

Магнитные перистальтические насосы для закладочных работ

Мария Александровна ВАСИЛЬЕВА*

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, Санкт-Петербург

Аннотация

Актуальность работы. Применение закладки выработанного пространства призвано повысить безопасность ведения горных работ, а именно, управляя горным давлением, можно снизить потери полезного ископаемого при выемке, предотвратить возникновение подземных пожаров, а также снизить риски разрушения объектов на селитебных территориях.

Методология проведения работы. Работа посвящена исследованию возможности применения системы перистальтического транспортирования пастообразных гидросмесей с использованием энергии бегущего магнитного поля для проведения работ по закладке выработанного пространства. Исходя из особенностей материалов, используемых в качестве основы закладочных смесей, специфики процесса перемещения последних к месту закладки, все больше используют инновационные технологии транспортирования закладочных смесей.

Результаты и область применения. Принципиально новым подходом к транспортированию жидких и вязких сред является применение низкочастотных магнитных перистальтических насосов. Конструкция такого насоса предполагает применение в качестве исполнительного органа рабочего канала, изготовленного из магнитоактивного эластомера, по протяжению которого под воздействием бегущего магнитного поля проходят периодические волны локальной деформации, перемещающие закладочную смесь.

Выводы. Отказ от традиционной роликовой системы, передавливающей канал, и замена основного исполнительного органа насоса на рабочий канал, структурирующий поток и препятствующий его расслоению, позволит расширить область применения насосного оборудования при проведении закладочных работ. Давление, развиваемое насосом, зависит от энергетических характеристик бегущего магнитного поля. Исследования показали, что скорость движения волны локальной деформации при перемещении различных материалов достаточно стабильна и незначительно зависит от вязкости вещества.

Ключевые слова: закладочные работы, магнитные насосы, гибридные материалы, трубопроводы, природоподобные технологии, насосное оборудование.

Введение

В настоящее время около 85 % от общих объемов закладочных работ проводится гидравлическим способом. Транспортировка закладочного материала в выработанное пространство является важнейшим технологическим звеном в цепи процессов, связанных с добычей полезных ископаемых [1].


При перемещении закладочных смесей на большие горизонтальные расстояния становится необходимым применение различного вспомогательного оборудования, в том числе вибрационного, поскольку потери напора при перемещении таких материалов высоки [2–4]. Перемещение закладочной смеси по трубопроводам приводит к их быстрому износу из-за высокой абразивности гидросмеси. Одновременно с этим при перемещении закладочного материала со скоростью ниже критической скорости потока происходит его расслоение, что приводит к заилению трубопроводов, неравномерной подаче закладочного материала и, соответственно, снижению качества монолитного закладочного массива [5, 6].

С целью снижения потерь при транспортировании гидросмеси закладочного материала в нее добавляют значительное количество воды, что приводит к снижению прочности будущего закладочного массива вследствие излишней обводненности, вымыванию вяжущего, повышенной слоистости, а также увеличению периода проявления сейсмической активности после закладки [7–11].

Методы и методология проведения работы

Конструкция современного насосного оборудования накладывает существенные ограничения на параметры перекачиваемых закладочных смесей. Так, даже незначительное увеличение концентрации материала твердого оказывает существенное влияние на энергопотребление насосов в процессе транспортирования гидросмесей. Большинство существующих систем гидротранспорта работают на низких концентрациях твердого материала в потоке закладочной смеси, что приводит к снижению технико-экономической эффективности системы гидравлического транспорта, а также к значительному росту

✉ Saturn.sun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2594-748X>

водопритока в выработках. При этом эффективное транспортирование сильногущенных смесей грунтовыми насосами вызывает сложности.

На рынке сегодня представлены различные конструкции насосного оборудования, способного перекачивать гидросмеси с высоким содержанием твердых частиц – до 80 % по массе. Основными типами таких насосов являются поршневые и перистальтические насосы. В последние годы перистальтические насосы стали более популярны для дозирования транспортируемых гидросмесей [12]. Усовершенствования конструкции и технические достижения в области разработки материалов, из которых изготавливают рабочие каналы, расширяют диапазон применения перистальтических насосов. По материалам маркетинговых исследований, производство и использование перистальтических шланговых насосов идет возрастающими темпами. В применяемых сегодня перистальтических насосах используются специальные жесткие шланги с увеличенной толщиной стенок и мощным армированием, при этом более половины потребляемой энергии рассеивается на тепловое излучение в материале рабочего канала.

