УДК 622 23.05 DOI 10.21440/2307-2091-2018-1-89-93

ТЕОРЕТИКО-МЕХАНИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ СОСУДА В ШАХТНОЙ СКИПОВОЙ ПНЕВМОПОДЪЕМНОЙ УСТАНОВКЕ

Виталий Михайлович Таугер,
Евгений Борисович Волков,
evgeniy.volkov.ursmu@yandex.ru
Александр Анатольевич Леонтьев
Уральский государственный горный университет
Россия, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Актуальность. В сегменте горно-шахтных подъемных установок сложилась критическая ситуация. Традиционный канатный скиповой подъем практически исчерпал свои возможности. Увеличение глубины месторождений и рост производительности проходческих и очистных комбайнов обусловливают все большие емкости, размеры и скорости движения скипов, повышение мощности и массы подъемных машин, увеличение количества и диаметра канатов, высоты копра, диаметра шахтного ствола. Поиск альтернативных способов шахтного подъема, обладающих более высокой удельной производительностью, приводит к однозначному выводу о перспективности перехода от канатных к скиповым пневмоподъемным установкам.
Цель работы: обеспечить устойчивость движения сосуда в шахтной скиповой пневмоподъемной установке.
Методология исследования. Для снижения невозвратных потерь энергии на подъем собственного веса скипа организована замкнутая пневмосистема: выходное сечение спускного трубопровода воздуховодом сообщается с входным окном воздуходувки. В воздуходувку поступает поток с избыточным давлением, определяющимся весом порожнего скипа, в результате чего энергозатраты на подъем зависят только от веса полезного ископаемого. Оптимальная работа замкнутой системы возможна только при определенном значении диаметра трубопроводов.
Результаты. Описаны конструкция и принцип работы предложенной пневмоподъемной установки, приведена методика расчета диаметра трубопроводов для реализации воздухообмена между спускным и подъемным трубопроводами.
Заключение. В статье обосновано новое конструктивное исполнение скиповой пневмоподъемной установки, обладающей более высокой производительностью и экономичностью энергозатрат, за счет снижения аэродинамического сопротивления трассы и устранения невозвратных затрат энергии на подъем собственной массы скипа. По предложенной методике произведен расчет устойчивости движения сосуда в спускном трубопроводе пневмоподъемной установки.

Ключевые слова: подъемная установка; канатный подъем; конструкция; скип; пневмосистема; расход энергии; трубопровод.

В сегменте горно-шахтных подъемных установок сложилась критическая ситуация. Традиционный канатный скиповой подъем практически исчерпал свои возможности [1–5]. Увеличение глубины месторождений и рост производительности проходческих и очистных комбайнов обусловливают всё бóльшие емкости, размеры и скорости движения скипов, повышение мощности и массы подъемных машин, увеличение количества и диаметра канатов, высоты копра, диаметра шахтного ствола [6–9]. Поиск альтернативных способов шахтного подъема, обладающих более высокой удельной производительностью, приводит к однозначному выводу о перспективности перехода от канатных к скиповым пневмоподъемным установкам (СППУ) [10].

Разработка СППУ ведется с конца XX в. [11]; докторская диссертация по данной теме защищена в Уральской государственной горно-геологической академии (ныне УГГУ) [12].

Описанная в статье [13] СППУ обладает следующими характерными чертами:

– скип в виде контейнера с гладкой цилиндрической частью;

– ствол с направляюще-уплотнительными устройствами, которые установлены с шагом, равным половине высоты цилиндрической части скипа;

– в стволе размещен один скип;

– загрузочная (на нижнем горизонте) и разгрузочная (на верхнем горизонте) станции;

– воздухонагнетательный агрегат (воздуходувка).

Подъем груженого скипа производится за счет избыточного давления воздушного потока, создаваемого воздуходувкой. Спуск порожнего скипа происходит под собственным весом. Направляюще-уплотнительные устройства контактируют с гладкой наружной поверхностью скипа, предотвращая утечку воздуха.

