

# Анализ технологических и энергетических параметров шаровых мельниц

Р.В. Ключев✉

Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ kluev-roman@rambler.ru

**Резюме:** В работе рассматриваются вопросы, связанные с анализом важнейших технологических параметров шаровых мельниц, таких как изменение производительности, потребляемая мощность, количество поступающей в мельницу воды, давление масла в гидросистеме мельницы, плотность пульпы при разгрузке мельницы. Установлено, что мощность, потребляемая мельницами, изменяется в пределах 836–1260 кВт. Представлены энергетические характеристики мельниц, а также удельный расход электроэнергии, коэффициенты корреляции и уравнения регрессии. Значения коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса показывают хорошее согласование с нормальным законом распределения случайных величин. Удельный расход электроэнергии для мельниц изменяется в пределах 6,71–9,94 кВт·ч/т. В дальнейшем планируется провести проверочный расчет приводных электродвигателей мельниц с целью установления соответствия фактической мощности электродвигателя расчетной. Такая проверка позволяет объективно оценить, соответствует ли фактическая потребляемая мощность принятой технологии процесса измельчения в корпусе самоизмельчения горно-обогатительного комбината.

**Ключевые слова:** мельница, уравнение регрессии, удельный расход энергии, горно-обогатительный комбинат, измельчаемая руда

**Для цитирования:** Ключев Р.В. Анализ технологических и энергетических параметров шаровых мельниц. *Горная промышленность*. 2024;(6):107–110. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-107-110>

## Analysis of technological and energy parameters of ball mills

R.V. Klyuev✉

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ kluev-roman@rambler.ru

**Abstract:** The paper considers issues related to the analysis of the most important process parameters of ball mills, such as changes in productivity, power consumption, amount of water entering the mill, oil pressure in the mill hydraulic system, pulp density during mill unloading. It was found that the power consumed by the mills varies within 836–1260 kW. The energy characteristics of the mills, as well as specific power consumption, correlation coefficients and regression equations are presented. The values of the coefficients of variation, asymmetry and excess show good agreement with the normal distribution law of random variables. Specific power consumption for mills varies within 6.71–9.94 kWh/t. In the future, it is planned to carry out a verification calculation of the drive electric motors of the mills in order to establish that the actual power of the electric motor corresponds to the calculated one. Such a check allows to objectively assess whether the actual power consumption corresponds to the adopted technology of the grinding process in the autogenous grinding body of the mining and processing plant.

**Keywords:** mill, regression equation, specific energy consumption, mining and processing plant, crushed ore

**For citation:** Klyuev R.V. Analysis of technological and energy parameters of ball mills. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):107–110. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-107-110>

### Введение

Вследствие значительной энергоемкости технологических процессов (обогащение, дробление, флотация и т.д.) горно-обогатительное производство составляет значительную часть в энергетическом балансе государства. Следует отметить, что рост электропотребления горной промышленности определяется не только абсолютным увеличением производства, но и значительными качественными и количественными изменениями в технологических цепоч-

ках на предприятиях. Для горной промышленности одним из ведущих показателей, от которого зависит развитие всей отрасли, является энергоэффективность технологического оборудования, что в конечном итоге способствует повышению технико-экономических показателей предприятий. При этом необходимо оценивать статистическую связь между технологическими и энергетическими параметрами в ходе проведения комплексных энергетических обследований (энергоаудита) предприятий и выявления

соответствующих резервов экономии электроэнергии.

Для оценки параметров фактического режима работы шаровых мельниц с разгрузкой через решетку (МШР) на горно-обогащительном комбинате были проведены комплексные исследования технологических параметров и электропотребления [1; 2]. Целью исследования является определение изменений производительности, потребляемой мощности, количества поступающей в мельницу воды, давления масла в гидросистеме мельницы, плотности пульпы при разгрузке мельницы [3; 4].

Мельницы типа МШР работают в замкнутом цикле с классификатором, а фактическая загрузка мельницы не фиксируется на экране телемонитора АСУ ТП диспетчерской корпуса самоизмельчения [5; 6].

