

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ РАБОТЫ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА И ДЛИНЫ ЛАВЫ НА УДЕЛЬНЫЙ РАСХОД ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СКРЕБКОВОГО КОНВЕЙЕРА МЕХАНИЗИРОВАННОГО ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

Г.И. Бабокин¹, В.А. Шаллоева¹

¹ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: babokinginov@yandex.ru

Аннотация: Исследовано влияние технологической схемы работы очистного комбайна и длины лавы на удельный расход электрической энергии скребкового конвейера механизированного забоя угольной шахты при отработке пластов пологого падения с целью оценки энергоэффективности. Доля электрической энергии, потребляемой технологическими операциями добычи и транспортирования угля механизированными очистными забоями составляет 12–16% от общего потребления угольной шахты, поэтому исследование влияния технологических режимов работы оборудования и параметров очистного забоя на удельный расход электрической энергии скребкового конвейера актуальны. Разработана методика расчета удельного расхода электроэнергии электроприводом конвейера, позволяющая повысить точность расчета энергетических и технико-экономических параметров механизированного забоя с учетом особенностей электропотребления при выполнении технологических операций. Исследование проведено для механизированного забоя с комплексом YOU, работающего в условиях пласта 19 шахты «Костромовская» ООО «ММК-уголь», при вынимаемой мощности пласта 2 м. Установлены зависимости удельного расхода электроэнергии скребкового конвейера АФС для механизированного комплекса YOU от длины лавы и технологической схемы работы комбайна. Показано, что с увеличением длины лавы очистного забоя от 200 до 500 м удельный расход электроэнергии конвейера, вычисляемый в кВт·ч/т, увеличивается при односторонней схеме работы комбайна с 0,64 до 1,4, а при челноковой схеме работы — с 0,53 до 1,25. При росте длины лавы очистного забоя от 200 до 500 м удельный расход электроэнергии конвейера, вычисляемый в кВт·ч/т·км, уменьшается с 3,2 до 2,8 для односторонней схемы работы комбайна и с 2,65 до 2,5 — для челноковой схемы работы. Применение челноковой схемы работы комбайна в механизированном комплексе позволяет повысить энергоэффективность скребкового конвейера на 11 — 18% по сравнению с односторонней схемой за счет повышения уровня загрузки конвейера. Доля удельного расхода электрической энергии скребкового конвейера в суммарном удельном расходе очистного комбайна и скребкового конвейера с увеличением длины лавы от 200 м до 500 м растет с 25% до 56%.

Ключевые слова: скребковый конвейер, удельный расход электроэнергии, механизированный очистной забой, потребляемая мощность, очистной комбайн, длина лавы, технологическая схема работы комбайна.

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

Influence of shearer operation flow chart and longwall length on specific energy consumption of scraper conveyor in fully mechanized working face

G.I. Babokin¹, V.A. Shalloeveva¹

¹ National University of Science and Technology «MISIS», Moscow, Russia,
e-mail: babokinginov@yandex.ru

Abstract: The influence exerted by the shearer operation flow chart and the longwall length on the specific energy consumption of a scraper conveyor in the fully mechanized working face in gently dipping coal seams is studied for the energy efficiency evaluation. Power consumed in mining and haulage of coal in fully mechanized longwalls amounts to 12–16% of the total energy consumption in a coal mine. For this reason, it seems important to analyze the influence of process conditions of equipment and parameters of longwall face on the specific energy consumption of a scraper conveyor. The procedure developed for the calculation of the specific energy consumption improves accuracy of capacity and performance of a fully mechanized longwall face with regard to specific features of energy consumption. The article presents a case-study of longwall face in coal seam 19 in Kostromovskaya Mine of MMK-Ugol, at mining height of 2 m. The dependences of the specific energy consumption by AFC on the longwall length and the shearer operation flow chart are determined. It is shown that with increasing length of the longwall from 200 to 500 m, the specific energy consumption of the scraper conveyor grows from 0.64 to 1.4 kW h/t in case of one-way operation of the shearer and from 0.53 to 1.25 kW h/t in case of shuttle operation of the shearer, or decreases from 3.2 to 2.8 kW h/r km and from 2.65 to 2.5 kW h/t km in one-way and shuttle operation of the shearer, respectively. The shuttle operation of the shearer improves the energy efficiency of the scraper conveyor by 11–18% as compared with the one-way flow chart owing to higher load of the conveyor. The share of the specific energy consumption of AFC in the total specific energy consumption of the shearer–conveyor system grows from 25 to 56% with an increase in the length of the longwall from 200 to 500 m.

