

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ МЕЛЬНИЦ САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОБОГАТИТЕЛЬНОЙ ФАБРИКИ

Р.В. Ключев¹, В.Н. Хетагуров², О.А. Гаврина², М.Т. Плиева²

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

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, РСО-Алания, Россия

Аннотация: Актуальность проблемы расчета потребления электроэнергии на обогатительных фабриках обусловлена необходимостью снижения энергетической составляющей затрат в себестоимости производимой продукции. Одним из наиболее энергоемких переделов производства является участок измельчения, где основным технологическим оборудованием служат мельницы самоизмельчения. Цель работы заключается в оценке потребления электроэнергии мельниц обогатительной фабрики с применением методов статистического и корреляционного анализа. В соответствии с поставленной целью в ходе исследования освещены следующие вопросы: произведен анализ статистических данных мельниц, корреляционный анализ мощности и производительности мельниц; сформулировано определение удельного расхода электроэнергии мельниц. На основании экспериментальных исследований с использованием статистических методов расчета разработана методика расчета энергетических характеристик и удельного расхода электроэнергии мельниц самоизмельчения обогатительной фабрики, которая содержит необходимое и достаточное число критериальных проверок исходных статистических данных, позволяет получить основные параметры закона распределения, оценку коэффициента корреляции и коэффициентов линейного уравнения регрессии между отдельными выборками. Установлено, что между производительностью и электропотреблением для мельниц самоизмельчения наблюдается низкое значение коэффициента корреляции, что указывает на слабую зависимость между параметрами P и Q . Проверка по критерию Стьюдента подтвердила при $\alpha = 0,05$ значимость коэффициента корреляции между производительностью Q и удельным расходом электроэнергии ω и коэффициентов линейного уравнения регрессии. Для обеспечения минимального значения удельного расхода электроэнергии рекомендуется работать в области оптимального режима с максимально допустимой по технологическим условиям загрузкой мельницы при 136,5 т/ч.

Ключевые слова: потребление электроэнергии, мельница самоизмельчения, доверительный интервал, производительность, мощность, корреляционный анализ, коэффициент корреляции, обогатительная фабрика, руда.

Для цитирования: 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.

Integrated analysis of electric energy demand of autogenous grinding mills at concentration factories

R.V. Klyuev¹, V.N. Khetagurov², O.A. Gavrina², M.T. Plieva²

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia, e-mail: kluev-roman@rambler.ru

² North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Abstract: The relevance of the electric energy demand calculation at concentration factories is governed by the requirement to save on electricity bills in the overall production cost. One of the most energy-hungry phases in mineral processing is grinding using autogenous mills. The aim of this study is to estimate the electric energy demand of the mills using the methods of the statistical and correlation analyses. In conformity with the aim, the scope of the research encompasses: the mill statistics analysis, the correlation of the energy consumption and productiveness of the mills, the definition of the specific energy consumption of the mills. Using the experimental research findings and the statistical design methods, the computation procedure is developed for the energy response and specific energy consumption of the autogenous grinding mills; the procedure contains the necessary and sufficient number of criterion-based checkouts of the initial statistical data, and provides the basic parameters of the statistical law, as well the estimates of the correlation coefficient and the coefficients of the linear regressional relationship between separate samplings. It is found that the productiveness and energy consumption of the autogenous grinding mills have a low correlation coefficient, which points at the weak connection between the parameters P and Q . The Student's t-test confirms that at $\alpha = 0.05$, the correlation coefficient of the productiveness Q and the specific energy consumption ω , and the coefficients of the linear regressional relationship are significant. For minimizing the specific energy demand, it is recommended to operate within the optimum mode range at the maximum allowable capacity of the mill at 136.5 t/h.

Key words: electric energy consumption, autogenous grinding mill, confidence interval, productiveness, capacity, correlation analysis, correlation coefficient, concentration factory, ore.

For citation: 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;(5-1):145-156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_145.

Введение

Технологический процесс на обогащительных фабриках [1], горных предприятиях [2], угольных шахтах [3] рассматривается как объект статистического исследования по расчету затрат электроэнергии на единицу продукции. Для этого технологический процесс разделяется на составные части: поставка и транспорт массы, измельчение, флотация,

сушка, водообеспечение, отвод хвостов обогащения. Знание законов распределения случайных величин на каждом этапе технологического процесса дает возможность определить точечные и интервальные оценки электропотребления [4, 5].

