

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗИРОВАННОГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

Г.И. Бабокин¹, Д.М. Шпрехер²

¹ ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

² ТулГУ, Тула, Россия, e-mail: shpreher-d@yandex.ru

Аннотация: Повышение производительности и улучшение технико-экономических показателей очистных забоев угольных шахт достигается переходом на отработку лав с длиной до 500 м и увеличением установленной мощности оборудования механизированного комплекса. Однако при этом возрастает объем потребления и удельный расход электрической энергии, и поэтому актуально повышение энергоэффективности работы забоя. Разработана аналитическая методика расчета удельного расхода электрической энергии очистного забоя как взаимосвязанного технологического оборудования, учитывающая режимы работы забоя в добычные и ремонтную смены. Для механизированного очистного забоя шахты Костромовская ООО ММК-уголь, оборудованного комплексом JOU с комбайном 4LS2, доказано, что при работе очистного комбайна (ОК) по челноковой схеме удельный расход электрической энергии очистного забоя на 15–20% ниже, чем при работе по односторонней схеме, и равен соответственно 2,56–3,29 и 3,02–4,12 кВт·ч/т. Установлено, что наибольший вклад в удельный расход электрической энергии очистного забоя вносят ОК (27,6 – 43,5%), скребковый конвейер (13–20%), насосная станция высокого давления (13–20%), насос орошения (4,1–10,0%). Удельный расход электрической энергии ОК практически не зависит от длины лавы и равен 1,0–1,1 кВт ч/т, а удельный расход другого оборудования забоя с увеличением длины лавы возрастает. Показано, что применение системы стабилизации погонной нагрузки транспортной системы очистного забоя позволяет снизить его удельный расход электрической энергии на 31–36%, 14,5–17% и 7,5–11,5% соответственно при работе в лаве со средней сопротивляемостью угля резанию 300, 200 и 150 кН/м. Большие значения снижения удельного расхода соответствуют работе конвейера в лаве с большей длиной. Применение насосной станции высокого давления с системой управления, поддерживающей постоянное давление в гидросистеме комплекса, обеспечивает снижение удельного расхода электрической энергии станции на 34–40% за цикл загрузки-разгрузки.

Ключевые слова: очистной забой, удельный расход электрической энергии, очистной комбайн, скребковый конвейер, перегружатель, насосная станция высокого давления, энергоэффективность.

Для цитирования: 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.

Enhancement of energy efficiency in fully mechanized longwall mining

G.I. Babokin¹, D.M. Shprekher²

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia

² Tula State University, Tula, Russia, e-mail: shpreher-d@yandex.ru

Abstract: Improvement of productivity and performance in coal mines is achieved by transition to longwalls up to 500 m long, and by increase in the rated capacity of mechanized longwall mining systems. In this case, however, the size of consumption and the unit rate of electric energy grow, which necessitates enhancement of energy efficiency of longwall mining. The analytical procedure is developed for the specific energy consumption calculation for longwall mining systems as interlinked process equipment with regard to operating regimes during production and maintenance schedules. The case-study of mechanized longwall in Kostromovskaya Mine of MMK-Coal, equipped with Joy longwall shearer 4LS2 has proved that in shuttle operation of the shearer, the longwall energy consumption is lower than in one-way operation scheme by 15–20%, and makes 2.56–3.29 kW h/t as against 3.02–4.12 kW·h/t, respectively. The largest contribution to the specific energy consumption in the longwall is made by the shearer (27.6–43.5%), scraper conveyor (13–20%), high-pressure pumping station (13–20%) and by the sprinkling pump (4.1–10.0%). Specific energy consumption of the shearer is independent of the longwall length and equals 1.0–1.1-kW h/t, while specific energy consumption of the other equipment grows with increasing length of the longwall. It is shown that stabilization of unit load of transportation system in the longwall can enable reduction in the specific energy consumption in the longwall by 31–36, 14.5–17 and 7.5–11.5% in shearing of coal with cuttability of 300, 200 and 150 kN/m, respectively. Higher values of reduction in the specific energy consumption describe operation of the shearer in the longer longwall. The use of a high-pressure pumping station with constant pressure control in the hydraulic system of the longwall mining system ensures reduction in the specific energy consumption of the pumping station by 34–40% in one loading–unloading cycle.

Key words: longwall, specific energy consumption, shearer, scraper conveyor, loader, high-pressure pumping station, energy efficiency.

For citation: Babokin G. I., Shprekher D. M. Enhancement of energy efficiency in fully mechanized longwall mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(9):122-134. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_9_0_122.

