

ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Р.В. Ключев

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия,
e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Аннотация: Рассмотрено решение актуальной задачи горного производства: оптимизации расхода электроэнергии на процессы обогащения руд путем математического моделирования данных статистического анализа, которая приобрела глобальную значимость и сдерживает темпы добычи минерального сырья для отраслей промышленности. Методика исследования основана на оценке зависимости электропотребления обогатительной фабрики от числа одновременно работающих технологических машин. Выполнен комплексный анализ работы электрооборудования участка обогащения руд. Сформулирован инженерный прогноз потребления электроэнергии в различных технологических режимах работы оборудования обогатительной фабрики на основе метода коэффициентов темпов роста. Выполнен прогноз динамики параметров электрообеспечения на основе регрессионных моделей методом наименьших квадратов. Дана экономическая оценка параметров повышения показателей эффективности использования электроэнергии с определением экономического эффекта за счет оптимизации режима загрузки оборудования. Показано, что относительная погрешность расчетов расхода электроэнергии по экспериментальному и теоретическому закону распределения исходных массивов информации не превышает допустимого значения. Рекомендовано поддерживать оптимальное значение производительности линий, исходя из номинальной производительности мельницы. Обосновано, что резервом экономии электроэнергии является повышение производительности мельниц до статистически обоснованной величины. Даны количественные значения размеров экономии электроэнергии дифференцированно для участков процесса обогащения. Результаты исследования могут быть востребованы при модернизации действующих и строительстве новых обогатительных фабрик, а также для обучения специалистов горного производства.

Ключевые слова: электроэнергия, обогащение, руда, статистика, анализ, оборудование, фабрика, производительность.

Для цитирования: Ключев Р. В. Оптимизация электропотребления обогатительной фабрики на основе статистического анализа // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 12. – С. 150–161. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_150.

Optimization of power consumption at concentration plants using statistical analysis

R.V. Klyuev

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

Abstract: The article focuses on a relevant objective of the mining industry, namely, optimization of power consumption by mineral processing activities via statistical modeling. The problem connected with the electric energy consumption has become critical now and retards rates of production of mineral resources for industries. The research procedure involves estimation of power consumption at a concentration plant as function of quantity of production machines involved in simultaneous operation. An integrated analysis of duties of electric equipment at an ore concentration workshop is performed. An engineering forecast of the electric energy consumption in different modes of equipment at a concentration plane is conducted using the method of growth rates. The dynamics of power supplies is predicted using the regression models and the least square method. The economic evaluation of options of enhanced efficiency in utilization of electric energy is given with the determination of economic effect owing to optimized loading conditions of production equipment. It is shown that the relative error of power consumption from the experimental and theoretical distribution laws of initial data arrays is never higher than the allowable value. It is recommended to maintain an optimized productivity of a processing line on the basis of a rated capacity of a mill. It is justified that the source of the electric energy saving is the increase in the mill capacity up to a statistically valid value. The figures of power savings are given for individual workshops of a concentration plant. The research findings can be in demand when upgrading and constructing operating and new concentration plants, as well as in training specialists for the mining industry.

Key words: power, processing, ore, statistics, analysis, equipment, plant, capacity.

For citation: Klyuev R. V. Optimization of power consumption at concentration plants using statistical analysis. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(12):150-161. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_12_0_150.

Введение

В последние годы все большее значение приобретают вопросы эффективной добычи минеральных ресурсов для экономической сферы государства [1, 2]. В России увеличение темпов переработки минерального сырья происходит за счет освоения крупных месторождений [3, 4]. В настоящее время все сложнее стало добывать руду вследствие ухудшающихся горнотехнических условий ее залегания. Увеличение глубины горных работ ежегодно увеличивает себестоимость добычи руды на 5%. В условиях дефицита ресурсов поиски путей совершенствования процесса обогащения являются перспективным направлением упрочнения минерально-сырьевой базы [5–7]. Актуальность поставленной проблемы подтверждается и в кон-

тексте устойчивого развития вопросов добычи полезных ископаемых при соблюдении экологических норм, в первую очередь, за счет снижения выброса парниковых газов [8–10] и недопущения глобального потепления.

Цель работы состоит в формировании технологий обогащения [11, 12], способствующих вводу в технологический процесс различных техногенных георесурсов.

Методика исследования

Основным математическим аппаратом является статистический метод. Электропотребление обогатительной фабрики поставлено в зависимость от числа одновременно работающих технологических машин, которое является дискретной случайной величиной [13, 14].

Комплекс методов включает в себя: анализ работы электрооборудования, прогнозирование потребления электроэнергии, прогнозирование на основе метода коэффициентов темпов роста, прогнозирование на основе регрессионных моделей методом наименьших квадратов, экономическую оценку повышения показателей эффективности использования электроэнергии и определение экономического эффекта за счет оптимизации режима загрузки оборудования [15–17].

Знание законов распределения случайных величин на всех этапах технологического процесса позволяет произвести расчет точечных и интервальных оценок электропотребления [18, 19].

Обсуждение результатов

Обогащение вольфрамово-молибденовых руд осуществляется по схеме селективной флотации (рис. 1).

