

Евстратов Владимир Александрович^{1,*}, доктор техн. наук, профессор, **Воронова Элеонора Юрьевна**¹, доктор техн. наук, доцент, **Апачанов Антон Сергеевич**², кандидат техн. наук, доцент, **Григорьев Владимир Иванович**², кандидат техн. наук, доцент, **Сухарникова Валентина Александровна**¹, кандидат техн. наук, доцент, **Бреславцева Ирина Валентиновна**¹, кандидат техн. наук, доцент

¹ Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ(НПИ) им. М.И. Платова, 346500, Россия, г. Шахты, пл. Ленина, 1

² Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского (ПКУ), 109004, Россия, г. Москва, ул. Земляной Вал, д. 73

*E-mail: vae602@yandex.ru

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШНЕКОВЫХ МОДУЛЕЙ ГОРНЫХ МАШИН

Аннотация: Шнековые модули, входящие в состав горных машин, наряду с такими достоинствами, как непрерывность транспортирования, герметичность, возможность транспортирования пылящих грузов, обладают существенным недостатком. Перемещаемый материал движется по спиральной траектории, что значительно снижает производительность оборудования и увеличивает удельные энергозатраты. В работе рассматривается возможность снижения вращательной составляющей движения материала и увеличение поступательной составляющей его движения в винтовом канале шнекового модуля за счет создания условий анизотропного трения при движении материала по внутренней поверхности корпуса модуля. Условия анизотропного трения создаются за счет установки на внутренней поверхности модуля ребер. Для определения направления движения материала в условиях анизотропного трения применена теорема об изменении кинетической энергии. Геометрические характеристики внутренней поверхности корпуса шнекового модуля, обеспечивающие анизотропное трение при движении материала, определяются исходя из условий эксплуатации машины и физико-механических свойств перемещаемых материалов. Результаты компьютерного моделирования показывают, что правильно подобранные геометрические параметры внутренней поверхности корпуса шнекового модуля позволяют повысить производительность шнекового модуля на 18–20% за счет увеличения поступательной составляющей движения материала и снижения вращательной составляющей. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании корпусов шнековых модулей горных машин.

Ключевые слова: Шнековый модуль, крутящий момент, шнековый вал, массив материала, поверхность скольжения, коэффициент внутреннего трения материала, угол нарезки спирали винта, анизотропное трение, кинетическая энергия.

Информация о статье: принята 28 февраля 2021 г.
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-42-47

Технологические и транспортирующие машины горной промышленности выполняют свои основные функции посредством механического воздействия рабочих органов на перерабатываемые или перемещаемые материалы. Количественные и качественные показатели процессов, происходящих при этом в материалах, во многом определяют эффективность функционирования горного оборудования [1, 2]. Поэтому определяющими при выборе структуры машины и параметров ее рабочих органов являются свойства исходного материала и конечного продукта. Сложность выбора обусловлена широким спектром материалов и многообразием их физико-механических характеристик [3]. Кроме того, свойства одного и того же материала могут существенно меняться при изменении температуры, влажности, давления и т.п. [4].

Отсутствие точного математического описания процессов, происходящих в материалах при взаимодействии с рабочими органами горных машин, приводит к тому, что во многих случаях параметры рабочих органов выбираются на основе экспериментальных данных [5, 6] или на основании опыта, накопленного в других отраслях промышленности при переработке материалов с похожими свойствами [7-9].

Такой подход при проектировании и конструировании во многих случаях приводит к созданию низкокэффеkтивных технологических и транспортирующих горных машин.

В полной мере это относится к процессам, протекающим в различных материалах при взаимодействии со шнековыми рабочими органами, получившими достаточно широкое распространение в горных машинах.

Большинство очистных комбайнов, предназначенных для механизированной выемки угля в очистных забоях, имеют рабочие органы в виде двух шнеков, оснащенных резцами [10]. Комбайны не имеют специальных погрузочных устройств. Погрузка отбитого угля на конвейер осуществляется шнеками совместно с погрузочными щитами [11]. Для укладки готовой бетонной смеси за опалубку при креплении горных выработок монолитным бетоном применяются бетоноукладчики, имеющие шнековые питатели. Для крепления горных выработок монолитным бетоном широкое применение получила передвижная машина со шнековым смешивающе-транспортным рабочим органом. Для выемки весьма тонких и тонких угольных пластов с неустойчивыми боковыми породами применяются бурошнековые установки [12].