Key words: scraper conveyor, specific energy consumption, fully mechanized longwall face, consumed power, shearer, longwall length, shearer operation flow chart.

For citation: Babokin G.I., Shalloeveva 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;(3):167-176. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_3_0_167.

Введение

Одним из основных энергоресурсов, применяемых при выработке электрической энергии и в металлургии является уголь, добываемый открытым и подземным способом. При подземной добыче угольные шахты потребляют в основном электрическую энергию, составляющую около 80% всех потребляемых энергоресурсов. При этом расход электрической энергии на операции добычи и транспортирование угля составляет

12 – 16% от общего потребления электрической энергии шахты [1].

В связи с возрастающей конкуренцией на мировом рынке угля, 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 применяемых при добыче и транспортировании угля очистных механизированных

забоев, включающих очистной комбайн, скребковый конвейер и другое оборудование, достигается увеличением установленной мощности оборудования, повышением длины лавы, совершенствованием технологических схем работы. Установленная мощность скребкового конвейера механизированного забоя достигает 1000–3000 кВт и составляет около 50% установленной электрической мощности забоя, поэтому вопросам снижения удельного расхода электрической энергии при транспортировании угля скребковым конвейером уделяется достаточно внимания.

В работах [2–4] показано, что применение регулируемого электропривода скребкового конвейера позволяет снизить динамические нагрузки в элементах конвейера при пуске, обеспечить выравнивание нагрузок головного и концевого приводов и повысить надежность конвейера, а в ряде случаев снизить затраты на транспортирование угля.

В работах [4–8] рассмотрены следующие методы снижения удельного электропотребления электроприводом скребкового конвейера: исключение режима работы конвейера на холостом ходу, повышение коэффициента полезного действия электропривода, снижение удельного сопротивления движению тягового органа с грузом; регулирование скорости движения тягового органа конвейера в зависимости от режима работы очистного комбайна. В ряде работ при оценке параметров энергосбережения учтена неравномерность грузопотока, поступающего на конвейер [6–8].

В работах [6–12, 13–16] рассмотрено влияние горно-геологических и технологических факторов на энергетические характеристики оборудования механизированного очистного забоя. При этом отсутствуют количественные оценки влияния технологической схемы работы комбайна и длины лавы на удель-

ный расход электрической энергии скребкового конвейера комплекса. Кроме того, расчет электрической энергии, потребляемой электроприводом конвейера, и удельного расхода конвейера осуществляется методом коэффициента спроса, не учитывающим достаточно точно реальные режимы работы оборудования механизированного забоя. В связи с изложенным разработка методики расчета удельного расхода электрической энергии конвейера с учетом технологических режимов и параметров работы забоя, а также оценка влияния технологической схемы работы очистного комбайна и длины лавы на удельный расход электрической энергии скребкового конвейера актуальны.

