

Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината

Р.В. Клюев✉

Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ kluev-roman@rambler.ru

Резюме: Представлены результаты исследований технологических параметров шаровых мельниц горно-обогатительного комбината в ходе разработки и проведения полного факторного эксперимента. Разработана методика проведения эксперимента, учитывающая специфику горного производства. Установлены основные технологические факторы: производительность, крепость подаваемой на измельчение руды, плотность слива классификатора, оказывающие наибольшее влияние на электропотребление. Проведен анализ входных параметров для технологического процесса измельчения, определены интервалы их варьирования, построена матрица планирования, рассчитаны коэффициенты линейного уравнения регрессии, оценена их значимость. Наряду с этим осуществлен переход от кодовых значений переменных к натуральным величинам и получена математическая модель, с помощью которой можно осуществлять расчет и прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от наиболее значимых технологических параметров. Полученные результаты позволяют управлять режимами работы мельниц на горно-обогатительных комбинатах on-line и планируются к включению в автоматизированную систему управления технологическим процессом предприятий.

Ключевые слова: мельница, горно-обогатительный комбинат, крепость руды, производительность мельницы, математическая модель

Для цитирования: Клюев Р.В. Разработка методики планирования эксперимента для исследования параметров мельниц горно-обогатительного комбината. *Горная промышленность*. 2024;(5S):105–109. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109>

Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant

R.V. Klyuev✉

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

✉ kluev-roman@rambler.ru

Abstract: The article presents the results of studying the process parameters of ball mills at a mining and processing plant during the development and implementation of a complete factorial experiment. A methodology for conducting this experiment has been developed that takes into account the specific features of mining production. The main process factors have been established, i.e. productivity, hardness of the ore fed for grinding, density of the classifier discharge, which have the greatest impact on power consumption. An analysis of the input parameters for the grinding process was carried out, the ranges of their variation were determined, a planning matrix was built, the coefficients of the linear regression equation were calculated, and their significance was assessed. Along with this, a transition was made from code values of variables to natural values, and a mathematical model was designed, with the help of which it is possible to calculate and forecast power consumption depending on the most significant process parameters. The obtained results allow to control the operating modes of the mills at mining and processing plants in on-line mode and are planned to be included in the automated process control systems of the enterprises.

Keywords: mill, mining and processing plant, ore hardness, mill productivity, mathematical model

For citation: Klyuev R.V. Development of a methodology for planning an experiment to study the parameters of mills at a mining and processing plant. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):105–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-105-109>

Введение

Эксперимент всегда служил средством познания окружающего мира, критерием истинности гипотез и теорий. Долгое время считалось, что выбор стратегии эксперимента и его реализация полностью определяются опытом и интуицией исследователя [1; 2]. Однако рост экспериментальных исследований сделал актуальной постановку вопроса об эффективности эксперимента, появление современных компьютерных программ открыло дорогу для реализации таких схем экспериментов, которые резко повысили их коэффициент полезного действия. Возникла математическая теория эксперимента и планирование эксперимента как ее часть [3; 4]. Основными трудностями классической схемы эксперимента являются: большое число опытов; неудобство представления результатов эксперимента; оценка влияния факторов определяется с дисперсией. Избежать данных трудностей и повысить эффективность экспериментальных исследований можно на базе математической теории планируемого эксперимента [5–7]. Планируемый эксперимент (ПЭ) может быть поставлен на любом объекте исследования, который согласуется структурно. К основным достоинствам ПЭ следует отнести:

- отличается высокой эффективностью, т.е. для изучения объекта исследования ставится минимальное число опытов;
- позволяет исследовать одновременно влияние нескольких переменных параметров на показатели объекта;
- позволяет получить зависимость между переменными параметрами и показателями объекта исследования в простой и удобной математической форме;
- разрешает при наличии случайных погрешностей поставить опыты так, чтобы дисперсия в оценке коэффициентов полинома была наименьшей.

Методы

В представленной работе стоит задача составить методику проведения планируемого эксперимента для исследования энергетических характеристик мельниц мокрого самоизмельчения (ММС) и шаровых мельниц с разгрузкой через решетку (МШР) [8]. ПЭ в процессе подготовки и реализации проходит ряд последовательных операций.

1. Первоначально необходимо выбрать технологические факторы, влияющие на электропотребление мельниц, причем эти переменные параметры должны быть независимы друг от друга.

На электропотребление мельниц влияет большое число технологических факторов [9–11]. Это в значительной степени усложняет задачу оценки их влияния на потребление энергии мельниц [12]. Учитывая отсутствие контроля многих технологических параметров, важных с точки зрения электропотребления, целесообразно получить априорную информацию от специалистов о степени влияния факторов на уровень электропотребления. Необходимо выделить основные влияющие факторы, а остальные могут быть отнесены к незначимым виду небольших колебаний и малой степени их влияния [13].