По мнению доктора технических наук Ю. А. Николаева, предложившего СППУ описанной конструкции, ее реализация позволит решить все проблемы, стоящие перед канатным скиповым подъемом.

Нетрудно заметить, однако, что данная установка имеет ряд существенных недостатков, один из которых состоит в многочисленности направляюще-уплотнительных устройств. При большой глубине шахты их количество составит несколько сотен единиц, что серьезно усложнит конструкцию СППУ, повысит расходы на ее изготовление, монтаж и эксплуатацию.

Не менее, а возможно, даже более важным недостатком представляется низкий КПД энергетической системы, который обусловливается двумя факторами:

1) высокое аэродинамическое сопротивление ствола;

2) невозвратные потери энергии на подъем собственной массы скипа.

Каждое из направляюще-уплотнительных устройств является местным аэродинамическим сопротивлением – диафрагмой. Преодоление воздушным потоком с расчетной скоростью свыше 10 м/с ряда из сотни таких диафрагм потребует затрат энергии, сопоставимых с полезным расходом на подъем непосредственно груженого скипа.

В период спуска воздух из-под порожнего скипа выпускается в атмосферу. Таким образом, расход энергии на подъем собственной массы скипа представляет собой невозвратную потерю.

На кафедре технической механики УГГУ разработан вариант установки с повышенной энергоэффективностью, который иллюстрируется рис. 1–3.

СППУ (рис. 1) содержит подъемный *1* и спускной *2* трубопроводы, смонтированные в шахтном стволе (на рис. 1 не показан), разгрузочную *3* и загрузочную *4* станции, воздуходувку *5* и пневмораспределительную систему *6*, в которую входят краны *7*, *8*, *9*, *10*.

Воздуходувка снабжена собственной системой управления, предусматривающей возможность снижения подачи до 40 % номинальной [14]. Энергетические характеристики современных воздуходувок позволяют обеспечить широкий диапазон производительностей СППУ при диаметрах трубопроводов *d* (рис. 3) не более 2 м. Такие трубопроводы свободно могут разместиться в стволе диаметром 6,5 м.

В разгрузочную станцию *3* входят поворотная платформа *11*, установленная на неподвижной опоре качения

12, привод вращения *13* поворотной платформы, прикрепленные к поворотной платформе и расположенные симметрично относительно оси ее вращения верхние секции *14* и *15* трубопроводов *1* и *2*.

На опоре качения *12* смонтированы стойки *16*, на которых посредством осей *17* и *18* (рис. 2) с возможностью вращения установлена опрокидывающая секция *19*. В вертикальном положении опрокидывающая секция соосна верхней секции *14*. Ось *17* соединена с выходным валом мотор-редуктора *20*. В верхней секции *15* находится порожний скип *21*, удерживаемый фиксаторами *22*.

Загрузочная станция содержит поворотную платформу *23* с нижними секциями *24* и *25* трубопроводов *1* и *2*. В нижней секции *24* находится груженый скип *26*.

На рис. 3 показан простейший из рассматриваемых вариантов подъемного сосуда. Корпус скипа *27* имеет вид контейнера с направляюще-уплотнительными устройствами в виде колец *28*, которые выполняют функции как бесконтактных уплотнений, так и вкладышей подшипников скольжения.

Между кольцами *28* и внутренней стенкой трубопровода имеются гарантированные зазоры, через которые будет проходить часть воздушного потока. Расчеты показывают, что за счет увеличения количества колец потеря расхода может быть снижена до приемлемой величины.