Хвостовое хозяйство обогатительной фабрики (рис. 2) состоит из пульпопровода (16), хвостохранилища (17), пульпонасосной, отстойника, основного (21) и промежуточного (26) резервуара [20].

Технология обогащения руды включает в себя 2 основных цикла — молибденовый и шеелитовый, и заключается в выделении соответствующих концентратов из хвостов.

Для осаждения твердой фракции пульпы и осветления воды в пульпопровод поступает гашеная известь. Полученная смесь пульпы с кашечной известью насосами поднимается в хвостохранилище (14), в котором происходит осаждение твердой фракции и осветление воды. Осветленная вода плавучей насосной станцией (18) перекачивается в отстойники корпуса. Очищенная техническая вода через промежуточный резервуар (26) насосами (19) типа ЦН-3000-197 подается в основной запасной резервуар (21), находящийся на обогатительной фабрике. В этот же резервуар от береговой насосной станции (22) поступает свежая техническая вода из водохранилища (23).

Из запасного резервуара (21) вода (20) типа ЦСНГ-850-840 закачивается в резервуар корпуса самоизмельчения.

Доля электропотребления подразделений обогатительной фабрики в течение года представлена на рис. 3.

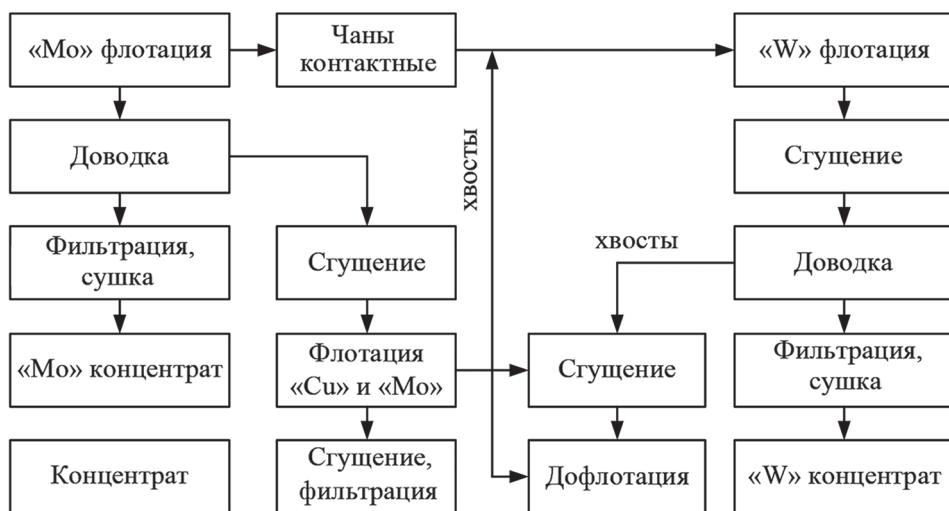
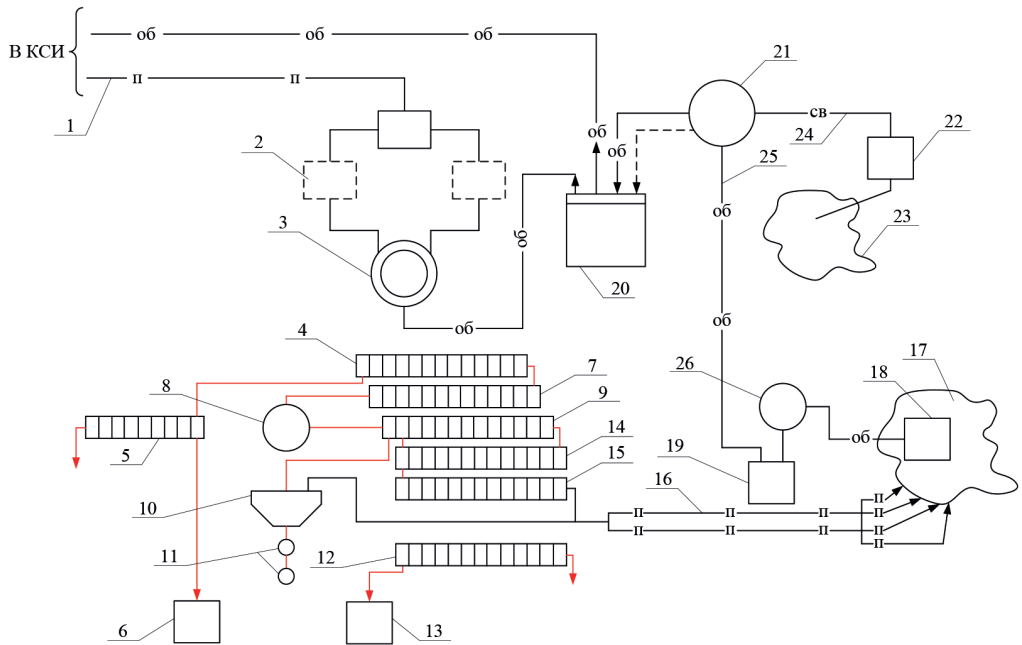