На основании анализа литературных источников и опроса специалистов горно-обогащительных комбинатов установлено, что на величину мощности, потребляемую приводом мельницы P , кВт, и, следовательно, и на потребление электроэнергии основное влияние оказывают следующие факторы:

- G – шаровая загрузка мельницы (только для МШР), т;
- Q – производительность, т/ч;

– K_p – крепость подаваемой на измельчение руды, отн. ед. (по шкале проф. М.М. Протодяконова);

– γ – плотность слива классификатора, т/м³.

При планировании эксперимента сначала необходимо провести выбор независимых входных параметров для технологического процесса измельчения и определить интервалы их варьирования [14; 15].

2. Следующий этап планируемого эксперимента заключается в построении матрицы планирования. Для ее составления необходимо закодировать исходную информацию. Обозначение верхних и нижних уровней факторов соответственно символами «+1» и «-1» фактически соответствует кодированию факторов по формуле:

$$x_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i} \tag{1}$$

где x_i – минимальное или максимальное значение фактора; x_{i0} – нулевой уровень i -го фактора (среднее значение интервала варьирования); Δx_i – такое значение фактора в натуральных единицах, прибавление которого к нулевому уровню дает верхний уровень.

План, содержащий запись всех комбинаций факторов или их части в кодированной форме, называется матрицей планирования. При исследовании потребляемой мощности мельницей как ММС, так и МШР, учитывается по три влияющих фактора ($n = 3$), поэтому матрица планирования для данного эксперимента будет называться матрицей полного факторного эксперимента типа 2^3 (ПФЭ). При реализации планируемого эксперимента необходимо проведение дублирующих опытов. Если априори известно, что влияние случайных факторов во всех точках факторного пространства одинаково, т.е. пространство однородно, можно провести m дублирующих опытов только для одной из строк матрицы планирования. В противном случае необходимо проводить дублирование эксперимента во всех точках и определять однородность дисперсии факторного пространства по критерию Кохрена.

3. Следующий этап планируемого эксперимента заключается в расчете коэффициентов полинома.

4. Проверка значимости коэффициентов. Идея проверки – нулевая гипотеза H_0 , или значимость коэффициентов заключается в том, что, так как результаты эксперимента имеют случайную погрешность, то некоторые коэффициенты полинома могут оказаться незначимыми и без ущерба для точности их можно опустить, т.е. приравнять к 0.

5. Проверка адекватности полинома.

Расчетный алгоритм планируемого эксперимента удобен и прост, но предполагает при выполнении всех вычислительных операций подстановку факторов варьирования в кодах. Переход к натуральным единицам осуществляется в конце и проводится по выражению (1).

Изложенная последовательность расчета коэффициентов уравнения, его статистического анализа и принятия решений может быть представлена алгоритмом, блок-схема которого изображена на рис. 1.

Результаты и их обсуждение

По разработанной методике проведения планируемого эксперимента исследованы величины потребляемой мощности P , кВт, приводом мельниц ММС-70×23 и МШР-36×50. Данные расчетов выполняют роль численных примеров методики проведения планируемого эксперимента.

В качестве объекта исследования выступают мельницы



Рис. 1
Алгоритм расчета и анализа математической модели экспериментально-статистическими методами

Fig. 1
An algorithm for calculating and analyzing a mathematical model using experimental and statistical methods

ММС-70×23. В качестве функции цели выбирается мощность P , кВт, потребляемая приводом мельницы.

1. Выбор факторов.

На потребляемую мощность приводом мельницы оказывают влияние: производительность мельницы Q , т/ч, крепость руды K_p , плотность слива классификатора γ , т/м³. Данные факторы имеют следующие интервалы варьирования: $Q = 100-220$ т/ч; $K_p = 14-16$; $\gamma = 2,6-3,2$ т/м³.

В качестве базового уровня принимаются средние значения интервалов варьирования:

$$Q_0 = \frac{100 + 220}{2} = 160 \text{ т/ч}; K_{p0} = \frac{14 + 16}{2} = 15;$$

$$\gamma_0 = \frac{2,6 + 3,2}{2} = 2,9 \text{ т/м}^3.$$

2. Построение матрицы планирования.

Для получения математической модели воспользуемся планом ПФЭ типа 2³ – планирование двухуровневое, три фактора, 8 опытов. Матрица планирования эксперимента приведена в табл. 1.