Комплексное исследование выборок начальной информации по мельнице МШР позволило выявить, что наиболее значимые показатели технологического процесса (шум мельницы, объем воды, поступающей в мельницу, плотность пульпы) варьируются в небольших пределах, в то время как производительность мельницы  $Q$  и потребляемая мощность  $P$  изменяются в определенных диапазонах по случайным законам распределения [7; 8].

В технологическом процессе измельчаемая руда поступает в МШР из мельниц мокрого самоизмельчения (ММС) и классификатора.

При работе в последовательном цикле ММС-МШР вполне допустимо предположить, что загрузка на выходе в мельницу ММС с определенным интервалом запаздывания соответствует загрузке мельницы МШР и обуславливает величину потребляемой мощности двигателем мельницы МШР [9]. Мощность, потребляемая мельницами МШР, изменяется в пределах 836–1260 кВт.

**Методы исследования**

В работе при анализе технологических параметров мельниц и их электропотребления используются статистический, расчетно-экспериментальный и расчетно-статистический методы исследования [10; 11].

Используемые методы предполагают выявление зависимостей, которые должны быть нормализованы в конкретных моделях того или иного вида. Для этого из большого количества показателей необходимо определить те, которые наиболее существенным образом влияют на рассматриваемый выходной фактор. Для этого наибольшую эффективность имеют методы экспертных оценок и кластерного анализа, предусматривающие опрос экспертов

на основе присвоения им удельных весов значимости и построения дивизимных деревьев классификации и соответствующих дендрограмм показателей.

Статистический метод расчета показателей электропотребления заключается в применении средних эксплуатационных отношений значений расходуемого электропотребления к количеству добытого и перерабатываемого продукта.

Отчетно-статистический метод не следует приравнять к математико-статистическому методу, с помощью которого можно получить научное обоснование, точность выявляемого электропотребления, а также соответствующую вероятностную оценку вероятных изменений электропотребления при варьировании показателей технологических переделов и формализовать влияние технологических факторов [12–14].

Расчетно-аналитический метод определения ожидаемого расхода электроэнергии основан на расчетах теоретического плана, позволяющих оценить степень связи установленной мощности электроприемника и показателей его загрузки в различных режимах работы [15–17].

В качестве наиболее перспективных методов в последние годы все большее применение находят методы машинного обучения, основанные на применении искусственных нейронных сетей. Эти методы позволяют дать наиболее точные краткосрочные и среднесрочные прогнозные значения изменения электропотребления и технологических параметров в зависимости от различных случайных, трудно формализуемых параметров [17].

**Обсуждение результатов**

Непосредственное измерение производительности мельницы МШР не представляется возможным, ввиду отсутствия соответствующей аппаратуры контроля. Однако, очевидно, что если интервал запаздывания, который составляет в среднем один час, значительно меньше интервала измерения, то влиянием запаздывания при определении статистических характеристик  $P$  и  $Q$  можно пренебречь. Поэтому средний удельный расход электроэнергии для мельниц МШР может быть определен как отношение математического ожидания потребляемой мощности МШР к математическому ожиданию загрузки мельницы ММС. Результаты обработки массивов информации и значения удельного расхода электроэнергии МШР представлены в табл. 1, 2.

В табл. 1 представлены численные характеристики слу-

**Таблица 1**  
Энергетические характеристики шаровых мельниц с разгрузкой через решетку (производительность мельницы, удельный расход электроэнергии)

**Table 1**  
Energy characteristics of ball mills with the grate discharge (mill productivity, specific energy consumption)

Номер мельницы	Производительность мельницы $Q$ , т/ч					Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т				
	$m_Q$	$S_Q$	$V_Q$	$A_Q$	$E_Q$	$m_\omega$	$S_\omega$	$V_\omega$	$A_\omega$	$E_\omega$
МШР-1	146,3	19,4	0,131	2,495	5,890	7,96	0,810	0,102	-1,973	4,321
МШР-2	138,9	12,6	0,091	0,091	0,393	7,77	0,689	0,089	0,123	-0,631
МШР-3	145,3	4,3	0,03	1,661	1,726	7,58	0,229	0,03	-1,345	1,411
МШР-4	138,0	11,8	0,086	-0,501	-0,402	8,25	0,697	0,084	0,759	0,028
МШР-5	151,3	25,7	0,17	0,624	0,777	7,25	1,26	0,174	0,035	0,114
МШР-6	125,2	8,3	0,066	-1,07	1,398	6,71	0,506	0,075	1,49	2,862
МШР-7	132,6	5,4	0,041	0,249	-0,049	7,17	0,299	0,042	-0,109	-0,276
МШР-8	127,6	5,6	0,044	-0,997	0,156	9,19	0,779	0,085	-1,383	2,385
МШР-9	148,1	7,6	0,051	0,351	-1,547	7,2	0,334	0,046	-0,436	-1,008
МШР-10	126,80	3,4	0,027	-0,727	-0,671	9,94	0,727	0,073	1,124	0,034

