

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ ЭКСКАВАТОРОВ

Р.В. Ключев^{1,3}, О.А. Гаврина¹, В.Н. Хетагуров¹, О.А. Фоменко²

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет), Владикавказ, Россия;

² Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия;

³ Московский политехнический университет, Москва, Россия

Аннотация: Актуальным является техническое обоснование норм электропотребления и целесообразности их увязки с факторами, определяющими степень влияния наиболее существенных производственных показателей на изменение расходов электроэнергии. Для правильной и исчерпывающей характеристики электропотребления требуется установить количественную оценку степени влияния горно-технологических факторов и режимов работы механизмов для выявления ключевых факторов и выявить закономерности электропотребления. Целью работы является комплексное исследование электропотребления по отдельным технологическим операциям горного производства карьера и прогнозирование норм расхода на основе применения вероятностных методов расчета. Закономерности электропотребления обнаружены при помощи вероятно-статистических методов расчета и аппарата математического моделирования. Приведены эмпирические и теоретические зависимости расхода электроэнергии экскаватора от параметров черпания. Представлены результаты расчетов параметров корреляции и уравнений зависимостей расхода электроэнергии на экскаваторные работы от выделенных факторов. Исследован характер электропотребления экскаваторов, определены горно-технологические факторы, оказывающие наибольшее влияние на их энергетические показатели. Построены энергетические характеристики экскаваторов в виде зависимостей общего расхода электроэнергии в функции производительности Π , горно-геологических свойств грунта K и угла поворота на выгрузку α . Установлено, что коэффициент корреляции, который позволяет оценить степень влияния исследуемых факторов на электропотребление, достигает значения 0,774, что свидетельствует о достаточной степени влияния выбранных параметров на величину электропотребления.

Ключевые слова: расход электроэнергии, экскаватор, горно-технологические факторы, производительность, коэффициент корреляции; закон распределения, карьер, угол поворота.

Для цитирования: Ключев Р.В., Гаврина О.А., Хетагуров В.Н., Фоменко О.А. Исследование горно-технологических факторов, влияющих на потребление энергии экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 146–157. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-146-157.

Analysis of geotechnical factors influencing power consumption of excavators

R.V. Klyuev^{1,3}, O.A. Gavrina¹, V.N. Khetagurov¹, O.A. Fomenko²

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

² Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russia;

³ Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia.

Abstract: Relevance. The technical justification of power consumption standards and the feasibility of linking them with factors that determine the degree of influence of the most significant production indicators on changes in electricity consumption is relevant. For the correct and most complete characteristics of power consumption, it is necessary to establish a quantitative assessment of the degree of influence of mining and technological factors and operating modes of mechanisms to identify the most significant factors and establish patterns of power consumption. Purpose and methods. The aim of the work is a comprehensive study of power consumption for individual technological operations of the mining quarry and forecasting consumption rates based on the application of probabilistic calculation methods. Results. To find the patterns of power consumption, probabilistic-statistical methods of calculation and mathematical modeling apparatus are used. Empirical and theoretical dependences of the electric power consumption of the excavator on the scooping parameters are given. The results of calculating the correlation parameters and equations of the dependences of the energy consumption for excavation on selected factors are presented. Conclusions. The nature of the power consumption of excavators is investigated, mining and technological factors are identified that have the greatest impact on their energy performance. The energy characteristics of excavators are constructed in the form of dependences of the total energy consumption as a function of productivity P , mining and geological properties of soil K and the angle of rotation for unloading α . It was found that the correlation coefficient, which allows us to assess the degree of influence of the studied factors on power consumption, reaches a value of 0.774, which indicates a sufficient degree of influence of the selected parameters on the amount of power consumption.

Key words: power consumption, excavator, mining factors, productivity, correlation coefficient, law of distribution, quarry, the power consumption, angle of rotation.

For citation: Klyuev R.V., Gavrina O.A., Khetagurov V.N., Fomenko O.A. Analysis of geotechnical factors influencing power consumption of excavators. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(11-1):146-157. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-146-157.

Введение

Одним из путей рационального энергосбережения в народном хозяйстве является совершенствование энергетического нормирования, внедрение прогрессивных научно обоснованных норм расхода электроэнергии. Взаимосвязь нормирования с учетом расхода энергоресурсов, планированием энергоснабжения, контролем и регулированием электропотребления, анализом энергоиспользования способствуют совершенствованию управления энергетическим хозяйством.