На рис. 2. приведены результаты эксперимента для ММС-70×23.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: 1 – \bar{P} – среднее экспериментальное значение мощности в отдельном

Таблица 1
Матрица планирования для ММС-70×23

Table 1
A planning matrix for MMS-70×23

Переменные параметры	Код	Q, т/ч	K _p	γ, т/м ³	x ₄ = x ₁₂ = x ₁ · x ₂	x ₅ = x ₁₃ = x ₁ · x ₃	x ₆ = x ₂₃ = x ₂ · x ₃	x ₀
Условное обозначение		x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₀
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	
2	+1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	

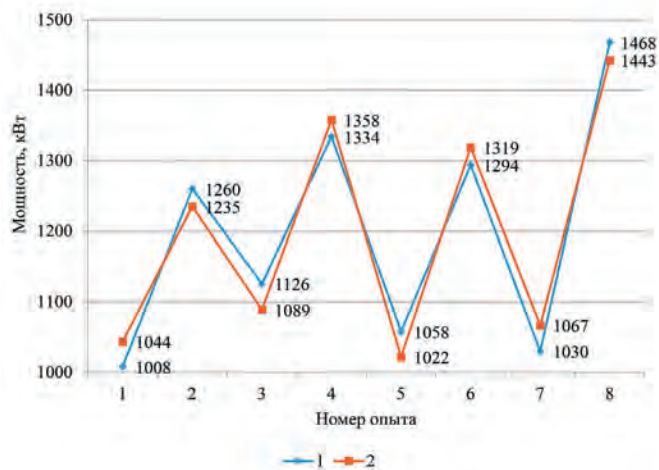


Рис. 2
Результаты эксперимента для ММС-70×23

Fig. 2
Test results for MMS-70×23

опыте, кВт; 2 – \hat{P} – расчётное значение мощности по полиному в отдельном опыте, кВт.

3. Расчет коэффициентов линейного уравнения регрессии (полинома) $y = b_0 + b_1 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3$ проводится по выражению:

$$b_i = b_{ij} = \frac{\sum_{g=1}^N x_{gi} \cdot y_g}{N}, \quad (2)$$

где N – число опытов.

$b_1 = 141,75$; $b_2 = 42,25$; $b_3 = 15,25$; $b_{12} = 19,75$; $b_{13} = 26,75$; $b_{23} = -5,75$; $b_0 = 1197,25$.

Зависимость между функцией цели и переменными параметрами имеет явный вид. Полином позволяет проанализировать влияние каждого фактора и их взаимодействия на функцию цели. Вид полинома позволяет диагностировать топографию факторного пространства при реше-

нии оптимизационных задач и обоснованно подходить к выбору метода решения. Расчетный алгоритм планируемого эксперимента удобен и прост, но предполагает при выполнении всех вычислительных операций подстановку факторов варьирования в кодах. Переход к натуральным единицам осуществляется в конце и проводится по выражению (1).

4. Проверка значимости коэффициентов.

Величина дисперсии эксперимента $S^2\{y\}$ определяется по результатам первых трех дублирующих опытов ($m = 3$) для первой строчки матрицы планирования ($g = 1$) по выражению:

$$S_g^2(y) = \frac{\sum_{i=1}^m (y_{g1i} - \bar{y}_g)^2}{(m-1)}, \quad (3)$$

$$S_g^2(y) = 1092$$

Дисперсия при определении коэффициентов полинома вычисляется по выражению:

$$S_g^2(b_i) = \frac{S^2\{y\}}{N \cdot m}, \quad (4)$$

$$S_g^2(b_i) = 45,5.$$

Число степеней свободы, характеризующее объем экспериментальной выборки, определяется по формуле:

$$v = N \cdot (m-1) \\ v = 16. \text{ Для } g=5\% \text{ и } v=16: t_{кр}=2,12. \quad (5)$$

Расчетное значение t-критерия Стьюдента определяется по выражению:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}, \quad (6)$$

где b_i – любой коэффициент полинома; $S\{b_i\}$ – среднеквадратичное отклонение величины b_i .

Величину t_i , вычисленную для каждого коэффициента полинома, необходимо сравнить с табличной величиной $t_{кр}$, полученной из справочных таблиц: $t_{23} = 0,85$; $t_3 = 2,26$.

Так как $t_{23} < t_{кр}$, коэффициент b_{23} незначим, т.е. может быть опущен в полиноме. $t_3 > t_{кр}$, т.е. коэффициент b_3 значим. Очевидно, что все остальные коэффициенты также значимы. Итак, после проверки значимости коэффициентов полином имеет следующий вид:

$$\hat{P} = 1197,25 + 141,75 \cdot x_1 + 42,25 \cdot x_2 + 15,25 \cdot x_3 + 19,75 \cdot x_1 \cdot x_2 + 26,75 \cdot x_1 \cdot x_3.$$

5. Проверка адекватности полинома.