Для основных потребителей обогатительной фабрики — мельниц, дробилок и др. — получены линейные уравнения регрессии между расходом электроэнер-

гии и производительностью агрегата [6]. Для выявления долгосрочного планирования удельного расхода в зависимости от времени года используются статистические методы определения точечных и интегральных оценок, уравнения регрессии [7, 8]. Вопросы применения метода множественной регрессии при планировании электропотребления промышленных предприятий приведены в [9].

В соответствии с этим методом к основным факторам, влияющим на удельный расход электроэнергии, были отнесены следующие:

- переработка рудной массы в месяц;
- содержание основных компонентов;
- выход натурального концентрата.

Количество значимых факторов с точки зрения влияния их на потребление электроэнергии можно уточнить путем экспертных оценок на основе метода ранговой корреляции [10, 11].

Наиболее энергоемким технологическим процессом является процесс измельчения. Для анализа и планирования электропотребления, правильной разработки методики нормирования расхода электроэнергии и оптимизации процесса измельчения по энергетическим характеристикам на обогатительных фабриках, а также оценки точности расчета расхода электроэнергии необходимо, прежде всего, установить энергоемкость каждой технологической операции и место, занимаемое этой операцией в общем балансе электропотребления. Ввиду случайного характера расхода электроэнергии [12, 13] на измельчение в различных режимах рекомендуется все мельницы разбивать на группы по признакам: тип, размер, место в технологической цепи. При наличии параллельных линий и совпадении семейства прямых линий возможность объединения массивов информации регрессии рекомендуется проверять по критерию Стьюдента [14, 15].

Энергетические характеристики мельниц могут быть получены при обработке массивов информации, включающих в себя данные о часовой или суточной производительности, потребляемой приводом мельниц мощности, расходе электроэнергии в сутки. На характер электропотребления влияет степень загрузки мельниц рудой. При этом в диапазоне производительности 80 – 120 т/ч наблюдается пропорциональная зависимость между приращениями мощности и производительностью. Энергетические характеристики мельниц в установленном режиме работы отвечают уравнениям линейной регрессии с высокими значениями коэффициента корреляции [16, 17].

Точность исходных данных массивов информации зависит от методов регистрации параметров режима электропотребления. Применяются прямые и косвенные методы регистрации параметров режима с использованием технических средств [18, 19].

Технологический удельный расход электроэнергии при измельчении может быть получен на основании понятия энергетического потенциала, который определяется в процессе выработки единицы продукции, а также непосредственно по энергетическим характеристикам оборудования.

На величину удельного расхода электроэнергии [20, 21], потребляемой мельницей мокрого самоизмельчения (ММС), оказывают влияние степень ее загрузки, критическая скорость вращения барабана. Снижения удельного расхода электроэнергии можно достичь при эксплуатации мельниц с оптимальной загрузкой. При оптимальной загрузке рудной массой с коэффициентом заполнения полезного объема мельницы $\varphi = (40 \div 43)\%$ обеспечивается производительность $130 \div 135$ т/ч и поддерживается постоянство потребляемой мощности на уровне $1100 \div 1150$ кВт.

Для оценки параметров фактического режима работы мельниц ММС были произведены комплексные исследования.

Выборка информации о рабочем режиме мельниц ММС и мельниц шаровых с разгрузкой через решетку МШР каждой линии по методу пассивного эксперимента осуществлялась случайным образом с периодичностью 5–7 мин и в течение 3–4 ч в разное время суток и разные дни недели. Массивы информации имели объем 24–36 случайных реализаций режима для каждой технологической линии, общий массив содержит около 300 случайных реализаций.

Анализ исходных массивов показал, что в установившемся режиме такие параметры технологического процесса, как шум мельниц, давление масла в гидросистеме мельницы, плотность пульпы, изменяются в незначительных пределах и могут быть приняты практически постоянными.

Основные параметры технологического процесса: производительность мельницы Q , т/ч, количество воды, поступа-

ющее в мельницу, и потребляемая мощность P , кВт, изменяются случайным образом.