Введение

При подземной добыче угля из всех потребляемых энергоресурсов шахтой электрическая энергия составляет около 80%, при этом расход электрической энергии на операции добычи и транспортирование угля равен 12–16% от общего потребления электрической энергии шахты [1]. Угольные предприятия уделяют большое внимание снижению себестоимости продукции, в том числе

за счет уменьшения энергозатрат на тонну добываемой продукции. Повышение производительности и улучшение технико-экономических показателей очистных забоев угольных шахт достигается переходом на отработку лав с длиной до 250–500 м и неизбежным увеличением установленной мощности оборудования механизированного комплекса до 4200–6600 кВт [2, 3]. Так установленная мощность применяемых очист-

ных комбайнов (ОК) достигла 1200—2200 кВт, скребковых забойных конвейеров (СК) 1600—2500 кВт. Увеличивается мощность и другого оборудования — штрекового скребкового перегружателя, насосных станций высокого давления и орошения, дробилки и вспомогательного оборудования. При этом возрастает объем потребления и удельный расход электрической энергии очистным забоем [2, 4]. В связи с изложенным, актуально повышение энергоэффективности работы очистного механизированного забоя.

Анализ исследований и публикаций

В работах [5, 6] 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. Кроме того, установлено, что с увеличением длины лавы удельный расход энергии ОК практически постоянен, а для СК увеличивается. В [7] классифицированы факторы, влияющие на удельное электропотребление выемочного участка, и получены экспериментальные данные удельного расхода для отдельного оборудования и суммарное для участка шахты при изменении скорости подачи ОК от 4 до 10 м/мин. 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, 8] рассмотрено определение мощности и производительности очистных и проходческих комбайнов аналитически и на основе имитационной модели.

Таким образом, на данный момент отсутствует аналитическая методика расчета удельного расхода электрической энергии очистного забоя как взаимосвязанного технологически оборудования — ОК, СК, перегружателя, дробилки, насосных станций и вспомогательного оборудования, — которая позволит получить сравнительную оценку вклада отдельного оборудования в удельный расход очистного забоя и оценить технические решения, повышающие энергоэффективность его работы. Повышение энергоэффективности очистного забоя реализуется: путем повышения его производительности за счет улучшения организации труда, повышения надежности оборудования; совершенствованием конструкции оборудования; применением современных систем управления оборудованием забоя [9–16]. Новым направлением повышения энергоэффективности очистного забоя стало применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода (ЧРЭП) в СК и перегружателя, а также для насосной станции высокого давления (НСВД) системы гидравлики крепи [17–22]. Это позволило в транспортной системе очистного забоя поддерживать заданную погонную нагрузку СК и перегружателя при переменном потоке угля ОК, а в НСВД снизить потери энергии холостого хода насоса. В известной литературе отсутствует количественная оценка повышения энергетической эффективности данных технических решений.

Цель работы — установить закономерности формирования удельного расхода электрической энергии, потребляемой очистным забоем при добыче угля, и количественно оценить энергоэффективность применения новых технических решений. Задачи, решаемые в работе: предложить аналитическую методику расчета удельного расхода электрической энергии оборудованием очистного

забоя при добыче угля; количественно установить закономерности изменения удельного расхода для конкретных условий работы очистного забоя; количественно оценить повышение энергоэффективности очистного забоя при применении системы стабилизации погонной нагрузки СК и перегружателя и стабилизации гидравлического давления в системе с НСВД крепи.

Методика расчета удельного расхода электрической энергии механизированного очистного забоя

Удельный расход электрической энергии очистного забоя определяется как сумма удельных расходов оборудования за сутки работы: ОК, СК, перегружателя, дробилки, насосных станций орошения и высокого давления, аппаратуры освещения и управления и вспомогательного оборудования. Сутки работы очистного забоя включают три добычные смены и одну ремонтную. Исходными данными при расчете являются: технические параметры механизированного комплекса для отработки пологонаклонных пластов длинными лавами при управлении кровлей способом полного обрушения.

Рассмотрим определение удельного расхода электрической энергии отдельным оборудованием очистного забоя в добычные смены. Методики расчета удельного расхода энергии ОК и СК представлены в [5, 6]. Удельный расход электрической энергии скребкового перегружателя рассчитывается по методике [6]. Удельный расход электрической энергии дробилки предложено определять по формуле:

$$\omega_d = \frac{(P_x t_x + P_d t_d) n_{ц}}{Q_{кc} \eta_3 \eta_c}, \quad (1)$$

где P_x, P_d — мощность, потребляемая электроприводом дробилки в режимах

холостого хода и дробления негабаритов угля, кВт; t_x, t_d — длительность работы дробилки в режимах холостого хода и дробления в цикле работы ОК по односторонней и челноковой схемам [5], ч; $Q_{кc}, n_{ц}$ — добыча угля ОК и число циклов его работы за три добычные смены, т и шт.; η_3, η_c — КПД электропривода и электрической сети.

