \leq f(v_W), \quad (4)$$

где v_B – вершина с лучшим откликом, v_W – вершина с худшим откликом, v_{W-1} – вершина со вторым после худшего откликом.

На втором шаге происходит отражение худшей вершины. Вычисляется центр тяжести n вершин, исключая v_W :

$$c = \frac{1}{n} \sum_{i \neq W} v_i \quad (5)$$

Строится отражённая точка-кандидат r и проводится измерение $f_r = f(r)$.

$$r = 2c - v_W \quad (6)$$

На третьем шаге проводится проверка успешности отражения и разрешение осцилляций. В случае если новая точка r улучшает отклик ($f_r > f_W$), вершина v_W исключается из симплекса, вместо неё включается r . Получается новый симплекс, после чего итерация переходит к шагу 1:

$$\mathcal{V}^{(k+1)} = (\mathcal{V}^{(k)} \setminus \{v_W\}) \cup \{r\} \quad (7)$$

В случае если отражение не привело к улучшению по сравнению с удалённой вершиной или даже ухудшило её, для предотвращения обратного скачка (осцилляции) алгоритм не включает r в симплекс. Вместо этого временно отбрасывается вершина со вторым после худшего откликом v_W , и для неё выполняется аналог отражения, вычисляя точку r' . Если функция отклика улучшилась, замена признаётся успешной. Тогда новый симплекс формируется заменой v_{W-1} на r' :

$$\mathcal{V}^{(k+1)} = (\mathcal{V}^{(k)} \setminus \{v_{W-1}\}) \cup \{r'\} \quad (8)$$

Если и вторая попытка не дала улучшения, то это интерпретируется как признак того, что симплекс накрыл область оптимума и дальнейшее движение с текущим размером ребра L неэффективно.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены факторы, варьируемые в эксперименте. Параметром оптимизации выступает удельная энергоемкость измельчения E . Она выражается в энергии, затраченной на измельчение тонны исходного сырья до требуемой фракции. В эксперименте под эффективностью измельчения понимается заданный гранулометрический состав продукта (в нашем случае 80% измельчённой массы занимает фракция $-0,1$ мм). В экспериментах измельчению подвергался гранитный отсев. Состав исходного сырья приведен в табл. 2, а на рис. 1 показана закономерность протекания процесса измельчения во времени в ходе проведения одного из экспериментов.

Таблица 1
Факторы эксперимента, направленного на эмпирическую оптимизацию энергоэффективности измельчения

Фактор	Минимальное значение	Основной уровень	Максимальное значение	Интервал варьирования
A , мм	2	5	9	1
f , Гц	10	20	25	3
$d_{ш} / D$	0,0125	0,025	0,0375	0,00625
d_c / D	0	0,3	0,5	0,1

Таблица 2
Гранулометрический состав исходного сырья

Фракция, мм	Доля в гран. составе, %
+1	44
1–0,25	30
0,25–0,1	17
–0,1	9

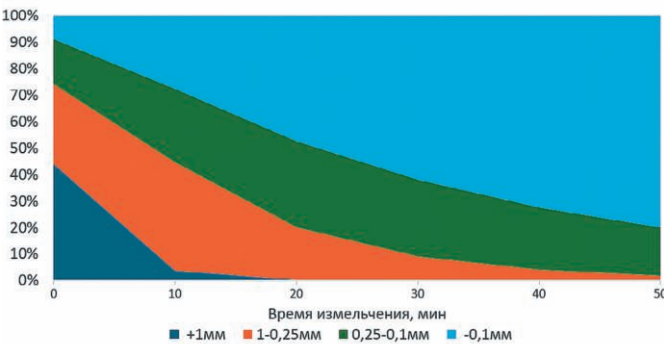


Рис. 1
Кинетика измельчения в ходе проведения одного из экспериментов

Table 1
Factors in an experiment aimed at the empirical optimization of the grinding energy efficiency