Методика расчета

На основе анализа результатов работ [6, 7, 17] и режима работы скребкового конвейера в механизированном забое предложено определять активную мощность потребляемой электрической энергии конвейера по формуле:

$$P_k = P_x + P_v = K_{из} [2 q_{ц} \cdot \omega_{ц} \cdot g \cdot L_k \cdot V_{л}] \eta_p^{-1} \cdot \eta_{эп}^{-1} + K_{из} [q_{г} \cdot \omega_{г} \cdot g \cdot L_3 \cdot V_{л}] \eta_p^{-1} \cdot \eta_{эп}^{-1} \quad (1)$$

где P_x , P_v — мощность холостого хода конвейера и переменная мощность, зависящая от грузопотока и длины загруженной части конвейера; $q_{ц}$, $q_{г}$ — вес погонного метра цепного органа и груза (угля), кг/м; $\omega_{ц}$, $\omega_{г}$ — коэффициенты сопротивления движению тягового органа и груза; $V_{л}$ — скорость движения тягового органа, м/с; L_k , L_3 — длина конвейера и загруженной части конвейера, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; η_p , $\eta_{эп}$ — КПД редуктора и электропривода конвейера; $K_{из}$ — коэффициент, учитывающий дополнительное усилие при изгибе конвейера. Следует отметить, что длина конвейера практически равна длине лавы.

Вес погонного метра груза на конвейере зависит от производительности комбайна Q_k и равен [17]:

$$q_{\Gamma} = \frac{Q_k}{V_{\Gamma} \cdot 3,6}, \quad (2)$$

где $Q_k = 60 \cdot H \cdot B \cdot \gamma \cdot V_{\Gamma}$, т/ч; H – вынимаемая мощность пласта, м; B – ширина захвата исполнительного органа комбайна, м; γ – удельный вес отбитого угля, кг/м³; V_{Γ} – скорость подачи комбайна, м/мин.

Длина загруженной части конвейера L_3 зависит от положения комбайна в лаве и скорости его перемещения V_{Γ} при выполнении технологических операций разрушения угля и погрузки его на конвейер:

$$L_3 = L_{KH} \pm \int_{t_H}^{t_K} V_{\Gamma} dt, \quad (3)$$

где L_{KH} – начальная длина загруженной части конвейера; t_H, t_K – время начала и окончания выполнения технологической операции.

С учетом (2) и (3) мощность, потребляемая электроприводом конвейера, для любой операции комбайна определяется по формуле:

$$P_K = P_X + 0,277 \cdot \omega_{\Gamma} \cdot g \cdot Q_k \cdot L_3 \quad (4)$$

Величина мощности и энергии, потребляемой электроприводом скребково-

го конвейера комплекса, определяется грузопотоком, формируемым очистным комбайном, и зависит от технологической схемы его работы. В настоящее время нашли применение односторонняя и челноковая схемы работы [6, 10, 12].

При односторонней схеме работы комбайна цикл работы по выемке полосы угля по всей длине лавы включает следующие операции: разрушение угля и погрузку его на конвейер при движении комбайна вверх по лаве (выемка угля) длительностью t_B ; зачистку машинной дороги и погрузку угля на конвейер при движении вниз по лаве длительностью $t_{3ч}$; зарубку исполнительного органа комбайна в пласт угля на конце лавы длительностью $t_{3р}$. Далее цикл работы комбайна повторяется. Вес погонного метра перемещаемого груза в течение цикла работы изменяется, и потребляемая электроприводом конвейера мощность, определенная по уравнению (4), для интервалов времени цикла представлена на рис. 1, а.

Электрическая энергия, потребляемая конвейером за сутки, при односторонней технологической работе определяется согласно уравнению:

$$W_{\text{сут.о}} = [0,5 P_X \cdot (t_B + t_{3ч}) + 0,5 P_{M1} \cdot t_B + 0,5 P_{M2} \cdot t_{3ч} + P_{3р} \cdot t_{3р}] \cdot T_{\text{см}} \cdot n_{\text{см}} \cdot t_{\text{цо}}^{-1} \quad (5)$$