Удельный расход электрической энергии насосной станции орошения и охлаждения электродвигателей комбайна равен

$$\omega_{но} = \frac{P_{но} t_p}{Q_{кc}}, \quad (2)$$

где $P_{но}$ — мощность, потребляемая насосной станцией при работе забоя по выемке угля за три смены, пропорциональная расходу и напору воды в системе орошения, определяемая по известной формуле [23] с учетом КПД электропривода и электрической сети, кВт; t_p — время непрерывной работы станции за указанный период, ч.

Насосная станция высокого давления создает гидравлическое давление эмульсии в стойках крепи и домкратах СК с заданным расходом для передвижения секций крепи и конвейера. Рассматривается НСВД, гидравлическая система которой имеет разгрузочный клапан [21, 23]. Удельный расход электрической энергии НСВД при односторонней или челноковой схемах работы ОК определяется по формуле:

$$\omega_{нв} = \frac{(P_{нв} t_b K_1 + P_{нв} t_{зач} K_2 + P_{нв} t_{зар} K_3) n_{ц}}{Q_{кc}}, \quad (3)$$

где $P_{нв}$ — мощность, потребляемая НСВД и определяемая гидравлическим давлением и расходом эмульсии [23]; $t_b, t_{зач}, t_{зар}$ — длительность режимов выемки, зачистки и зарубки ОК в цикле его работы [5]; K_1, K_2, K_3 — коэффициенты использования по времени НСВД в режимах работы ОК.

Удельный расход электрической энергии на аппаратуру освещения, управления, вспомогательное оборудование в добычные и ремонтную смены определялся как отношение объема потребленной электрической энергии, рассчитанной методом коэффициента спроса, к объему угля, добытого ОК за три добычные смены.

Результаты исследований удельного расхода очистного забоя

Исследование проведено для условий участка 19 шахты Костромовская ООО «ММК-уголь». Забой оснащен комплексом JOY с очистным комбайном 4LS20, скребковым конвейером 1FC-11 (установленная мощность привода конвейера с увеличением длины лавы от 200 до 500 м изменялась от 1200 до 3000 кВт), перегружателем ПСП-308, дробилкой ДУ-910, насосной станцией орошения BRW-400/16, насосной станцией высокого давления BRW-400/31,5 (для длины лавы 200–300 м) и BRW-400/37,5 (для длины лавы 400–500 м). Отрабатывается пласт с вынимаемой мощно-

стью 2 м и изменением сопротивляемости угля резанию от 100 до 400 кН/м [5, 9]. Диапазон изменения производительности комбайна от 500 до 2200 т/ч.

В табл. 1 и табл. 2 представлены расчетные данные удельного расхода электрической энергии очистного забоя при работе ОК по односторонней и челноковой технологическим схемам при сопротивляемости угля резанию 300 кН/м и изменении длины лавы от 200 до 500 м. Из анализа представленных результатов следует: при работе ОК по челноковой схеме удельный расход электрической энергии очистного забоя на 15–20 ниже, чем при работе по односторонней схеме, и равен 2,56–3,29 и 3,02–4,12 кВт/ч; с увеличением длины лавы от 200 до 500 м удельный расход электрической энергии забоя увеличивается на 33,8% и на 28,8% соответственно для односторонней и челноковой схем работы ОК. Наибольшую удельную энергоемкость от общего удельного расхода энергии забоя в порядке убывания имеют: ОК; СК; НСВД; насосная станция орошения; перегружатель. Удельный расход

Таблица 1

Удельный расход очистного забоя при односторонней схеме работы очистного комбайна (кВт·ч/т)

Specific energy consumption of longwall in one-way operation scheme of shearer, kW·h/t

№ п/п	Оборудование очистного забоя	Длина лавы, м			
		200	300	400	500
1	Очистной комбайн	1,11	1,09	1,11	1,09
2	Скребковый конвейер	0,64	0,88	1,08	1,4
3	Перегружатель	0,15	0,15	0,15	0,15
4	Дробилка	0,08	0,08	0,1	0,1
5	Насосная станция орошения	0,31	0,29	0,31	0,32
6	Насосная станция высокого давления	0,59	0,57	0,71	0,8
7	Аппаратура освещения, управления и др.	0,026	0,022	0,07	0,09
8	Оборудование в ремонтную смену	0,11	0,13	0,15	0,17
8	Итого для очистного забоя за сутки	3,02	3,15	3,68	4,12

Таблица 2

Удельный расход очистного забоя при челноковой схеме работы очистного комбайна (кВт·ч/т)