Рис. 1. Технологическая карта обогащения руд

Fig. 1. Technological map of ore enrichment



- 1, 16 – пульпопроводы; 2 – гидроклодцы; 3 – пуль-поделитель; 4 – основная «Мо» флотация; 5 – перечистка; 6 – фильтрация; 7 – контрольная «Мо» флотация; 8 – контактный чан; 9 – основная «Wo» флотация; 10 – сгустители; 11 – пропарка; 12 – доводка; 13 – сушка; 14 – контрольная флотация; 15 – контрольная «Wo» флотация; 17 – хвостохранилище; 18 – плавучая насосная станция; 19 – насосная станция I подъема; 20 – насосная станция высокого давления (НВД); 21 – запасной резервуар; 22 – береговая насосная станция; 23 – озеро; 24 – свежая вода; 25 – оборотная вода; 26 – резервуар

Рис. 2. Технология переработки руды
Fig. 2. Ore processing technology

На рисунке принято следующее обозначения: КСИ – корпус самоизмельчения.

На рис. 4 приведен характер изменения энергоёмкости отделения корпуса

самоизмельчения по отдельным кварталам за 2023 г. Уравнение регрессии, построенное по методу наименьших квадратов (МНК), наиболее точно описывается полиномом 6-го порядка:

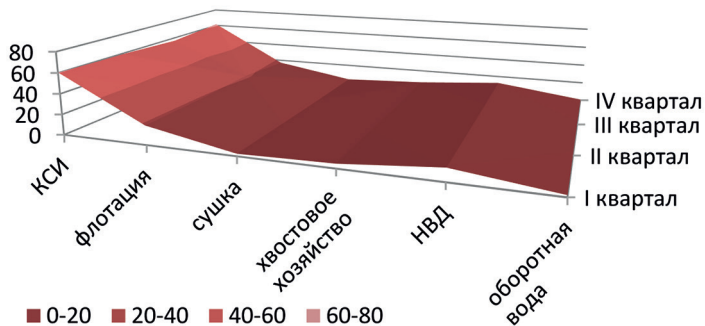


Рис. 3. Доля энергоёмкости отделений обогатительной фабрики
Fig. 3. Share of energy intensity of the processing plant departments

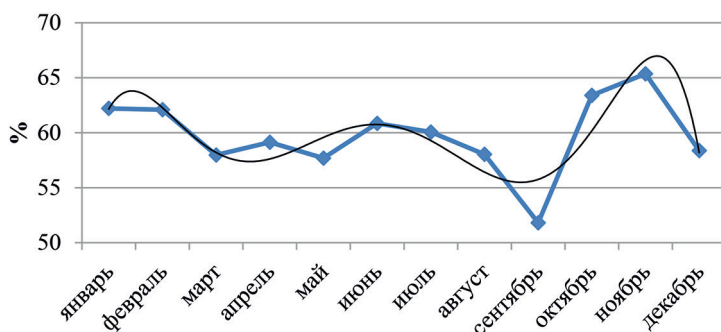


Рис. 4. Характер изменения энергоемкости отделений во времени
 Fig. 4. The nature of changes in energy intensity of departments over time

$$y = 0,0032 \cdot x^6 + 0,1191 \cdot x^5 - 1,6962 \cdot x^4 + 11,622 \cdot x^3 - 39,177 \cdot x^2 + 58,252 \cdot x + 33,033$$

Коэффициент детерминации: $R^2 = 0,7256$.

Доля КСИ в электропотреблении фабрики составляет 55–61%, поэтому КСИ выбран в качестве основного объекта исследования электропотребления.

Прогнозированием на основе метода коэффициентов темпа роста (МКТР) определяются среднегодовые коэффициенты темпов роста для среднего значения (k_{TM}) и стандарта (k_{TS}):

$$k_{TM} = \sqrt[\rho]{\frac{\bar{m}_x(N)}{\bar{m}_x(1)}}, \quad (1)$$

$$k_{TS} = \sqrt[\rho]{\frac{\bar{S}_x(N)}{\bar{S}_x(1)}}, \quad (2)$$

где $\bar{m}_x(1)$ и $\bar{m}_x(N)$ – соответственно среднее значение прогнозируемой величины за первый (1) и последний (N) годы рассматриваемого временного ряда; $\bar{S}_x(1)$ и $\bar{S}_x(N)$ – то же самое для стандарта.

Расчетные прогнозируемые значения:

а) для среднего:

$$\bar{m}_x(N+1) = k_{TM} \cdot \bar{m}_x(N), \quad (3)$$

б) для стандарта:

$$\bar{S}_x(N+1) = k_{TS} \cdot \bar{S}_x(N). \quad (4)$$

При нормальном распределении величин $\{W\}$ и $\{\omega\}$ прогнозное значение W_{np} равно

$$W_{np} = \bar{m}_x(N+1) + t_\beta \cdot \bar{S}_x(N+1), \quad (5)$$

где t_β – критерий Стьюдента (1,9÷1,5).

Для прогнозирования по МНК применяют уравнение регрессии:

$$y = a + b \cdot x. \quad (6)$$

В отдельных случаях может использоваться уравнение второго порядка в виде параболической функции времени x :

$$y = a + b \cdot x + c \cdot x^2. \quad (7)$$

Прогнозирование осуществляется по линейной функции: $y = a + b \cdot t$.