Особо следует отметить, что трубопроводы со всеми секциями, корпуса скипов и направляюще-уплотнительные устройства выполнены из полимерных композиционных материалов (композитов). Специально подобранные

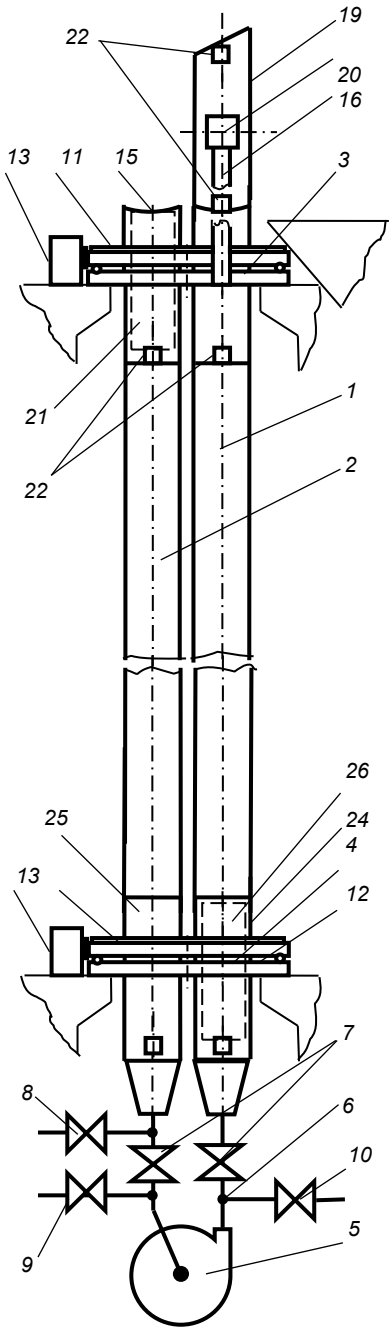

Рисунок 1. Энергосберегающая скиповая пневмоподъемная установка.

Figure 1. Energy saving skip pneuvmo elevating equipment.

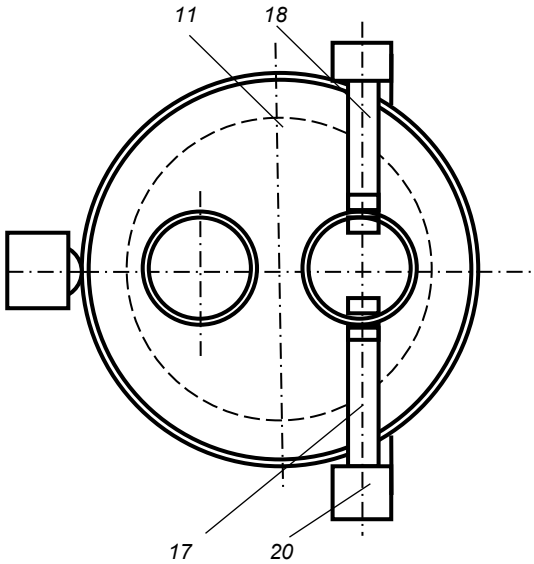

Рисунок 2. Разгрузочная станция (вид сверху).

Figure 2. Unloading station (top view).

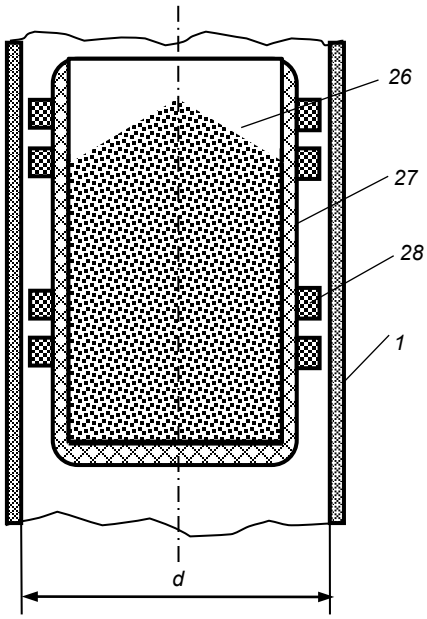

Рисунок 3. Груженый скип.

Figure 3. Loaded skip.

многослойные композиты по прочностным показателям сравнимы с низкоуглеродистыми, а в особых случаях – и с легированными сталями и имеют плотность в 4–5 раз меньше [15]. Специалистами ООО «СКБ «Мысль» (г. Екатеринбург) совместно с сотрудниками кафедры технической механики УГГУ ведутся поиски состава антифрикционного композита для направляюще-уплотнительных устройств.

