



ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ УГЛЯ КОНВЕЙЕРНЫМ ТРАНСПОРТОМ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ ГРУЗОПОТОКЕ ИЗ ЛАВЫ

Е. Ю. Степаненко

*ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
58, ул. Артема, г. Донецк, ДНР, 83001.
E-mail: gormash@fimm.donntu.org*

Получена 08 октября 2019; принята 25 ноября 2019.

Аннотация. Одной из важнейших составляющих горного производства является транспортировка отбитой горной массы конвейерным транспортом. Как показывает практика, современные методы транспортировки недостаточно эффективны с учетом энергопотребления. Это обусловлено неравномерностью грузопотока из лавы в течение рабочей смены, что приводит к превышению нормативных значений потребления энергии в три раза. Настоящая работа посвящена актуальной проблеме поиска путей снижения энергозатрат конвейерного транспорта при переменном грузопотоке из лавы с целью снижения себестоимости добычи угля. На основе разработанной виртуальной модели получены зависимости общего энергопотребления конвейеров при различных режимах регулирования скорости ленты. Установлено, что наиболее целесообразным по критерию снижения суммарного энергопотребления с вложением минимальных инвестиционных затрат является применение трехскоростного дискретного регулирования. Увеличение количества рабочих скоростей более трех не дает существенного прироста дополнительной экономии.

Ключевые слова: конвейерный транспорт, грузопоток, очистной забой, неравномерность, регулирование, моделирование, рабочий процесс, энергопотребление.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВУГІЛЛЯ КОНВЕЄРНИМ ТРАНСПОРТОМ ПРИ ЗМІННОМУ ВАНТАЖОПОТОЦІ З ЛАВИ

О. Ю. Степаненко

*ДОНУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
58, вул. Артема, м. Донецьк, ДНР, 83001.
E-mail: gormash@fimm.donntu.org*

Отримана 08 жовтня 2019; прийнята 25 листопада 2019.

Анотація. Однією з найважливіших складових гірничого виробництва є транспортування відбитої гірничої маси конвеєрним транспортом. Як показує практика, сучасні методи транспортування недостатньо ефективні з урахуванням енергоспоживання. Це обумовлено нерівномірністю вантажопотоку з лави протягом робочої зміни, що призводить до перевищення нормативних значень споживання енергії в три рази. Дана робота присвячена актуальній проблемі пошуку шляхів зниження енерговитрат конвеєрного транспорту при змінному вантажопотоці з лави з метою зниження собівартості видобутку вугілля. На основі розробленої віртуальної моделі отримані залежності загального енергоспоживання конвеєрів при різних режимах регулювання швидкості стрічки. Встановлено, що найбільш доцільним за критерієм зниження сумарного енергоспоживання зі вкладенням мінімальних інвестиційних витрат є застосування трьохшвидкісного дискретного регулювання. Збільшення кількості робочих швидкостей більше трьох не дає суттєвого приросту додаткової економії.

Ключові слова: конвеєрний транспорт, вантажопотік, очисний вибій, нерівномірність, регулювання, моделювання, робочий процес, енергоспоживання.

RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF COAL TRANSPORTATION BY CONVEYOR TRANSPORT WITH VARIABLE CARGO FLOW FROM COALFACE

Elena Stepanenko

*Donetsk National Technical University,
58, Artema Str., Donetsk, DPR, 83001.
E-mail: gormash@fimm.donntu.org*

Received 08 October 2019; accepted 25 November 2019.

Abstract. One of the most important components of the mining industry is the delivery of cargo by conveyor transport. However, modern transportation methods are not sufficiently efficient in terms of energy consumption. This is due to the uneven flow of cargo from the lava during the work shift, which leads to three times the normative values of energy consumption. The present work is devoted to the urgent problem of finding ways to reduce the energy consumption of conveyor transport with variable cargo flow from lava in order to reduce the cost of coal production. Based on the developed virtual model, the dependences of the total energy consumption of the conveyors are obtained for various modes of belt speed control. It has been established that the most appropriate is the use of three-speed discrete control with criterion for reducing total energy consumption with an investment of minimum investment costs. An increase in the number of operating speeds of more than three does not give a significant increase in additional savings.