Методика прогнозирования предусматривает построение линии регрессии из условия минимума дисперсии [21–23]. Сначала определяются значения коэффициентов a и b в системе линейных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N y_i = a \cdot N + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i \cdot x_i = a \cdot \sum_{i=1}^N x_i + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 \end{cases}, \quad (8)$$

где a и b – искомые коэффициенты уравнения регрессии; N – период наблюдения (число лет); x – текущее значение

времени за период наблюдения; $x = 1, 2, \dots$; y — значение исследуемой величины (\bar{m}_x и \bar{S}_x).

Уравнение регрессии имеет вид (6).

Краткосрочный прогноз на k -й квартал $N + 1$ года осуществляется следующим образом:

а) по математическому ожиданию:

$$\bar{m}_x \cdot k \cdot (n+1) = a_1 + b_1 \cdot (n+1). \quad (9)$$

б) по среднеквадратичному отклонению:

$$\bar{S}_x \cdot k \cdot (n+1) = a_2 + b_2 \cdot (n+1). \quad (10)$$

При нормальном распределении величин $\{W\}$ и $\{\omega\}$ прогнозное значение W будет равно

$$W_k(n+1) = \bar{m}_{xk}(n+1) + t_{\beta} \cdot \sigma_{xk}(n+1), \quad (11)$$

где $\alpha = 0,05$ ($\beta = 0,95$); $v = n - 2$.

Для последующей оценки доверительного интервала тренда и прогноза определяется среднеквадратичное отклонение от тренда:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{v}}, \quad (12)$$

где y_i и \hat{y}_i — соответственно фактическое и расчетное значения членов ряда; v — число степеней свободы:

$$v = n - m', \quad (13)$$

где m' — число оцениваемых параметров; n — число наблюдений.

Для линейной регрессии: $m' = 2$ (a, b) и $v = n - 2$.

Для параболы: $m' = 3$ (a, b, c) и $v = n - 3$.

Среднеквадратичная ошибка тренда:

$$S_y = S_y \cdot k_T, \quad (14)$$

где k_T — некоторая функция числа наблюдений и периода упреждения.

Для линейного тренда k_T определяется по выражению

$$k_T = \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{3 \cdot (n+2 \cdot L - 1)^2}{n \cdot (n^2 - 1)}} \quad (15)$$

или по справочным таблицам: $k_T = f(n, L)$.

Доверительный интервал для тренда (ДИТ):

$$[\text{ДИТ}] = \hat{y}_i \pm t_{\text{кр}} \cdot \bar{S}_y, \quad (16)$$

где $t_{\text{кр}}$ — значение статистики Стьюдента при принятом уровне значимости.

Доверительный интервал прогноза (ДИП) на L шагов вперед:

$$[\text{ДИП}] = \hat{y}_{i+L} \pm t_{\text{кр}} \cdot \bar{S}_{\text{@}}, \quad (17)$$

где $\bar{S}_{\text{@}} = S_y \cdot k_p$.

Значение коэффициента k_p определяется из выражения

$$k_{\text{@}} = \sqrt{\frac{N+1}{N} + \frac{3 \cdot (N+2 \cdot L - 1)^2}{N \cdot (N^2 - 1)}}. \quad (18)$$

Аналогично по МНК определяются расчетные значения на квартал $N + 1$ года для параболы второго порядка.

Прогнозирование по параболе $y = a + b \cdot t + c \cdot t^2$ осуществляется следующим образом.

Практическое применение МНК к параболе второй степени сводится к решению системы нормальных уравнений:

$$\begin{cases} \sum y_i = a \cdot N + b \cdot \sum x_i + A \cdot \sum x_i^2 \\ \sum y_i \cdot x_i = a \cdot \sum x_i + b \cdot \sum x_i^2 + A \cdot \sum x_i^3 \\ \sum y_i \cdot x_i^2 = a \cdot \sum x_i^2 + b \cdot \sum x_i^3 + A \cdot \sum x_i^4 \end{cases} \quad (19)$$

При расчете проводится раздельное прогнозирование величин \bar{m}_x , \bar{S}_x .

Составляется таблица фактических y_i и расчетных \hat{y}_i значений чисел ряда и определяется среднеквадратичное отклонение:

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-3}}. \quad (20)$$

Доверительный интервал тренда:

$$[\text{ДИТ}] = \hat{y}_{i+L} \mp t_{\beta} \cdot S_y \cdot k_T, \quad (21)$$

Доверительный интервал прогноза:

$$[\text{ДИП}] = \hat{y}_{i+L} \mp t_{\beta} \cdot S_y \cdot k_p. \quad (22)$$

Рассчитываются \bar{m}_x , \bar{S}_x , прогноз-ные значения $\bar{m}_{xk}(n+1)$, $\sigma_{xk}(n+1)$. По уравнению параболы $W(\omega)$ прогнозное значение равно (11), где $t_{\beta} = 1,96$ при $\alpha = 0,05$.