Предложенная СППУ работает следующим образом.

В исходный момент воздуходувка *5* включена, краны *7* и *8* закрыты, *9* и *10* открыты, воздуходувка установлена на минимальную подачу и работает в режиме паузы с нулевым избыточным давлением на выходе.

Затем начинается спуск порожнего скипа *21* под собственным весом, краны *7* открываются, краны *9* и *10* закрываются, подача воздуходувки увеличивается, и воздух начинает поступать из спускного трубопровода во входное окно воздуходувки, а из ее выходного окна – в подъемный трубопровод под груженый скип *26*. Пауза в работе воздуходувки заканчивается, начинается период неустановившегося движения скипов.

По мере разгона скипов подача воздуходувки повышается до расчетной величины, и скипы приобретают заданные постоянные скорости, т. е. наступает период установившегося движения.

В спускном трубопроводе развивается избыточное давление, определяемое весом порожнего скипа *21*, поэтому при подаче воздуха из спускного трубопровода во входное окно воздуходувки электроэнергия расходуется только на транспортирование ископаемого.

В момент приближения на расчетное расстояние груженого скипа к разгрузочной станции, а порожнего скипа – к загрузочной станции начинается постепенное закрывание кранов *7*, открывание кранов *9* и *10* и уменьшение подачи воздуходувки. Скорости скипов снижаются, и к моменту полного закрытия кранов *7* и открытия кранов *9* и *10* груженый скип с минимальной скоростью прибывает в опрокидывающую секцию *19* разгрузочной станции, а порожний скип – в концевую секцию *25* загрузочной станции. Воздуходувка *5* возвращается в режим паузы с минимальной подачей.

Кран *8* играет вспомогательную роль. Он открывается в случае рассогласования движения скипов, когда груженый скип прибыл в опрокидывающую секцию, а порожний еще не достиг концевой секции.

Мотор-редуктор *20* наклоняет опрокидывающую секцию *19* над приемным бункером, а привод вращения *13* поворотной платформы *23* перемещает концевую секцию *25* в положение загрузки (на рис. 1, 2 не показано).

Выполняются операции разгрузки груженого и загрузки порожнего скипов. Затем мотор-редуктор возвращает опрокидывающую секцию в вертикальное положение, и опорожненный скип опускается в концевую секцию *14*. Приводы вращения устанавливают концевую секцию *14* с порожним скипом соосно спускному трубопроводу *2*, концевую секцию *25* с загруженным скипом соосно подъемному трубопроводу *1*, и цикл подъема завершается.

Равенство средних скоростей груженого и порожнего скипов обеспечивается при значении внутреннего диаметра *d* трубопроводов (рис. 3), которое определяется из следующих соображений.

Примем допущения:

1) порожний скип прибывает на загрузочную станцию одновременно с прибытием груженого скипа на разгрузочную станцию;

2) потери расхода через направляюще-уплотнительные устройства отсутствуют;

3) потери энергии на трение и аэродинамическое сопротивление при движении скипов отсутствуют.

Допущения означают, что масса воздуха, вытесненного из спускного трубопровода, равна массе воздуха, заполнившего подъемный трубопровод. Поскольку диаметры, а, следовательно, и площади сечения трубопроводов равны, то можно от равенства масс перейти к равенству плотностей:

$$\rho_0 = \rho_{0t}\frac{p_0+\Delta p}{p_0} = \rho_{0t}\left(1+\frac{\Delta p_г}{p_0}\right), \qquad (1)$$

где ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях; ρ_{0t} – плотность воздуха при атмосферном давлении и температуре, которую воздух приобретает, пройдя через воздуходувку; p_0 – атмосферное давление; $\Delta p_г$ – избыточное давление под груженым скипом.