Specific energy consumption of longwall in shuttle operation scheme of shearer, kW·h/t

№ п/п	Оборудование очистного забоя	Длина лавы, м			
		200	300	400	500
1	Очистной комбайн	1,07	1,02	1,00	1,00
2	Скребковый конвейер	0,53	0,78	1,00	1,00
3	Перегрузатель	0,13	0,13	0,14	0,13
4	Дробилка	0,06	0,07	0,07	0,08
5	Насосная станция орошения	0,27	0,24	0,23	0,23
6	Насосная станция высокого давления	0,38	0,35	0,42	0,42
7	Аппаратура освещения, управления и др.	0,02	0,04	0,05	0,07
8	Оборудование в ремонтную смену	0,10	0,10	0,12	0,12
8	Итого для очистного забоя за сутки	2,56	2,73	3,04	3,29

электрической энергии ОК практически не зависит от длины лавы и равен 1,1 и 1,0 кВт ч/т, при этом доля удельного расхода ОК в общем расходе забоя составляет 38,3 – 27,6% и 43,5 – 31,5% соответственно для односторонней и челноковой схем работы ОК. Удельный расход электрической энергии СК с увеличением длины лавы от 200 до 500 м увеличивается от 0,64 до 1,4 кВт·ч/т и от 0,53 до 1,25 кВт·ч/т, при этом доля удельного расхода СК в общем расходе забоя составляет 22,0 – 35,4% и 21,6 – 39,4% соответственно для односторонней и челноковой схем работы ОК. Удельный расход электрической энергии НСВД составлял 0,38 – 0,80 кВт·ч/т, увеличивается с удлинением лавы и составляет 13 – 20% от общего расхода забоя. Удельный расход электрической энергии насосной станции орошения составлял 0,23 – 0,32 кВт·ч/т и в общем расходе забоя 4,1 – 10,0%. Удельный расход электрической энергии перегружателя, оборудования в ремонтную смену, дробилки, аппаратуры освещения составляют соответственно: 0,13 – 0,15 кВт·ч/т; 0,1 – 0,17 кВт·ч/т; 0,06 – 0,10 кВт·ч/т;

0,02 – 0,09 кВт·ч/т, а суммарная величина удельного расхода энергии указанных потребителей не превышает 12% от общего расхода очистного забоя.

Повышение энергоэффективности очистного забоя

Оптимальная энергоэффективность работы ОК обеспечивается системой автоматического поддержания заданной мощности электропривода резания, позволяющей получить максимальную производительность комбайна в конкретных условиях его работы [24]. Повышение энергоэффективности СК и перегружателя возможно путем стабилизации погонной нагрузки транспортной цепи забоя [17 – 19], включающей ЧРЭП СК и перегружателя, датчик погонной нагрузки лавы, устанавливаемый на конвейерном штреке лавы, и регулятор погонной нагрузки, воздействующий на скорость движения скребковой цепи СК и перегружателя. Погонная нагрузка груза СК q (кг/м) определяется уравнением [25]:

$$q = \frac{Q_k}{3,6V}, \quad (4)$$

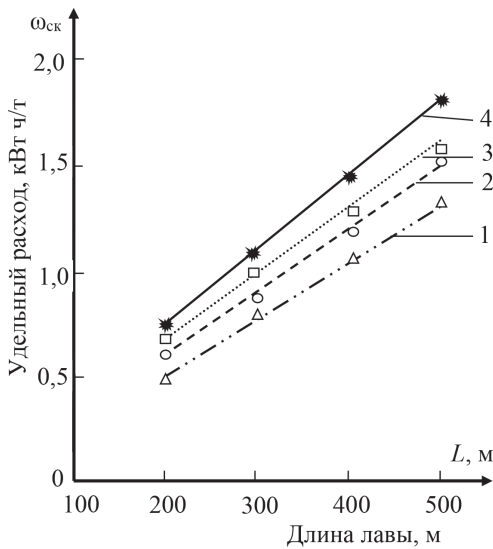


Рис. 1. Зависимости удельного расхода электрической энергии скребкового конвейера от длины лавы при следующей погонной нагрузке груза: 1 – 510 кг/м; 2 – 260 кг/м; 3 – 145 кг/м; 4 – 115 кг/м

Fig. 1. Specific energy consumption of scraper conveyor versus longwall length at different cargo unit loads: 1–510 kg/m; 2–260 kg/m; 3–145 kg/m; 4–115 kg/m

где Q_k – производительность комбайна, т/ч; V_k – скорость движения скребковой цепи СК, м/с.

Из уравнения (4) следует, что при снижении производительности ОК, например, с повышением сопротивления пласта угля резанию, для поддержания заданной погонной нагрузки необходимо снижать линейную скорость движения скребковой цепи СК.