Предприятия горнодобывающей промышленности являются достаточно энергоемкими, их доля электропотребления составляет значительную часть в общем энергобалансе Российской Федерации. Увеличение расхода элек-

троэнергии на предприятиях горной отрасли определяется ростом объемов добычи полезного ископаемого, изменением в последние годы горно-геологических условий (увеличение объемов вскрыши, повышение крепости пород и т.д.), использованием современных мощных машин и механизмов. Отмеченными обстоятельствами подтверждается необходимость анализа, рационального использования электропотребления, научно обоснованного нормирования и прогнозирования расхода электроэнергии. В связи с этим необходимо осуществить техническое обоснование норм электропотребления и связать их с факторами, характеризующими влияние наиболее существенных технологических факторов на изменение расхода электроэнергии [1].

Для правильной и исчерпывающей характеристики электропотребления требуется установить количественную оценку степени влияния горно-технологических факторов и режимов работы механизмов для выявления ключевых факторов и выявить закономерности электропотребления. В работе рассматривается высокогорный карьер одного из крупнейших горно-металлургических комбинатов (ГМК) РФ. Производственные площадки открытой добычи полезных ископаемых карьера расположены на отметке 2285 – 2435 м.

Цель работы

Целью работы является комплексное исследование электропотребления по отдельным технологическим операциям горного производства карьера и его прогнозирование.

Рекомендации по результатам исследования позволят научно обосновать нормы расхода электроэнергии на единицу горной массы и в дальнейшем наметить пути и средства сокращения потерь электроэнергии.

Анализ методов, используемых для определения электропотребления в горнорудной промышленности

Для установления норм расхода электроэнергии в горнодобывающей промышленности используются статистический, экспериментальный и расчетный методы.

Электропотребление карьера обусловлено потреблением электроэнергии на экскавацию и бурение. Рассмотрим возможность применения указанных методов для определения норм расхода электрической энергии на экскавацию и бурение.

В условиях горнодобывающего производства наиболее применим экспериментальный метод. В работе предлагается следующая реализация метода:

а) регистрируются энергетические характеристики:

$$P = f(\Pi),$$

где P – мощность, потребляемая из сети; Π – производительность каждого агрегата, входящего в технологический цикл, за единицу времени, например, час.

б) по энергетическим характеристикам $P = f(\Pi)$ строятся кривые $\mathcal{E}_y = f(\Pi)$, где \mathcal{E}_y – удельный расход электроэнергии путем ординат точек кривой на их абсциссы, т.е.:

$$\mathcal{E}_y = P / \Pi, \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{т}(\text{м}^3).$$

Расчетный метод заключается в оценке электропотребления по эмпирическим формулам. Сложность этого метода состоит в том, что многочисленные коэффициенты, входящие в расчетные формулы, недостаточно обоснованы. Подробно этот метод будет рассмотрен при расчете расхода электроэнергии на экскавацию и погрузку руды из взорванного забоя в кузов автосамосвала.

Улучшение энергетических характеристик внедряемого на горных предприятиях энергоемкого оборудования способствует техническому прогрессу и соответствующему росту расхода электроэнергии. При этом важными факторами, влияющими на рост электропотребления, являются коэффициент вскрыши на горных работах, увеличение объема вскрышных и добычных горных работ, вовлечение в переработку бедных руд и т.д.

Увеличение мощности карьерных машин и механизмов должно увязываться с совершенствованием системы электроснабжения горнодобывающих предприятий, одним из первых этапов проектирования которой является определение электрических нагрузок.

Вопросом установления соотношений между электропотреблением и тех-

нологическими параметрами в виде аналитических зависимостей применительно к энергоемким механизмам открытых горных работ посвящен ряд работ [2 – 14]. Эти зависимости необходимы для анализа электропотребления, нормирования расходов электроэнергии и планирования работы предприятий.

Одним из основных показателей эффективности использования электроэнергии на предприятиях является расход энергии. Необходимо учитывать специфику производства на горных предприятиях для правильного обоснования расхода электроэнергии, определяемого по утвержденным нормативам планирования электропотребления, благодаря чему достигается рациональное использование электроэнергии.

Статистический анализ зависимости электропотребления от факторов, которые оказывают на него значительное влияние, проводится для получения моделей электропотребления предприятий горной промышленности.

Получаемая степень оценки влияния технологических факторов количественно позволяет создать базу для расчета зависимостей расхода электроэнергии и построения энергетических характеристик различного оборудования горных предприятий. Показатели электропотребления — это сложные функции многих переменных составляющих, поэтому для нахождения закономерностей электропотребления используем вероятностно-статистические методы расчета и аппарат математического моделирования.