Избыточное давление $\Delta p_г$ равно

$$\Delta p_г = \frac{4\left(m_и+m_с\right)g}{\pi d^2}, \qquad (2)$$

где $m_и$, $m_с$ – масса ископаемого и собственная масса скипа соответственно; g – ускорение свободного падения; d – внутренний диаметр трубопроводов.

После подстановки (2) в (1) и алгебраических преобразований получаем выражение для диаметра:

$$d = 2\sqrt{g\left(m_и+m_с\right)\Big/\pi p_0\left(\frac{\rho_0}{\rho_{0t}}-1\right)}.$$

В реальной конструкции через зазоры между элементами направляюще-уплотнительных устройств и стенками трубопроводов возможны перетечки воздуха. Потеря расхода в таком случае компенсируется расчетным увеличением диаметра трубопроводов.

На вход воздуходувки поступает воздух из спускного трубопровода с избыточным давлением $\Delta p_п$, возникающим под порожним скипом в период установившегося движения и равным

$$\Delta p_п = \frac{4m_с g}{\pi d^2},$$

вследствие чего воздуходувка развивает избыточное давление, определяющееся (при указанных ранее допущениях) только массой ископаемого:

$$\Delta p = \Delta p_г - \Delta p_п = \frac{4m_и g}{\pi d^2},$$

и экономия потребляемой воздуходувкой электроэнергии составит

$$\Delta E = \frac{\Delta p_п Q}{\eta} = \frac{4m_с g Q}{\pi d^2 \eta},$$

где Q – объемный расход воздуха в системе; η – КПД воздуходувки.

Особо следует рассмотреть правомерность принятых допущений.

Необходимо учитывать, что исследования трубопроводного пневмоподъема находятся в стадии решения общих вопросов, касающихся принципов построения и про-

ектирования систем. Рассматривать на этой стадии конкретные конструктивные исполнения компонентов установок преждевременно. Конструирование, безусловно, будет связано со специфическими трудностями, однако каких-либо непреодолимых препятствий не предвидится.

Так, известны и широко используются в технике уплотнения зазоров, способные либо практически полностью предотвратить потерю расхода текучего, либо свести ее к допустимому минимуму [16]. Целесообразность использования того или иного варианта направляюще-уплотнительных устройств должна быть установлена на основе специальных исследований. Не исключено, что будут приняты направляюще-уплотнительные устройства с гарантированным зазором, и потеря расхода скомпенсируется расчетным увеличением диаметра трубопроводов.

Механические сопротивления движению скипа зависят от способа его центрирования в трубе, который следует выбирать на основании технико-экономической оценки вариантов конструкции сосуда. На данном же этапе исследований считаем правомерным предположить, что механические сопротивления не окажут решающего влияния на воздухообмен между трубопроводами.

Кроме механического сопротивления, при движении сосудов будет проявляться также аэродинамическое сопротивление перемещению воздуха по трубопроводам. Попытки учесть данный вид сопротивлений приводят к сильному усложнению аналитического решения. В дальнейшем предполагается посвятить вопросу влияния аэродинамических сопротивлений на устойчивость движения сосуда специальные теоретико-экспериментальные исследования.

Соединение спускного трубопровода с входным окном воздуходувки и установка направляюще-уплотнительных устройств на скипы позволят добиться экономии энергозатрат скиповой пневмоподъемной установки за счет снижения аэродинамического сопротивления трассы и устранения невозвратных затрат энергии на подъем собственной массы скипа.