Для оценки адекватности модели прогноза используется F -критерий Фишера, для оценки точности прогноза проводится ретроспективная проверка выбранных уравнений регрессии.

Расчетные значения W_p сравниваются с фактическими с определением относительной ошибки прогноза:

$$\Delta\% = \frac{W_p - W_{cp}}{W_p} \cdot 100\%. \quad (23)$$

Результаты прогноза расхода электроэнергии расчета абсолютной и отно-

сительной ошибки прогноза по МНК приведены в таблице.

Тенденция к росту электропотребления проявляется в связи с увеличением объема перерабатываемой руды. Удельный расход электроэнергии имеет слабо выраженную склонность к снижению.

График зависимости ΔW от производительности одной линии представлен на рис. 5.

При максимальной производительности мельниц $Q_{\max} = 140$ т/ч экономия электроэнергии составит:

$$\Delta W_r = 867\,650 \cdot (140 - 112) = 24\,294\,200 \text{ кВт}\cdot\text{ч/г}.$$

Снижение удельного расхода электроэнергии составит:

$$\Delta\omega = \frac{\Delta W_r}{Q_T \cdot 144 \cdot 365} = 3,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч/г}.$$

Снижение $\Delta\omega$, соответствующее увеличению производительности линии на 1 т/ч:

Определение расхода электроэнергии по методу наименьших квадратов для корпуса самоизмельчения

Determination of energy consumption by the least squares method for the self-grinding body

Параметр	Корпус самоизмельчения							
	Фактическое значение			Расчетное значение			Ошибка	
	\bar{m}	\bar{S}	$\bar{m} + t_{\beta} \cdot \bar{S}$	\hat{m}	\hat{S}	$\hat{m} + t_{\beta} \cdot \hat{S}$	$\Delta_{\text{абс.}}$	$\Delta_{\text{отн.}}, \%$
W , кВт·ч/сут	184 552	44 408	271 592	191 209	45 283	279 964	-8372	-3,1
	186 475	47 896	280 351	202 331	48 831	297 940	-17 589	-6,3
	251 492	44 220	338 163	244 588	43 346	329 546	8617	2,5
	255 832	62 180	377 705	233 892	50 716	333 295	44 410	11,7
	292 114	61 470	412 595	297 968	41 409	379 130	33 465	8,11
	260 710	48 620	356 005	265 552	52 601	368 650	-12 645	-3,6
ω , кВт·ч/т	17,38	4,183	25,579	17,023	4,941	26,707	-1,128	-4,4
	15,75	4,428	24,429	15,498	3,505	22,368	2,061	8,4
	16,11	2,79	21,573	16,726	3,762	24,1	-2,522	-11,7
	15,88	3,33	22,407	15,810	3,643	22,950	-0,543	-2,4
	16,54	4,982	26,305	16,429	2,583	21,492	4,813	18,3
	16,15	4,801	25,560	16,122	3,782	23,535	2,025	7,9

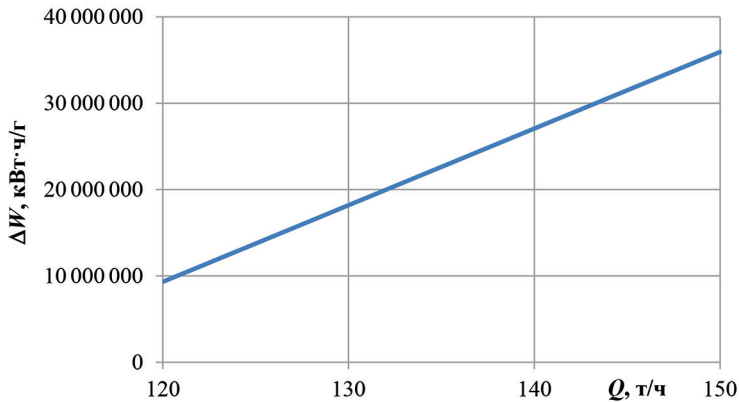


Рис. 5. Зависимость экономии электроэнергии от производительности технологической линии корпуса самоизмельчения

Fig. 5. Dependence of energy savings on the productivity of the technological line of the self-grinding body

$$\Delta\omega = \frac{\Delta\omega}{Q_M - 112} = 0,12 \text{ кВт}\cdot\text{ч/г}.$$

Экономический эффект от снижения удельной нормы расхода электроэнергии на $\Delta\omega$:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= \Delta\omega \cdot Q_{\text{cp}} \cdot 365 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = \\ &= 12 \text{ тыс. руб./г}, \end{aligned}$$

$$\text{где } Q_{\text{cp}} = \frac{Q_T + 112}{2} = 126 \text{ т/г}.$$

Транспорт горной массы в корпус самоизмельчения производится конвейером. Движение конвейера осуществляется одним электродвигателем с установленной мощностью $P_H = 400$ кВт. Номинальное напряжение электродвигателя: $U_H = 6$ кВ.

В суточном цикле работы конвейера значительное место занимает составляющая T_x — время работы в холостом режиме, которое составляет $T_{x,\text{cp}} = 13,34$ ч/сут. Среднее время работы конвейера под нагрузкой: $T_{p,\text{cp}} = 14,56$ ч/сут.