Анализ горно-технологических факторов, влияющих на электропотребление экскаваторов

Для решения вопросов рационального использования, нормирования

и планирования электропотребления необходимо следующее:

1. На основе экспериментальных исследований дать обоснование степени влияния основных производственных показателей на расход электроэнергии.

2. Определить закономерности электропотребления отдельных энергоемких механизмов и технологических операций горного производства.

3. Разработать научно-методические вопросы нормирования и прогнозирования электропотребления для предприятий открытой разработки полезных ископаемых.

Отличительной особенностью карьеров является значительное разнообразие режимов работы эксплуатируемого оборудования, зависящих от различных горно-геологических условий и технологических схем [3 – 6].

Для правильной и наиболее полной характеристики электропотребления следует иметь количественную оценку степени влияния каждого параметра, по которой можно выявить наиболее существенные факторы и установить закономерности электропотребления [1]. Экскаваторы, применяемые на открытых горных разработках, являются энергоемкими потребителями, работающими в весьма разнообразных условиях.

Такие параметры, как производительность P , горно-геологические свойства грунта K и угол поворота на выгрузку α непрерывно изменяются и оказывают влияние на изменение расхода электроэнергии. Поэтому для дальнейшего анализа степени влияния каждого фактора на величину электропотребления экскаваторами необходимо выделить прежде всего именно эти изменяющиеся факторы.

Наряду с тем на электропотребление оказывают влияние и другие техноло-

гические особенности работы экскаваторов. В практике работы экскаваторов на карьерах распространено уменьшение вместимости ковша для машин, работающих на тяжелых скальных породах и руде. При работе на более легких грунтах вместимость ковша остается стандартной для данного типа экскаватора. Кроме того, условия работы экскаваторов в карьере таковы, что им помимо основной операции — погрузки — приходится выполнять целый ряд дополнительных операций, таких, как подготовка забоя.

Все выделенные параметры, за исключением фактора, учитывающего горно-геологические свойства горной массы, могут постоянно регистрироваться в процессе работы и быть использованы для расчета электропотребления. Горно-геологические свойства горных пород невозможно определить через значение длительности цикла экскавации, так как на нее влияет длительность процесса копания и угол поворота на выгрузку.

Расход электроэнергии на экскаваторные работы определяется как выделенными главными факторами, так и другими второстепенными, нарушающими жесткую функциональную зависимость между основными показателями. В связи с этим расход электроэнергии экскаваторами можно рассматривать как случайную величину и для анализа электропотребления применять методы теории вероятностей, и, в частности, корреляционный анализ.

Материалом исследования послужили данные экспериментальных циклических замеров расхода электроэнергии и трех предварительно выделенных параметров Π , K и α экскаваторов. Чтобы иметь соответствующие изменения производительности, данные циклических замеров приводились к часовому отрезку времени, равному 1.

Часовую производительность определяют по формуле:

$$\Pi_{\text{ч}} = (q \cdot k_{\text{и}}) / t_{\text{ц}}, \quad (1)$$

где q — объем ковша, м^3 ; $k_{\text{и}}$ — коэффициент использования ковша; $t_{\text{ц}}$ — длительность цикла, ч.

При вычислении было принято допущение, что в течение часа экскаватор работал с углом поворота, равным углу поворота за цикл.

Предварительным условием каждого корреляционного исследования является установление области изменения признаков и характера их изменчивости. Для выявления закона изменчивости случайной величины по экспериментальным данным строят кривую распределения этой величины в виде гистограммы. При этом другие влияющие факторы должны оставаться постоянными.

Колебания расходов электроэнергии экскаваторами в зависимости от выбранных факторов целесообразно рассмотреть для выявления характера изменчивости по двумерному закону распределения расхода электроэнергии с каждым отдельно взятым параметром Π , K и α . Многомерный закон распределения всех параметров W , Π , K и α можно рассматривать сразу, но тогда останется неизвестен характер распределения расхода электроэнергии и каждого из параметров Π , K и α .

Между факторами, определяющими расход электроэнергии на экскавацию, наиболее тесная зависимость наблюдается между производительностью и категорией пород по экскавации. Значительно слабее связь у зависимости $\Pi = f(\alpha)$, между категорией породы и углом поворота связи практически нет.