Сотрудниками кафедры технической механики УГГУ выполняются теоретические исследования и конструкторские проработки СППУ повышенной энергоэффективности. На конец текущего года намечено приступить к экспериментальной проверке полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бежок В. Р., Дворников В. И., Манец И. Г. и др. Шахтный подъем. Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. 624 с.
2. Бурчаков А. С., Малкин Л. С., Еремеев В. М. и др. Проектирование предприятий с подземным способом добычи полезных ископаемых: справочник. М.: Недра, 1991. 399 с.
3. Спиваковский Л. О., Гончаревич И. Ф. Специальные транспортирующие устройства в горнодобывающей промышленности. М.: Недра, 1985. 128 с.
4. Хоменко О. Е., Кононенко М. Н., Мальцев Д. В. Горное оборудование для подземной разработки рудных месторождений: справ. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Днепропетровск: НГУ, 2011. 448 с.
5. Кузьмин А. В. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Минск: Высш. школа, 1983. 350 с.
6. Николаев Ю. А. Горнодобывающим отраслям – новый вид транспорта // Изв. вузов. Горный журнал. 1999. № 3/4. С. 14–17.
7. Борецкий Е. А., Егорова М. С. Глобальная горнодобывающая промышленность // Молодой ученый. 2015. № 11.4. С. 40–45.
8. Mine 2011. The game has changed // Review of global trends in mining industry. PWC 2011. URL: https://www.pwc.kz/en/events/assets/mine_2011_eng.pdf
9. Outlook: Prospects for Recovery in the global Mining Industry. KPMG, 2010. URL: https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf
10. Литвинский Г. Г. Сущность научной доктрины «Шахта XXI века» // Уголь. 2006. № 11. С. 44–46.
11. Николаев Ю. А. Методика расчета скиповой пневмоподъемной установки // Горный журнал. 1990. № 9. С. 95–97.
12. Николаев Ю. А. Теория и методы расчета скиповой пневмоподъемной установки для шахт и карьеров: автореф. дис. … д-ра техн. наук. Свердловск, 1991. 45 с.
13. Таугер В. М., Волков Е. Б., Холодников Ю. В. Скиповая пневмоподъемная установка повышенной энергоэффективности // Изв. вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 77–83.
14. Промышленные воздуходувки и турбовоздуходувки SIEMENS. URL: http://www/bibliotecar.ru
15. Холодников Ю. В., Альшиц Л. И., Таугер В. М. Промышленные композиты: возможности и перспективы. Саарбрюккен (ФРГ): Lambert Academic Publishing, 2016. 455 с.
16. Детали машин: онлайн-справочник. URL: http://detamash.ru/tribotehnika/tipyi-uplotneniy.html

Поступила 29 ноября 2017

DOI 10.21440/2307-2091-2018-1-89-93

Theoretical mechanical calculations of the stability of the vessel motion in a mine skip pneuvmo elevating equipment

Vitaliy Mikhaylovich Tauger,
evgeniy.volkov.ursmu@yandex.ru
Evgeniy Borisovich Volkov,
Aleksandr Anatol'evich Leontyev
Ural State Mining University
Ekaterinburg, Russia

Urgency of the problem. There is a critical situation in the segment of mining hoists. A traditional cable car skip hoist has almost exhausted its possibilities. The increasing depth of deposits and the productivity growth of development machines and clearing combines stipulate bigger capacities, sizes and speed of skips. This increases the power and weight of lifting machines, the number and diameter of cables, the height of the copra, and the diameter of the shaft are increased too. The search for alternative methods of mine lifting, which have a higher specific productivity is being carried out. It leads to a clear conclusion about the prospects of the transition from rope pneumatic lifting units to the skip ones.
Purpose of the work: to ensure the stability of the vessel movement in the mine skip pneuvmo elevating equipment.
Research methodology: to reduce the non-return energy losses on the rise of the skip's own weight, a closed pneumatic system is organized: the outlet section of the descent pipeline is connected with the inlet window of the blower. The blower receives the flow pressure, which is determined by the weight of the empty skip, with the result that the energy consumption of the lift depends only on the weight of the mineral. The optimal operation of the closed system is possible only at a certain value of the pipeline diameter.
Results. The design and operation principle of the proposed air-lifting installation are described, the method of calculating the diameter of the pipelines for the implementation of air exchange between the descents and lifting pipelines is given.
Conclusion. The article substantiates the new design of the skip pneumatic lifting installation, which has a higher performance and energy efficiency. This is achieved by means of reducing the aerodynamic drag of the track and eliminating the irrevocable energy costs for the rise of its own mass of the skip. According to the method proposed, the stability of the vessel in the descent pipeline of the pneumatic lifting installation is calculated.