Оценим количественно повышение энергоэффективности транспортной цепи рассматриваемого очистного забоя при стабилизации ее погонной нагрузки. Первоначально рассмотрим СК. На рис. 1 представлены зависимости удельного расхода электрической энергии СК от длины лавы, полученные по энергетическим характеристикам конвейера [6].

Характеристики соответствуют разным значениям погонной нагрузки груза СК – q , определяемые максимальной

производительностью ОК – Q_k при заданной сопротивляемости угля резанию A . Максимальная производительность ОК достигается при минимальной сопротивляемости угля резанию 100 кН/м и равна номинальной производительности СК, равной 2200 т/ч. В этом случае, рис. 1, прямая 1, СК работает с номинальной погонной нагрузкой груза, равной 510 кг/м, и минимальным удельным потреблением электрической энергии, которое изменяется от 0,5 до 1,27 кВт·ч/т при увеличении длины лавы от 200 до 500 м. Зависимости 2, 3, 4 на рис. 1 соответствуют погонным нагрузкам груза СК, меньшим номинальной, и получены для сопротивляемости угля резанию 200, 300, 400 кН/м и соответствующим им максимальным производительностям ОК 1125, 625, 500 т/ч [5].

Система поддержания погонной нагрузки СК номинальной при работе ОК с сопротивляемостью угля резанию более 100 кН/м позволяет снизить удельный расход электрической энергии СК с величины, соответствующей конкретной сопротивляемости (прямые 2, 3, 4 рис. 1) до номинальной. Далее принято, что распределение сопротивляемости угля резанию по лаве соответствует нормальному закону, и оценку снижения удельного расхода выполним для трех значений математического ожидания сопротивления: 150, 200, 300 кН/м при отклонении от среднего ± 50 кН/м. Результаты расчета снижения удельного расхода электрической энергии представлены в табл. 3.

Из данных табл. 3 следует, что применение системы стабилизации погонной нагрузки СК позволяет снизить его удельный расход электрической энергии на 25–30%, 12–17% и 6–10% соответственно при работе в лаве со средней сопротивляемостью угля резанию 300, 200 и 150 кН/м. Большие значения снижения удельного расхода соответст-

Таблица 3

Снижение удельного расхода электрической энергии скребкового конвейера и перегружателя с системой стабилизации погонной нагрузки
Reduction in specific energy consumption of scraper conveyor and loader
with the system of unit load stabilization

Математическое ожидание сопротивляемости угля резанию в лаве, кН/м	300	200	150
Снижение удельного расхода электрической энергии скребкового конвейера, %	25 – 30	12 – 17	6 – 10
Снижение удельного расхода электрической энергии перегружателя, %	6	2,5	1,5

вуют работе СК в лаве с большей длиной. Изложенная методика для забойного перегружателя позволяет установить, что применение стабилизации погонной нагрузки транспортной цепи забоя снижает удельный расход электрической энергии перегружателя на 1,5; 2,5; 6,0, соответственно для средней сопротивляемости угля резанию 150, 200, 300 кН/м.

Повышение энергоэффективности насосной станции высокого давления. Гидравлические НСВД обеспечивают поддержание кровли в механизированной крепи, передвижение секций крепи и забойного конвейера. Современные НСВД обеспечивают давление эмульсии в гидравлической сети комплекса 32 – 42 МПа и расход 400 – 640 л/мин [21]. В настоящее время в механизированных очистных забоях применяются НСВД с разгрузочным клапаном [21, 23].

Цикл работы НСВД включает нагрузку станции длительностью t_n и разгрузку станции длительностью t_p . При распоре секций крепи или передвижении секций конвейера система управления комплексом по данным измерения системного давления в магистрали сигнализирует о необходимости работы разгрузочного клапана в режиме нагрузки, когда эмульсия по прямой магистрали подается в домкраты стоек и конвейера с номинальным давлением p_1 и расходом Q_1 , рис. 2, а. После выполнения операции нагрузки система управления

инициирует переключение разгрузочного клапана в режим разгрузки станции, при котором эмульсия от насоса подается по обратной магистрали в бак станции с номинальным давлением и расходом эмульсии.

Рассмотренный режим работы НСВД характеризуется гидравлическими ударами, снижающими ресурс элементов гидравлической сети комплекса, а также неэффективной затратой электрической энергии электроприводом насоса станции при работе в режиме разгрузки с номинальными значениями давления и расхода. В [19] предложена НСВД с частотно-регулируемым асинхронным электродвигателем насоса, где нет необходимости переключать разгрузочный клапан станции. Система управления насосом обеспечивает в режиме нагрузки номинальные значения давления и расхода эмульсии, а в режиме разгрузки – номинальное давление эмульсии и снижение ее расхода путем уменьшения частоты вращения вала электродвигателя насоса до значений, необходимых для забоя Q_2 , рис. 2, б.