Цель работы

В соответствии с поставленной целью в ходе исследования освещены следующие вопросы: произведен анализ статистических данных мельниц; проведен корреляционный анализ мощности и производительности ММС; произведено определение удельного расхода электроэнергии ММС [22].

Анализ статистических данных мельниц

Массивы информации случайных реализаций по производительности и потребляемой мощности были обработаны методами математической статистики. В табл. 1, 2 представлены результирующие расчеты основных статистических параметров, характеризующих работу мельниц ММС: производительности Q , т/ч, и потребляемой мощности P , кВт, для установившегося рабочего режима

Таблица 1

**Энергетические характеристики мельниц самоизмельчения
(производительность мельницы, мощность, потребляемая двигателем мельницы)
Energy characteristics of AG mills (mill output, power consumed by the mill motor)**

Номер мельницы	Производительность мельницы, Q , т/ч					Мощность, потребляемая электродвигателем мельницы, P , кВт				
	m_o	S_o	V_o	A_o	E_o	m_p	S_p	V_p	A_p	E_p
ММС-1	125,2	21,6	0,173	-1,193	0,04	1192,8	33,9	0,028	-3,171	8,854
ММС-2	138,9	12,6	0,091	0,393	-0,31	1057,1	128,6	0,122	-1,019	-0,146
ММС-3	145,3	4,3	0,03	1,661	1,726	1187,5	13,8	0,012	1,001	0,234
ММС-4	138	11,8	0,086	-0,501	-0,402	1007,7	37,3	0,037	-0,868	1,098
ММС-5	151,3	25,7	0,17	0,624	0,777	1185,1	153,6	0,13	-1,027	0,345
ММС-6	125,2	8,3	0,066	-1,07	1,398	1220,4	27,5	0,023	-0,971	-0,032
ММС-7	132,7	5,4	0,041	0,849	-0,049	1128,8	12,2	0,011	-0,653	-0,719
ММС-8	127,6	5,6	0,044	-0,997	0,156	975,4	43,6	0,045	2,658	5,461
ММС-9	148,1	7,6	0,051	0,351	-1,547	1179,3	3,94	0,003	0,861	-0,635
ММС-10	132,7	5,5	0,041	-0,222	-1,03	1104,8	45,8	0,041	0,271	-0,417

Таблица 2

Энергетические характеристики мельниц самоизмельчения (удельный расход электроэнергии, коэффициенты корреляции и уравнения регрессии)
Energy characteristics of AG mills mills (specific power consumption, correlation coefficients and regression equations)

Номер мельницы	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т					Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии			
	m_{ω}	S_{ω}	V_{ω}	A_{ω}	E_{ω}	r_{QP}	$P = a_1 + b_1 \cdot Q$	$r_{Q\omega}$	$\omega = a_2 + b_2 \cdot Q$
ММС-1	6,64	1,995	0,203	1,543	1,016	0,534	$1078,1+0,916 \cdot Q$	-0,98	$21,2-0,0907 \cdot Q$
ММС-2	7,68	1,221	-0,159	-0,729	-0,666	-0,19	$1326-1,936 \cdot Q$	-0,683	$16,87-0,0662 \cdot Q$
ММС-3	8,18	0,235	0,029	-0,776	0,499	0,215	$1088,3+0,083 \cdot Q$	-0,915	$15,36-0,0494 \cdot Q$
ММС-4	7,35	0,678	0,092	-0,009	-0,259	0,062	$908,8+0,196 \cdot Q$	-0,935	$14,74-0,0535 \cdot Q$
ММС-5	8,04	1,823	0,227	1,321	0,123	0,134	$1064,2+0,8 \cdot Q$	-0,71	$15,66-0,0604 \cdot Q$
ММС-6	9,79	0,744	0,076	1,901	3,656	0,062	$1194,5+0,207 \cdot Q$	-0,936	$20,34-0,0843 \cdot Q$
ММС-7	8,51	0,379	0,045	-0,135	-0,404	-0,266	$1208,7+0,602 \cdot Q$	-0,972	$17,57-0,0682 \cdot Q$
ММС-8	7,66	0,432	0,656	0,557	-1,007	0,197	$780,8+1,525 \cdot Q$	-0,659	$14,12-0,0607 \cdot Q$
ММС-9	8,0	0,413	0,052	-0,302	-1,525	-0,426	$1211,5-0,217 \cdot Q$	-0,998	$16,05-0,0545 \cdot Q$
ММС-10	8,34	0,454	0,054	-0,324	-0,858	-0,128	$963,9+1,062 \cdot Q$	-0,673	$15,72-0,0656 \cdot Q$