Расход электроэнергии при работе конвейера со средней загрузкой:

$$\begin{aligned} W_{\text{тр}} &= P_{\text{cp}} \cdot T_{p,\text{cp}} = \\ &= 232 \cdot 14,56 = 3376 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут}. \end{aligned}$$

Удельный расход электроэнергии на транспорт руды в режиме средней загрузки:

$$\omega_{\text{тр}} = \frac{W_{\text{тр}}}{m_Q} = \frac{3376}{17\,780} = 0,19 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т},$$

где m_Q — среднее значение суточной производительности конвейера.

Снижение удельного расхода электроэнергии за счет исключения холостого хода конвейера:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{\text{г}} &= \omega_{\text{тк}} - \omega_{\text{тр}} = \\ &= 0,283 - 0,19 = 0,093 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}, \end{aligned}$$

где $\omega_{\text{тк}}$ — фактический удельный расход электроэнергии на транспорт руды конвейера.

Годовая экономия электроэнергии:

$$\Delta W_{\text{г}} = \Delta\omega_{\text{г}} \cdot m_Q \cdot 365.$$

Экономический эффект от упорядочения режима работы конвейера за счет исключения режима холостого хода:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{г}} &= \Delta W_{\text{г}} \cdot C_0 = 603\,882 \cdot \\ &\cdot 0,015 \cdot 10^{-3} = 9,06 \text{ тыс. руб}. \end{aligned}$$

Экономический эффект может быть рассчитан по времени холостого хода конвейера:

$$\mathcal{E}_{\text{г}} = P_x \cdot T_{x,\text{cp}} \cdot 365 \cdot C_0,$$

где P_x — мощность, потребляемая конвейером на холостом ходу;

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_r &= 133 \cdot 13,34 \cdot 365 \cdot 0,015 \cdot 10^{-3} = \\ &= 8,98 \text{ тыс. руб./год.}\end{aligned}$$

Значения экономического эффекта, полученные разными методами, практически совпадают.

В связи с оптимизацией режима работы основных технологических механизмов КСИ необходимо обеспечить оптимальный режим работы конвейера, соответствующий режиму работы технологических линий.

При производительности одной линии $Q_{\text{лин.ср}} \geq 126$ т/ч суточная производительность конвейера должна быть не менее 16 213 т/сут.

При максимальной производительности $Q_m = 3069$ т/ч необходимое время работы конвейера равно

$$T'_p = \frac{18\,213}{3069} = 5,9 \text{ ч.}$$

Суточный расход электроэнергии при работе конвейера с максимальной загрузкой:

$$\begin{aligned}W_{\text{TM}} &= P_m \cdot T'_p = 846 \cdot 5,9 = \\ &= 2041 \text{ кВт}\cdot\text{ч/сут,}\end{aligned}$$

где P_m — мощность, потребляемая конвейером при максимальной загрузке.

Удельный расход электроэнергии:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{TM}} &= \frac{W_{\text{TM}}}{m'_Q} = \frac{2041}{18\,213} = \\ &= 0,112 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т.}\end{aligned}$$

Снижение удельного расхода электроэнергии:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{\text{TM}} &= \omega_{\text{т.ср}} - \omega_{\text{TM}} = \\ &= 0,283 - 0,112 = 0,171 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т.}\end{aligned}$$

Годовая экономия электроэнергии:

$$\begin{aligned}\Delta W_{\text{TM}} &= \Delta\omega_{\text{TM}} \cdot m'_Q \cdot 365 = \\ &= 0,171 \cdot 18\,213 \cdot 365 = \\ &= 1\,136\,764 \text{ кВт}\cdot\text{ч/г.}\end{aligned}$$

Экономический эффект от оптимизации режима работы конвейера за счет полного использования его мощности:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{TM}} &= \Delta W_{\text{TM}} \cdot C_0; \\ \mathcal{E}_{\text{TM}} &= 1\,136\,764 \cdot 9,015 \cdot 10^{-3} = \\ &= 17,05 \text{ тыс. руб./год.}\end{aligned}$$

Выводы

1. Относительная погрешность расчетов расхода электроэнергии по экспериментальному и теоретическому закону распределения исходных массивов информации не превышает 5%.

2. Рекомендуется поддерживать оптимальное значение производительности линий не ниже $Q_n = 126$ т/ч, что близко к номинальной производительности мельницы: $Q_m = 150$ т/ч.

3. Резервом экономии энергии является повышение производительности мельниц до статически обоснованной величины 135...140 т/ч.

4. При повышении производительности КСИ на 1 т/ч экономия электроэнергии в год составляет в среднем 370 тыс. кВт·ч, а удельная норма расхода электроэнергии снижается на 0,12 кВт·ч/т.

5. При работе 9 линий КСИ вместо 6 пропорционально примерно в 1,3 раза увеличивается расход электроэнергии по КСИ, а удельный расход по КСИ остается прежним.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Golik V. I., Hasheva Z. M., Galachieva S. V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region // The Social Sciences. 2015, vol. 10, no. 6, pp. 746–749.

2. Голик В. И. Перспективное направление восстановления потенциала Садона // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 68—75. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75.