Keywords: lifting device; rope hoist; construction; skip; pneumatic system; power consumption; pipeline.

REFERENCES

1. Bezhok V. R., Dvornikov V. I., Manez I. G., and others, 2007, *Shakhtnyy podyom* [Mine hoist]. Donetsk, 624 p.
2. Burdakov A. S., Malkin, L. S., Yeremeyev V. M., and others. 1991, *Proyektirovaniye predpriyatiy s podzemnym sposobom dobychi poleznykh iskopayemykh: spravochnik* [Designing the enterprises with the underground mining method: a Handbook]. Moscow, 399 p.
3. Spivakovsky L. O., Goncharevich I. F. 1985, *Spetsialnyye transportiruyushchiye ustroystva v gornodobyvayushchey promyshlennosti* [Special conveyors in the mining industry]. Moscow, 128 p.
4. O. E. Khomenko, M. N. Kononenko, D. V. Mal'tsev, 2011, *Gornoye oborudovaniye dlya podzemnoy razrabotki rudnykh mestorozhdeniy: spravochnoye posobiye* [Mining machinery for underground mining of ore deposits: Ref. benefit. 2nd ed.]. Dnipropetrovsk, 448 p.
5. Kuz'min A.V. 1983, *Spravochnik po raschetam mekhanizmov pod'emno-transportnykh mashin* [Reference book on calculations of mechanisms of hoisting-and-transport machines]. Minsk, 350 p.
6. Nikolayev Yu. A. 1999, *Gornodobyvayushchim otraslyam – novyy vid transporta* [A new mode of transport should be provided to the mining industries]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 3/4, pp. 14–17.
7. Boretsky E. A., Yegorova M. S. 2015, *Globalnaya gornodobyvayushchaya promyshlennost'* [Global mining industry]. *Molodoy uchenyy* [The young scientist], no. 11.4, pp. 40–45.
8. Mine 2011. The game has changed // Review of global trends in mining industry. PWC 2011. URL: https://www.pwc.kz/en/events/assets/mine_2011_eng.pdf
9. Outlook: Prospects for Recovery in the global Mining Industry. KPMG, 2010. URL: https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2012/08/building-business-value-part-2.pdf
10. Litvinsky G. G. 2006, *Sushchnost nauchnoy doktriny «Shakhta XXI veka* [The essence of the scientific doctrine of "The 21st century mine"] Ugol'[Coal], no. 11, pp. 44–46.
11. Nikolayev Yu. A. 1990, *Metodika rascheta skipovoy pnevmopod'emnoy ustanovki* [Method of calculation of the skip pneuvmo elevating equipment]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], no. 9, pp. 95–97.
12. Nikolayev Yu. A. 1991, *Teoriya i metody rascheta skipovoy pnevmopodyemnoy ustanovki dlya shakht i karyerov: avtoref. dis. … d-ra tekhn. nauk* [Theory and methods of calculation of skip pneumatic lifting installation for mines and quarries: the synopsis of the Doctor of technical Sciences dissertation]. Sverdlovsk, 45 p.
13. Tauger V. M., Volkov Ye. B., Kholodnikov Yu.V. 2017, *Pnevmopod'emnaya ustanovka povyshennoy energoeffektivnosti* [The skip pneumatic ram of high efficiency]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 2, pp. 77–83.
14. SIEMENS industrial blowers and turbo blowers. URL: http://www/bibliotecar.ru
15. Kholodnikov U. V., Alschitz L. I., Tauger V. M. 2016, *Promyshlennyye kompozity: vozmozhnosti i perspektivy* [Industrial composites: opportunities and prospects]. Saarbrücken (Germany), 455 p.
16. Machine parts: the online directory. URL: http://detamash.ru/tribotehnika/tipyi-uplotneniy.html

Received 29 November 2017