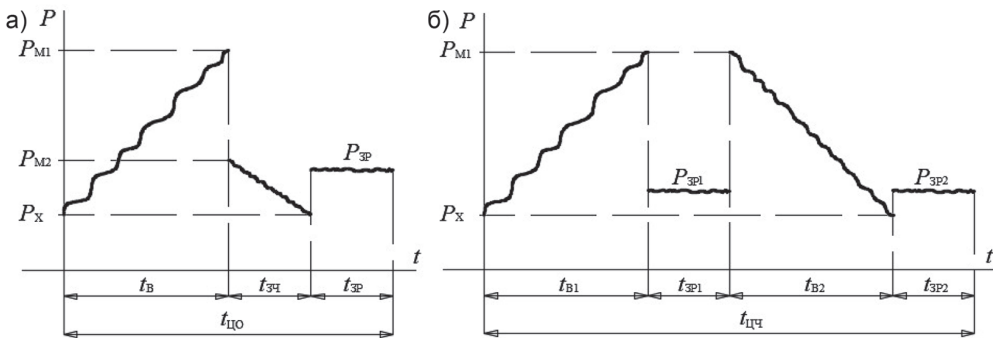


Рис. 1. Диаграммы мощности, потребляемой электроприводом скребкового конвейера: односторонняя схема работы комбайна (а); челноковая схема работы комбайна (б)

Fig. 1. Diagrams of power consumed by scraper conveyor motor: one-way operation of shearer (a); shuttle operation of shearer (b)

где $T_{\text{СМ}}$ — длительность рабочей смены, ч; $n_{\text{СМ}}$ — число рабочих смен в сутки; $t_{\text{ЦО}} = t_{\text{В}} + t_{\text{ЗЧ}} + t_{\text{ЗР}}$ — длительность цикла выемки полосы угля. $P_{\text{М1}}, P_{\text{М2}}$ — максимальные мощности электропривода конвейера при длине его загрузки $L_3 = L_{\text{К}}$ для операций выемки угля и зачистки машинной дороги определяются по формуле (4), $P_{\text{ЗР}}$ — средневзвешенная мощность электропривода конвейера при зарубке.

При челноковой схеме работы комбайна в механизированном комплексе цикл работы включает операции: разрушение и погрузку угля на конвейер при движении комбайна вверх по лаве длительностью $t_{\text{В1}}$; зарубку исполнительного органа комбайна в пласт угля на вентиляционном штреке длительностью $t_{\text{ЗР1}}$; разрушение и погрузку угля на конвейер при движении комбайна вниз по лаве длительностью $t_{\text{В2}}$; зарубку исполнительного органа комбайна на конвейерном штреке длительностью $t_{\text{ЗР2}}$. Далее работа комбайна повторяется. Вес погонной нагрузки конвейера при выемке угля выше, чем при зарубке. Мощность, потребляемая электроприводом конвейера, определяется по формуле (4) для соответствующих операций цикла и представлена на рис. 1, б. Энергия, потребляемая конвейером за сутки, при челноковой схеме работы комбайна определяется по формуле:

$$W_{\text{СУТ.Ч}} = 0,5(P_{\text{М1}} + P_{\text{Х}}) \cdot (t_{\text{В1}} + t_{\text{В2}}) + P_{\text{ЗР1}} \cdot t_{\text{ЗР1}} + P_{\text{ЗР2}} \cdot t_{\text{ЗР2}}, \quad (6)$$

где $P_{\text{ЗР1}}, P_{\text{ЗР2}}$ — средневзвешенные мощности, потребляемые электроприводом конвейера при зарубке на концах лавы, кВт.

Суточные объемы добычи и транспортировки скребковым конвейером угля механизированного комплекса при односторонней и челноковой схеме равны [10]:

$$Q_{\text{СУТ.О}} = 60 \cdot B \cdot H \cdot \gamma \cdot L_{\text{К}} \cdot n_{\text{СМ}} \cdot T_{\text{СМ}} \cdot t_{\text{ЦО}}^{-1} \quad (7)$$

$$Q_{\text{СУТ.Ч}} = 120 \cdot B \cdot H \cdot \gamma \cdot L_{\text{К}} \cdot n_{\text{СМ}} \cdot T_{\text{СМ}} \cdot t_{\text{ЦО}}^{-1} \quad (8)$$

Средний удельный расход электроэнергии конвейером на транспортирование угля за сутки определяется параметрами:

$$\omega_{\text{С1}} = W_{\text{СУТ}} / Q_{\text{СУТ}} \quad (9)$$

$$\omega_{\text{С2}} = W_{\text{СУТ}} / Q_{\text{СУТ}} \cdot L_{\text{К}} \quad (10)$$

Удельный расход $\omega_{\text{С1}}$, измеряемый в кВт·ч/т, применяется при планировании и нормировании удельных расходов и расчете технико-экономических показателей механизированных комплексов при работе в конкретных условиях.