По следующей формуле определяется снижение удельного расхода электрической энергии при применении НСВД с частотно-регулируемым электроприводом насоса и системой управления, поддерживающей постоянное гидравлическое давление в гидросистеме комплекса за цикл нагрузки-разгрузки стан-

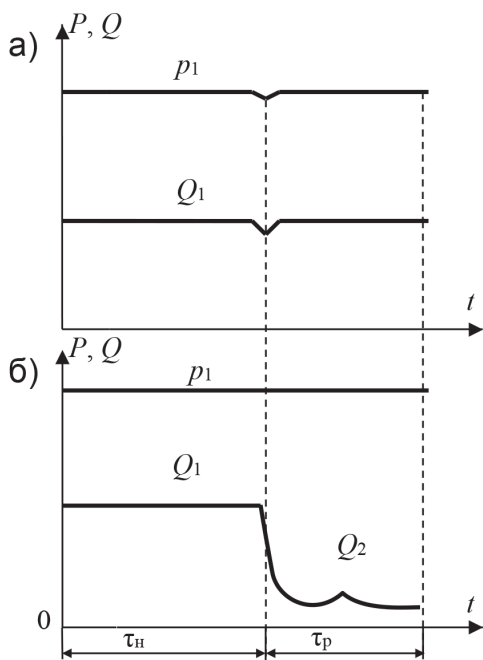


Рис. 2. Нагрузочные диаграммы работы насосной станции высокого давления: при работе разгрузочного клапана (а); с регулированием расхода станции при разгрузке (б)

Fig. 2. Load charts of high-pressure pumping station: in operation with decompression pressure control valve (a); in operation with delivery rate control during unloading (b)

ции по сравнению с базовым вариантом НСВД и постоянной длительности нагрузки станции:

$$\Delta\omega = \frac{p_1(Q_1 - Q_2)t_p n_c}{Q_{kc}}, \quad (5)$$

где n_c — число циклов работы станции в сутки.

Для рассматриваемого очистного забоя с модернизированными насосными станциями BRW400/31,5 и BRW400/37,5 и расходом эмульсии в режиме разгрузки 80 — 160 л/мин удельный расход электрической энергии снижается на 34 — 40%.

Заключение

1. Разработана аналитическая методика расчета удельного расхода элект-

рической энергии очистного забоя как взаимосвязанного технологического оборудования, учитывающая режимы работы забоя в добычные и ремонтную смены и позволяющая оценить вклад каждого типа оборудования в удельный расход забоя.

2. Установлено, что при работе ОК по челноковой схеме удельный расход электрической энергии очистного забоя на 15 — 20 ниже, чем при работе по односторонней схеме, и составил, соответственно, 2,56 — 3,29 и 3,02 — 4,12 кВт·ч/т. С удлинением лавы от 200 до 500 м удельный расход электрической энергии забоя увеличивается на 33,8% и на 28,8% соответственно для односторонней и челноковой схем работы ОК.

Удельный расход электрической энергии ОК практически не зависит от длины лавы и равен 1,1 и 1,0 кВт·ч/т, при этом доля удельного расхода ОК в общем расходе забоя составляет 38,3 — 27,6% и 43,5 — 31,5% соответственно для односторонней и челноковой схем работы ОК.

Удельный расход электрической энергии СК с увеличением длины лавы от 200 до 500 м увеличивается от 0,64 до 1,4 кВт·ч/т и от 0,53 до 1,25 кВт·ч/т, при этом доля удельного расхода СК в общем расходе забоя составляет 22,0 — 35,4% и 21,6 — 39,4% соответственно для односторонней и челноковой схем работы ОК.

Удельный расход электрической энергии НСВД составляет 0,38 — 0,80 кВт·ч/т, увеличивается с удлинением лавы и составляет 13 — 20% от общего расхода забоя.

Удельный расход электрической энергии насосной станции орошения находится в промежутке 0,23 — 0,32 кВт·ч/т и в общем расходе забоя составляет 4,1 — 10,0%.

Суммарный удельный расход электрической энергии перегружателя, оборудования в ремонтную смену, дробилки,

аппаратуры освещения не превышает 12% от общего расхода очистного забоя.

3. Применение системы стабилизации погонной нагрузки транспортной системы очистного забоя, включающей СК и перегружатель, позволяет снизить ее удельный расход электрической энергии на 31 – 36%, 14,5 – 17% и 7,5 – 11,5% соответственно при работе в лаве со средней сопротивляемостью угля резанию 300, 200 и 150 кН/м. Большие значения

снижения удельного расхода соответствуют работе СК в лаве с большей длиной.