3. Рыбак Я., Хайрутдинов М. М., Конгар-Сюрюн Ч. Б., Тюляева Ю. С. Ресурсосберегающие технологии освоения месторождений полезных ископаемых // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 3(49). — С. 405—415. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.

4. Похиленко Н. П., Афанасьев В. П., Толстов А. В., Крук Н. Н., Похиленко Л. Н., Иванова О. А. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твердых полезных ископаемых Сибири // Геология рудных месторождений. — 2023. — Т. 65. — № 5. — С. 476—492. DOI: 10.31857/S0016777023050088.

5. Zhao X., Yang Y., Sun F., Wang Bo, Zuo Y., Li M., Shen J., Mu F. Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high coal rank coalbed methane in south Qinshui Basin, Shanxi Province // Petroleum Exploration and Development. 2016, vol. 43, no. 2, pp. 332—339. DOI: 10.1016/S1876-3804(16)30039-8.

6. Шадрунова И. В., Колодежная Е. В., Горлова О. Е. Разработка технологии сухого обогащения флюоритовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 2. — С. 43—57. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_43.

7. Baigenzhenov O., Khabiyev A., Mishra B., Aimbetova I., Yulusov S., Temirgali I., Kuldeyev Y., Korganbayeva Z. Asbestos waste treatment — an effective process to selectively recover gold and other nonferrous metals // Recycling. 2022, vol. 7, no. 6, article 85. DOI: 10.3390/recycling7060085.

8. Wang J., Zhao Q., Ning P., Wen Sh. Greenhouse gas contribution and emission reduction potential prediction of China's aluminum industry // Energy. 2024, vol. 290, article 130183. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130183.

9. Filonchik M., Peterson M. P., Yan H., Gusev A., Zhang L., Yang Sh. Greenhouse gas emissions and reduction strategies for the world's largest greenhouse gas emitters // Science of the Total Environment. 2024, vol. 994, article 173895. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173895.

10. Куликова А. А., Хабарова Е. И. Использование биологических рабочих агентов для снижения углеродного следа // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 311—321. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-311-321.

11. 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, vol. 67, no. 3-4. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.

12. Wang M., Wang X., Liu W. A novel technology of molybdenum extraction from low grade Ni—Mo ore // Hydrometallurgy. 2009, vol. 97, no. 1-2, pp. 126—130. DOI: 10.1016/j.hydromet.2008.12.004.

13. Моргоева А. Д., Моргоев И. Д., Ключев Р. В., Гаврина О. А. Прогнозирование потребления электрической энергии промышленным предприятием с помощью методов машинного обучения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 7. — С. 115—125. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527.

14. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on LSTM recurrent neural network considering weather features // Energies. 2021, vol. 14, no. 10, article 2737. DOI: 10.3390/en14102737.

15. Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Гаврина О. А., Плиева М. Т. Комплексный анализ потребления электроэнергии мельниц самоизмельчения обогатительной фабрики // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 5-1. — С. 145—156. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_145.

16. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1333, no. 6, article 062033. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

17. Зиновьева О. М., Смирнова Н. А. К вопросу оценки надежности технических устройств на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 1. — С. 157—168. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.

18. Khan A.-N., Iqbal N., Rizwan A., Ahmad R., Kim D.-H. An ensemble energy consumption forecasting model based on spatial-temporal clustering analysis in residential buildings // Energies. 2021, vol. 14, no. 11, article 3020. DOI: 10.3390/en14113020.

19. Albuquerque P. C., Cajueiro D. O., Rossi M. D. C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset // *Expert Systems with Applications*. 2022, vol. 187, article 115917. DOI: 10.1016/J.ESWA.2021.115917.
20. Buechler E., Goldin A., Rajagopal R. Improving the load flexibility of stratified electric water heaters: design and experimental validation of MPC strategies // *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2024, vol. 15, pp. 3613 – 3623. DOI: 10.1109/TSG.2024.3366116.
21. Hamed M. M., Ali H., Abdelal Q. M. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances // *Energy*. 2022, vol. 255, article 124510. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124510.
22. Zhou C., Chen X. Predicting China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach // *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 5086 – 5099. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.103.
23. Ahmadi M., Soofiabadi M., Nikpour M., Naderi H., Abdullah L., Arandian B. Developing a deep neural network with fuzzy wavelets and integrating an inline PSO to predict energy consumption patterns in urban buildings // *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 8, article 270. DOI: 10.3390/math10081270. **WAS**