Гранулометрический состав в процессе измельчения описывается распределением Розина–Раммлера:

$$R = 1 - \exp[-kdt], \tag{9}$$

где R – массовая доля подрешетного продукта; k – коэффициент, зависящий от измельчаемости материала и размерностей фракции и времени; d – фракция продукта, мм; t – время измельчения, мин [8]. Зная долю R_1 фракции d в определенный момент времени t_1 , возможно рассчитать время, необходимое для завершения измельчения. Для этого из формулы (9) необходимо найти коэффициент k и затем найти время t_2 , необходимое, чтобы фракция d составляла массовую долю не менее R_2 :

$$k = - \frac{\ln(1-R_1)}{dt_1}; \tag{10}$$

$$t_2 = - \frac{\ln(1-R_2)}{kd}. \tag{11}$$

Уравнение для расчета времени измельчения получается путем замены коэффициента k в уравнении (11) выражением (10):

$$t_2 = \frac{\ln(1-R_2)}{\ln(1-R_1)} t_1. \tag{12}$$

Далее рассчитывается энергия, которая будет затрачена за полученное время измельчения, не дожидаясь фактического окончания процесса:

$$E = \frac{Pt_2}{m \cdot 60} = \frac{\ln(1-R_2)}{\ln(1-R_1)} \frac{Pt_1}{m \cdot 60}, \tag{13}$$

где E – энергоэффективность, кВт*ч/т; P – потребляемая вибромотором мощность, кВт; m – масса породы, т.

При проведении экспериментов мельница останавливалась в момент $t_1 = 15$ мин, проводился гранулометрический анализ и вычислялась удельная энергоемкость измельчения. Начальные значения точек симплекса представлены в опытах 1–5, далее проводилась оптимизация в опытах 6–17 (табл. 3).

Опыты 18 и 19 демонстрируют увеличение удельной энергоемкости, что свидетельствует о наличии экстремума в предыдущем симплексе в точке 17. Таким образом, оптимальными рабочими параметрами мельницы являются: амплитуда колебаний камеры 3 мм, частота колебаний камеры 22 Гц, отношение диаметра шара к диаметру камеры 0,025 и отношение диаметра сердечника к диаметру камеры 0,2.

С использованием найденных оптимальных значений факторов были проведены серии опытов по измельчению различных материалов – гранитной крошки, мраморной крошки и гипса. При этом один из факторов менялся, а другие оставались фиксированными в найденном оптимальном значении. В результате серии опытов были получены зависимости энергоемкости измельчения материалов от факторов, используемых в эксперименте: от амплитуды колебаний помольной камеры (рис. 2), от частоты колебаний помольной камеры (рис. 3), от отношения диаметра шара к диаметру камеры (рис. 4), от отношения диаметра сердечника к диаметру камеры (рис. 5).

Анализ зависимости энергоемкости измельчения от амплитуды колебаний помольной камеры (см. рис. 2) показывает, что слишком маленькая амплитудакратно увеличивает энергоемкость измельчения. Это объясняется тем, что между шарами не образовывается достаточного

Таблица 3
Результаты эмпирической оптимизации симплекс-методом

Table 3
Results of empirical optimization done with the simplex algorithm

Опыт	, мм	, Гц			Е, кВт*ч/т	Получение симплекса
1	5	10	0,0125	0	65,95	Начальный симплекс
2	4	10	0,0125	0	60,53	Начальный симплекс
3	5	13	0,0125	0	56,10	Начальный симплекс
4	5	10	0,025	0	51,69	Начальный симплекс
5	5	10	0,0125	0,1	53,63	Начальный симплекс
6	4	13	0,0188	0,1	46,54	Отражение вершины 1
7	5	13	0,025	0,1	43,17	Отражение вершины 2
8	4	10	0,0375	0,2	49,57	Отражение вершины 3
9	4	13	0,0375	0,1	44,76	Отражение вершины 5
10	3	16	0,0375	0,2	39,59	Отражение вершины 4
11	4	19	0,025	0,1	36,19	Отражение вершины 8
12	4	19	0,0375	0,2	34,28	Отражение вершины 6
13	4	22	0,025	0,2	20,84	Отражение вершины 9
14	3	25	0,0375	0,2	23,27	Отражение вершины 7
15	4	25	0,025	0,2	21,84	Отражение вершины 10
16	3	22	0,0375	0,3	19,52	Отражение вершины 11
17	3	22	0,025	0,2	18,53	Отражение вершины 12
18	4	19	0,0188	0,3	21,80	Отражение вершины 14
19	3	25	0,0375	0,2	24,10	Отражение вершины 18

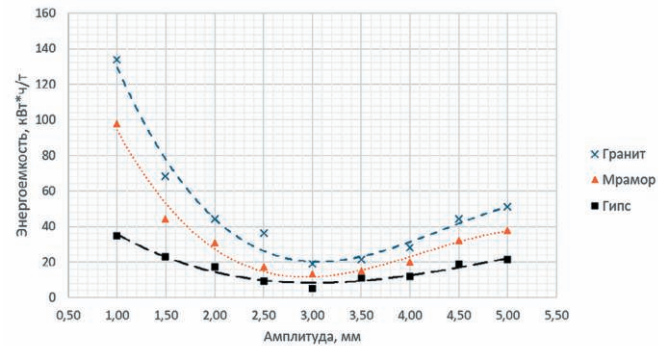


Рис. 2
Графики зависимости
энергоемкости измельчения
горных пород от амплитуды
колебаний помольной камеры