Результаты проведенных исследований показывают, что значения W , Π , K и α представляют собой случайные величины. Поэтому, используя методы

теории корреляционного анализа, можно найти аналитическую зависимость расхода электроэнергии на экскавацию от параметров Π , K и α .

Для решения этой задачи предварительно рассмотрим парные зависимости между расходом электроэнергии на экскавацию и каждым из параметров, а также зависимости между Π , K и α .

Начальная задача корреляционного анализа состоит в определении формы связи. По экспериментальным данным для рассматриваемых факторов рассчитаны частные средние и построены эмпирические кривые (рис. 1). По изменению эмпирических зависимостей установлено, что в виде теоретического уравнения для этих зависимостей наиболее близким является уравнение прямой линии.

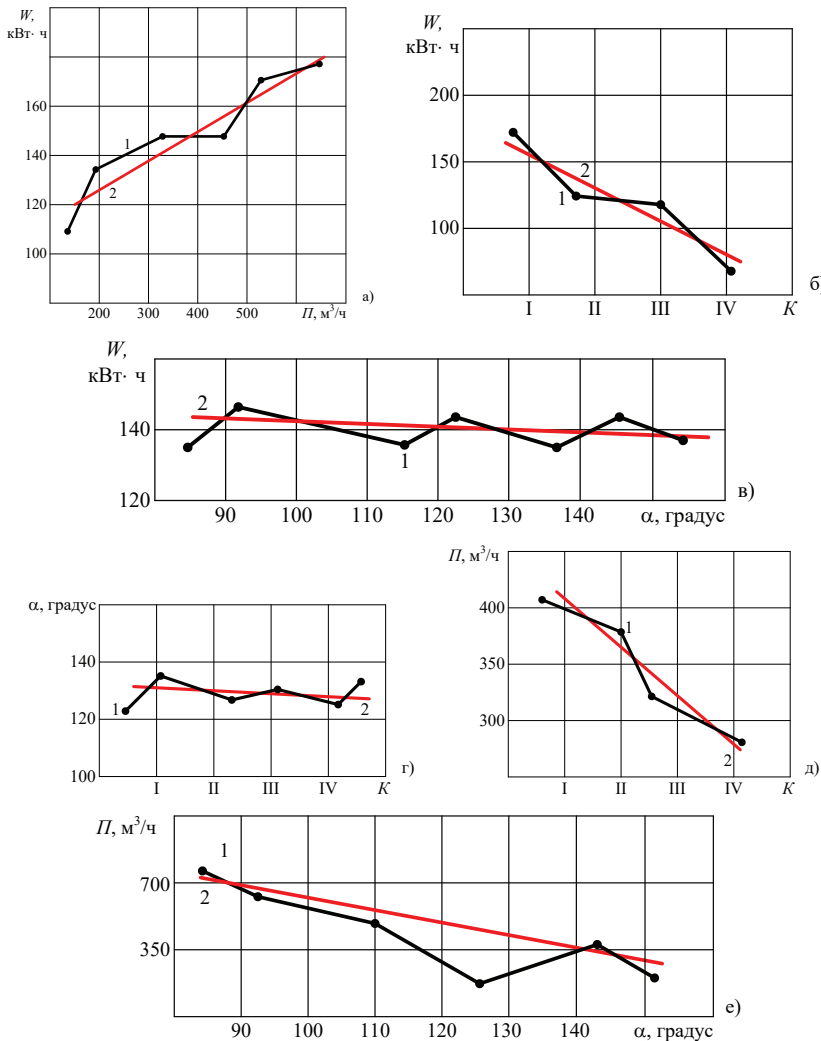


Рис. 1. Эмпирические (1) и теоретические (2) зависимости расхода электроэнергии экскаватора от параметров черпания

Fig. 1. Empirical (1) and theoretical (2) dependences of the electric power consumption of an excavator on scooping parameters

Для расчета параметров корреляции были составлены корреляционные таблицы и по известной методике рассчитаны средние значения рассматриваемых параметров, их средние квадратические отклонения (σ) и коэффициенты корреляции (r). Результаты расчетов параметров корреляции и уравнения этих зависимостей, найденных по способу наименьших квадратов, приведены в табл. 1.

Как видно из рис. 1, б расход электроэнергии на экскавацию уменьшается при увеличении категории породы. Такая закономерность объясняется характером зависимостей, показанных на рис. 1, а и е. С увеличением трудности экскавации (рис. 1, е) значительно падает производительность, а с уменьшением производительности (рис. 1, а) снижается расход электроэнергии [15, 16].