Keywords: conveyor transport, cargo flow, coalface, unevenness, regulation, modeling, workflow, energy consumption.

Актуальность

В настоящее время конвейерные транспортные системы являются одним из важнейших звеньев транспортной системы угольных шахт. Они характеризуются универсальностью, простотой автоматизации и высокой производительностью при большой длине и сравнительно небольшой мощности транспортировки. Однако вследствие особенностей технологического процесса добычи угля конвейерные транспортные системы загружаются неравномерно. При этом такие факторы, как сложность пуска в загруженном состоянии и необходимость высокой степени готовности к принятию груза, требуют непрерывной работы конвейеров без остановок. Как показывает опыт эксплуатации, конвейерный транспорт за период рабочей смены загружается не в полном объеме, а иногда работает без нагрузки, то есть в режиме холостого хода. Это приводит к значительным непроизводительным затратам электроэнергии, которые могут превышать нормативные значения в три раза. Настоящая работа посвящена поиску путей снижения энергозатрат конвейерного транспорта при переменном

грузопотоке из лавы, что позволит добиться снижения себестоимости добычи угля, и является актуальной научно-технической задачей современного горного машиностроения.

Анализ исследований и публикаций

Исследования зависимости энергозатрат на транспортирование груза конвейерным транспортом от величины грузопотока проводились начиная со второй половины 60-х годов [1]. Однако по состоянию на сегодняшний день [1–14] вопрос целесообразности и рационального алгоритма регулирования скорости тягового органа ленточных конвейеров, обеспечивающих, как правило, транспортирование груза при интенсивной выемке угля из нескольких забоев, изучен недостаточно. Результаты исследований энергоэффективности ленточных конвейеров с регулируемым приводом, описанные в работах [2–5], существенно разнятся. Кроме того, проблемной является ситуация с оценкой статистических характеристик грузопотока на шахтном конвейерном транспорте, от которых напрямую зависит результат расчета их энергоэффективности [6].

Исследования [7, 8] указывают на неравномерный характер грузопотока из лавы и позволяют произвести его моделирование как случайного процесса, однако не анализируют причины неравномерности шахтного грузопотока и поступления груза на транспортную цепочку шахты. В работе [9] разработаны структурная и математическая модель процесса формирования выходного грузопотока из лавы, параметры которого могут быть использованы в качестве исходных данных для моделирования рабочего процесса ленточного конвейера. Об актуальности вопроса снижения энергопотребления транспортирования груза, в частности адаптацией скорости транспортных средств к источникам грузопотоков, свидетельствуют результаты исследований [10]. Однако внимание здесь сконцентрировано на повышении качества электроэнергии и не рассмотрен вопрос влияния неравномерности исходного грузопотока на показатели энергопотребления транспортирования груза. Энергетическая модель ленточного конвейера, представленная в [11], сводится к определению четырех расчетных коэффициентов его рабочего процесса, при этом вопросы, связанные с влиянием неравномерности входного грузопотока на величину энергопотребления на конвейере, остаются открытыми. В работе [12] установлена существенная неравномерность грузопотока и массы транспортируемого груза на ленте, а также их влияние на величину и характер неравномерности нагруженности приводных двигателей. Таким образом, необходимо проведение дальнейших исследований по обоснованию способа снижения энергопотребления на конвейерном транспорте в условиях переменного грузопотока из лавы.

Цель исследования

Поиск рационального способа регулирования скорости ленты конвейера по критерию минимизации суммарного энергопотребления на функционирование ленточного конвейера.

