

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ ОТРАБАТЫВАЕМОГО СТОЛБА НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОЧИСТНОГО МЕХАНИЗИРОВАННОГО УЧАСТКА

Г.И. Бабокин

Горный институт, НИТУ «МИСиС», Москва, Россия,  
e-mail: babokinginov@yandex.ru

**Аннотация:** Разработана аналитическая методика расчета удельного расхода электрической энергии очистного участка, включающего электрооборудование очистного забоя и многодвигательный электропривод участковой конвейерной линии, отличающаяся учетом изменяющихся длины обрабатываемого выемочного столба и сопротивляемости пласта угля резанию. Исследование проведено для очистного участка шахты «Апардинская» ООО «ЮжКузбассуголь», оснащенного механизированным комплексом «Глинник 21/45» с очистным комбайном KSW-1140 и скребковым конвейером «АНЖЕРА-34». Участковый ленточный транспорт включает от одного до шести последовательно установленных ленточных телескопических конвейеров «ПИОМА В1200S» с возможностью обработки столба длиной от 450 до 2700 м. Установлены зависимости удельного расхода электрической энергии очистного участка от сопротивляемости пласта резанию и изменения номинальной длины обрабатываемого столба и выявлено, что удельный расход электрической энергии очистного участка с увеличением длины выемочного столба от 450 до 2700 м увеличивается: от 2,9 до 4,9 кВт·ч/т, от 2,2 до 4,0 кВт·ч/т, от 1,7 до 3,2 кВт·ч/т, соответственно при сопротивляемости угля резанию 300, 200, 100 кН/м. Доля удельного расхода электрической энергии на транспортирование угля участковыми ленточными конвейерами от полного удельного расхода электрической энергии оборудованием очистного участка составляет от 13,7 до 55,8%, возрастающая с увеличением длины выемочного столба и сопротивляемости пласта угля резанию. Установлены зависимости числа суток обработки выемочного столба очистным забоем от сопротивляемости пласта угля резанию для номинальной длины выемочного столба от 450 до 2700 м.

**Ключевые слова:** очистной комбайн, очистной участок, выемочный столб, очистной забой, ленточный конвейер, удельный расход электроэнергии, потребляемая электрооборудованием электроэнергия, производительность очистного участка, сопротивляемость пласта угля резанию.

**Для цитирования:** Бабокин Г. И. Исследование влияния длины обрабатываемого столба на удельный расход электрической энергии очистного механизированного участка // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 5. – С. 155–169. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_5\_0\_155.

---

## Influence of longwall length on specific power consumption

G.I. Babokin

Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,  
Moscow, Russia, e-mail: babokinginov@yandex.ru

---

**Abstract:** The analytical estimation procedure is developed for the specific power consumption in a longwall including electrical facilities and a multiengine electric drive of a conveyor line, with regard to the change in the longwall length and in the coal cuttability. The article presents the case-study of a longwall in Alarda Mine, YuzhKuzbassugol, equipped with longwall machine system Glinnik 21/45 with shearer KSW-1140 and scraper conveyor Anzhera-34. The belt transport includes one to 6 series-installed telescopic belt conveyors Pioma V1200S meant for longwalls 450 to 2700 m long. Assessment of the specific power consumption versus the longwall length and coal cuttability finds out that the specific power consumption with the increasing length of the longwall from 450 to 2700 m grows from 2.9 to 4.9 kW·h/t, from 2,2 to 4,0 kW·h/t, from 1,7 to 3,2 kW·h/t, at the coal cuttability of 300, 200 and 100 kN/m. The specific power consumption in coal transport by the belt conveyors varies from 13.7 to 55.8% of the total specific power taken by the longwall equipment with the increase in the longwall length and coal cuttability. The days of longwalling as function of the coal cuttability are found for the longwalls 450 to 2700 m long.

**Key words:** shearer, longwall, extraction panel, longwall face, belt conveyor, specific power consumption, power consumed by electrical facilities, longwall capacity, coal cuttability.

**For citation:** Babokin G. I. Influence of longwall length on specific power consumption. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(5):155-169. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_5\_0\_155.

---

### Введение

При подземной добыче угля потребляемая шахтой электрическая энергия составляет около 86% от всех используемых энергоресурсов. Затраты электрической энергии механизированным оборудованием добычи и транспортирования угля составляет до 17% от общего потребления электрической энергии шахты. Очистный угольный участок, включающий оборудование очистного забоя и систему ленточных конвейеров конвейерного штрека, обеспечивает отработку выемочного столба, и его производительность в значительной степени определяет технико-экономические показатели шахты. Повышение производительности и улучшение технико-экономических показателей очистных участков

угольных шахт достигается переходом на отработку лав длинными столбами, до 3000 м, с длиной лавы до 300 м и увеличением установленной мощности оборудования механизированного очистного участка. Установленная мощность применяемых очистных комбайнов (ОК) достигла 2200 кВт, скребковых забойных конвейеров (СК) — 2500 кВт, ленточных конвейеров штрека — 3000 кВт. Увеличивается мощность и другого оборудования — скребкового конвейера, перегружателя, насосных станций высокого давления и орошения, дробилки и вспомогательного оборудования. При этом возрастает объем потребления и удельный расход электрической энергии очистным участком. Угольные предприятия добиваются снижения себестоимости про-

дукции, в том числе за счет уменьшения энергозатрат на тонну добываемой продукции, так как это обеспечивает конкурентные преимущества предприятия на рынке. Кроме того, величина удельного расхода применяется при определении установленной мощности электрооборудования механизмов участка и нормировании труда рабочих участка. Удельный расход электроэнергии при добыче угля зависит от технических и горно-геологических условий шахты и многих других случайно изменяющихся факторов. Закономерности формирования удельного расхода электроэнергии оборудования очистного забоя достаточно изучены. Снижение удельного расхода электроэнергии очистного участка возможно при установлении закономерностей его формирования с учетом электропотребления ленточных конвейеров и изменения сопротивляемости угля резанию разрабатываемого пласта.

В связи с изложенным актуально исследование электропотребления и удельного расхода электроэнергии электрооборудованием очистного механизированного участка.