Для удаления продуктов бурения из скважин широко применяются буровые штанги со шнековой лопастью. Для транспортировки сухих тампонажных материалов и механизированного приготовления растворов в практике тампонажных работ широкое применение получил передвижной цементно-смесительный агрегат, в котором подача сухих компонентов в смесительную камеру осуществляется шнековым модулем. При буровзрывном способе проведения горных выработок широкое распространение получила пыжеделательная машина, имеющая в своем составе шнековый питатель.

При вертикальном транспортировании и подаче под давлением материал в шнековом модуле движется по спиральной траектории, со значительным отклонением от продольной оси модуля. Это приводит к снижению производительности и повышению энергозатрат [13].

Данный недостаток является следствием отсутствия адекватных математических моделей, дающих точную количественную и качественную оценку процессов, происходящих в массиве материала и на поверхностях его контакта с рабочими органами технологических машин. Более точную количественную оценку процесса движения материала в шнековом модуле дает математическое описание процесса движения потока материала, учитывающее форму его поперечного сечения [14].

Для разработки математических моделей формирования грузопотоков в технологических и транспортирующих машинах и комплексах необходимо установить факторы, оказывающие влияние на формирование этих грузопотоков, и обосновать зависимость объема материала на выходе от влияющих факторов [15].

Движение груза по винтовой линии с малым шагом существенно снижает эксплуатационные показатели процесса транспортирования. Для частичного устранения данных недостатков проводят конструкторские мероприятия, направленные на снижение коэффициента трения материала о поверхность лопасти и на увеличение трения материала о внутреннюю поверхность шнекового модуля [16]. Глад-

кая внутренняя поверхность корпуса слабо препятствует вращательному движению материала внутри модуля.

Для уменьшения вращательного движения материала в других отраслях промышленности корпуса шнековых модулей, подающих материал под давлением к формующим, измельчающим и другим рабочим органам имеют ребра на внутренней поверхности.



Рис. 1. Профиль сечения корпуса шнекового модуля

Fig. 1. Conveyor tube inner surface profile

руются для использования в некоторой области применения и без ее конкретизации выбор оптимальных параметров невозможен. При выполнении теоретических исследований процессов, происходящих в материалах под действием рабочих органов технологических машин, важное значение имеет адекватность расчетных схем и математических моделей реальным физическим процессам [17].

В работе рассмотрена возможность повышения производительности шнекового модуля за счет уменьшения угла между направлением движения материала и продольной осью модуля за счет рифления его внутренней поверхности (рис. 1).

На часть материала в межреберном пространстве действуют следующие силы (рис. 2). Движущая сила от основной части груза

$$F_{dr} = N_c f_c \cos(\beta - \varphi), \quad (1)$$

где N_c – сила, действующая на груз в межреберном пространстве

$$N_c = m_c R \omega_0^2 \left(\frac{\sin \alpha \sin \beta}{\cos(\beta - \alpha)} \right)^2;$$

f_c – коэффициент внутреннего трения груза; φ – угол между ребрами и осью конвейера (рис. 2); m_c – масса груза; R – радиус винта; ω_0 – угловая скорость винта; α – угол нарезки спирали винта; β – угол между направлением движения груза и осью конвейера.

Сила, препятствующая перемещению груза между витками ребер

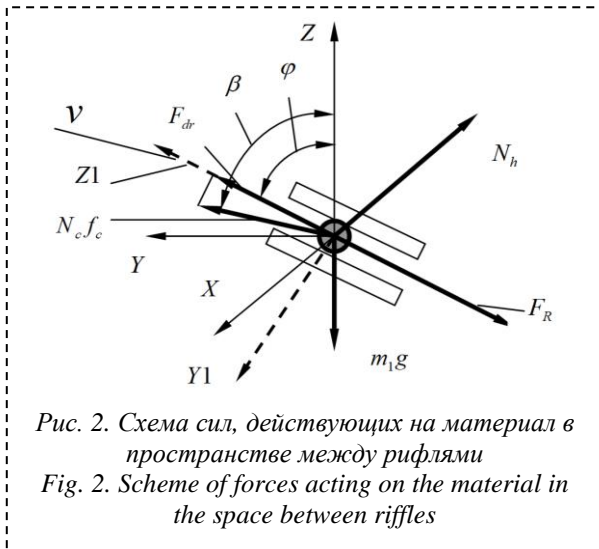


Рис. 2. Схема сил, действующих на материал в пространстве между рифлями
 Fig. 2. Scheme of forces acting on the material in the space between ruffles