мельниц. Также приведены численные характеристики случайных величин Q , P и ω : математическое ожидание (m_Q, m_P, m_{ω}); среднеквадратичное отклонение (S_Q, S_P, S_{ω}); коэффициенты вариации (V_Q, V_P, V_{ω}); коэффициенты скошенности или асимметрии (A_Q, A_P, A_{ω}); коэффициенты эксцесса (E_Q, E_P, E_{ω}); коэффициенты корреляции ($r_{QP}, r_{Q\omega}$) и коэффициенты линейного уравнения регрессии a и b .

Значения коэффициентов асимметрии, эксцесса и вариации указывают на близость закона распределения случайных величин для мельниц ММС к нормальному. Исключения составляют ММС-1 и ММС-8, что может быть вызвано случайной ошибкой при формировании массива. Незначительные колебания величины математического ожидания по производительности для всех 10 мельниц ММС в диапазоне (125,2÷151,3) т/ч и по величине потребляемой мощности (975,4÷1220,4) кВт позволяют предположить, что технологический процесс ведется в области оптимального рабочего режима.

Отклонение потребляемой мощности и производительности ММС от математического ожидания характеризуется величинами среднеквадратичного отклонения: $S_Q = (5,4 \div 25,7)$ т/ч; $S_P = (3,94 \div 153,6)$ кВт.

Изменение величины и знака коэффициента корреляции r_{QP} в довольно широких пределах от $\pm 0,062$ до 0,534 не позволяет в отмеченном диапазоне изменений параметров сделать заключение о наличии определенной корреляционной зависимости между потребляемой мощностью P и производительностью Q . На это также указывает различный вид уравнений регрессии и изменение знака и величины зависимого коэффициента « b » в соотношении 1:6. Следует отметить, что мельницы работают не в оптимальном режиме, а либо с незаполненным ($r_{QP} < 0$), либо с переполненным ($r_{QP} > 0$) барабаном.

Можно предположить, что изменение знака и величины зависимого коэффициента линейного уравнения регрессии определяется наличием сложного ха-

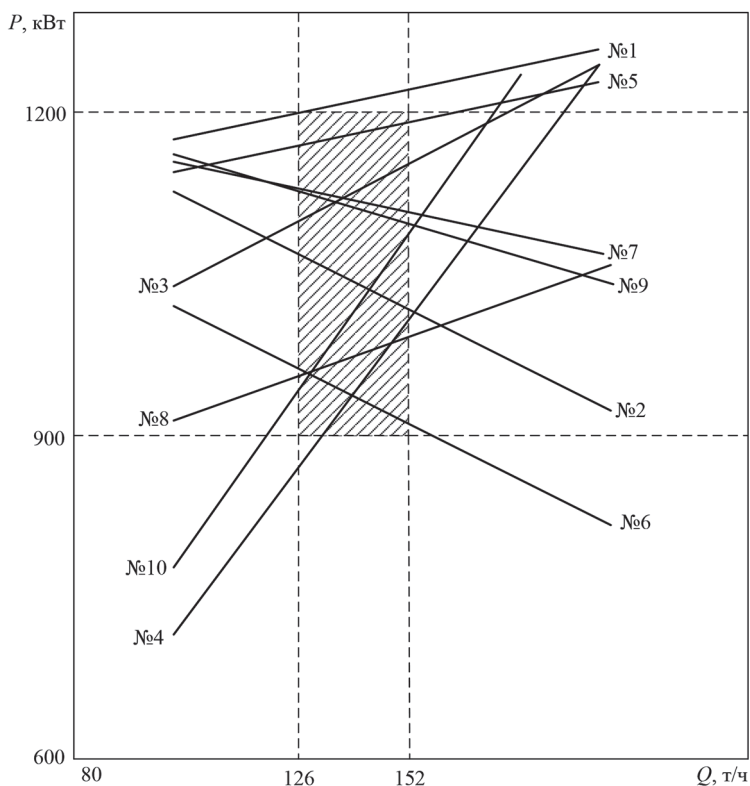


График зависимости потребляемой мощности от производительности
Graph of power consumption versus performance

рактера зависимости удельного расхода электроэнергии от производительности мельницы.