В приведенных парных зависимостях между расходом электроэнергии и параметрами черпания влияние каждого фактора на расход искажается неявным влиянием остальных параметров. Это подтверждается зависимо-

стями (рис. 1, з–е), показывающими наличие определённой связи между параметрами черпания.

О степени влияния параметров черпания друг на друга и на расход электроэнергии можно судить по коэффициентам корреляции, которые для рассматриваемых параметров приведены в табл. 1. Расход электроэнергии и параметры П, К и α корреляционно связаны между собой в неодинаковой степени. Для определения аналитической зависимости расхода электроэнергии от совокупности параметров черпания необходимо составить и решить уравнение множественной регрессии.

Эмпирические кривые соответствующих рассматриваемых парных зависимостей хорошо описываются линейными уравнениями, поэтому и многофакторную зависимость $W = f(\text{П}, \text{К}, \alpha)$ можно считать линейного типа:

$$W = a + b \cdot \text{П} + c \cdot \text{К} + d \cdot \alpha. \quad (2)$$

Находя коэффициенты данного уравнения способом наименьших квадратов из условия:

Таблица 1

Результаты расчетов параметров корреляции и уравнений зависимостей расхода электроэнергии на экскаваторные работы от выделенных факторов для экскаваторов
The results of calculating the correlation parameters and equations of the dependences of the energy consumption for excavation on selected factors for excavators

Зависимость	Параметр корреляции		Уравнение регрессии	
	\bar{W}	$\bar{П}$		
$W = f(\text{П})$	$\bar{W} = 152$	$\bar{П} = 423$	$r = 0,831$	$W = 0,217 \cdot \text{П} + 78$
	$\sigma_W = 3,2$	$\sigma_{\text{П}} = 175$		
$W = f(\text{К})$	$\bar{W} = 152$	$\bar{К} = 2,6$	$r = -0,572$	$W = -21,2 \cdot \text{К} + 181$
	$\sigma_W = 30,3$	$\sigma_{\text{К}} = 1,18$		
$W = f(\alpha)$	$\bar{W} = 152$	$\bar{\alpha} = 118,5$	$r = -0,128$	$W = -0,26 \cdot \alpha + 178$
	$\sigma_W = 30,3$	$\sigma_{\alpha} = 14,8$		
$\alpha = f(\text{К})$	$\bar{\alpha} = 121,4$	$\bar{К} = 2,65$	$r = -0,078$	$\alpha = -1,27 \cdot \text{К} + 140$
	$\sigma_{\alpha} = 14,8$	$\sigma_{\text{К}} = 1,09$		
$\text{П} = f(\alpha)$	$\bar{П} = 421$	$\bar{\alpha} = 117$	$r = -0,36$	$\text{П} = -3,2 \cdot \alpha + 870$
	$\sigma_{\text{П}} = 175$	$\sigma_{\alpha} = 14,8$		
$\text{П} = f(\text{К})$	$\bar{П} = 420,5$	$\bar{К} = 2,55$	$r = 0,782$	$\text{П} = -117 \cdot \text{К} + 630$
	$\sigma_{\text{П}} = 174$	$\sigma_{\text{К}} = 1,16$		

$$\Sigma(W - \bar{W})^2 = \min,$$

получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \Sigma W = n \cdot a + b \cdot \Sigma П + c \cdot \Sigma K + d \cdot \Sigma \alpha; \\ \Sigma W \cdot П = a \cdot \Sigma П + b \cdot \Sigma П^2 + c \cdot \Sigma П \cdot K + d \cdot \Sigma П \cdot \alpha; \\ \Sigma W \cdot K = a \cdot \Sigma K + b \cdot \Sigma П \cdot K + c \cdot \Sigma K^2 + d \cdot \Sigma K \cdot \alpha; \\ \Sigma W \cdot \alpha = a \cdot \Sigma \alpha + b \cdot \Sigma П \cdot \alpha + c \cdot \Sigma K \cdot \alpha + d \cdot \Sigma \alpha^2, \end{cases} \quad (3)$$

где n — число опытных данных.