### **Анализ исследований и публикаций**

Развитие и совершенствование оборудования очистных механизированных участков происходит в направлении повышения производительности путем увеличения длины лавы и длины отработываемого лавой столба пласта. В связи с этим повышается установленная мощность электрооборудования очистного забоя и конвейерной линии, сооруженной на конвейерном штреке очистного участка [1, 2]. Основным энергетическим параметром, определяющим энергоэффективность работы очистного оборудования в работах [3], принят удельный расход электроэнергии, равный количеству электроэнергии, затрачиваемой на

добычу и транспортировку одной тонны угля. Снижение удельного расхода электроэнергии при добыче угля позволяет повысить экономические показатели очистных участков и шахты.

В работах [3, 4] рассмотрены методы определения удельного расхода и повышения энергоэффективности оборудования очистного забоя, в т.ч. описаны аналитические методы расчета энергетических показателей при работе очистного комбайна по выемке угля без учета технологических операций зачистки машинной дороги и зарубки исполнительного органа в пласт угля, классифицированы организационные, технологические и геологические факторы, влияющие на удельное электропотребление выемочного участка, но не учитывается влияние сопротивляемости угля резанию на удельный расход забоя. В работе отсутствует анализ существенных факторов, влияющих на высокий уровень удельного расхода электрической энергии участка, а предложенный кластерный анализ не конкретизирован для определения удельного расхода очистного забоя. В работах [4–6] предложены имитационные модели очистного комбайна и системы электрооборудования очистного участка для определения энергетических параметров очистного забоя. Модели получены при достаточно большом количестве допущений, не учитывают электропотребление ленточных конвейеров участка и могут быть полезны на этапе эскизного проектирования. В [2, 7] представлена методика выбора оптимальной длины лавы высокопроизводительного забоя, обеспечивающего максимальную производительность, без достаточного точного учета расхода электроэнергии при добыче угля.

В работах [8–10] исследовано влияние технологической схемы и режима работы ОК на удельный расход электрической энергии ОК и СК и показано, что

применение челноковой схемы работы комбайна снижает удельный расход электрической энергии в сравнении с односторонней схемой работы ОК. Установлено, что с увеличением длины лавы удельный расход энергии ОК практически постоянен, а для СК увеличивается. Получены закономерности изменения удельного расхода электроэнергии всех механизмов очистного забоя.

Следует отметить, что во всех работах недостаточное внимание уделено влиянию сопротивляемости угля резанию на удельный расход электроэнергии оборудования очистного забоя и не рассматривается удельный расход ленточного конвейера участка, транспортирующего уголь от лавы до магистрального конвейера шахты. По сути, формирование грузопотока на ленточном конвейере осуществляется ОК и технологически очистной забой и ленточный конвейер образуют единую технологическую и энергетическую систему [11 – 14]. Расчет энергетических параметров очистного участка проводится методом коэффициента спроса, имеющего низкую точность [15]. Закономерности формирования удельного расхода электрической энергии очистного участка и методика расчета удельного расхода электроэнергии очистного участка, с учетом потребления электроэнергии участковым ленточным транспортом при различной длине столба и учете сопротивляемости пласта угля резанию, отсутствует.

Цель работы — установить закономерности формирования удельного расхода электрической энергии, потребляемой электрооборудованием очистного участка, включающего оборудование забоя и ленточного транспорта участка, при изменении длины выемочного столба и сопротивляемости угля резанию.

Задачи, решаемые в работе: разработка аналитической методики расчета удельного расхода электрической энер-

гии, потребляемой электрооборудованием очистного участка, при изменении длины выемочного столба и сопротивляемости угля резанию; количественно установить закономерности изменения удельного расхода очистного участка от длины обрабатываемого столба и вариации сопротивляемости пласта угля резанию в лаве.

### **Методика аналитического расчета удельного расхода электрической энергии, потребляемой электрооборудованием очистного участка**

Электрооборудование очистного механизированного участка включает: электрооборудование очистного забоя (ОК, СК, перегружателя, дробилки, насосной станции орошения, насосной станции высокого давления гидравлической крепи); электрооборудование ленточных конвейеров, расположенных на конвейерном штреке; электрооборудование освещения лавы и штреков; вспомогательного оборудования.

Очистной комбайн при разрушении и погрузке угля исполнительным органом на скребковый конвейер формирует поток угля, транспортируемый далее перегружателем и ленточными конвейерами на магистральный ленточный конвейер. Основным параметром потока угля — производительность комбайна, рассматриваемая далее в функции времени. Производительность ОК зависит от многих факторов — горно-геологических, технических параметров оборудования механизированного очистного забоя (ОЗ), организационных и др.

Для определения параметров потока угля, поступающего на транспортное оборудование участка, рассматриваем челноковую схему работы ОК [7, 16]. Цикл работы ОК включает выемку двух лент угля (длительностью  $t_{B1}$  и  $t_{B2}$ ) и две заруб-

ки исполнительного органа по концам лавы (длительностью  $t_{31}$  и  $t_{32}$ ). Зарубка осуществляется двумя косыми наездами ОК с операцией передвижки концевой части скребкового конвейера в очистном механизированном комплексе. Предложено определять время одного цикла, необходимое для снятия двух полос угля, по формуле

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{в1}} + t_{\text{в2}} + t_{31} + t_{32} = \sum_{i=1}^2 \frac{L - 3L_K}{V_{\text{пи}}} + \sum_{i=1}^2 K_y \left( \frac{4L_K}{V_{\text{Ки}}} + 5t_{\text{МОi}} + \frac{B}{V_{\text{фи}}} + \frac{2L_K}{V_{\text{ПЕРi}}} \right), \quad (1)$$

где  $L$  — длина лавы, м;  $L_K$  — длина комбайна по осям шнеков, м (длина косо-го заезда при зарубке исполнительного органа, равная  $3 L_K$ , м);  $V_{\text{пи}}$  — скорость подачи комбайна при движении вверх или вниз по лаве, м/мин;  $t_{\text{МОi}}$  — длительность вертикальных перемещений исполнительного органа при косом заезде и отработке концевых участков лавы, технологических остановок ОК при зарубке;  $B$  — ширина захвата исполнительного органа комбайна, м;  $V_{\text{фи}}$  — скорость фланговой передвижки концевой участка конвейера при зарубке;  $V_{\text{ПЕРi}}$  — скорость перемещения ОК при перегоне;  $K_y$  — коэффициент, учитывающий организацию и условия труда при выполнении концевых операций;  $V_{\text{Ки}}$  — скорость комбайна. В формуле (1) индекс  $i = 1$  соответствует работе ОК при движении вверх по лаве, а индекс 2 — вниз по лаве.