$$F_R = m_1 g f_h \sin \varphi + m_1 g \cos \varphi + N_h f_h. \quad (2)$$

где m_1 – масса груза между витками ребер; f_h – коэффициент трения груза о корпус; N_h – сила нормального давления движущейся части груза и части, находящейся между витками ребер, на корпус конвейера.

$$N_h = m_c R \omega_0^2 \left(\frac{\sin \alpha \sin \beta}{\cos(\beta - \alpha)} \right)^2 + m_1 R \omega_0^2 \left(\frac{\sin \alpha \sin \varphi}{\cos(\varphi - \alpha)} \right)^2$$

Движение груза между ребрами происходит, если

$$N_c f_c \cos(\beta - \varphi) > N_h f_h + m_1 g (f_h \sin \varphi + \cos \varphi) \quad (3)$$

Сила, препятствующая перемещению груза вдоль ребер

$$F_{Z1} = N_h f_h + m_1 g (f_h \sin \varphi + \cos \varphi). \quad (4)$$

Сила, препятствующая перемещению груза перпендикулярно ребрам

$$F_{Y1} = N_c f_c. \quad (5)$$

Из зависимостей (4) и (5) коэффициент трения груза вдоль ребер f_{Z1} и коэффициент трения поперек ребер f_{Y1} соответственно равны:

$$f_{Z1} = f_h + \frac{m_1 g}{N_h} (f_h \sin \varphi + \cos \varphi), \quad (6)$$

$$f_{Y1} = f_c.$$

При выполнении условия (3) материал движется по внутренней поверхности корпуса модуля в условиях анизотропного трения ($f_{Z1} < f_{Y1}$), и направление

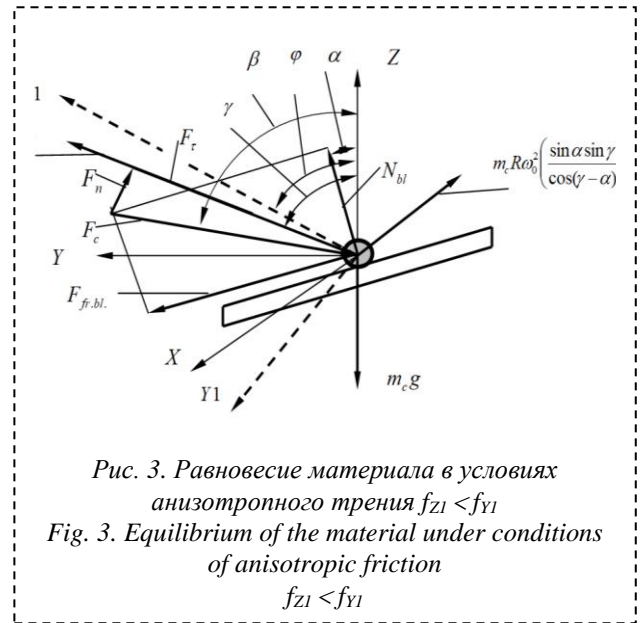


Рис. 3. Равновесие материала в условиях анизотропного трения $f_{Z1} < f_{Y1}$
 Fig. 3. Equilibrium of the material under conditions of anisotropic friction $f_{Z1} < f_{Y1}$

силы трения материала о корпус модуля не совпадает с направлением движения материала (рис. 3).

Сила трения

$$F_c = \sqrt{F_n^2 + F_\tau^2}, \quad (7)$$

где F_n – нормальная составляющая силы трения материала о корпус модуля; F_τ – тангенциальная составляющая силы трения материала о корпус модуля.