Графическая интерпретация (рисунок) уравнений связи объектов исследования показывает, что график зависимости $P = f(Q)$ представлен областью, а не точкой, что характерно для измельчительных установок и комплексов.

Увеличение производительности мельницы ММС за пределами оптимальной области, в которой достигается максимум выхода продукта расчетного класса, приводит к уменьшению выхода продукта расчетного класса и увеличению удельного расхода электроэнергии.

Семейство построенных линий регрессии $P = f(Q)$ для каждой мельницы ММС определяет рабочую зону в достаточно узком диапазоне изменений про-

изводительности и потребляемой мощности.

Для рабочей зоны мельниц удельный расход электроэнергии (ω) определяется отношением среднего значения потребляемой мощности к средней величине часовой производительности (см. табл. 2). Правомерность определения ω базируется на свойствах математического ожидания случайной величины. Удельный расход электроэнергии для мельниц типа ММС изменяется в пределах $(7,34 \div 9,84)$ кВт·ч/т.

Корреляционный анализ мощности и производительности ММС

Для выявления корреляционной связи между основными параметрами технологического процесса необходимо про-

ведение активного эксперимента в широком диапазоне изменений Q и P . С этой целью было проведено исследование изменения мощности, потребляемой мельницами в период загрузки и разгрузки на мельницах ММС-5 и ММС-8.

Исходный массив информации в соответствии с разработанной методикой исследования был подвергнут математической обработке для выявления взаимозависимости между P и Q . Статистические характеристики случайных величин P и Q представлены в табл. 3.

Критериальная проверка коэффициента корреляции производилась по критерию Фишера на основании распределения Стьюдента. Если $t_p > t_{кр}$, то гипотеза о том, что выборочный коэффициент корреляции имеет случайные отклонения от нуля при генеральной совокупности с параметром $r = 0$, отклоняется. Критическое значение $t_{кр}$ определяется по таблицам распределения Стьюдента при $\alpha = 5\%$ и числе степеней свободы $\gamma = (n - 2)$, где $n = 24$. Для исследуемых параметров значение коэффициента корреляции оказалось равным $r = 0,734$ и значение параметра $t = 5,0$, что больше величины $t_{кр} = 2,074$.

Доверительные границы для коэффициента корреляции определяются по формуле

$$r - t \cdot S_r \leq \rho \leq R + t \cdot S_r, \quad (1)$$

где $S_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}} = 0,096$, $t = 2,074$ – табличное значение коэффициента распределения Стьюдента.

Отсюда: ДИ (ρ) = [0,5; 0,93].

Определение удельного расхода электроэнергии ММС

Удельный расход электроэнергии мельницами ММС может быть рассчитан по следующему выражению:

$$\omega = \frac{a}{Q} + b = \frac{455,68}{Q} + 3,83.$$

Доверительные границы для удельного расхода электроэнергии определяются по формуле

$$\omega = m_\omega \pm t \cdot S_\omega. \quad (2)$$

При нормальном законе распределения и доверительной вероятности $0,95 \cdot t = 1,96$ доверительные границы ω при оптимальной загрузке, принимаемой равной $Q = 130$ т/ч, и при средней часовой производительности для 10 мельниц (см. табл. 1) $Q_{cp} = 136,5$ т/ч ($S_{cp} = 9,44$ т/ч) равны: ДИ (ω) = [6,65; 8,03].