Далее по методике [7–9] определяются энергетические параметры и параметры диаграммы технической производительности ОК за цикл работы. При заданных параметрах комбайна, сопротивляемости угля резанию для номинальных значений мощности электродвигателей шнеков (резания)  $P_{1H}$ ,  $P_{2H}$  определяется максимально возможная

скорость перемещения комбайна по формуле

$$V_{\text{пм}} = \frac{30n_1\eta_p(P_{1H} + P_{2H})}{ADK_{\text{ио}}(n_{31} + n_{32})}, \quad (2)$$

где  $A$  — средневзвешенная сопротивляемость пласта угля резанию, кН/м;  $K_{\text{ио}}$  — коэффициент, характеризующий параметры исполнительного органа и условия работы резцов;  $\eta_p$  — КПД редукторов привода резания;  $D$  — диаметр шнека;  $n_{31}$ ,  $n_{32}$  — число резцов, одновременно разрушающих забой на опережающем и на отстающем шнеке;  $n_1$  — число резцов в линии резания шнека.

Техническая производительность ОК, без учета параметров надежности, определяется по следующей формуле, т/ч:

$$Q = B \cdot h \cdot \gamma \cdot V_{\text{п}} \cdot 60 \quad (3)$$

где  $B$  — ширина захвата исполнительного органа комбайна, м;  $h$  — мощность вынимаемого пласта, м;  $\gamma$  — удельный вес угля, т/м<sup>3</sup>.

Число циклов работы ОК за сутки равно

$$n_{\text{ц}} = n_{\text{см}} (T_{\text{см}} / t_{\text{ц}}), \quad (4)$$

где  $T_{\text{см}}$  — длительность рабочей смены, мин;  $n_{\text{см}}$  — число смен.

Техническая суточная добыча угля из лавы определяется по формуле

$$Q_{\text{с}} = 120 \cdot B \cdot h \cdot \gamma \cdot L \cdot n_{\text{ц}} \quad (5)$$

Электрическая мощность потребляемой из электрической сети электроэнергии ОК в режимах выемки угля и зарубки исполнительного органа определялась по формуле

$$P_K = \left[ (P_1 + P_2)\eta_{\text{ЭПР}}^{-1} + P_{\text{п}}\eta_{\text{ЭПП}}^{-1} + P_{\text{н}}\eta_{\text{ЭПН}}^{-1} + P_{\text{пог}} \right] \eta_{\text{ЭС}}^{-1}, \quad (6)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_{\text{п}}$ ,  $P_{\text{н}}$ ,  $P_{\text{пог}}$  — мощности и КПД  $\eta_{\text{ЭПР}}$ ,  $\eta_{\text{ЭПП}}$ ,  $\eta_{\text{ЭПН}}$ ,  $\eta_{\text{ЭС}}$  — соответственно, электроприводов резания, подачи, гидравлического насоса, электрической сети;

$P_{\text{пог}}$  — мощность энергии, затрачиваемой шнеками ОК на погрузку угля на СК.

Электрическая энергия, потребляемая ОК в сутки, определяется по следующей формуле:

$$W_{\text{ч}} = [P_{\text{КВ1}} t_{\text{В1}} + P_{\text{КВ2}} t_{\text{В2}} + P_{\text{ККО}} t_{\text{КО}}] n_{\text{СМ}} T_{\text{СМ}} t_{\text{Цч}}^{-1}, \quad (7)$$

где  $P_{\text{КВ1}}$ ,  $P_{\text{КВ2}}$ ,  $P_{\text{ККО}}$  — средневзвешенные электрические мощности ОК при выемке полосы угля, зарубке исполнительного органа в пласт угля, выполнении концевых операций в технологической схеме работы. При заданных параметрах оборудования очистного забоя по уравнениям (1) — (6) определяются энергетические параметры ОК и диаграмма технической производительности ОК за цикл работы. Обобщенная диаграмма представлена на рис. 1.

Производительность ОК изменяется при выемке угля в пределах, определяемых изменением сопротивляемости угля резанию по длине лавы. При зарубке производительность изменяется дискретно: два пика соответствуют косым наездам ОК, другие низкие уровни производительности соответствуют поступлению угля на конвейер при перемещении шнеков в вертикальной плоскости

и холостому движению ОК при выполнении концевых операции с другими механизмами механизированного комплекса.

Введем среднюю производительность ОК при выемке угля  $\bar{Q}_{\text{В}}$  и зарубке исполнительного органа в пласт угля  $\bar{Q}_{\text{З}}$  в цикле его работы с временем  $t_{\text{Ц}}$ .

Далее примем, что очистной забой обрабатывает пласт угля по простиранию с углом падения равным нулю, поэтому  $\bar{Q}_{\text{В1}} = \bar{Q}_{\text{В2}} = \bar{Q}_{\text{В}}$  и  $\bar{Q}_{\text{З1}} = \bar{Q}_{\text{З2}} = \bar{Q}_{\text{З}}$ .

Таким образом, за сутки работы ОК выполняет  $n_{\text{Ц}}$  выемки угля, и в каждом цикле производительность ОК изменяется дискретно от  $\bar{Q}_{\text{В}}$  до  $\bar{Q}_{\text{З}}$  и затем от  $\bar{Q}_{\text{З}}$  до  $\bar{Q}_{\text{В}}$ .