Тангенциальная составляющая силы трения

$$F_\tau = N_c f_\gamma, \quad (8)$$

где f_γ – коэффициент трения в направлении силы F_τ ,

$$f_\gamma = \sqrt{f_{Z1}^2 \cos^2(\gamma - \varphi) + f_{Y1}^2 \sin^2(\gamma - \varphi)}$$

Нормальная составляющая силы трения

$$F_n = N_c f_{(90-\gamma)}, \quad (9)$$

где $f_{(90-\gamma)}$ – коэффициент трения в направлении силы F_n ,

$$f_{(90-\gamma)} = \sqrt{f_{Z1}^2 \sin^2(\gamma - \varphi) + f_{Y1}^2 \cos^2(\gamma - \varphi)}$$

γ – угол отклонения движения материала от оси модуля.

Сила трения

$$F_R = N_c f_\beta, \quad (10)$$

где f_β – коэффициент трения в направлении силы F_R ,

$$f_{\beta} = \sqrt{f_{z1}^2 \cos^2(\beta - \varphi) + f_{y1}^2 \sin^2(\beta - \varphi)}.$$

Направление движения материала в условиях анизотропного трения определяем из условия максимума суммы работ всех сил на направлении его абсолютной скорости (теорема об изменении кинетической энергии).

$$T = \sum A_i^E = \max. \quad (11)$$

Отношение суммы работ сил, действующих на материал в шнековом модуле, к перемещению материала на направлении его движения

$$\frac{\sum A_i^E}{l} = N_{bl} l \cos(\gamma - \alpha) + N_{bl} f_{bl} l \sin(\gamma - \alpha) - N_c f_{\gamma} l = \max. \quad (12)$$

Угловая скорость материала в условиях анизотропного трения

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{\omega_0 \cos \alpha \cos \gamma}{\cos(\gamma - \alpha)}. \quad (13)$$

Полученные зависимости позволяют исследовать влияние формы внутренней поверхности корпуса модуля на направление движения материала в условиях анизотропного трения (рис. 4).

Линии 1 (рис. 4) показывают угол отклонения направления движения материала от вертикали в условиях анизотропного трения при $f_{z1} < f_{y1}$ и при различных значениях угла закручивания ребер φ . Линии 2 отражают угол отклонения направления движения груза от вертикали при изотропном трении груза о корпус конвейера при $f_{z1} = f_{y1}$. Линии 3 являются границами области распространения анизотропного трения при движении груза по поверхности корпуса конвейера. С левой стороны от этих линий расположена область анизотропного трения, а с правой стороны, соответственно, область изотропного трения.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что правильно подобранные параметры рифления корпуса могут существенно повысить производительность шнекового модуля. Геометрические размеры и угол закручивания ребер должны определяться в зависимости от гранулометрического состава и коэффициентов трения перемещаемых материалов, чтобы добиться максимального значения коэффициента выдачи материала за счет его движения в условиях анизотропного трения. Результаты компьютерного моделирования показывают, что за счет увеличения поступательной составляющей движения материала и снижения вращательной составляющей производительность шнекового модуля можно увеличить на 18-20%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишлянников Д.И., Максимов А.Б. Исполнительный орган агрегата для проходческих и

очистных работ // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 2. С. 13-19.

2. Lavrenko S.A., Shishljannikov D.I., Maksimov A.B. Energy efficient unit executive body for tunneling and cleaning operations // Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian-German Raw Materials. 2018. pp. 287-292.

3. Шишлянников Д.И., Максимов А.Б. Развитие средств механизированной добычи калийных руд // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2019. № 3. С. 15-21.

4. Дядичев В.В., Колесников А.В., Дядичев А.В. Совершенствование экструзионного оборудования и технологии переработки вторичных комбинированных полимерных материалов и смесей // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Том 6. № 1. С. 162-168.

5. Li X., Wang Sh., Ge Sh., Malekian R. A study on drum cutting properties with full-scale experiments and numerical simulations // Measurement. 2018. V. 114. pp. 25-36.

6. Припоров И.Е., Бачу Т.Н. Оптимизация конструктивных параметров шнека переменного шага пресс-экструдера КМЗ-2 на основе планирования эксперимента // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 3 (65). С. 84-87.

7. Бодиловский А.В. Теоретическое исследование движения зеленой массы в шнековом прессе // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2001. №3. С. 19-21.