Основной материал

На основе методики, приведенной в работе [15], с использованием программного пакета «Matlab Simulink» разработана виртуальная модель для определения наиболее оптимального способа регулирования, позволяющая определить потребление электроэнергии при различных ре-

жимах регулирования скорости ленты как для одного, так и для цепи одновременно работающих конвейеров.

На начальном этапе моделирования задается грузопоток из очистного забоя, который описывается как произведение двух взаимно некоррелированных величин: непрерывной $Q'(t)$ и дискретной $Y_Q(t)$:

$$Q(t) = Q'(t) \cdot Y_Q(t). \quad (1)$$

Непрерывная составляющая грузопотока $Q'(t)$ аппроксимируется случайной функцией с распределением мгновенных значений производительности по закону, близкому к нормальному. Дискретная составляющая $Y_Q(t)$ описывается обобщенной функцией, которая представляет собой бесконечную сумму функций Хевисайда, взятых по очереди с положительными и отрицательными знаками. Дискретная составляющая $Y_Q(t)$ может быть описана как поток готовности технологической цепи [16].

Алгоритм моделирования рабочего процесса конвейера позволяет выполнить расчет величины переменной транспортной задержки при регулировании скорости ленты либо присваивает постоянное значение указанной величине в случае отсутствия регулирования. Также определяется разница значений грузопотока до и после транспортной задержки и интегрируется по времени для определения текущей массы отбитого угля на конвейере Q_s . С учетом скорости конвейера V_k и веса его перемещающихся частей F рассчитывается величина энергопотребления по зависимости, приведенной в работе [16]:

$$W = F \left(Q_s \left[\begin{matrix} Q(t_i), Q(t_{i-1}), \\ Q(t_{i-\tau}), V_k(Q(t_i)) \end{matrix} \right] \right) \times \times V_k(Q(t_i)) \cdot t, \quad (2)$$

где $Q(t_{i-\tau})$ – значения процесса погрузки угля на ленту $Q(t)$, которые отстают от $Q(t_i)$ на переменную транспортную задержку.

Для проверки адекватности модели использованы данные, приведенные в работе [17]. Установлено, что разница результатов моделирования в сравнении с результатами исследований [17] составляет не более 5 %.

Для определения оптимального способа повышения энергоэффективности процесса транспортировки отбитой горной массы промоделированы рабочие процессы конвейеров с различными

схемами регулирования при одинаковых условиях эксплуатации. Исходные данные для моделирования грузопотока взяты из работы [9]: математическое ожидание производительности очистного комбайна – 290 т/ч (диапазон от 100 до 570 т/ч; коэффициент вариации – 0,5, что обусловлено неравномерностью скорости подачи комбайна (диапазон от 1,2 до 7,5 м/мин). В качестве объекта исследования выбрана минимальная участковая группа, состоящая из скребкового и ленточного конвейеров.

На рис. 1 представлен результат моделирования входного грузопотока. Как видно из рис. 1, входной грузопоток характеризуется высокой неравномерностью с математическим ожиданием 4 800 кг/мин и коэффициентом вариации 0,5.

На рис. 2 представлены результаты моделирования минутных значений общего энергопотребления конвейеров без регулирования скорости в течение 100 минут. Из рис. 2 видно, что энергопотребление колеблется в пределах от 0,3 до 0,7 кВт·ч/мин и характеризуется суммарным значением 270 кВт·ч.

На рис. 3 представлены результаты моделирования минутных значений общего энергопотребления конвейеров с плавным регулированием скорости в течение 100 минут.

Сравнительный анализ зависимостей, приведенных на рис. 2 и 3 показывает, что снижение суммарного энергопотребления при частотном регулировании скорости в сравнении с режимом отсутствия регулирования скорости ленты составляет 39 %.