Участковая конвейерная линия состоит, как правило, из  $n_{\text{К}}$  телескопических ленточных конвейеров (ЛК), устанавливаемых на штреке последовательно. Номинальная длина каждого ЛК  $L_{\text{НК}}$  может быть разной, однако далее принимаем, что применяются ЛК с одинаковой номинальной длиной. Длину участка укорочения ленты телескопического ЛК обозначим  $L_{\text{УК}}$ . Очистной забой начинает обработку участкового столба с максимальной его длины, равной длине столба  $L_{\text{С}} = L_{\text{НК}} \cdot n_{\text{К}}$ . По мере отработки

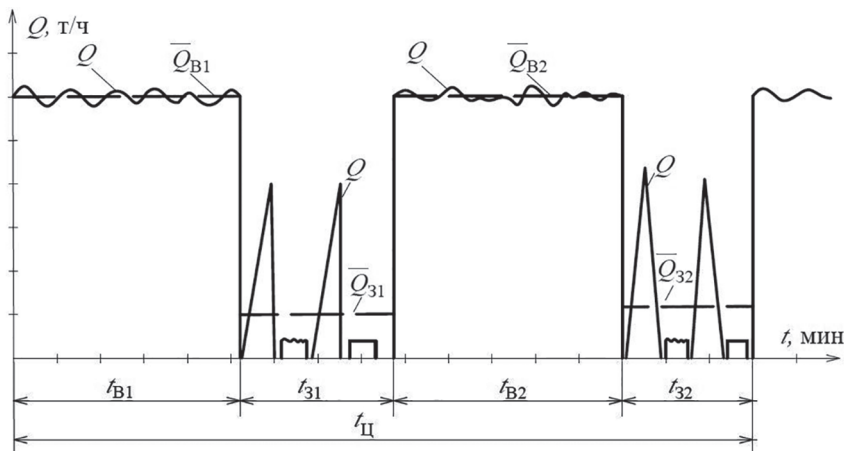


Рис. 1. Диаграмма технической производительности комбайна за цикл работы

Fig. 1. Diagrams of the technical performance of the combine for the work cycle

столба ОК снимает последовательно ленты угля шириной, равной  $B$ , и объемом  $V = B \cdot h \cdot L$ . Длина загрузки углем ленты первого (головного) ЛК изменяется от  $L_{\text{лн}}$  до величины  $L_{\text{лн}} - L_{\text{ук}}$ , где  $L_{\text{ук}}$  — длина ленты укорочения ЛК. Затем отработка столба происходит до следующего укорочения ленты первого ЛК. Число укорочений ленты первого и далее каждого головного ЛК равно  $n_{\text{ук}} = L_{\text{лн}} / L_{\text{ук}}$ . После достижения рабочим участком ленты первого ЛК нуля так же последовательно работают второй, третий и т.д., до  $n_{\text{к}}$ -го ЛК.

Средневзвешенная мощность потребляемой электрической энергии электроприводом транспортной конвейерной линии штрека при выемке ленты угля определяется по формуле:

$$P_{\text{тл}} = \left[ \left( \frac{\bar{Q}}{3,6 \cdot V_{\text{л}}} + q_{\text{л}} + q_{\text{р}} \right) \omega \cdot c \cdot g \cdot L_{\text{зт}} \cdot V_{\text{л}} \right] \cdot \eta_{\text{рт}}^{-1} \cdot \eta_{\text{эпт}}^{-1} \quad (8)$$

где  $Q$  — средняя производительность при выемке или зарубке исполнительного органа в цикле работы ОК;  $q_{\text{л}}, q_{\text{р}}$  — соответственно погонная нагрузка ленты и вращающихся частей роликовых опор движению ленты;  $\omega$  — коэффициент сопротивления движению ленты;  $c$  — коэффициент, учитывающий сопротивление движению ленты с грузом в местах изгиба на барабанах и усилии натяжения ленты;  $g$  — ускорение свободного падения;  $L_{\text{зт}}$  — длина загруженной части ленты транспортной линии;  $V_{\text{л}}$  — скорость движения ленты ЛК;  $\eta_{\text{рт}}, \eta_{\text{эпт}}$  — соответственно общий КПД редукторов и электроприводов  $n_{\text{к}}$  работающих ЛК транспортной линии.

Величина загруженной части ленты конвейерной линии определяется по формуле

$$L_{\text{зт}} = L_{\text{зв}} + L_{\text{зп}} = [(L_{\text{лн}} - L_{\text{ук}} \cdot i) - k \cdot B] + L_{\text{лн}}(n_{\text{к}} - 1) \quad (9)$$

где  $L_{\text{зв}}$  — переменная длина загруженной части ленты головного (первого) ЛК линии, работающего с укорочением ленты;  $L_{\text{зп}}$  — постоянная длина загруженной части ленты  $n_{\text{к}} - 1$  ленточных конвейеров, работающих без укорочения ленты;  $i$  — порядковый номер укорочения ленты головного ЛК, изменяется от 0 (номинальная длина конвейера) до  $n_{\text{ук}}(0, 1, 2, \dots, n_{\text{ук}})$ ;  $k$  — порядковый номер ленты угля, снимаемой ОК в каждом укорочении ленты конвейера. Изменяется от 0 до числа, равного количеству лент угля, снимаемых ОК при прохождении забоем расстояния, равного  $L_{\text{ук}}$ , т.е.  $n_{\text{л}} = L_{\text{ук}} / B$ .

По формулам (8), (9), задавая параметрами конвейерной линии для каждого последовательного положения линии ОЗ при обработке столба участка, определяются длина загруженной части ленты конвейерной линии и параметры диаграммы мощности потребляемой электроэнергии электроприводом линии. Так как на вход транспортной линии участка поступает непрерывный поток угля ступенчатой формы (см. рис. 1), то в соответствии с формулой (8) мощность потребляемой электроприводом конвейерной линии электрической энергии имеет ступенчато изменяющуюся средневзвешенную мощность с параметрами  $\bar{P}_{B1}, \bar{P}_{B2}$  при выемке ленты угля в лаве, и  $\bar{P}_{31}, \bar{P}_{32}$  при зарубке наполнительного органа ОК. Параметры длительности времени выемки, зарубки и цикла работы ОК для диаграмм производительности и мощности одинаковы. Далее с учетом принятых ранее допущений принято, что  $\bar{P}_{B1} = \bar{P}_{B2} = \bar{P}_B$ ,  $\bar{P}_{31} = \bar{P}_{32} = \bar{P}_3$ .