8. Попов В.П., Мартынова Д.В., Антимонов С.В., Мартынов Н.Н., Межуева Л.В., Шахов В.А. Теоретическое обоснование энерго- и ресурсосберегающей конструкции шнекового пресс-экструдера для производства высококачественных кормовых продуктов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 6 (68) с. 107-109.

9. Заика В.П. Продолжительность прессования в шнековых прессах // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2003. №10. С. 38-40.

10. Суханов А.Е., Максимов А.Б. Обоснование рациональных параметров шнековых погрузочных органов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» // Сборник научных трудов международного научного семинара «Транспорт. Взгляд в будущее». 2018. С. 62-66.

11. Габов В.В., Нгуен К.Л., Нгуен В.С., Ле Т.Б., Задков Д.А. Обоснование геометрических и режимных параметров шнековых исполнительных органов, обеспечивающих эффективность погрузки угля на забойный конвейер // Уголь. 2018. С. 32-35.

12. Zhou Y., Zhang W., Gamwo I., Lin J. Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2017. V. 100. pp. 287-297.

13. Байбара С.Н. Факторы повышения эффективности работы вертикального шнека при транспортировании сыпучих материалов // Современные прикладные исследования: матер. Нац. рос. конф., апрель 2017, г. Шахты. – Ново-черкасск: ЮГПУ(НПИ), 2017. С.395-399.

14. Evstratov V.A., Rud A.V., Belousov K.Y. Process modelling vertical screw transport of bulk material flow // Procedia Engineering, 2015, 129, с. 397-402.

15. Liu S., Ji H., Liu X., Jiang H. Experimental research on wear of conical pick interacting with

coalrock // Engineering Failure Analysis. 2017. V. 74. pp. 172-187.

16. Вертикальный шнековый конвейер: пат. 148348 Российская Федерация / К.А. Адигамов, С.Н. Байбара, Г.В. Черненко, С.С. Петренко: Заяв. № 2014126952. – опубл. 10.12.2014, Бюл. №34.

17. Evstratov V.A., Sukharnicova V.A. The mathematical description of granular material handling with an upright screw conveyer // Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: materials of the International Conference. - February 26, 2019. Beijing, PRC. pp. 243-250.

Vladimir A. Evstratov^{1,*}, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Eleonora Y. Voronova**¹, Dr. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Anton S. Apachanov**², C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Vladimir I. Grigoryev**², C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Valentina A. Sukharnikova**¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, **Irina V. Breslavtseva**¹, C. Sc. in Engineering, Associate Professor

¹ Shakhty automobile and road construction institute (branch) of Platov SRSPU(NPI), 346500, Russia, Shakhty, Lenin Square 1

² K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management, 109004, Russia, Moscow, Str. Zemlyanoy Val 73

*E-mail: vae602@yandex.ru

EFFICIENCY IMPROVEMENT OF THE SCREW MODULES OF MINING MACHINES

Abstract: The screw modules that are part of mining machines, along with such advantages as continuity of transportation, leak tightness, possibility of transporting dust cargo, have a major drawback. The moving material moves along a spiral path, which significantly reduces equipment productivity and increases unit energy consumption. The work is considering the possibility of reducing the rotational component of the movement of the material and increasing the onward component of the movement thereof in the screw channel of the screw module by creating conditions of anisotropic friction when the material moves along the internal surface. The conditions of anisotropic friction are created by ribs mounted on the internal surface of the module. The kinetic energy theory is used to determine the direction of movement of the material under anisotropic friction conditions. Geometric characteristics of the internal surface of the body of the screw module which provide for anisotropic friction during the movement of the material, are determined on the basis of the operating conditions of the machine and the physical-mechanical properties of the materials being moved. Computer simulation results show that the correctly chosen geometric parameters of the internal surface of the body of the screw module make it possible to increase the performance of the screw module by 18-20% by increasing the onward component of the movement of the material and reducing the rotational component. The resulting dependencies can be used in the design of screw module tubes.

Keywords: Screw modules, torque, screw shaft, material mass, sliding surface, coefficient of internal friction of the material, the angle of the helix of the screw, anisotropic friction, kinetic energy.