При этом различие в значениях величины удельного расхода по средним значениям составляет:

Таблица 3

Корреляционный анализ мощности и производительности мельниц самоизмельчения Correlation analysis of power and productivity of AG mills

Статистические характеристики	Исследуемые параметры	
	мощность, P , кВт	производительность, Q , т/ч
Среднее значение	883,7	121,2
Стандарт	227,8	56,5
Коэффициент вариации, V_x	0,258	0,466
Асимметрия, A_x	-0,77	-0,33
Экссесс, E_x	-0,06	-0,75
Коэффициент корреляции, $r_{Q\omega}$	0,91	
Уравнение регрессии, $y = a + b \cdot x$	$P = 4391,1 + 3,67 \cdot x$	

• при значении $Q = 150$ т/ч — $\omega_{cp} = 7,34$ кВт·ч/т;

• при значении $Q = 136,5$ т/ч — $\omega_{cp} = 6,88$ кВт·ч/т.

Значение среднего удельного расхода электроэнергии для 10 мельниц ММС (см. табл. 2, $\omega_{cp} = 8,34$ кВт·ч/т): $S_{cp} = 0,84$ кВт·ч/т.

Значение удельного расхода электроэнергии по значениям средней часовой производительности 10 мельниц ММС и средней потребляемой мощности электродвигателями:

$$\omega_{cp} = \frac{P_{cp}}{Q_{cp}} = \frac{1123,89}{136,5} = 8,23 \text{ кВт·ч/т.}$$

Относительная ошибка в определении удельного расхода электроэнергии по табл. 2 составляет:

$$S_{\omega_{cp}} = \frac{8,34 - 8,23}{8,34} \cdot 100\% = 1,3\% .$$

Относительная ошибка в определении удельного расхода электроэнергии по уравнению регрессии составляет:

$$S_{\omega_{cp}} = \frac{8,34 - 6,88}{8,34} \cdot 100\% = 17,5\% .$$

Доверительный интервал для удельного расхода электроэнергии по измельчению мельницами ММС при уровне значимости $\alpha = 0,05$, $t = 1,96$: ДИ (ω) = [6,69; 9,98].

Выводы

В результате исследований получены следующие выводы.

1. Произведена оценка потребления электроэнергии мельниц обогатительной фабрики с применением методов статистического и корреляционного анализа.

2. Методика расчета энергетических характеристик и удельного расхода электроэнергии по мельницам обогатительной фабрики содержит необходимое и достаточное число критериальных проверок исходных статистических данных,

позволяет получить основные параметры закона распределения, оценку коэффициента корреляции и коэффициентов линейного уравнения регрессии между отдельными выборками.

3. Значения коэффициентов асимметрии, эксцесса и вариации указывают на близость закона распределения случайных величин для мельниц ММС к нормальному. Исключения составляют ММС-1 и ММС-8, что может быть вызвано случайной ошибкой при формировании массива. Незначительные колебания величины математического ожидания по производительности для всех 10 мельниц ММС в диапазоне $(125,2 \div 151,3)$ т/ч и по величине потребляемой мощности $(975,4 \div 1220,4)$ кВт позволяют предположить, что технологический процесс ведется в области оптимального рабочего режима.

4. Отклонение потребляемой мощности и производительности ММС от математического ожидания характеризуется величинами среднеквадратичного отклонения: $S_0 = (5,4 \div 25,7)$ т/ч; $S_p = (3,94 \div 153,6)$ кВт.

5. Проверка по критерию Стьюдента подтвердила при $\alpha = 0,05$ значимость коэффициента корреляции между производительностью Q и удельным расходом электроэнергии ω и коэффициентов линейного уравнения регрессии.

6. При нормальном законе распределения и доверительной вероятности $0,95 \cdot t = 1,96$ доверительные границы ω при оптимальной загрузке, принимаемой равной $Q = 130$ т/ч, и при средней часовой производительности для 10 мельниц (см. табл. 1) $Q_{cp} = 136,5$ т/ч ($S_{cp} = 9,44$ т/ч) равны: ДИ (ω) = [6,65; 8,03].