Электрическая энергия, потребляемая электроприводом конвейерной линии за цикл работы ОК, определяется по формуле

$$W_{\text{ли}} = 2\bar{P}_B \cdot t_B + 2\bar{P}_3 \cdot t_3 \quad (10)$$

Удельный расход электрической энергии конвейерной линии за цикл работ

ОК и перемещения забоя на расстояние  $2B$  равен

$$\omega_{\&i} = \frac{W_{\&i}}{G_{\&}} = \frac{W_{\&i}}{2B \cdot h \cdot L \cdot \gamma}, \quad (11)$$

где  $G_{\&}$  — вес угля, добываемого в цикле работы ОК.

Удельный расход ЭЭ конвейерной линии за цикл работы ОК зависит от положения ОЗ по длине столба и с уменьшением длины столба уменьшается (уравнения (8) – (11)).

Удельный расход ЭЭ электропривода конвейерной линии за сутки или за время отработки столба определяется по следующим формулам:

$$\omega_{\text{сут}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{цс}}} W_{\text{цс}i}}{G_{\&} \cdot n_{\text{цс}}}; \omega_{\text{ст}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{цст}}} W_{\text{цс}i}}{G_{\&} \cdot n_{\text{цст}}} \quad (12)$$

где  $n_{\text{цс}}$ ,  $n_{\text{цст}}$  — соответственно число циклов работы ОК за сутки и за время отработки выемочного столба.

ОЗ проходит за цикл  $2B$  м, за сутки  $2B \cdot n_{\&}$  м, поэтому число суток, необходимое для отработки выемочного столба, равно

$$n_{\text{сут}} = \frac{L_{\text{ст}}}{2B \cdot n_{\&}}. \quad (13)$$

Таким образом, разработана методика аналитического расчета удельного расхода электрической энергии, потребляемой электрооборудованием очистного участка.

### Результаты исследований

Исследование проведено для типового высокопроизводительного очистного участка шахты «Апардинская» ООО «ЮжКузбассуголь». Очистной забой участка оснащен механизированным комплексом «Глинник 21/45» с основным оборудованием: очистной комбайн KSW-1140, скребковый конвейер «Анжера-34», перегружатель ПСН3100, дробилка ДР 2500, насос орошения ЕНР 2К,

насос высокого давления ЕНР3К150. Рассматривается участковый ленточный транспорт с возможностью отработки столба длиной от 450 до 2700 м. В связи с этим конвейерная линия будет включать от одного до шести последовательно установленных ленточных телескопических конвейеров «ПИОМА В1200S». Каждый конвейер имеет номинальную длину 450 м и двухдвигательный электропривод суммарной мощностью 500 кВт.

По мере выемки угля ОК лентами шириной 0,8 м очистной забой перемещается и длина столба уменьшается. Укорачивание ленты каждого головного конвейера происходит через каждые 50 м, а другие конвейеры остаются постоянно в работе. После продвижения забоя на 450 м головной конвейер демонтируется и в работе остаются только оставшиеся конвейеры, и так далее до отработки столба.

По предложенной методике определены параметры диаграммы технической производительности (см. рис. 1) и энергетические характеристики ОК при изменении сопротивляемости угля резанию от 100 до 300 кН/м.

Технические характеристики комбайна KSW-1140: вынимаемая мощность пласта 2,5 м; мощность привода резания  $300 \cdot 2 = 600$  кВт; мощность привода подачи  $55 \cdot 2 = 110$  кВт; мощность гидравлического насоса 13 кВт; ширина захвата  $B = 0,8$  м; диаметр шнека  $D = 1,4$  м; число резцов, одновременно разрушающих забой: на опережающем шнеке  $n_{31} = 21$ , на отстающем  $n_{32} = 17$ ; число резцов в линии резания равно трем.

Параметры очистного участка: длина лавы  $L = 250$  м; длина обрабатываемого столба до  $L_{\&} = 2700$  м. Основным фактором, влияющим на производительность ОК, принята сопротивляемость угля резанию в зоне работы шнековых исполнительных органов. Угол падения пласта принят равным 0.



Таблица 1

**Параметры режима работы очистного комбайна при изменении сопротивляемости угля резанию**  
**Parameters of mode of operation of the cleaning combine when the resistance of coal to cutting changes**

№ п/п	Параметры режима работы очистного комбайна	Сопротивляемость угля резанию, кН/м		
		300	200	100
1	Техническая производительность, т/мин	10,8	16,2	32,5
2	Длительность времени, мин: цикла работы, $t_{\text{ц}}$ выемки угля в цикле, $t_{\text{B1}} + t_{\text{B2}}$ зарубки исполнительного органа в цикле, $t_{\text{31}} + t_{\text{32}}$	172,0 106,4 65,6	136,6 71,0 65,6	101,0 35,4 65,6
3	Число циклов работы в сутки, $n_{\text{ц}}$	6,3	7,9	10,7
4	Добыча угля в сутки, т	8240	10 380	14 029
5	Потребляемая электрическая энергия за сутки, кВт·ч	7944	6652	5313
6	Средняя производительность, т/ч: при выемке угля в цикле, $\bar{Q}_{\text{B}}$ при зарубке исполнительного органа в цикле, $\bar{Q}_{\text{3}}$	648 130	972 130	1920 130
7	Удельный расход электрической энергии в сутки, кВт·ч/т	0,9	0,64	0,38

По изложенной методике определены параметры режимов работы и производительности комбайна за цикл работы, представленные в табл. 1 и на рис. 1, при значениях сопротивляемости угля резанию 300, 200, 100 кН/м.

Из анализа данных табл. 1 следует, что с увеличением сопротивляемости угля резанию от 100 до 300 кН/м параметры режима работы ОК изменяются следующим образом: максимальная скорость подачи и производительность ОК

уменьшается пропорционально в 3 раза; длительность цикла работы ОК увеличивается в 1,7 раза, а добыча угля в сутки уменьшается в 1,7 раза; длительность времени выемки угля в цикле увеличивается в 3 раза, при постоянной длительности времени зарубки исполнительного органа; удельный расход электрической энергии на добычу угля увеличивается в 2,4 раза.