Таблица 2  
Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии

Table 2  
Correlation coefficients and regression equations

Номер мельницы	Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии			
	$r_{QP}$	$P = a_1 + b_1 \cdot Q$	$r_{Q\omega}$	$\omega = a_2 + b_2 \cdot Q$
МШР-1	0,025	1147,7+0,02·Q	-0,987	14,09-0,0419·Q
МШР-2	0,248	1052,7+0,129·Q	-0,988	15,27-0,054·Q
МШР-3	0,030	1088,8+0,079·Q	-0,937	14,74-0,0493·Q
МШР-4	0,490	1045,5+0,615·Q	-0,988	16,28-0,0582·Q
МШР-5	-0,040	1086,5+0,115·Q	-0,923	14,1-0,0453·Q
МШР-6	-0,259	870,1-0,229·Q	-0,987	14,28-0,0604·Q
МШР-7	-0,098	965,8-0,115·Q	-0,984	14,4-0,0544·Q
МШР-8	-0,265	1260,5-0,287·Q	-0,739	22,27-0,1025·Q
МШР-9	0,393	938,0+0,857·Q	-0,955	13,44-0,0421·Q
МШР-10	0,095	943,9+2,494·Q	-0,282	17,51-0,0596·Q

чайных величин  $Q$ ,  $P$  и  $\omega$ : математическое ожидание  $m_Q$ ,  $m_\omega$ ; среднеквадратичное отклонение  $S_Q$ ,  $S_\omega$ ; коэффициенты вариации  $V_Q$ ,  $V_\omega$ ; коэффициенты скошенности или асимметрии  $A_Q$ ,  $A_\omega$ ; коэффициенты эксцесса ( $E_Q$ ,  $E_\omega$ ).

Значения коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса показывают хорошее согласование с нормальным законом распределения случайных величин. Удельный расход электроэнергии для мельниц МШР изменяется в пределах 6,71–9,94 кВт·ч/т.

В табл. 1 величины средней производительности для 10 мельниц МШР составляют  $Q_{cp} = 138$  т/ч, величина средней мощности, потребляемой электродвигателями мельниц МШР, составляет  $P_{cp} = 1080$  кВт. Установив таким образом область работы мельниц МШР, необходимо провести проверочный расчет приводных электродвигателей мельниц с целью установления соответствия фактической мощности электродвигателя расчетной. Такая проверка позволяет объективно оценить, соответствует ли фактическая потребляемая мощность принятой технологии процесса измельчения в корпусе самоизмельчения горно-обогательного комбината.

В табл. 2 приведены коэффициенты корреляции между производительностью и мощностью и удельным расходом электроэнергии ( $r_{QP}$ ,  $r_{Q\omega}$ ), а также коэффициенты линейного уравнения регрессии  $a$  и  $b$ .

Из табл. 2 видно, что изменение величины и знака коэффициентов корреляции от  $\pm 0,025$  до  $\pm 0,988$  не позволяет в отмеченном диапазоне изменений параметров производительности, мощности и соответствующего удельного расхода электроэнергии сделать вывод о имеющейся определенной корреляционной зависимости между этими параметрами. На это также указывает различный вид уравнений регрессии и изменения знака и величины зависимого коэффициента. Можно утверждать, что изменение знака и величины зависимого коэффициента линейного уравнения регрессии определяется наличием экстремума зависимости удельного электропотребления от производительности мельницы, что подтверждается проведением многочисленных экспериментальных исследований по рассматриваемой тематике [6; 7].