7. Удельный расход электроэнергии для ММС при $m_{\omega} = 8,3$ кВт·ч/т определяется доверительным интервалом: ДИ (ω) = [6,69; 9,98] кВт·ч/т.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анциферов С. И., Булгаков С. Б., Карачевцева А. В., Тимашев М. В. Усовершенствованная конструкция струйной противоточной мельницы для горнорудной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-2. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_5.
2. Голик В. И. Перспективное направление восстановления потенциала Сагона (РСО-Алания) // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 68–75. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-68-75.
3. Босиков И. И., Ключев Р. В., Майер А. В., Стась Г. В. Разработка метода анализа и оценки оптимального состояния аэрогазодинамических процессов на угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 1. – С. 97–106. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.
4. Вялкова С. А., Моргоева А. Д., Гаврина О. А. Разработка гибридной модели прогнозирования потребления электрической энергии для горно-металлургического предприятия // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 3. – С. 486–493. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
5. 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.
6. Klyuev R. V., Morgoev I. D., Morgoeva A. D., Gavrina O. A., Martyushev N. V., Efremenkova E. A., Mengxu Q. Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review // Energies. 2022, vol. 15, no. 23, article 8919. DOI: 10.3390/en15238919.
7. Бурянина Н. С., Королюк Ю. Ф., Малеева Е. И., Лесных Е. В. Линии электропередач с уменьшенным количеством проводов в горных территориях // Устойчивое развитие горных территорий. – 2018. – № 3. – С. 404–410. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-404-410.
8. 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.
9. Капанский А. А. Методы решения задач оценки и прогнозирования энергетической эффективности // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2019. – Т. 11. – № 2 (42). – С. 103–115.
10. Санаев Н. К., Тынянский В. П. Определение методом ранговой корреляции значимых факторов, влияющих на изнашивание деталей цилиндропоршневой группы // Вестник машиностроения. – 2018. – № 12. – С. 57–60.
11. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Куликова Е. Ю. Иерархическая структура аэрологических рисков в угольных шахтах // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14. – № 2. – С. 276–285. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.
12. 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.
13. Gunkel P. A., Jacobsen H. K., Bergaentzlé C.-M., Scheller F., Andersen F. M. Variability in electricity consumption by category of consumer: The impact on electricity load profiles // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2022, vol. 147, article 108852. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108852.
14. Gagnon Ph., Hayashi Y. Theoretical properties of Bayesian Student-t linear regression // Statistics & Probability Letters. 2022, vol. 193, article 109693. DOI: 10.1016/j.spl.2022.109693.
15. Wang J., Shao W., Zhang X., Qian J., Song Zh., Peng Zh. Nonlinear variational Bayesian Student's-t mixture regression and inferential sensor application with semisupervised data // Journal of Process Control. 2021, vol. 105, pp. 141–159. DOI: 10.1016/j.jprocont.2021.07.013.

16. 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.
17. Naha R., Garg S., Battula S. K., Amin M. B., Georgakopoulos D. Multiple linear regression-based energy-aware resource allocation in the Fog computing environment // *Computer Networks*. 2022, vol. 216, article 109240. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.109240.
18. Ji Q., Zhang S., Duan Q., Gong Y., Li Y., Xie X., Bai J., Huang C., Zhao X. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion // *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 12, article 2148. DOI: 10.3390/math10122148.
19. 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.egyr.2021.08.103.
20. Yousaf A., Asif R. M., Shakir M., Rehman A. U., Adrees M. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy // *Sustainability*. 2021, vol. 13, no. 11, article 6199. DOI: 10.3390/su13116199.
21. Hamed M. M., Ali H., Abdelal Q. 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. Kanté M., Li Y., Deng S. Scenarios analysis on electric power planning based on multi-scale forecast: A case study of Taoussa, Mali from 2020 to 2035 // *Energies*. 2021, vol. 14, no. 24, article 8515. DOI: 10.3390/en14248515. **WJCI**

REFERENCES

1. Antsiferov S. I., Bulgakov S. B., Karachevceva A. V., Timashev M. V. Advanced design of the countercurrent jet mill for the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 12-2, pp. 5 – 16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_122_0_5.
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. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Mayer A. V., Stas G. V. Development of a method for analyzing and evaluating the optimal state of aerogasodynamic processes in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 97 – 106. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-97-106.
4. Vyalkova S. A., Morgoeva A. D., Gavrina O. A. Development of a hybrid model for predicting the consumption of electrical energy for a mining and metallurgical enterprise. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 3, pp. 486 – 493. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-3-486-493.
5. 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 Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022, vol. 333, no. 7, pp. 115 – 125. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/7/3527.
6. Klyuev R. V., Morgoev I. D., Morgoeva A. D., Gavrina O. A., Martyushev N. V., Efremenkov E. A., Mengxu Q. Methods of forecasting electric energy consumption: A literature review. *Energies*. 2022, vol. 15, no. 23, article 8919. DOI: 10.3390/en15238919.
7. Buryanina N. S., Korolyuk Yu. F., Maleeva E. I., Lesnykh E. V. Power transmission lines with a reduced number of wires in mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2018, no. 3, pp. 404 – 410. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-10-3-404-410.
8. 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.