По полученным параметрам потока угля, поступающего на вход транспорт-

Таблица 2

**Параметры удельного расхода транспортной линии участка, кВт·ч/т**  
**Parameters of specific consumption of transport line of the site, kW·h/t**

Длина столба $L_{\text{с}}$ , м	Сопротивляемость угля резанию $A$ , кН/м		
	300	200	100
450	0,40	0,33	0,30
900	0,80	0,66	0,60
1350	1,20	1,00	0,90
1800	1,60	1,32	1,20
2700	2,40	2,00	1,80

ной линии участка (см. рис. 1), по формулам (8)–(12) были рассчитаны энергетические параметры конвейерной линии.

В табл. 2 представлены полученные параметры удельного расхода транспортной линии ленточных конвейеров участка в зависимости от длины обрабатываемого столба и сопротивляемости пласта угля резанию в лаве.

Анализ полученных данных (табл. 2) показал, что с увеличением длины обрабатываемого столба, а значит и номинальной загруженной углем длины транспортной линии, удельный расход электрической энергии потребляемой электроприводом линии, измеряемый в кВт·ч/т, в соответствии с уравнениями (8) – (9), линейно увеличивается. Количественные значения удельного расхода зависят от средней производительности потока угля ОК при операции выемки угля, определяемой сопротивляемостью пласта угля резанию (см. табл. 1).

Величина удельного расхода конвейерной линии при изменении номинальной длины столба от 450 до 2700 м изменяется:

- от 0,44 до 2,4 кВт·ч/т при сопротивляемости угля резанию 300 кН/м;
- от 0,33 до 2,1 кВт·ч/т при сопротивляемости угля резанию 200 кН/м;

- от 0,30 до 1,8 кВт·ч/т при сопротивляемости угля резанию 100 кН/м.

Удельный расход электроэнергии транспортной линии при длине столба более 900 м соизмерим и выше удельного расхода ОК (см. табл. 1) при добыче угля.

Удельный расход электрической энергии транспортной линии на 1 км ее длины равен:

- 0,88 кВт·ч/т·км при сопротивляемости угля резанию 300 кН/м;
- 0,73 кВт·ч/т·км при сопротивляемости угля резанию 200 кН/м;
- 0,66 кВт·ч/т·км при сопротивляемости угля резанию 100 кН/м.

Для получения количественной оценки удельного расхода электрической энергии рассматриваемого очистного участка по методике [10] определен удельный расход электрической энергии электрооборудованием ОЗ, представленный в табл. 3.

По данным табл. 2, 3 на рис. 2 построены зависимости удельного расхода электрической энергии электрооборудования очистного участка от сопротивляемости угля резанию при различной номинальной длине столба очистного участка.

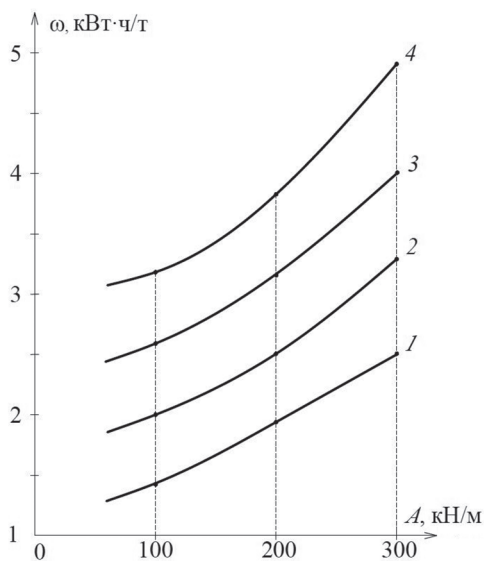
Из анализа данных рис. 2 следует, что доля расхода электрической энергии

Таблица 3

**Удельный расход электрической энергии электрооборудованием очистного забоя, кВт·ч/т**

**Specific consumption of electric energy by electric equipment of the treatment face, kW·h/t**

№ п/п	Механизм очистного забоя	Сопротивляемость угля резанию, кН/м		
		300	200	100
1	Очистной комбайн	0,96	0,61	0,38
2	Скребковый конвейер	0,82	0,65	0,62
3	Перегрузатель	0,21	0,18	0,15
4	Насос орошения	0,27	0,22	0,16
5	Насос высокого давления	0,23	0,16	0,11
6	Аппаратура освещения и управления	0,03	0,026	0,02
	Итого	2,52	1,846	1,44



- 1 – очистной забой;  
 2 – очистной участок, длина столба 900 м;  
 3 – очистной участок, длина столба 1800 м;  
 4 – очистной участок, длина столба 2700 м

Рис. 2. Зависимости удельного расхода электрической энергии электрооборудования очистного участка от сопротивляемости угля резанию

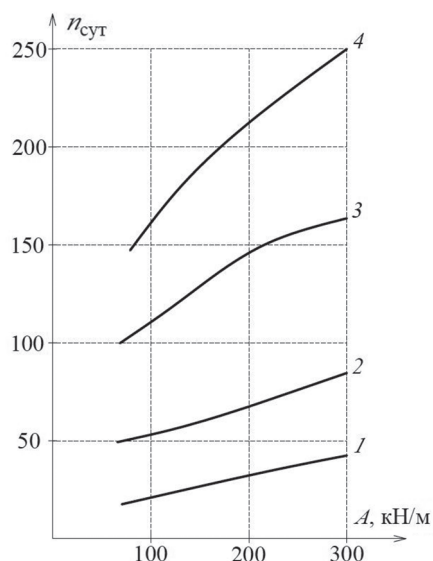
Fig. 2. Dependences of specific consumption of electrical energy of electrical equipment of the treatment area on the resistance of coal to cutting

гии на транспортирование угля участковыми ленточными конвейерами с изменением длины столба от 450 до 2700 м увеличивается:

- от 13,7 до 48,7% от полного удельного расхода энергии очистного участка при сопротивляемости угля резанию 300 кН/м;
- от 14,7 до 49,6% при сопротивляемости угля резанию 200 кН/м;
- от 17,2 до 55,8% при сопротивляемости угля резанию 100 кН/м.

Такая тенденция объясняется увеличением загруженной части ленты транспортной линии участка с возрастанием номинальной длины выемочного столба.