На рис. 4 представлены результаты моделирования минутных значений общего энергопотребления конвейеров с дискретным регулированием скорости в течение 100 минут. Для всех конвейеров заданы номинальная скорость $V_{ном}$ и скорость холостого хода $V_{хол} = V_{ном} / 10$. Для трехскоростного регулирования дополнительно задана скорость $V_2 = V_{ном} / 2$, а для четырехскоростного заданы скорости $V_2 = 3 \cdot V_{ном} / 2$ и $V_3 = V_{ном} / 3$.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 4, показывает, что суммарные значения величины минутного энергопотребления составляют: для двухскоростного привода – 252 кВт·ч, для

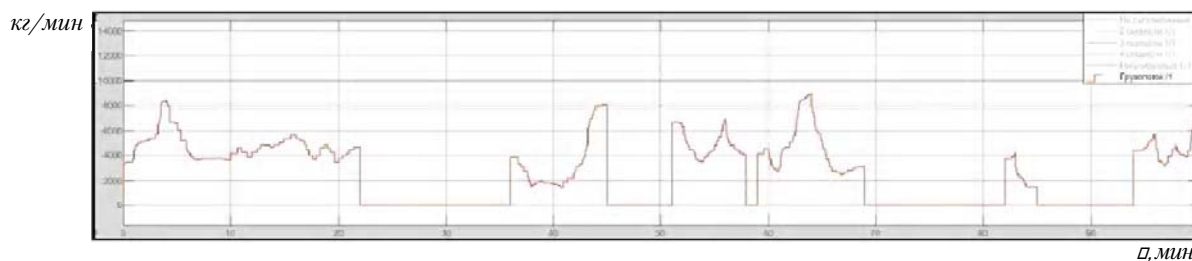


Рисунок 1. Входной грузопоток.

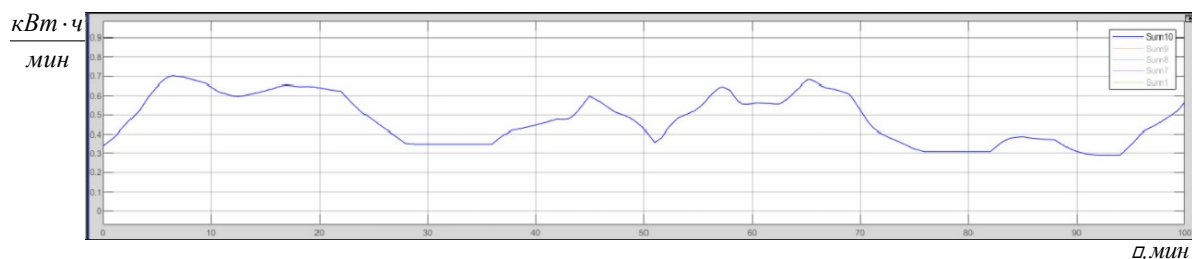


Рисунок 2. Минутные значения общего энергопотребления конвейеров без регулирования скорости.

трехскоростного – 202 кВт·ч, для четырехскоростного – 196 кВт·ч. Это означает, для описанных выше условий вычислительного эксперимента снижение энергопотребления составит соответственно 6 % для двухскоростного, 25 % для трехскоростного и 27 % для четырехскоростного приводов.

Результаты оценки суммарного энергопотребления конвейеров в течение 100 минут приведены в таблице 1.

Таблица 1. Электропотребление конвейеров при различных видах регулирования привода

Вид регулирования скорости	Суммарное энергопотребление, кВт·ч	Экономия энергии, %
Без регулирования	270	—
Двухскоростное	252	6
Трехскоростное	202	25
Четырехскоростное	196	27
Плавное регулирование	163	39

Выводы

Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее оптимальным по критерию снижения суммарного энергопотребления (на 39 %) является плавное регулирование скорости ленты. Однако обеспечение такого способа регулирования требует разработки сложных алгоритмов регулирования и внедрения тиристорных преобразователей частоты, затраты на установку которых значительно выше, чем потенциальная экономия электроэнергии на процесс транспортировки угля, которую они могут обеспечить. В связи с этим целесообразным является применение трехскоростного дискретного регулирования, осуществляемого путем переключения числа пар полюсов или изменения индуктивности обмоток двигателя и обеспечивающего высокое (до 25 %) снижение величины суммарного энергопотребления. Увеличение количества рабочих скоростей более трех не дает существенного прироста дополнительной экономии. Разница экономии электроэнергии между трех и четырехскоростным регулируемым приводами составляет 2 %.