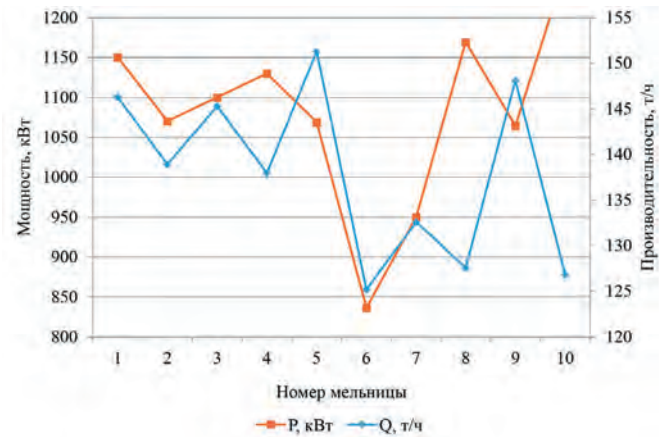


Рис. 1  
Графики изменения мощностей, потребляемых электродвигателями мельниц (P, кВт), и производительности мельницы (Q, т/ч)

Fig. 1  
Graphs of changes in the power consumed by the mill electric motors (P, kW) and mill productivity (Q, t/h)

На рис. 1 приведены графики изменения мощностей, потребляемых электродвигателями мельниц (P, кВт), и производительности мельницы (Q, т/ч).

Из рис. 1 видно, что коэффициент корреляции между значениями мощности и производительностью для 10 мельниц МШР составляет 0,127, в то время как аналогичное значение для мельниц МШР1–МШР7 составляет 0,8. Это позволяет сделать вывод о наличии тесной связи между P и Q для мельниц МШР (№1–7), что позволяет осуществлять плавное регулирование мощности за счет загрузки мельниц исходным материалом и выравнивать суточный график нагрузки предприятия в пиковые часы за счет использования потребителей-регуляторов (ПР). В качестве таких ПР в данном случае выступают 7 мельниц МШР. Это приведет к снижению затрат за превышение или недоотпуск электроэнергии при использовании тарифов, дифференцированных по зонам суток.

**Заключение**

На основе проведения комплексного энергоаудита наиболее энергоемких потребителей горных предприятий – мельниц – исследованы их технологические и энергетические параметры в ходе обработки представительных исходных выборок данных, полученных с помощью измерительных комплексных ПКК-57 и Энерготестера.

Представлены энергетические характеристики мельниц, а также удельный расход электроэнергии, коэффициенты корреляции и уравнения регрессии. Значения коэффициентов вариации, асимметрии и эксцесса показывают хорошее согласование с нормальным законом распределения случайных величин. Удельный расход электроэнергии для мельниц изменяется в пределах 6,71–9,94 кВт·ч/т.

Также разработаны мероприятия по выравниванию суточного графика нагрузки предприятия за счет использования потребителей-регуляторов в часы пиковых нагрузок, способствующие снижению удельной энергоемкости продукции и улучшению технико-экономических показателей предприятий.