Удельный расход $\omega_{\text{С2}}$, измеряемый в кВт·ч/т·км, применяется для сравнения энергетических параметров различных типов конвейеров, отличающихся конструкцией.

Результаты исследования

Исследуем влияние на удельный расход электроэнергии скребкового конвейера AFC при работе с комбайном 4LS20 по рассмотренным технологическим схемам в механизированном комплексе YOU в условиях шахты «Костромовская» ООО «ММК-Уголь» при отработке пласта 19 (система разработки — длинные столбы по простиранию с полным обрушением) [10]. Комбайном 4L20 разрабатывался пласт угля мощностью $H = 2$ м, с сопротивляемостью угля резанию 300 кН/м, ширина захвата исполнительного органа $B = 0,8$ м, скорость подачи комбайна в технологических режимах определялась по методике [13]. Исследование проводилось при нулевом угле падения пласта, работе комбайна по выемке при постоянной скорости подачи, кроме того, было принято, что $t_{\text{В1}} = t_{\text{В2}}, t_{\text{ЗР1}} = t_{\text{ЗР2}}$.

При количественной оценке расчет удельных расходов конвейера осуществлялся по формулам (4) — (10) для двух технологических схем работы комбайна при изменении длины лавы. На рис. 2 представлены полученные зависимости

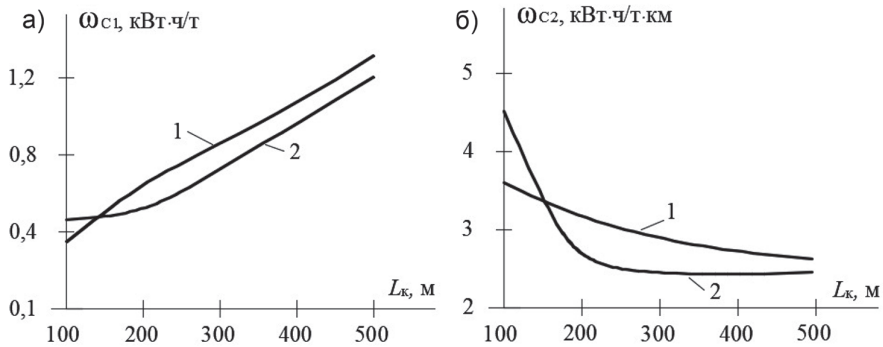


Рис. 2. Зависимости удельного расхода электрической энергии скребкового конвейера от длины лавы для односторонней (1) и челноковой (2) схем работы комбайна

Fig. 2. Specific energy consumption of AFC versus longwall length in one-way operation (1) and shuttle operation (2) of shearer

удельного расхода электрической энергии на транспортирование угля скребковым конвейером от длины лавы при односторонней и челноковой схемах работы комбайна.

Для лав длиной 100–150 м удельные затраты на транспортирование угля составляют 3,7–3,2 кВт·ч/т·км для односторонней схемы и 4,6–2,7 кВт·ч/т·км для челноковой схемы, а для лав длиной 150–500 м, соответственно, 3,2–3,8 кВт·ч/т·км и 3,2–2,5 кВт·ч/т·км. Из анализа полученных данных следует, что с увеличением длины лавы удельный расход ω_{c1} электроэнергии увеличивается, а удельный расход ω_{c2} уменьшается. Первое объясняется тем, что с увеличением длины лавы в соответствии с (1) возрастает доля расхода мощности P_x и энергии холостого хода в общих затратах на транспортирование угля. Второе объясняется тем, что удельный расход ω_{c2} , полученный путем приведения затрат на 1 км транспортирования, исключил влияние длины лавы на мощность холостого хода, и получен объективный параметр для сравнения энергоэффективности различных типов конвейеров.