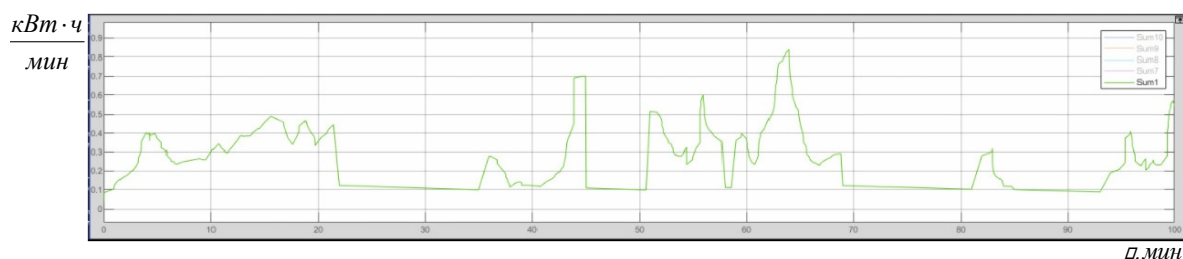


Рисунок 3. Минутные значения общего энергопотребления конвейеров с плавным регулированием скорости.

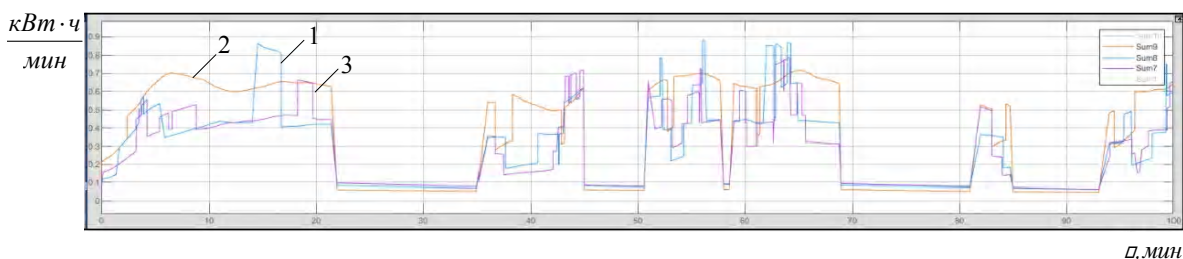


Рисунок 4. Минутные значения суммарного энергопотребления конвейеров с дискретным регулированием скорости: двухскоростное (кривая 1), трехскоростное (кривая 2), четырехскоростное (кривая 3).