Fig. 2
A plot of the specific rock
milling energy vs the milling
chamber oscillation amplitude

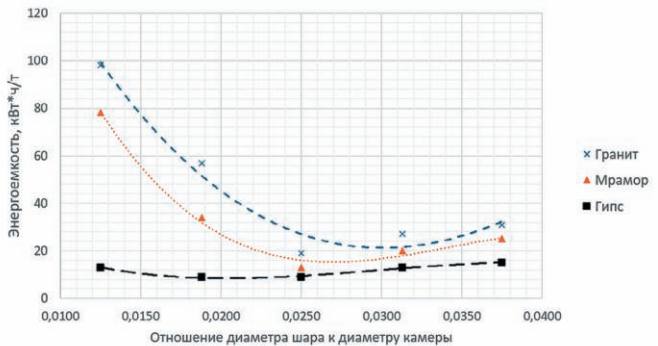


Рис. 4
Графики зависимости
энергоемкости измельчения
горных пород от отношения
диаметра шара к диаметру
камеры

Fig. 4
A plot of the specific rock
milling energy vs the
ball-to-chamber diameter ratio

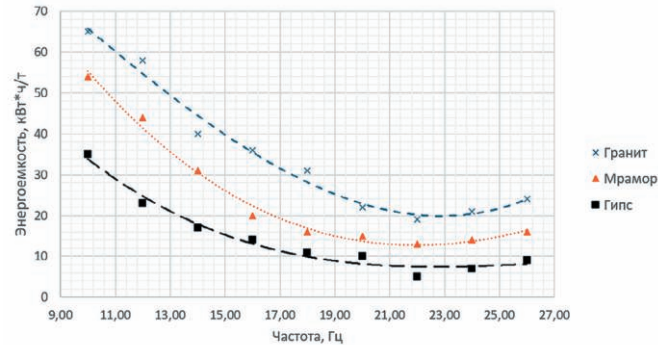


Рис. 3
Графики зависимости
энергоемкости измельчения
горных пород от частоты
колебаний помольной камеры

Fig. 3
A plot of the specific rock
milling energy vs the milling
chamber oscillation frequency

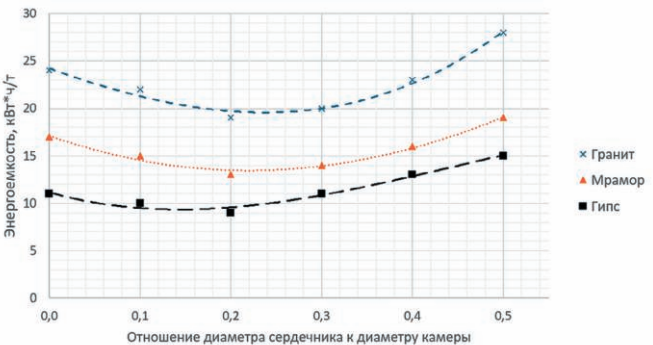


Рис. 5
Графики зависимости
энергоемкости измельчения
горных пород от отношения
диаметра сердечника
к диаметру камеры

Fig. 5
A plot of the specific rock
milling energy vs the
core-to-chamber diameter
ratio

пространства для попадания между ними крупных частиц, и значительная часть измельчения происходит в процессе истирания, а не из-за взаимных ударов шаров [9; 10]. Оптимальная частота колебаний помольной камеры для всех трех образцов горной породы, использованных в эксперименте, как видно на рис. 3, находится в пределах 20–25 Гц.