По расчетному полиному вычисляются значения функции цели. Эти значения определяются при подстановке варьируемых факторов в кодах в соответствии со строчкой матрицы планирования. Для $g = 1: P_1 = 1044$ кВт.

Значения функции цели для оставшихся точек вычисляются аналогично.

Дисперсия неадекватности рассчитывается по выражению:

$$S_{ад}^2 = \frac{1}{N-d} \cdot \sum_{g=1}^N (\bar{y}_g - \hat{y}_g)^2, \quad (7)$$

где d – число значимых членов аппроксимирующего полинома; \bar{y} – среднее экспериментальное значение функции цели; \hat{y} – значение функции цели, полученное расчетным путем по полиному.

$$S_{ад}^2 = 3890,5.$$

Расчетное значение F-критерия определяется по выражению:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S^2\{y\}}, \quad (8)$$

$$F = 3,56.$$

Вычисленная величина F сравнивается с табличным значением $F_{кр}$, которая выбирается с учетом трех величин: g – уровня значимости, $g = 5\%$; $v_{2ад} = v = N(m-1) = 8(3-1) = 16$ – числа степеней свободы; $v_{1ад} = N-d = 8-6 = 2$ – числа степеней свободы аппроксимирующего полинома. Первые две величины характеризуют возможность ошибки и объем эксперимента. Величина $v_{1ад}$ характеризует структуру полинома с точки зрения поставленного числа экспериментов и вычисленных по ним значимых членов.

По справочным таблицам для этих значений $F_{кр} = 3,6$. Так как $F < F_{кр}$, то данный полином адекватен модели мельницы ММС-10×23.

После этого производится переход к натуральным единицам полинома в соответствии с выражением (1).

Подставив полученные значения x_i в полином и производя упрощение, получим окончательный вид уравнения регрессии:

$$P_{ММС} = 1517,8 - 7,02 \cdot Q - 10,42 \cdot K_p - 186,95 \cdot \gamma + 0,34 \cdot Q \cdot K_p + 1,52 \cdot Q \cdot \gamma.$$

Заключение

Разработан алгоритм расчета и анализа математической модели экспериментально-статистическими методами применительно к исследованию технологических параметров мельниц на горно-обогательном комбинате. Получена математическая модель, с помощью которой можно осуществлять расчет и прогнозирование потребления электроэнергии в зависимости от наиболее значимых технологических параметров. Полученные результаты позволяют управлять режимами работы мельниц на горно-обогажительных комбинатах on-line и планируются к включению в автоматизированную систему управления технологическим процессом предприятий.

Список литературы / References

1. Skeebea 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>

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. 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>
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
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
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):406–415.
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):406–415. (In Russ.).
6. 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>
7. 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>
8. 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.
9. Голик В.И., Титова А.В., Титов Г.И. К утилизации хвостов обогащения руд цветных металлов. *Горная промышленность*. 2023;(5):96–101. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-96-101>
Golik V.I., Titova A.V., Titov G.I. On utilization of concentration tailings of non-ferrous metal ores. *Russian Mining Industry*. 2023;(5):96–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5-96-101>
10. Королев Н.А., Жуковский Ю.Л., Булдыско А.Д., Баранов Г.Д., Чен П. Оценка энергетического ресурса на основе диагностики технического состояния электромеханического оборудования минерально-сырьевого комплекса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(5):158–181. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_158
Korolev N.A., Zhukovskiy Y.L., Buldysko A.D., Baranov G.D., Chen P. Energy resource evaluation from technical diagnostics of electromechanical devices in minerals sector. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(5):158–181. (In Russ.). https://doi.org/10.25018/0236_1493_2024_5_0_158
11. Опалев А.С., Черезов А.А. Опыт освоения магнитно-гравитационной сепарации на предприятиях России и стран СНГ для повышения качества железорудного сырья. *Горная промышленность*. 2023;(3):122–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-122-128>
Opalev A.S., Cherezov A.A. Experience in the development of magnetic gravity separation at enterprises in Russia and CIS countries to improve the quality of iron ore raw materials. *Russian Mining Industry*. 2023;(3):122–128. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-122-128>
12. 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>
13. 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
14. Malozyomov B.V., Martyushev N.V., Sorokova S.N., Efremkov 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>
15. 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.).

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

Информация о статье

Поступила в редакцию: 19.09.2024
Поступила после рецензирования: 22.10.2024
Принята к публикации: 24.10.2024

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

Article info

Received: 19.09.2024
Revised: 22.10.2024
Accepted: 24.10.2024