Увеличение удельного расхода электрической энергии электрооборудованием участка с увеличением сопротивляемости угля резания (от 100 до 300 кН/м)



- Длина столба:  
 1 – 450 м; 2 – 900 м; 3 – 1800 м; 4 – 2700 м

Рис. 3. Зависимость числа суток отработки выемочного столба очистным забоем от сопротивляемости угля резанию

Fig. 3. Dependence of the number of days of working out of excavation column by the cleaning face on the resistance of coal to cutting

при постоянной номинальной длине конвейерной линии (длине столба  $L_c$ ), составляет 52–68%. Это обусловлено тем, что с увеличением сопротивляемости угля резанию средняя производительность ОК по выемке угля уменьшается и ЛК работают с погонной нагрузкой ниже номинальной, при этом КПД конвейеров транспортной линии уменьшается ниже номинального.

Параметры режима работы очистного забоя, полученные при определении энергетических параметров очистного участка, позволили по формуле (13) определить число суток работы, за которое забой обрабатывает выемочный столб. Зависимости числа суток отработки выемочного столба очистным забоем от сопротивляемости угля резанию при длине столба от 450 до 2700 м представлены на

рис. 3. Из анализа данных, представленных на рис. 3, следует, что с увеличением длины столба число суток отработки столба очистным забоем увеличивается по линейному закону для всех значений сопротивляемости угля резанию.

С увеличением сопротивляемости угля резанию от 100 до 300 кН/м число суток отработки столба очистным забоем изменяется по нелинейному закону, в следующем диапазоне:

- от 26 до 42 сут при номинальной длине выемочного столба 450 м;
- от 53 до 84 сут при номинальной длине столба 900 м;
- от 105 до 167 сут при номинальной длине столба 1800 м;
- от 158 до 250 сут при номинальной длине столба 2700 м.

Разработанную методику расчета удельного расхода электрической энергии электрооборудованием очистного участка и числа суток отработки выемочного столба рекомендуется применять при обосновании технико-экономических показателей очистных работ на угольных шахтах.

Установлены закономерности формирования энергетических показателей очистного участка и дана их количественная оценка для типового очистного участка.

### **Заключение**

1. Разработана аналитическая методика расчета удельного расхода электрической энергии очистного участка, включающего электрооборудование очистного забоя и многодвигательный электропривод участковой конвейерной линии, отличающаяся учетом изменяющихся длины обрабатываемого выемочного столба и сопротивляемости пласта угля резанию.

2. Установлено количественное влияние длины обрабатываемого столба и сопротивляемости пласта угля резанию на

удельный расход электрической энергии участковой конвейерной линии, состоящей из телескопических ленточных конвейеров. Показано, что с увеличением номинальной длины столба от 450 до 2700 м удельный расход электрической энергии конвейерной линии изменяется следующим образом: от 0,44 до 2,4 кВт·ч/т при сопротивляемости пласта угля резанию 300 кН/м; от 0,34 до 2,1 кВт·ч/т при сопротивляемости пласта угля резанию 200 кН/м; от 0,30 до 1,8 кВт·ч/т при сопротивляемости пласта угля резанию 100 кН/м. Удельный расход электрической энергии участковой транспортной линии на один километр ее длины при изменении сопротивляемости угля резанию от 300 до 100 кН/м уменьшается от 0,88 до 0,63 кВт·ч/т·км.

3. Установлены зависимости удельного расхода электрической энергии очистного участка от сопротивляемости пласта резанию от 100 до 300 кН/м и изменения номинальной длины обрабатываемого столба от 450 до 2700 м. Показано, что удельный расход электрической энергии очистного участка с увеличением длины выемочного столба от 450 до 2700 м увеличивается: от 2,9 до 4,9 кВт·ч/т при сопротивляемости угля резанию 300 кН/м; от 2,2 до 4,0 кВт·ч/т при сопротивляемости угля резанию 200 кН/м; от 1,7 до 3,2 кВт·ч/т при сопротивляемости угля резанию 100 кН/м. Доля удельного расхода электрической энергии на транспортирование угля участковыми ленточными конвейерами от полного удельного расхода электрической энергии оборудованием очистного участка с изменением длины выемочного столба от 450 до 2700 м и сопротивляемости пласта угля резанию в диапазоне 100–300 кН/м составляет от 13,7 до 55,8%.

4. Установлены зависимости числа суток отработки выемочного столба очистным забоем от сопротивляемости пла-

ста угля резанию для номинальной длины выемочного столба от 450 до 2700 м. Показано, что с увеличением длины столба число суток отработки столба очистным забоем увеличивается по линейному закону для всех значений сопротивляемости угля резанию. С увеличением сопротивляемости угля резанию от 100 до 300 кН/м число суток отработки столба очистным забоем изменяется по нелинейному закону, в диапазоне от 53 до 84 сут при номинальной длине столба 900 м; от 105 до 167 сут при номинальной длине столба 1800 м; от 158 до 250 сут при номинальной длине столба 2700 м.

5. По результатам исследования рекомендуется применить методику расчета

удельного расхода электрической энергии электрооборудованием очистного участка при выборе его установленной мощности и обосновании технико-экономических показателей очистных работ на угольных шахтах. В условиях формирования очистным комбайном переменного потока угля, поступающего на скребковый конвейер, рекомендуется применение регулируемого электропривода скребкового конвейера, перегружателя и участкового ленточного конвейера с системой поддержания постоянной погонной нагрузки, который позволит снизить удельный расход электроэнергии транспортного оборудования участка и износ тягового органа и рештаков скребкового конвейера и ленты ленточного конвейера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов В. И., Хмелинский А. А., Мефодьев С. Н. Современные подходы к компоновке оборудования для добычи угля на пологих пластах // Уголь. — 2019. — № 6. — С. 36–40. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-6-36-40.

2. Мешков А. А., Волков М. А., Ордин А. А., Тимошенко А. М., Ботвенко Д. В. О рекордной длине и производительности очистного забоя шахты имени В.Д. Ялевского // Уголь. — 2018. — № 7. — С. 4–7. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-7-4-7.