9. Kapansky A. A. Methods for solving the problems of evaluation and forecasting energy efficiency. *Kazan state power engineering university bulletin*. 2019, vol. 11, no. 2 (42), pp. 103–115. [In Russ].

10. Sanaev N. K., Tynyanskiy V. P. Determination of significant factors, influencing on the wear of cylinder-piston group parts, by the method of rank correlation. *Vestnik mashinostroeniya*. 2018, no. 12, pp. 57–60. [In Russ].

11. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kulikova E. Yu. Hierarchical structure of aerological risks in coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 276–285. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-276-285.

12. 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.

13. Gunkel P. A., Jacobsen H. K., Bergaentzlé C.-M., Scheller F., Andersen F. M. Variability in electricity consumption by category of consumer: The impact on electricity load profiles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022, vol. 147, article 108852. DOI: 10.1016/j.ijepes.2022.108852.

14. Gagnon Ph., Hayashi Y. Theoretical properties of Bayesian Student-t linear regression. *Statistics & Probability Letters*. 2022, vol. 193, article 109693. DOI: 10.1016/j.spl.2022.109693.

15. Wang J., Shao W., Zhang X., Qian J., Song Zh., Peng Zh. Nonlinear variational Bayesian Student's-t mixture regression and inferential sensor application with semisupervised data. *Journal of Process Control*. 2021, vol. 105, pp. 141–159. DOI: 10.1016/j.jprocont.2021.07.013.

16. 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.

17. Naha R., Garg S., Battula S. K., Amin M. B., Georgakopoulos D. Multiple linear regression-based energy-aware resource allocation in the Fog computing environment. *Computer Networks*. 2022, vol. 216, article 109240. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.109240.

18. Ji Q., Zhang S., Duan Q., Gong Y., Li Y., Xie X., Bai J., Huang C., Zhao X. Short- and medium-term power demand forecasting with multiple factors based on multi-model fusion. *Mathematics*. 2022, vol. 10, no. 12, article 2148. DOI: 10.3390/math10122148.

19. 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.

20. Yousaf A., Asif R. M., Shakir M., Rehman A. U., Adrees M. An Improved residential electricity load forecasting using a machine-learning-based feature selection approach and a proposed integration strategy. *Sustainability*. 2021, vol. 13, no. 11, article 6199. DOI: 10.3390/su13116199.

21. Hamed M. M., Ali H., Abdelal Q. 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. Kanté M., Li Y., Deng S. Scenarios analysis on electric power planning based on multi-scale forecast: A case study of Taoussa, Mali from 2020 to 2035. *Energies*. 2021, vol. 14, no. 24, article 8515. DOI: 10.3390/en14248515.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

*Хетагуров Валерий Николаевич*¹ — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: hetag@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2151-9309,
*Гаврина Оксана Александровна*¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Gavrina-Oksana@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9712-9075,
*Плиева Мадина Тодиковна*¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: madosya80@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2633-0617,
¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет).
Для контактов: Ключев Р.В., e-mail: kluev-roman@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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,
*V.N. Khetagurov*¹, Dr. Sci. (Eng.),
Professor, e-mail: hetag@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-2151-9309,
*O.A. Gavrina*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: Gavrina-Oksana@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-9712-9075,
*M.T. Plieva*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: madosya80@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0003-2633-0617,
¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy
(State Technological University),
362021, Vladikavkaz, Russia.
Corresponding author: R.V. Klyuev, e-mail: kluev-roman@rambler.ru.

Получена редакцией 16.01.2023; получена после рецензии 28.02.2023; принята к печати 10.04.2023.
Received by the editors 16.01.2023; received after the review 28.02.2023; accepted for printing 10.04.2023.