Из данных рис. 2 следует, что при увеличении длины конвейера от 200 до 500 м удельный расход ω_{c1} растет на 19% и 35% соответственно для односто-

ронней и челноковой схем работы комбайна, что необходимо учитывать при планировании и нормировании удельных расходов комплекса. Удельный расход ω_{c2} с увеличением длины конвейера от 200 до 500 м снижается на 13% и 10% соответственно для односторонней и челноковой схем работы комбайна. Поэтому применение механизированных комплексов в лавах большей длины позволяет снизить удельные затраты электрической энергии на транспортирование угля скребковым конвейером. Применение челноковой схемы работы комбайна для лав длиной 200–500 м позволяет снизить удельный расход электроэнергии на транспортирование угля конвейером ω_{c1} на 13–11%, а удельный расход ω_{c2} — на 18–11% в сравнении с односторонней схемой работы. Это объясняется более полной загрузкой конвейера при операциях выемки угля, чем при операции зачистки машинной дороги, так как вес погонного метра угля, поступающего на конвейер при выемке угля в 3–4 раза выше, чем при зачистке, кроме того, сокращается время работы конвейера на холостом ходу. При длине менее 150 м удельный расход электрической энергии ω_{c2} и ω_{c1} при работе челноковой схемой выше, чем при односторонней схеме. Это связано с тем,

Удельный расход электрической энергии скребкового конвейера и очистного комбайна

Specific electric energy consumption of a scraper conveyor and a cleaning combine

№ п/п	Удельный расход электрической энергии, кВт·ч/т	Схема работы очистного комбайна	Длина лавы, м			
			200	300	400	500
1	Скребокый конвейер	односторонняя	0,64	0,88	1,08	1,40
		челноковая	0,53	0,78	1,00	1,25
2	Суммарная скребкового конвейера и очистного комбайна	односторонняя	1,75	1,97	2,19	2,49
		челноковая	1,60	1,80	2,00	2,24

что при уменьшении длины лавы доля длительности работы конвейера в цикле с малой загрузкой или на холостом ходу при работе по челноковой схеме выше, чем при односторонней схеме.

В работе получены сравнительные данные удельного расхода электрической энергии электроприводами скребкового конвейера АФС и очистного комбайна 4LS20, при работе в лаве в условиях, представленных в начале раздела, с сопротивляемостью угля резанию 300 кН/м и изменении длины лавы от 200 до 500 м, таблица.

Из данных таблицы следует, что доля удельного расхода электрической энергии, потребляемой электроприводом конвейера, в суммарном удельном расходе скребкового конвейера и комбайна с увеличением длины лавы от 200 до 500 м растет с 25 до 56%.

Заключение

1. Разработана методика расчета удельного расхода электроэнергии электроприводом конвейера, позволяющая повысить точность расчета энергетических и технико-экономических параметров механизированного забоя с учетом особенностей электропотребления при выполнении технологических операций в очистном забое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захарова А. Г. Закономерности электропотребления на угольных шахтах Кузбасса. — Кемерово: Изда-во КузГТУ, 2002. — 198 с.

2. Установлены зависимости удельного расхода электроэнергии скребкового конвейера для механизированного комплекса YOU от длины лавы и технологической схемы работы комбайна. Показано, что с увеличением длины лавы очистного забоя от 200 м до 500 м удельный расход электроэнергии конвейера, вычисляемый в кВт·ч/т увеличивается при односторонней схеме работы комбайна с 0,64 до 1,4, а при челноковой схеме работы с 0,53 до 1,25. При росте длины лавы очистного забоя от 200 до 500 м удельный расход электроэнергии конвейера, вычисляемый в кВт·ч/т·км, уменьшается с 3,2 до 2,8 для односторонней схемы работы комбайна и с 2,65 до 2,5 — для челноковой схемы работы.