**Список литературы / References**

1. Golik V.I., Klyuev R.V., Martyushev N.V., Zyukin D.A., Karlina A.I. Prospects for return of valuable components lost in tailings of light metals ore processing. *Metallurgist*. 2023;67(1-2):96-103. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01493-5>
2. Brigida V.S., Golik V.I., Klyuev R.V., Sabirova L.B., Mambetalieva A.R., Karlina Yu.I. Efficiency gains when using activated mill tailings in underground mining. *Metallurgist*. 2023;67(3-4):398-408. <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01526-z>
3. Zhao X., Yang Y., Sun F., Wang Bo, Zuo Y., Li M. et al. Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high coal rank coalbed methane in south Qinshui Basin, Shanxi Province. *Petroleum Exploration and Development*. 2016;43(2):332-339. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(16\)30039-8](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(16)30039-8)
4. Шадрунова И.В., Колодежная Е.В., Горлова О.Е. Разработка технологии сухого обогащения флюоритовых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(2):43-57. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_2\\_0\\_43](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_43)  
Shadrunova I.V., Kolodezhna E.V., Gorlova O.E. Dry processing technology for fluorite ore. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(2):43-57. (In Russ.). [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2023\\_2\\_0\\_43](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_2_0_43)
5. Рыбак Я., Хайрутдинов М.М., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Тюляева Ю.С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2021;13(3):405-415.  
Rybak Ya., Khayrutdinov M.M., Kongar-Syuryun Ch.B., Tyulyayeva Yu.S. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021;13(3):405-415. (In Russ.)
6. Ключев Р.В. Анализ надежности элементов системы электроснабжения карьеров. *Горные науки и технологии*. 2024;9(2):183-194. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-254>  
Klyuev R.V. Reliability analysis of open-pit power supply system components. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;9(2):183-194. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-03-254>
7. Golik V.I., Hasheva Z.M., Galachieva S.V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region. *The Social Sciences*. 2015;10(6):746-749.
8. Malyukova L.S., Martyushev N.V., Tynchenko V.V. Circular Mining Wastes Management for Sustainable Production of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze. *Sustainability (Switzerland)*. 2023;15(15):11671. <https://doi.org/10.3390/su151511671>
9. Wang M., Wang X., Liu W. A novel technology of molybdenum extraction from low grade Ni-Mo ore. *Hydrometallurgy*. 2009;97(1-2):126-130. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.12.004>
10. Евдокимов С.И., Клыкова К.Ю., Рубаева И.О., Стадник Д.А. Технология использования черного концентрата в качестве минералов-носителей. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(3):568-580. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-568-580>  
Evdokimov S.I., Klykova K.Yu., Rubaeva I.O., Stadnik D.A. Technology of using rough concentrate as carrier minerals. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(3):568-580. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-3-568-580
11. Баловцев С. В., Меркулова А. М. Комплексная оценка надежности зданий, сооружений и технических устройств горных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(3):170-181. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_3\\_0\\_170](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170)  
Balovtsev S.V., Merkulova A.M. Comprehensive assessment of buildings, structures and technical devices reliability of mining enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(3):170-181. [https://doi.org/10.25018/0236\\_1493\\_2024\\_3\\_0\\_170](https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_3_0_170)
12. Vidayev I.G., Martyushev N.V., Ivashutenko A.S., Bogdan A.M. The resource efficiency assessment technique for the foundry production. *Advanced Materials Research*. 2014;880:141-145. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.141>
13. Pashkov E.N., Martyushev N.V., Ponomarev A.V. An investigation into autobalancing devices with multireservoir system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2014;66(1):012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/66/1/012014>
14. Ardashkin I.B., Yakovlev A.N., Martyushev N.V. Evaluation of the resource efficiency of foundry technologies: Methodological aspect. *Advanced Materials Research*. 2014;1040:912-916. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.912>
15. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremenkov E.A., Qi M. Mathematical modeling of mechanical forces and power balance in electromechanical energy converter. *Mathematics*. 2023;11(10):2394. <https://doi.org/10.3390/math11102394>
16. Жуков И.А., Голиков Н.С., Мартюшев Н.В. Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2022;14(1):142-150.  
Zhukov I.A., Golikov N.S., Martyushev, N.V. Design rationalization of the scraper conveyor section by means of an automated method of strength characteristics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022;14(1):142-150. (In Russ.)
17. Skeebe V.Yu., Ivancivsky V.V., Martyushev N.V., Lobanov D.V., Vakhrushev N.V., Zhigulev A.K. Numerical simulation of temperature field in steel under action of electron beam heating Source. *Key Engineering Materials*. 2016;712:105-111. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.105>

**Информация об авторе**

**Ключев Роман Владимирович** – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления, Московский политехнический университет, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>; e-mail: [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru)

**Information about the author**

**Roman V. Klyuev** – Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3777-7203>; e-mail: [kluev-roman@rambler.ru](mailto:kluev-roman@rambler.ru)

**Информация о статье**

Поступила в редакцию: 18.10.2024  
Поступила после рецензирования: 25.11.2024  
Принята к публикации: 02.12.2024

**Article info**

Received: 18.10.2024  
Revised: 25.11.2024  
Accepted: 02.12.2024