Подставляя в систему (3) значения переменных, найденных из опытных данных для экскаваторов и решая ее относительно a , b , c и d , получаем расход электроэнергии, кВт·ч:

$$W_{\text{см}} = 87 + 0,112 \cdot П_{\text{см}} - 1,2 \cdot K_{\text{см}} + 12,3 \cdot \alpha_{\text{см}}. \quad (4)$$

Судить о степени влияния каждого параметра в отдельности на величину расхода электроэнергии по зависимости (4) еще нельзя. Коэффициенты регрессии в данной зависимости показывают среднюю величину прироста ($W_{\text{см}}$) при изменении соответствующего фактора на единицу. Однако сами факторы выражаются в натуральных единицах измерения, поэтому сравнение степени количественного влияния их на функцию невозможно. Произвести сравнение можно, выразив все переменные в долях их средних квадратических отклонений σ , т.е. осуществив стандартизацию переменных. Значение $W_{\text{см}}$ и факторов $П$, K и α в стандартизованном масштабе рассчитывают по формуле:

$$T_y = (y_i - \bar{y}) / \sigma_y, \quad (5)$$

где t_y — стандартизованное значение функции и аргумента.

В этом случае стандартизованные коэффициенты при любом факторе показывают, на сколько σ в среднем изменится функция при изменении соответствующего фактора на одно σ и, таким образом, становятся сравними между собой [1].

Зависимость $W_{\text{см}} = f(П, K, \alpha)$ в стандартизованном масштабе запишется в виде:

$$t_W = \beta_1 \cdot t_{П} + \beta_2 \cdot t_K + \dots + \beta_3 \cdot t_{\alpha}, \quad (6)$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — стандартизованные коэффициенты множественной регрессии; $t_W, t_{П}, t_K, t_{\alpha}$ — стандартизованные значения переменных $W, П, K$ и α .

Решая уравнение (6) аналогично (4), имеем в числовой форме:

$$t_W = 1,184 \cdot t_{П} + 0,386 \cdot t_K + 0,403 \cdot t_{\alpha}, \quad (7)$$

Коэффициенты $t_{П}, t_K$ и t_{α} показывают, как меняется расход электроэнергии в зависимости от изменения величины одного из параметров черпания при постоянном уровне других параметров [1]. Из уравнения следует, что на величину электропотребления при экскавации наибольшее влияние оказывает производительность экскаватора, величина же угла поворота и категория грунта влияют меньше и примерно в равной степени.

Для сравнения характера изменения электропотребления при различном сочетании основных факторов и степени их влияния все уравнения зависимости $W = f(П, K, \alpha)$ для экскаваторов сведены в табл. 2 [1]. Здесь же приведены значения множественных коэффициентов корреляции.

Из представленных уравнений видно, что коэффициенты при переменных изменяются при добавлении новых факторов, определяющих расход электроэнергии на экскавацию. При этом

Таблица 2

Уравнение регрессии и коэффициенты корреляции зависимости расхода электроэнергии от параметров Π , K , α , для экскаваторов

The regression equation and correlation coefficients of the dependence of energy consumption on the parameters P , K , α , for excavators

Учитываемый параметр	Уравнение регрессии в стандартизованном масштабе	Уравнение регрессии в натуральном масштабе	Коэффициент корреляции, r
Π	$t_W = 0,831 \cdot t_\Pi$	$W = 0,217 \cdot \Pi + 78$	0,831
K	$t_W = -0,572 \cdot t_K$	$W = -21,2 \cdot K + 181$	-0,572
α	$t_W = -0,128 \cdot t_\alpha$	$W = -0,26 \cdot \alpha + 178$	-0,128
Π, K	$t_W = 0,93 \cdot t_\Pi - 0,088 \cdot t_K$	$W = 0,183 \cdot \Pi - 2,21 \cdot K + 81$	0,685
Π, α	$t_W = 1,23 \cdot t_\Pi + 0,218 \cdot t_\alpha$	$W = 0,213 \cdot \Pi + 0,31 \cdot \alpha + 14$	0,91
Π, K, α	$t_W = 1,63 \cdot t_\Pi + 0,39 \cdot t_K + 0,402 \cdot t_\alpha$	$W = 0,312 \cdot \Pi + 9,8 \cdot K + 0,69 \cdot \alpha - 78$	0,774

растет и множественный коэффициент корреляции, характеризующий степень влияния рассматриваемых параметров на электропотребление. При трех учитываемых факторах он достигает 0,774, что свидетельствует о достаточной степени влияния выбранных параметров на величину электропотребления [1].

Установление количественной оценки степени влияния рассмотренных факторов на величину расхода электроэнергии позволяет проанализировать характер электропотребления экскаваторами на открытых горных разработках, выявить параметры черпания, в наибольшей мере определяющие расход электроэнергии, оценить необходимую точность их учета, правильно спланировать и разработать мероприятия по экономии электроэнергии [1, 14–16].