3. Применение челноковой схемы работы комбайна в механизированном комплексе позволяет повысить энергоэффективность скребкового конвейера на 11 — 18% по сравнению с односторонней схемой за счет повышения уровня загрузки конвейера.

4. Доля удельного расхода электрической энергии скребкового конвейера в суммарном удельном расходе очистного комбайна и скребкового конвейера с увеличением длины лавы от 200 м до 500 м растет с 25% до 56%.

2. Кибрик И. С. К вопросу повышения эксплуатационной надежности привода забойных скребковых конвейеров // Уголь. — 2016. — № 8. — С. 96–97.
3. 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. 79–83.
4. Ткаченко А. А., Осичев А. В. Разработка моделей для исследования динамических процессов в электроприводах скребковых конвейеров // Вестник НТУ ХПИ. — 2013. — № 7. — С. 99–103.
5. Acarnley P.P., Watson J.F., Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. Vol. 53. No 2. Pp. 352–362.
6. 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.
7. Сергеев А. В., Кондрахин В. П., Стадник Н. И. Мехатроника в угольном машиностроении // Горное оборудование и электромеханика. — 2007. — № 4. — С. 20–29.
8. Бабокин Г. И. Энергосбережение в электроприводе конвейера // Известия вузов. Горный журнал. — 2002. — № 1. — С. 122–125.
9. 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.
10. 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.
11. Казаченко Г. В., Кислов Н. В., Бамсам Г. И. Основы расчета затрат мощности и производительности очистных и проходческих комбайнов. — Минск: БНГУ, 2015. — 75 с.
12. Галкин В. И., Шешко Е. Е. Транспортные машины. — М.: изд-во «Горная книга», МГГУ, 2010. — 588 с.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
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.
17. Плотников В. В. Вывод формулы для расчета производительности очистных комбайнов со штрековым, барабанным или корончатым исполнительным органом // Уголь. — 2009. — № 9. — С. 47–55. **PLAB**

REFERENCES

1. Zakharova A. G. Zakonomernosti elektropotrebleniya na ugol'nykh shakhtakh Kuzbassa [Regularities of power consumption in Kuzbass coal mines], Kemerovo, Izd-vo KuzGTU, 2002, 198 p.
2. Kibrik I. S. On the issue of improving the operational reliability of the drive of bottom-hole scraper conveyors. *Ugol'*. 2016, no 8, pp. 96–97. [In Russ].
3. Boikov I. L., Shestakov V. V., Zaklika M., Ulrich N. Experience in implementing frequency converters for driving downhole conveyors of the Vorgashorskaya mine. *Glyukauf*. 2010, no 1(2), pp. 79–83. [In Russ].

4. Tkachenko A. A., Osichev A. V. Development of models for the study of dynamic processes in electric drives of scraper conveyors. *Bulletin of the National Technical University «KhPI»*. 2013, no 7, pp. 99 – 103. [In Russ].

5. Acarnley P. P., Watson J. F., Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 53. No 2. Pp. 352 – 362.

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

7. Sergeev A. V., Kondrakhin V. P., Stadnik N. I. mechatronics in coal engineering. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2007, no 4, pp. 20 – 29. [In Russ].

8. Babokin G. I. Energy saving in the electric drive of the conveyor. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2002, no 1, pp. 122 – 125. [In Russ].

9. 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.

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

11. Kazachenko G. V., Kislov N. V., Bamsam G. I. *Osnovy rascheta zatrat moshchnosti i proizvoditel'nosti ochistnykh i prokhodcheskikh kombaynov* [Fundamentals of calculating the power and productivity costs of cleaning and tunneling combines], Minsk, BNGU, 2015, 75 p.

12. Galkin V. I., Sheshko E. E. *Transportnye mashiny* [Transport machines], Moscow, izd-vo «Gornaya kniga», MGGU, 2010, 588 p. 13. 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.