3. Кубрин С. С., Решетняк С. Н., Бондаренко А. М. Анализ влияния технологических факторов на удельные параметры расхода оборудования выемочных участков угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 2. — С. 161–170. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-161-170.

4. Федоров Г. С., Журавлев Е. И. Расчет оптимальных энергетических параметров работы очистного комплекса в различных горно-геологических условиях на основе имитационной модели очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 12. — С. 356–361.

5. Воронин В. А., Непша Ф. С. Имитационное моделирование электропривода очистного комбайна для оценки показателей энергоэффективности системы электроснабжения // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 633–639. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5.

6. Jonek-Kowalska I., Turek M. Dependence of total production costs on production and infrastructure parameters in the Polish Hard Coal Mining Industry // Energies. 2017, vol. 10, no. 10, article 1480. DOI: 10.3390/en10101480.

7. Ордин А. А., Метельков А. А. К вопросу об оптимизации длины к производительности комплексно-механизированного очистного забоя угольной шахты // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 2. — С. 100–112.

8. Бабокин Г. И. Исследование влияния технологической схемы работы и длины лавы на удельный расход электрической энергии комбайна // Горный информационно-аналити-

ческий бюллетень. — 2021. — № 2. — С. 139–149. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-139-149.

9. Плотников В. В. Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со штрековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9. — С. 47–55.

10. Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М. Повышение энергоэффективности механизированного очистного забоя угольной шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 9. — С. 122–134. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_122.

11. Карпенко С. М., Карпенко Н. В., Безгинов Г. Ю. Прогнозирование электропотребления на горнопромышленных предприятиях с использованием статистических методов // Горная промышленность. — 2022. — № 1. — С. 82–88. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-82-88.

12. Stecula K., Brodny J., Tutak M. Informatics platform as a tool supporting research regarding the effectiveness of the mining machines work / CBU International Conference on Innovations in Science and Education. 2017, pp. 1215–1219.

13. Ning Wang, Zongguo Wen, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production // Applied Energy. 2016, vol. 169, pp. 301–308. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.030.

14. Acarnley P. P., Watson J. F. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2006, vol. 53, no. 2, pp. 352–362. DOI: 10.1109/TIE.2006.870868.

15. Shi J. G., Mao J., Wei X. H. Research on dynamic tension control theory for heavy scraper conveyor // Applied Mechanics and Materials. 2010, vol. 34–35, pp. 1956–1960. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.1956.

16. Ning Wang, Zongguo Wen, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production // Applied Energy. 2016, vol. 169, pp. 301–308. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.030. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Efimov V. I., Hmelinskiy A. A., Mefod'ev S. N. Modern approaches to the layout of equipment for coal mining in shallow seams. *Ugol'*. 2019, no. 6, pp. 36–40. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-6-36-40.

2. Meshkov A. A., Volkov M. A., Ordin A. A., Timoshenko A. M., Botvenko D. V. On the record length and productivity of the stope at the mine named after V.D. Yalevsky. *Ugol'*. 2018, no. 7, pp. 4–7. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-7-4-7.

3. Kubrin S. S., Reshetnyak S. N., Bondarenko A. M. Impact of technology factors on specific power demands of equipment in extraction districts of coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 2, pp. 161–170. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-161-170.

4. Fedorov G. S., Zhuravlev E. I. Calculation of the optimal energy parameters for the operation of the mining complex in various mining and geological conditions based on the simulation model of the shearer. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 12, pp. 356–361. [In Russ].

5. Voronin V. A., Nepsha F. S. Simulation modeling of the electric drive of a cleaning combine for evaluation of energy efficiency indicators of the power supply system. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 633–639. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.5.

6. Jonek-Kowalska I., Turek M. Dependence of total production costs on production and infrastructure parameters in the Polish Hard Coal Mining Industry. *Energies*. 2017, vol. 10, no. 10, article 1480. DOI: 10.3390/en10101480.

7. Ordin A. A., Metelkov A. A. On the issue of optimizing the length and productivity of a complex-mechanized cleaning face of a coal mine. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no. 2, pp. 100–112. [In Russ].

8. Babokin G. I. Influence of process flow diagram and longwall length on specific energy consumption of shearers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 139–149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-139-149.

9. Plotnikov V. V. Conclusion of the formula for calculating the productivity of cleaning combines with a shtrekovym, drum or crown executive body. *Ugol'*. 2009, no. 9, pp. 47–55. [In Russ].

10. Babokin G. I., Shprekher D. M. Enhancement of energy efficiency in fully mechanized longwall mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 9, pp. 122–134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_122.

11. Karpenko S. M., Karpenko N. V., Bezginov G. Yu. Forecasting of power consumption at mining enterprises using statistical methods. *Russian Mining Industry.* 2022, no. 1, pp. 82–88. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1-82-88.

12. Stecula K., Brodny J., Tutak M. Informatics platform as a tool supporting research regarding the effectiveness of the mining machines work. *CBU International Conference on Innovations in Science and Education.* 2017, pp. 1215–1219.

13. Ning Wang, Zongguo Wen, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy.* 2016, vol. 169, pp. 301–308. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.030.

14. Acarnley P. P., Watson J. F. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics.* 2006, vol. 53, no. 2, pp. 352–362. DOI: 10.1109/TIE.2006.870868.

15. Shi J. G., Mao J., Wei X. H. Research on dynamic tension control theory for heavy scraper conveyor. *Applied Mechanics and Materials.* 2010, vol. 34–35, pp. 1956–1960. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.34-35.1956.

16. Ning Wang, Zongguo Wen, Mingqi Liu, Jie Guo Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production. *Applied Energy.* 2016, vol. 169, pp. 301–308. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.030.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Бабочкин Геннадий Иванович — д-р техн. наук,  
профессор, e-mail: babokinginov@yandex.ru,  
Горный институт, НИТУ «МИСиС».

## INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

G.I. Babokin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
e-mail: babokinginov@yandex.ru,  
Mining Institute, National University  
of Science and Technology «MISIS»,  
119049, Moscow, Russia.

Получена редакцией 20.11.2022; получена после рецензии 03.02.2023; принята к печати 10.04.2023.  
Received by the editors 20.11.2022; received after the review 03.02.2023; accepted for printing 10.04.2023.