4. Применение насосной станции высокого давления с частотно-регулируемым электроприводом насоса и системой управления, поддерживающей постоянное гидравлическое давление в гидросистеме комплекса, обеспечивает снижение удельного расхода электрической энергии станции на 34 – 40% за цикл нагрузки – разгрузки при расходе 80 – 160 л/мин в режиме разгрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарова А. Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса: Дис. докт. техн. наук: 05.09.03. – Кемерово: КузГТУ, 2002. – 328 с.

2. Ефимов В. И., Хмелинский А. А., Методьев С. Н. Современные подходы к компоновке оборудования для добычи угля на пологих пластах // Уголь. – 2019. – № 6. – С. 36 – 40.

3. 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.

4. Казаченко Г. В., Кислов Н. В., Бамсам Г. И. Основы расчета затрат мощности и производительности очистных и проходческих комбайнов. – Минск: БНГУ, 2015. – 75 с.

5. Бабокин Г. И. Исследование влияния технологической схемы работы и длины лавы на удельный расход электрической энергии очистного комбайна // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 139 – 149. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-139-149.

6. Бабокин Г. И., Шаллоева В. А. Исследование влияния технологической схемы работы очистного комбайна и длины лавы на удельный расход электрической энергии скребкового конвейера механизированного очистного забоя // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 167 – 176. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_167.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

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

11. 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.

12. Stebnev A. V., Zadkov D. A., Gabov V. V., Mukhortikov S. G. Analysis of operation of powered longwall systems in mines of SUEK-Kuzbass // Eurasian Mining. 2017, no. 2, pp. 28–32. DOI: 10.17580/em.2017.02.07.

13. Brodny J., Alszer S., Krystek M., Tutak M. Availability analysis of selected mining machinery // Archives of Control Sciences. 2017, vol. 27, no. 2, pp. 197–209.

14. Abramov B. I., Derzhavin D. A., Churikov D., Novoselov Yu. B., Suslov M. A., Shevyrev Yu. V. Instrumental studies of the electrical energy quality for oil field under conditions of widespread application of frequency-regulated electrical drives // Oil Industry. 2016, no. 1, pp. 90–92.

15. Малафеев С. И., Малафеев С. С. Информационные и управляющие компоненты электрических карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 33–45. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33-45.

16. 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.

17. 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.

18. Бойков И. Л., Шестаков В. В., Заклика М., Ульрих Н. Опыт внедрения преобразователей частоты для привода забойных конвейеров шахты Воргашорская // Глюкауф. – 2010. – № 1(2). – С. 79–89.

19. 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.

20. 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.

21. Andreas Wahl KAMAT: высокоэнергоэффективные насосные станции для длинных очистных забоев // Горная промышленность. – 2016. – № 3. – С. 30–34.

22. 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.

23. Кантович Л. И., Мерзляков В. Г. Горные машины и оборудование для подземных горных работ. – М.: Изд-во «Горная книга», 2014. – 453 с.

24. Серов В. И. Об автоматизации угольных комбайнов // Уголь. – 1985. – № 4. – С. 37–41.

25. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Транспортные машины. – М.: Изд-во «Горная книга», 2010. – 588 с. **MIAB**

REFERENCES

1. Zaharova A. G. *Zakonomernosti elektropotrebleniya na ugol'nyh shahtah* [Regularities of electricity consumption in coal mines], Doctor's thesis, Kemerovo, KuzGTU, 2002, 328 p.

2. 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].

3. 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. Yalovsky. *Ugol'*. 2018, no. 7, pp. 4–7. [In Russ].

4. Kazachenko G. V., Kislov N. V., Bamsam G. I. *Osnovy rascheta zatrat moshchnosti i proizvoditel'nosti ochistnyh i prohodcheskih kombajnov* [Fundamentals of calculating the power and performance costs of shearers and road-headers], Minsk, BNGU, 2015, 75 p.

5. 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.

6. Babokin G. I., Shalloeve V. A. Influence of shearer operation flow chart and longwall length on specific energy consumption of scraper conveyor in fully mechanized working face. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 167 – 176. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_167.

7. 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.

8. 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].

9. Ordin A. A., Metel'kov A. A. On the issue of optimizing the length to the productivity of a complex mechanized working face of a coal mine. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh.* 2013, no. 2, pp. 100 – 112. [In Russ].

10. Plotnikov V. V. Derivation of a formula for calculating the performance of shearers with a drift, drum or crown executive body. *Ugol'.* 2009, no. 9, pp. 47 – 55. [In Russ].