14. 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.

15. 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.

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.

17. 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].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бабокин Геннадий Иванович¹ – д-р техн. наук, профессор,

e-mail: babokinginov@yandex.ru,

Шаллоева Валерия Афанасьевна¹ – e-mail: gotovtseva.va@misis.ru,

¹ НИТУ «МИСиС».

Для контактов: Бабокин Г.И., e-mail: babokinginov@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

G.I. Babokin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: babokinginov@yandex.ru,

V.A. Shalloeveva¹, e-mail: gotovtseva.va@misis.ru,

¹ National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia.

Corresponding author: G.I. Babokin, e-mail: babokinginov@yandex.ru.

Получена редакцией 21.05.2020; получена после рецензии 02.10.2020; принята к печати 10.03.2021.

Received by the editors 21.05.2020; received after the review 02.10.2020; accepted for printing 10.03.2021.

**СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ ТОПЛИВА
К КОТЛУ НА ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

(№ 1233/04-21 от 18.02.2021; 22 с.)

*Дмитриева Валерия Валерьевна*¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
*Дзюин Дмитрий Владленович*¹ — студент, e-mail: dziouin@mail.ru,
¹ РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина.

Проведен анализ технологического процесса регулирования тепловой нагрузки и экономичного сжигания топлива в топках барабанных парогенераторов на ТЭЦ. Выполнен анализ объекта управления — котельного агрегата типа Е-75-3,9-440Г. Разработана математическая модель системы подачи топлива и воздуха к парогенератору в соответствии с характеристиками устанавливаемого оборудования. Произведены расчеты параметров этой модели. Исполнительным элементом системы является электрический однооборотный механизм, предназначенный для приведения в действие запорно-регулирующей арматуры в каналах подачи топлива и воздуха. Выполнен синтез двухканальной системы регулирования для обеспечения оптимального соотношения расходов топлива и воздуха с коррекцией по содержанию кислорода в дымовых газах. Модель автоматической системы регулирования реализована в ППП Matlab, среде Simulink. Полученные результаты показывают правильность настроек системы каскадного регулирования. Приведен вариант комплекса необходимых технических средств для практической реализации разработанной системы управления.

Ключевые слова: теплоэлектростанция, котельный агрегат, барабанный парогенератор, канал подачи топлива, канал подачи воздуха, корректирующий регулятор, система каскадного регулирования, экономичность сжигания топлива, содержание кислорода в уходящих газах, механизм электрический однооборотный, дроссельная поворотная заслонка, моделирование в Simulink, программно-технический комплекс.

**SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF FUEL SUPPLY TO THE BOILER
AT THE THERMAL POWER PLANT**

*V.V. Dmitrieva*¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
*D.V. Dzyuin*¹, Student, e-mail: dziouin@mail.ru,

¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), 119991, Moscow, Russia.

The article is devoted to the analysis of the technological process of heat load control and cost-effective fuel combustion in furnaces of drum steam generators at a thermal power plant. The object of automation — boiler unit type «E-75-3,9-440G» — is analyzed. The mathematical model of fuel and air supply system to the steam generator is developed according to installed equipment characteristics. The model's parameters are calculated. The actuating element of the system is an electric single-turn mechanism designed to actuate shut-off and control valves in the fuel and air supply channels. Two-channel control system is synthesized for providing an optimal ratio of fuel and air consumption with oxygen content correction in the flue gases. The automatic control system model is realized in Matlab application package, Simulink programming environment. The achieved results show the right settings for cascade control system. In conclusion, an example of the necessary technical equipment complex is listed for realizing the developed control system in practice.

Key words: thermal power plant, boiler unit, drum steam generator, fuel supply channel, air supply channel, correcting regulator, cascade control system, cost-effective fuel combustion, oxygen content in the flue gases, electric single-turn mechanism, butterfly valve, Simulink modelling, software and hardware complex.