Литература

1. Лобачева, А. К. Энергетические показатели конвейерного транспорта с регулируемой и нерегулируемой скоростью [Текст] / А. К. Лобачева // Транспорт шахт и карьеров ; под общ. ред. чл.-корр. АН СССР А. О. Спиваковского. – М., 1971. – С. 158–163.
2. Ленточные конвейеры с регулируемой скоростью [Электронный ресурс] / М. Заклика, М. Колек, С. Тютко // BARTEC. – Режим доступа : <http://www.bartec-russia.ru/files/mining/forconveyance.pdf>. – Загл. с экрана.
3. Иванцов, В. В. Энергосберегающее устройство плавного пуска и регулирования скорости многодвигательного конвейера на базе ЧРЭП «ЭРАТОН-ФР» [Электронный ресурс] / В. В. Иванцов // ЭРАСИБ. – [2015–2020]. – Режим доступа : <https://erasib.ru/staty/conveyor-eraton-fr/>. – Назв. с экрана.
4. Лауховф, Х. Действительно ли регулирование скорости ленточных конвейеров способствует экономии энергии [Текст] / Х. Лауховф // Глюкауф. 2006. № 1. С. 9–16.
5. Wheeler, C. A. Evolutionary Belt Conveyor Design – Optimizing Coasts [Text] / C. A. Wheeler // Bulk Material Handling by Conveyor. Belt. 7. – Littleton, Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2008. – 108 p.
6. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» [Текст] / В. М. Прокуда, Ю. А. Мишанский, С. Н. Проценко // Гірничя електромеханіка. 2012. № 88. С. 107–111.
7. Макарян, Л. В. Анализ и моделирование случайного шахтного грузопотока на магистральном сборном конвейере [Текст] / Л. В. Макарян, М. В. Сельнищина // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 5. С. 67–74.
8. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера [Текст] / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірничо-електромеханічна. 2013. Вип. 2. С. 140–150.
9. Improving energy efficiency of coal transportation by adjusting the speeds of combine and the mine face conveyor [Text] / M. Stadnik, D. Semchenko, A. Semchenko, P. Belytsky et al. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. vol 1, No 8(97) Engineering technological systems. P. 60–70.
10. Coordination of multiple adjustable speed drives for power quality improvement [Text] / S. Leng, I.-Y. Chung, C. S. Edrington, D. A. Cartes // Electric Power Systems Research. 2011. Vol. 81, Issue 6. P. 1227–1237.
11. Zhang, S. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors [Text] / S. Zhang,

Reference

1. Lobacheva, A. K. Energy indicators of conveyor transport with regulated and unregulated speed [Text]. In: *Transport of mines and quarries. Edited by ed. CHL.-Corr. USSR ACADEMY OF SCIENCES. A. O. Spivakovskogo. Moscow, 1971. P. 158–163. (in Russian)*
2. Zaklika, M.; Kolek, M.; Tytko, S. Ленточные конвейеры с регулируемой скоростью [Electronic resource]. In: *BARTEC*. Access mode: <http://www.bartec-russia.ru/files/mining/forconveyance.pdf>. Screen title. (in Russian)
3. Ivantsov, V. V. Energy-saving device for soft start and speed control of a multi-motor conveyor based on the «ERATON-FR CHREP» [Electronic resource]. In: *ERASIB* [2015–2020]. Access mode: <https://erasib.ru/staty/conveyor-eraton-fr/>. (in Russian)
4. Laukhoff, Kh. Does adjusting the speed of belt conveyors really help save energy [Text]. In: *Gluckauf*. 2006. № 1. P. 9–16. (in Russian)
5. Wheeler, C. A. Evolutionary Belt Conveyor Design – Optimizing Coasts [Text]. Bulk Material Handling by Conveyor. Belt. 7. Littleton, Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2008. 108 p.
6. Prokuda, V. M.; Mishansky, Yu. A.; Protsenko, S. N. Research and evaluation of cargo flows on the main conveyor transport PSP «mine «Pavlogradskaya» PJSC DTEK «Pavlogradugol» [Text]. In: *Mining automobile mechanic* 2012. № 88. pp. 107–111. (in Russian)
7. Makaryan, L. V.; Selnitsyna, M. V. Analysis and modeling of random mine cargo flow on the main Assembly line [Text]. In: *Mining information and analytical Bulletin*. 2016. № 5. P. 67–74. (in Russian)
8. Kondrakhin, V. P.; Stadnik, N. I.; Belitsky, P. V. Statistical analysis of operational parameters of the mine belt conveyor [Text]. In: *Scientific works of Donetsk national technical University*. Ser.: Mining and Electromechanical. 2013. Issue 2. P. 140–150. (in Russian)
9. Stadnik, M.; Semchenko, D.; Semchenko, A.; Belytsky, P. [et. al.]. Improving energy efficiency of coal transportation by adjusting the speeds of combine and the mine face conveyor [Text]. In: *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol 1, No 8 (97) Engineering technological systems. P. 60–70.
10. Leng, S.; Chung, I.-Y.; Edrington, C. S.; Cartes, D. A. Coordination of multiple adjustable speed drives for power quality improvement [Text]. In: *Electric Power Systems Research*. 2011. Vol. 81, Issue 6. P. 1227–1237.
11. Zhang, S.; Xia, X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors [Text]. In: *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. Issue 9. P. 3061–3071.