11. 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.

12. Stebnev A. V., Zadkov D. A., Gabov V. V., Mukhortikov S. G. Analysis of operation of powered longwall systems in mines of SUEK-Kuzbass. *Eurasian Mining.* 2017, no. 2, pp. 28 – 32. DOI: 10.17580/em.2017.02.07.

13. Brodny J., Alszer S., Krystek M., Tutak M. Availability analysis of selected mining machinery. *Archives of Control Sciences.* 2017, vol. 27, no. 2, pp. 197 – 209.

14. Abramov B. I., Derzhavin D. A., Churikov D., Novoselov Yu. B., Suslov M. A., Shevyrev Yu. V. Instrumental studies of the electrical energy quality for oil field under conditions of widespread application of frequency-regulated electrical drives. *Oil Industry.* 2016, no. 1, pp. 90 – 92.

15. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Information and control elements of electric mining shovels. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 4, pp. 33–45. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_4_0_33-45.

16. 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.

17. 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.

18. Boykov I. L., Shestakov V. V., Zaklika M., Ul'rih N. Experience in the implementation of frequency converters to drive the face conveyors of the Vorgashorskaya mine. *Glyukauf.* 2010, no. 1(2), pp. 79 – 89. [In Russ].

19. 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.

20. 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.

21. Andreas Wahl KAMAT: Highly energy efficient longwall pumping stations. *Russian Mining Industry.* 2016, no. 3, pp. 30 – 34. [In Russ].

22. 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.

23. Kantovich L. I., Merzlyakov V. G. *Gornye mashiny i oborudovanie dlya podzemnykh gornyh rabot* [Mining machinery and equipment for underground mining], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2014, 453 p.

24. Serov V. I. On the automation of coal harvesters. *Ugol'.* 1985, no. 4, pp. 37 – 41. [In Russ].

25. Galkin V. I., Sheshko E. E. *Transportnye mashiny* [Transport machines]. Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2010, 588 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабочкин Геннадий Иванович — д-р техн. наук, профессор,
ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: babokinginov@yandex.ru,
Шпрехер Дмитрий Маркович — д-р техн. наук, доцент,
Тульский государственный университет, e-mail: shpreher-d@yandex.ru.
Для контактов: Шпрехер Д.М., e-mail: shpreher-d@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.I. Babokin, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: babokinginov@yandex.ru,
D.M. Shprekher, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Tula State University, 300012, Tula, Russia, e-mail: shpreher-d@yandex.ru.
Corresponding author: D.M. Shprekher, e-mail: shpreher-d@yandex.ru.

Получена редакцией 29.06.2021; получена после рецензии 08.07.2021; принята к печати 10.08.2021.
Received by the editors 29.06.2021; received after the review 08.07.2021; accepted for printing 10.08.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭТАПОВ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ ВОЛАТИЛЬНОСТИ ЦЕН НА РЫНКЕ УГЛЯ

(2021, № 4, СБ 8, 24 с.)

Бехер Вадим Григорьевич — аспирант, ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: v.bekher@yandex.ru.

Волатильность цен на уголь заставляет оперативно реагировать на быстро изменяющуюся ситуацию за счет управления экономическими показателями добычи угля. Эффективно этот процесс может быть реализован во временных интервалах, обеспечивающих приемлемый уровень достоверности прогнозирования поведения цен. События, связанные с падением цен на рынке угля в 2019–2020 гг. стали для экономики многих угледобывающих предприятий серьезным испытанием, ряд предприятий оказался на грани закрытия. Одной из основных причин такой ситуации является неэффективное регулирование режима горных работ в целом и уровнем транспортной работы в частности. В условиях волатильности мирового рынка угля важной задачей является планомерное формирование конкурентоспособных вскрытых и готовых к выемке запасов, что во многом определяется обеспечением заданного уровня себестоимости добычи угля.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS OF OPEN-PIT MINING OPERATIONS STAGES IN THE CONDITIONS OF PRICE VOLATILITY ON COAL MARKET

V.G. Bekher, Graduate Student, Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: v.bekher@yandex.ru.

The volatility of coal prices makes it necessary to react quickly to the rapidly changing situation by managing the economic indicators of coal production. Effectively, this process can be implemented in time intervals that provide an acceptable level of reliability of forecasting price behavior. The events related to the fall in prices on the coal market in 2019–2020 became a serious test for the economy of many coal mining enterprises, a number of enterprises were on the verge of closure. One of the main reasons for this situation is the inefficient regulation of the mining regime in general and the level of transport work in particular. In the conditions of the volatility of the global coal market, an important task is the systematic formation of competitive open and ready-to-extract reserves, which is largely determined by ensuring a given level of the cost of coal production.