Оптимальное значение энергоёмкости в зависимости от отношения диаметра шара к диаметру камеры меняется для каждой горной породы (см. рис. 4). Это объясняется тем, что для пород разной крепости необходима различная энергия удара для разрушения частицы – чем выше крепость, тем выше энергия удара. Таким образом, для гипса с крепостью по шкале проф. Протодяконова равной 2, что соответствует мягким породам, достаточно шаров диаметром 15 мм. Для крепких пород, таких как мрамор и гранит (8 и 10 по шкале Протодяконова соответственно), необходимы более мощные удары, которые получаются при диаметре шаров 20–25 мм. При этом заметно, что после оптимального диаметра энергоёмкость растёт. Это объясняется тем, что более массивные шары обеспечивают энергию ударов, сильно превышающую ту, что необходима для разрушения частиц, что тем не менее не ведёт к росту производительности. Но более массивные шары имеют больший объём, соответственно их меньше помещается в помольной камере – это ведёт к уменьшению частоты ударов в секунду измельчения. Таким образом, увеличенная энергия ударов не добавляет интенсивности разрушения, а меньшая частота соударений замедляет процесс, что ведёт к неоптимальному расходу энергии [11–14].

Наличие сердечника снижает энергоёмкость измельчения до 17% (см. рис. 5) по сравнению с камерой, заполненной исключительно шарами, что экспериментально подтверждает выдвинутую гипотезу о снижении энер-

гоёмкости с помощью сердечника. Для всех материалов оптимальное отношение находится в окрестности величины 0,2. При этом дальнейшее увеличение диаметра сердечника приводит к обратному эффекту, так как в объёме барабана, который занимает сердечник, процесс измельчения не происходит. Задача сердечника заместить собой малоподвижное ядро, устранив зону неэффективного помола и демпфирование, вызываемое взаимным трением шаров в нем. Это достигается при отношении диаметров, равному 0,2, что примерно соответствует диаметру малоподвижного ядра.

Заключение

В статье рассмотрено применение метода планирования многофакторного эксперимента при поиске оптимальных значений параметров мелющей загрузки и рабочих параметров вибрационной мельницы, базирующегося на применении метода симплекс-планирования. Данный метод позволил осуществить поиск оптимальных значений удельной энергоёмкости измельчения при минимальном количестве опытов. Следует учесть, что при этом выдерживалось заданное значение контролирующего параметра – эффективности измельчения, что придаёт проведённым исследованиям дополнительную ценность. Это позволило авторам исследований получить зависимости энергоёмкости измельчения от амплитуды и частоты колебаний помольной камеры, а также от отношения диаметра шара к диаметру камеры и от отношения диаметра шара к диаметру сердечника, заменяющего в помольной камере малоподвижное ядро, что является важным результатом в исследованиях энергетических характеристик процесса вибрационного измельчения минерального сырья.

Список литературы / References

1. Закамалдин А.А., Перевошиков Ф.В., Шилин А.А. Эффективное использование электроэнергии при эксплуатации шаровой мельницы с постоянной скоростью вращения. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2023;334(9):115–127. <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4258>
Zakamaldin A.A., Perevoshchikov F.V., Shilin A.A. Efficient use of electric energy when operating a ball mill with a constant rotation speed. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2023;334(9):115–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/9/4258>
2. Кошелев А.В. Анализ энергозатрат вибрационных мельниц и возможные пути по их снижению. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;(5):286. Режим доступа: <https://science-education.ru/article/view?id=15257> (дата обращения: 18.04.2026).
Koshelev A.V. The analysis of power inputs of vibrating mills and possible ways on their decrease. *Modern Problems of Science and Education*. 2014;(5):286. (In Russ.) Available at: <https://science-education.ru/article/view?id=15257> (accessed: 18.04.2026).
3. Богданов В.С., Александрова Е.Б., Богданов Д.В., Богданов Н.Э., Гаврунов А.Ю. Improvement of grinding in vibration mills. *Строительные и дорожные машины*. 2019;(3):41–44.
Bogdanov V.S., Aleksandrova E.B., Bogdanov D.V., Bogdanov N.C., Gavrunov A.Yu. Совершенствование помола в вибрационных мельницах. *Stroitelnye i Dorozhnye Mashiny*. 2019;(3):41–44. (In Russ.)
4. Богданов В.С., Богданов Н.Э., Анциферов С.И., Нижегородов А.И., Сычев Е.А. Зависимость производительности вибрационной мельницы от её конструктивных и технологических параметров. *Цемент и его применение*. 2023;(3):46–49. Режим доступа: <https://jcement.ru/magazine/vypusk-3-2023/zavisimost-proizvoditelnosti-vibratsionnoy-melnitsy-ot-ee-konstruktivnykh-i-tekhnologicheskikh-param/> (дата обращения: 18.04.2026).
Bogdanov V.S., Bogdanov N.E., Antsiferov S.I., Nizhegorodov A.I., Sychev Ye.A. Dependence of vibrating mill capacity on its design and technological parameters. *Cement and its Applications*. 2023;(3):46–49. (In Russ.) Available at: <https://jcement.ru/magazine/vypusk-3-2023/zavisimost-proizvoditelnosti-vibratsionnoy-melnitsy-ot-ee-konstruktivnykh-i-tekhnologicheskikh-param/> (accessed: 18.04.2026).