Выводы

В результате исследований получены следующие выводы:

1. Определено, что отсутствие функциональной зависимости между элект-

ропотреблением и определяющими его горно-геологическими, технологическими и организационными факторами обусловило применение математического аппарата теории вероятностей и математической статистики.

2. Исследован характер электропотребления экскаваторов, определены горно-технологические факторы, оказывающие наибольшее влияние на их энергетические показатели. Построены энергетические характеристики экскаваторов в виде зависимостей общего расхода электроэнергии в функции производительности Π , горно-геологических свойств грунта K и угла поворота на выгрузку α .

3. Установлено, что коэффициент корреляции, характеризующий степень влияния рассматриваемых параметров на электропотребление, достигает значения 0,774, что свидетельствует о достаточной степени влияния выбранных параметров на величину электропотребления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попова О.В. Электропотребление при добыче угля открытым способом: На примере ОАО ХК «Кузбассразрезголь»: Дис. ... канд. техн. наук. — Кемерово.: ГОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет», 2003. — 226 с.

2. Kaboli S., Selvaraj J., Rahim N. Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm // Energy, 2016, vol. 115, pp. 857–871.

3. *Meira de Oliveira E., Oliveira F., Cyrino F.* Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods // *Energy*, 2018, vol. 1441, pp. 776 – 788.

4. *Biel K., Glock C.* Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning // *Computers & Industrial Engineering*, 2016, vol. 101, pp. 243 – 259.

5. *Bornschelegl M., Bregulla M., Franke J.* Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies // *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 1351, pp. 644 – 656.

6. *Wei N., Li Ch., Peng X., Zeng F., Lu X.* Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 181, № 106187.

7. *He Y., Zheng Y., Xu Q.* Forecasting energy consumption in Anhui province of China through two Box-Cox transformation quantile regression probability density methods // *Measurement*, 2019, vol. 136, pp. 579 – 593.

8. *Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А.* Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020. – №2. – С. 283 – 290.

9. *Клюев Р.В., Босиков И.И., Егорова Е.В., Гаврина О.А.* Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с помощью математических моделей // *Устойчивое развитие горных территорий*. 2020. – №3. – С. 418–427.

10. *Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O., Madaeva M., Sokolov A.* Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1258. pp. 262 – 271.

11. *Golik V.I., Razorenov Yu. I., Efremenkov A.B.* Recycling of metal ore mill tailings // *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363 – 368.

12. *Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O.* Metal deposits combined development experience // *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, № 6, pp. 591 – 594.

13. *Габараев О.З., Дмитрак Ю.В., Дребенштедт К., Савелков В.И.* Закономерности взаимодействия разрушенных геоматериалов и рудовмещающего массива при обработке подработанных вкрапленных руд // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2017. – № 4. – С. 406 – 413.


14. *Голки В.И., Разоренов Ю.И., Каргинов К.Г.* Основа устойчивого развития РСО-Алания – горнодобывающая отрасль // *Устойчивое развитие горных территорий*. – 2017. – № 2. – С. 163 – 172.

15. *Стефанов В.К., Антоненков Д.В., Игумнова С.А.* Удельный расход электроэнергии карьерных экскаваторов работающих в условиях крайнего Севера // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2011. – № 54. – С. 32 – 38.

16. *Ляхомский А.В., Петухов С.В.* Энергоэффективность экскаваторных работ угледобывающих предприятий // *Промышленная энергетика*. – 2019. – № 1. – С. 38 – 41.

17. *Spiliotis E., Petropoulos F., Kourentzes N., Assimakopoulos V.* Cross-temporal aggregation: Improving the forecast accuracy of hierarchical electricity consumption // *Applied Energy*, 2020, vol. 2611, № 114339.

18. *Xiao J., Li Y., Xie L., Liu D., Huang J.* A hybrid model based on selective ensemble for energy consumption forecasting in China // *Energy*, 2018, vol. 15915, pp. 534–546.

19. *Carvalho J., Larsen P., Sanstad A., Goldman Ch.* Long term load forecasting accuracy in electric utility integrated resource planning // *Energy Policy*, 2018, vol. 119, pp. 410–422. 