REFERENCES

1. Golik V. I., Hasheva Z. M., Galachieva S. V. Diversification of the economic foundations of depressive mining region. *The Social Sciences*. 2015, vol. 10, no. 6, pp. 746 – 749.
2. Golik V. I. Promising direction of Sadon's potential recovery (RNO-Alania). *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 68 – 75. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75.
3. Rybak Y., Khayrutdinov M., Kongar-Syuryun C., Tyulyayeva Y. Resource-saving technologies for development of mineral deposits. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 3(49), pp. 405 – 415. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-3-406-415.
4. Pokhilenko N. P., Afanasiev V. P., Tolstov A. V., Kruk N. N., Pokhilenko L. N., Ivanova O. A. Prospects and problems of development of the raw material base of sufficient strategic types of solid mineral resources of Siberia. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2023, vol. 65, no. 5, pp. 476 – 492. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0016777023050088.
5. Zhao X., Yang Y., Sun F., Wang Bo, Zuo Y., Li M., Shen J., Mu F. Enrichment mechanism and exploration and development technologies of high coal rank coalbed methane in south Qinshui Basin, Shanxi Province. *Petroleum Exploration and Development*. 2016, vol. 43, no. 2, pp. 332 – 339. DOI: 10.1016/S1876-3804(16)30039-8.
6. Shadrinova I. V., Kolodezhna E. V., Gorlova O. E. Dry processing technology for fluorite ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 2, pp. 43 – 57. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_2_0_43.
7. Baigenzhenov O., Khabiyev A., Mishra B., Aimbetova I., Yulusov S., Temirgali I., Kuldeyev Y., Korganbayeva Z. Asbestos waste treatment – an effective process to selectively recover gold and other nonferrous metals. *Recycling*. 2022, vol. 7, no. 6, article 85. DOI: 10.3390/recycling7060085.
8. Wang J., Zhao Q., Ning P., Wen Sh. Greenhouse gas contribution and emission reduction potential prediction of China's aluminum industry. *Energy*. 2024, vol. 290, article 130183. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130183.
9. Filonchik M., Peterson M. P., Yan H., Gusev A., Zhang L., Yang Sh. Greenhouse gas emissions and reduction strategies for the world's largest greenhouse gas emitters. *Science of the Total Environment*. 2024, vol. 994, article 173895. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173895.
10. Kulikova A. A., Khabarova E. I. Biological working agents use to reduce the carbon footprint. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 311 – 321. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-311-321.
11. 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, vol. 67, no. 3-4. DOI: 10.1007/s11015-023-01526-z.
12. Wang M., Wang X., Liu W. A novel technology of molybdenum extraction from low grade Ni – Mo ore. *Hydrometallurgy*. 2009, vol. 97, no. 1-2, pp. 126 – 130. DOI: 10.1016/j.hydromet.2008.12.004.
13. Morgoeva A. D., Morgoev I. D., Klyuev R. V., Gavrina O. A. Forecasting of electric energy consumption by an industrial enterprise using machine learning methods. *Bulletin of the Tomsk Poly-*

technic University. Geo Assets Engineering. 2022, vol. 333, no. 7, pp. 115–125. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527.

14. Wang Y., Zhang N., Chen X. A short-term residential load forecasting model based on LSTM recurrent neural network considering weather features. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 10, article 2737. DOI: 10.3390/en14102737.

15. Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Gavrina O. A., Plieva M. T. Integrated analysis of electric energy demand of autogenous grinding mills at concentration factories. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 5-1, pp. 145–156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_145.

16. Zhukovskiy Y., Batueva D., Buldysko A., Shabalov M. Motivation towards energy saving by means of IoT personal energy manager platform. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019, vol. 1333, no. 6, article 062033. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/6/062033.

17. Zinovieva O. M., Smirnova N. A. On the issue of assessing the reliability of technical devices at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 1, pp. 157–168. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_157.

18. Khan A.-N., Iqbal N., Rizwan A., Ahmad R., Kim D.-H. An ensemble energy consumption forecasting model based on spatial-temporal clustering analysis in residential buildings. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 11, article 3020. DOI: 10.3390/en14113020.

19. Albuquerque P. C., Cajueiro D. O., Rossi M. D. C. Machine learning models for forecasting power electricity consumption using a high dimensional dataset. *Expert Systems with Applications*. 2022, vol. 187, article 115917. DOI: 10.1016/J.ESWA.2021.115917.

20. Buechler E., Goldin A., Rajagopal R. Improving the load flexibility of stratified electric water heaters: design and experimental validation of MPC strategies. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2024, vol. 15, pp. 3613–3623. DOI: 10.1109/TSG.2024.3366116.

21. Hamed M. M., Ali H., Abdelal Q. M. Forecasting annual electric power consumption using a random parameters model with heterogeneity in means and variances. *Energy*. 2022, vol. 255, article 124510. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124510.

22. Zhou C., Chen X. Predicting China's energy consumption: Combining machine learning with three-layer decomposition approach. *Energy Reports*. 2021, vol. 7, pp. 5086–5099. DOI: 10.1016/j.egy.2021.08.103.

23. Ahmadi M., Soofiabadi M., Nikpour M., Naderi H., Abdullah L., Arandian B. Developing a deep neural network with fuzzy wavelets and integrating an inline PSO to predict energy consumption patterns in urban buildings. *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 8, article 270. DOI: 10.3390/math10081270.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Клюев Роман Владимирович — д-р техн. наук, доцент, профессор, Московский политехнический университет, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

R. V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Professor, Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru, ORCID ID: 0000-0003-3777-7203.

Получена редакцией 12.08.2024; получена после рецензии 16.09.2024; принята к печати 10.11.2024.
Received by the editors 12.08.2024; received after the review 16.09.2024; accepted for printing 10.11.2024.