Article info: received February 28, 2021
DOI: 10.26730/1816-4528-2021-2-42-47

REFERENCES

1. Shishlyannikov D. I., Maksimov A. B. The executive body of the unit for tunneling and cleaning works. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal, 2019, No. 2, pp. 13-19.

2. Lavrenko S. A., Shishljannikov D. I., Maksimov A. B. Energy efficient unit executive body for tunneling and cleaning operations. Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of

the Russian-German Raw Materials, 2018, pp. 287-292.

3. Shishlyannikov D. I., Maksimov A. B. The development of mass mechanized production of potash ores. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2019, No. 3. pp. 15-21.

4. Dyadichev V. V., Kolesnikov A. V., Dyadichev A.V. Improvement of extrusion equipment and technology for processing secondary combined polymer materials and mixtures. *Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*, 2018, Vol. 6. No. 1, pp. 162-168.

5. Li X., Wang Sh., Ge Sh., Malekian R. A study on drum cutting properties with full-scale experiments and numerical simulations. *Measurement*, 2018, V. 114, pp. 25-36.

6. Priporov I. E., Batchu T. N. Optimization of the design parameters of the variable pitch screw of the KMZ-2 press extruder based on the planning of the experiment. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2017, No. 3(65), pp. 84-87.

7. Bodilovskiy A. V. Theoretical study of the movement of green mass in a screw press. *Mechanization and electrification of agriculture*, 2001, No.3, pp. 19-21.

8. Popov V. P., Martynova D. V., Antimonov S. V., Martynov N. N., Mejueva L. V., Shakhov V. A. Theoretical justification of the energy- and resource-saving design of the screw press-extruder for the production of high-quality feed products // *Izvestia Orenburg State Agrarian University*, 2017, No. 6(68), pp. 107-109.

9. Zaika V. P. The duration of the pressing screw presses // *Tractors and agricultural machinery*, 2003, No.10, pp. 38-40.

10. Sukhanov A. E., Maximov A. B. Justification of the rational parameters of the auger loading

bodies of the Ural-20R tunneling and cleaning combines // *Collection of scientific papers of the international scientific seminar "Transport. Looking to the future"*, 2018, pp. 62-66.

11. Gabov V. V., Nguen K. L., Nguen V. S., Le T. B., Zadkov D. A. Substantiation of geometric and operating parameters of screw actuators that ensure the efficiency of coal loading on the bottom-hole conveyor // *Ugol'*, 2018, pp. 32-35.

12. Zhou Y., Zhang W., Gamwo I., Lin J. Mechanical specific energy versus depth of cut in rock cutting and drilling // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, V. 100, pp. 287-297.

13. Baybara S. N. Factors for increasing the efficiency of the vertical screw when transporting bulk materials // *Modern Applied Research: Proceedings of the National Russian Conference*, April 2017, Shakhty, 2017, pp. 395-399.

14. Evstratov V.A., Rud A.V., Belousov K.Y. Process modelling vertical screw transport of bulk material flow // *Procedia Engineering*, 2015, 129, c. 397-402.

15. Liu S., Ji H., Liu X., Jiang H. Experimental research on wear of conical pick interacting with coalrock // *Engineering Failure Analysis*, 2017, V. 74, pp. 172-187.

16. Adigamov K.A., Baybara S.N., Chernenko G.V., Petrenko S.S. Vertikalniy shnekoviy konveyer [Vertical Screw Conveyor]. Patent RF, no. 148348, 2014.

17. Evstratov V.A., Sukharnicova V.A. The mathematical description of granular material handling with an upright screw conveyor // *Scientific research of the SCO countries: synergy and integration: materials of the International Conference*. – February 26, 2019, Beijing, PRC, pp. 243-250.

Библиографическое описание статьи

Евстратов В.А., Воронова Э.Ю., Апачанов А.С., Григорьев В.И., Сухарникова В.А., Бреславцева И.В. Повышение эффективности шнековых модулей горных машин // *Горное оборудование и электромеханика* – 2021. – № 2 (154). – С. 42-47.

Reference to article

Evstratov V.A., Voronova E.Y., Apachanov A.S., Grigoryev V.I., Sukharnikova V.A., Breslavitseva I.V. Efficiency improvement of the screw modules of mining machines. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2021, no.2 (154), pp. 42-47.