REFERENCES

1. Popova O.V. *Elektropotreblenie pri dobyche uglja otkryтым sposobom: Na primere OAO HK "Kuzbassrazrezugol"* [Energy consumption in the extraction of coal by opencast methods using the example of OJSC HK "Kuzbassrazrezugol"], Candidate dissertation, Kemerovo, Kuzbass state technical University, 2003, 226 p. [In Russ].
2. Kaboli S., Selvaraj J., Rahim N. Long-term electric energy consumption forecasting via artificial cooperative search algorithm. *Energy*, 2016, vol. 115, pp. 857 – 871.
3. Meira de Oliveira E., Oliveira F., Cyrino F. Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods. *Energy*, 2018, vol. 1441, pp. 776 – 788.
4. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, vol. 101, pp. 243 – 259.
5. Bornschlegl M., Bregulla M., Franke J. Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies. *Journal of Cleaner Production*, 2016, vol. 1351, pp. 644 – 656.
6. Wei N., Li Ch., Peng X., Zeng F., Lu X. Conventional models and artificial intelligence-based models for energy consumption forecasting: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 181, № 106187.
7. He Y., Zheng Y., Xu Q. Forecasting energy consumption in Anhui province of China through two Box-Cox transformation quantile regression probability density methods. *Measurement*, 2019, vol. 136, pp. 579 – 593.
8. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, №2, pp. 283 – 290. [In Russ].
9. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Egorova E.V., Gavrina O.A. Assessment of mining-geological and mining technical conditions of the Severny pit with the use of mathematical models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, №3, pp. 418–427. [In Russ]
10. Klyuev R., Bosikov I., Gavrina O., Madaeva M., Sokolov A. Improving the energy efficiency of technological equipment at mining enterprises. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1258. pp. 262 – 271.
11. Golik V.I., Razorenov Yu. I., Efremenkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 363 – 368.
12. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Burdzieva O. Metal deposits combined development experience. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, vol. 7, no. 6, pp. 591 – 594.
13. Gabaraev O.Z., Dmitrak Yu. V., Drebenshtedt K., Savelkov V.I. Regularities of interaction of destroyed geo-materials and ore-bearing massif in the processing of processed deposited ore. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017, no. 4, pp. 406 – 413 [In Russ].
14. Golik V.I., Razorenov Yu. I., Karginov K.G. The basis of sustainable development of North Ossetia-Alania is the mining industry. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2017, no. 2 (32), pp.163 – 172. [In Russ].
15. Stefanov V.K., Antonenkov D.V., Igumnova S.A. Specific power consumption of quarry excavators operating in the far North. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no (S4), pp. 32 – 38. [In Russ].
16. Lyakhomsky A.V., Petuhov S.V. Energy efficiency of excavating operations of coal mining enterprises. *Promyshlennaya energetika*, 2019, no 1, pp. 38 – 41. [In Russ].
17. Spiliotis E., Petropoulos F., Kourentzes N., Assimakopoulos V. Cross-temporal aggregation: Improving the forecast accuracy of hierarchical electricity consumption. *Applied Energy*, 2020, vol. 2611, № 114339.

18. Xiao J., Li Y., Xie L., Liu D., Huang J. A hybrid model based on selective ensemble for energy consumption forecasting in China. *Energy*, 2018, vol. 15915, pp. 534–546.

19. Carvallo J., Larsen P., Sanstad A., Goldman Ch. Long term load forecasting accuracy in electric utility integrated resource planning. *Energy Policy*, 2018, vol. 119, pp. 410–422.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клюев Роман Владимирович^{1,3} – докт. техн. наук, доцент, зав. кафедрой, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

*Гаврина Оксана Александровна*¹ – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры;

*Хетагуров Валерий Николаевич*¹ – докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры;

*Фоменко Ольга Александровна*² – к.ф.н., директор филиала Южного Федерального Университета;

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет);

² Южный Федеральный университет;

³ Московский политехнический университет.

Для контактов: Клюев Р.В., e-mail: kluev-roman@rambler.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Klyuev R.V.^{1,3}, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Head of Chief, e-mail: kluev-roman@rambler.ru;

*Gavrina O.A.*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor;

*Khetagurov V.N.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor;

*Fomenko O.A.*², Ph.D., director of the branch of the Southern Federal University;

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), 362021, Vladikavkaz, Russia;

² Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russia;

³ Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia.

Corresponding author: R.V. Klyuev, e-mail: kluev-roman@rambler.ru.

Получена редакцией 26.05.2020; получена после рецензии 21.06.2020; принята к печати 10.10.2020.

Received by the editors 26.05.2020; received after the review 21.06.2020; accepted for printing 10.10.2020.