5. Дмитрак Ю.В., Атрушкевич В.А., Адамова Л.С. Анализ научных тенденций в исследованиях движения мелющих тел при тонком измельчении горных пород. *Маркшейдерия и недропользование*. 2022;(5):4–16. https://doi.org/10.56195/20793332_2022_5_4
Dmitrak Yu.V., Atrushkevich V.A., Adamova L.S. Analysis of scientific trends in the research of the movement of grinding bodies at fine grinding of rocks. *Mine Surveying and Subsoil Use*. 2022;(5):4–16. (In Russ.) https://doi.org/10.56195/20793332_2022_5_4
6. Дударев В.А., Михальков А.Д., Михальков В.С., Сиваченко Л.А. Исследование работы вертикальной вибрационной мельницы для измельчения строительных материалов. *Вестник Барановичского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2021;(1):4–9. Режим доступа: <https://rep.barsu.by/handle/data/6916> (дата обращения: 18.04.2026).
Dudarev V.A., Mikhalkov A.D., Mikhalkov V.S., Sivachenko L.A. Investigation of the operation of a vertical vibration mill for grinding building materials. *BarSU Herald. Series: Engineering*. 2021;(1):4–9. (In Russ.) Available at: <https://rep.barsu.by/handle/data/6916> (accessed: 18.04.2026).
7. Spendley W., Hext G.R., Himsforth F.R. Sequential Application of simplex designs in optimisation and evolutionary operation. *Technometrics*. 1962;4(4):441–461. <https://doi.org/10.1080/00401706.1962.10490033>
8. Sabah E. Effect of vibratory ball mill grinding parameters of hydrated lime ultrafine grinding on consumed energy. *Arabian Journal of Geosciences*. 2025;18(6):122. <https://doi.org/10.1007/s12517-025-12263-9>
9. Aranda R.M., Astacio R., Urban P., Aranda B., Cuevas F.G. Milling amorphous FeSiB ribbons with vibratory ball and disc mills. *Powder Technology*. 2024;441:119816. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119816>
10. Fu W., Li D., Zhang X. Structure optimization of vibratory mills based on container wall trajectory characteristics. *Advanced Powder Technology*. 2026;37(6):105264. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2026.105264>
11. Tomach P. The influence of the grinding media diameter on grinding efficiency in a vibratory ball mill. *Materials*. 2024;17(12):2924. <https://doi.org/10.3390/ma17122924>
12. Cheng M., Pan Y., Sun Y., Liu P., Liu B. Effects of support stiffness and grinding media shape on vibration superfine grinding performance of wheat bran. *BioResources*. 2025;20(4):9720–9738. <https://doi.org/10.15376/biores.20.4.9720-9738>
13. Hashimoto H., Watanabe R. Model simulation of energy consumption during vibratory ball milling of metal powder. *Materials Transactions, JIM*. 1990;31(3):219–224. <https://doi.org/10.2320/matertrans1989.31.219>
14. Терентьев В.В., Смирнов С.Ф., Краснов А.А. Моделирование времени пребывания измельчаемого материала в вибрационной мельнице. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2023;(2):126–131. DOI: 10.35523/230758722023432126131
Terentyev V.V., Smirnov S.F., Krasnov A.A. Simulation of the residence time of the crusher material in a vibrating mill. *Agrarian Journal of the upper Volga Region*. 2023;(2):126–131. (In Russ.) DOI: 10.35523/230758722023432126131

Информация об авторах

Дмитрак Юрий Витальевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий отделом моделирования и управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

Кравцов Алексей Александрович – младший научный сотрудник отдела моделирования и управления горнотехническими системами, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: havok.08@mail.ru

Information about the authors

Yury V. Dmitrak – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Research Associate, Head of Department of Modelling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1278-4845>; e-mail: dmitrak@yandex.ru

Alexey A. Kravtsov – Junior Researcher, Department of Modelling and Management of Mining Systems, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation; e-mail: havok.08@mail.ru

Article info

Received: 09.03.2026

Revised: 21.05.2026

Accepted: 02.06.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 09.03.2026

Поступила после рецензирования: 21.05.2026

Принята к публикации: 02.06.2026