- X. Xia // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. Issue 9. P. 3061–3071.
12. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation [Text] / A. Semenchenko, M. Stadnik, P. Belytsky, D. Semenchenko et al. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol 4, No 1(82) Engineering technological systems. P. 42–51.
13. Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production [Text] / N. Wang, Z. Wena, M. Liu, J. Guo // *Applied Energy*. 2016. № 169. P. 301–308.
14. Wang, X. Analysis of the bulk coal transport state of a scraper conveyor using the discrete element method [Text] / X. Wang, B. Li, Z. Yang // *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2018. № 64. P. 37–46.
15. Моделирование и оптимизация производственных процессов при добыче угля [Текст] : монография / С. А. Кариман, А. В. Брайцев, В. М. Шрамко. – М. : Наука, 1975. – 135 с.
16. Ставицкий, В. Н. Алгоритм идентификации транспортной задержки конвейера [Текст] / В. Н. Ставицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Обчислювальна техніка та автоматизація. 2011. Вип. 20(182). С. 58–65.
17. Разумный, Ю. Т. Формирование характеристик потока угля конвейерного транспорта по данным моделирования грузопотоков из очистных забоев [Текст] / Ю. Т. Разумный, В. Т. Заика // Энерготехніка і енергетика. 2013. № 2. С. 201–206.
12. Semenchenko, A.; Stadnik, M.; Belytsky, P.; Semenchenko, D. [et. al.]. The impact of an uneven loading of a belt conveyor on the loading of drive motors and energy consumption in transportation [Text]. In: *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. vol 4, No 1(82): Engineering technological systems. P. 42–51.
13. Wang, N.; Wena, Z.; Liu, M.; Guo, J. Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production [Text]. In: *Applied Energy*. 2016. № 169. P. 301–308.
14. Wang, X.; Li, B.; Yang, Z. Analysis of the bulk coal transport state of a scraper conveyor using the discrete element method [Text]. In: *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 2018. № 64. P. 37–46. (in Slovenian)
15. Kariman, S. A.; Braytsev, A. V.; Shramko, V. M. Modeling and optimization of production processes in coal mining [Text] : monograph. Moscow: Science, 1975. 135 p. (in Russian)
16. Stavitsky, V. N. Algorithm for identifying the transport delay of the pipeline [Text]. In: *Scientific works of Donetsk national technical University*. Ser.: Computer engineering and automation. 2011. Issue. 20(182). P. 58–65. (in Russian)
17. Razumny, Yu. T.; Zaika, V. T. Formation of characteristics of the coal flow of conveyor transport based on the data of modeling cargo flows from treatment faces [Text]. In: *Power engineering and energy*. 2013. № 2. P. 201–206. (in Russian)

Степаненко Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Научные интересы: повышение технического уровня горных машин на основе представления их как мехатронных систем с адаптивным компьютерным управлением рабочими процессами.

Степаненко Олена Юрійвна – кандидат технічних наук, доцент кафедри гірничих машин ДОУ ВПО «Донецький національний технічний університет». Наукові інтереси: підвищення технічного рівня гірничих машин на основі представлення їх як мехатронних систем з адаптивним комп'ютерним управлінням робочими процесами.

Stepanenko Elena – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Mining Machines Department, Donetsk National Technical University. Scientific interests: improving the technical level of mining machines based on their presentation as mechatronic systems with adaptive computer control of work processes.