Результаты работы и область их применения

Если для гидротранспорта гидросмесей найдены свои рациональные решения, то проблема транспортирования в удаленные и труднодоступные участки горных выработок пастообразных и вязких смесей при проведении закладочных работ еще не решена. Одним из решений этой проблемы является применение низкочастотных магнитных перистальтических насосов пульсационного типа, разрабатываемые в Санкт-Петербургском горном университете. Такой насос имеет внешний корпус, который защищает рабочий канал, выполненный из магнитоактивного эластомера, от повреждений. Внутренняя поверхность рабочего канала выполнена с винтовыми направляющими, обеспечивающими перемешивание гидросмеси и предотвращающими ее расслаивание [13, 14]. Вокруг

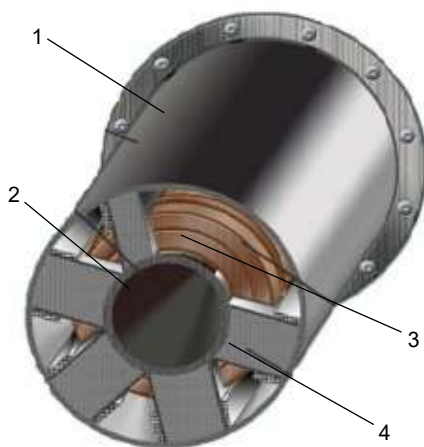


Рисунок 1. Общий вид низкочастотного магнитного перистальтического насоса. 1 – корпус, 2 – рабочий канал, 3 – обмотка, 4 – внешний магнитопровод.

Figure 1. General view of a low-frequency magnetic peristaltic pump. 1 – pump enclosure, 2 – operating channel, 3 – winding, 4 – external magnet core.

рабочего канала расположены индукторы генерирования бегущего магнитного поля (рис. 1). Основным отличием такого оборудования является самоиндуцированное сжатие рабочего канала под воздействием электромагнитного поля, исключающее необходимость механического воздействия на канал.

В насосе перемещение смеси происходит под воздействием локальной волнообразной деформации рабочего канала, выполненного из магнитоактивного эластомера (рис. 2). Волна перемещения закладочной смеси по рабочему каналу обусловлена воздействием бегущего магнитного поля, возникающим в пространстве, окружающем решетку из проводников, смещенных по фазе и в определенном порядке чередующихся по длине обмотки.

Механизм образования бегущего электромагнитного поля показан на рис. 3. Векторные диаграммы приведены для различных моментов последовательно через $1/6$ периода переменного тока. Когда вектор тока на диаграмме, вращаясь, проходит выше оси абсцисс, он направлен в данной фазе обмотке по стрелке (рис. 3, а). Соответственно, когда вектор тока данной фазы обмотки, поворачиваясь, оказывается ниже оси абсцисс, ток в это время имеет обратное направление.

Обозначив направление и плотность силовых линий, выходящих из плоскости токонесущей решетки, в виде кривой, получаем график распределения нормальной составляющей индукции бегущего магнитного поля над индуктором для данного момента времени (рис. 3, б). Длина волны этой синусоиды равна удвоенному расстоянию между проводниками одной и той же фазы, в которых токи текут в противоположном направлении, т. е. удвоенному расстоянию между проводниками, замкнутыми в виток. Это расстояние определяется полюсным шагом обмотки.

Волновой процесс, при котором поле в одних местах по длине индуктора возникает, а в других исчезает, внешне выглядит как поступательное движение волны. Поступательное движение волны бегущего магнитного поля внешне проявляется как действительное перемещение наведенных на поверхности индуктора магнитных полюсов и связанных с ним силовых линий магнитного потока.

Скорость движения волны определяется тем, что волна перемещается на свою длину, равную 2τ , за время периода переменного тока:

$$T = 1/f,$$

где f – частота переменного тока, Гц.

Скорость движения бегущего магнитного поля:

$$V_c = 2\tau f.$$

Это означает, что при частоте питающего напряжения 50 Гц скорость движения бегущего магнитного поля в метрах в секунду численно равна полюсному шагу обмотки индуктора, выраженному в сантиметрах. Направление этого движения зависит от порядка следования фаз в обмотке индуктора.

Эффективная величина электродвижущей силы на единицу длины проводника определяется:

$$E = \sqrt{2} B \tau f$$

где B – амплитудное значение индукции магнитного поля,

T ; τ – полюсный шаг обмотки. Величина $\sqrt{2}$ необходима

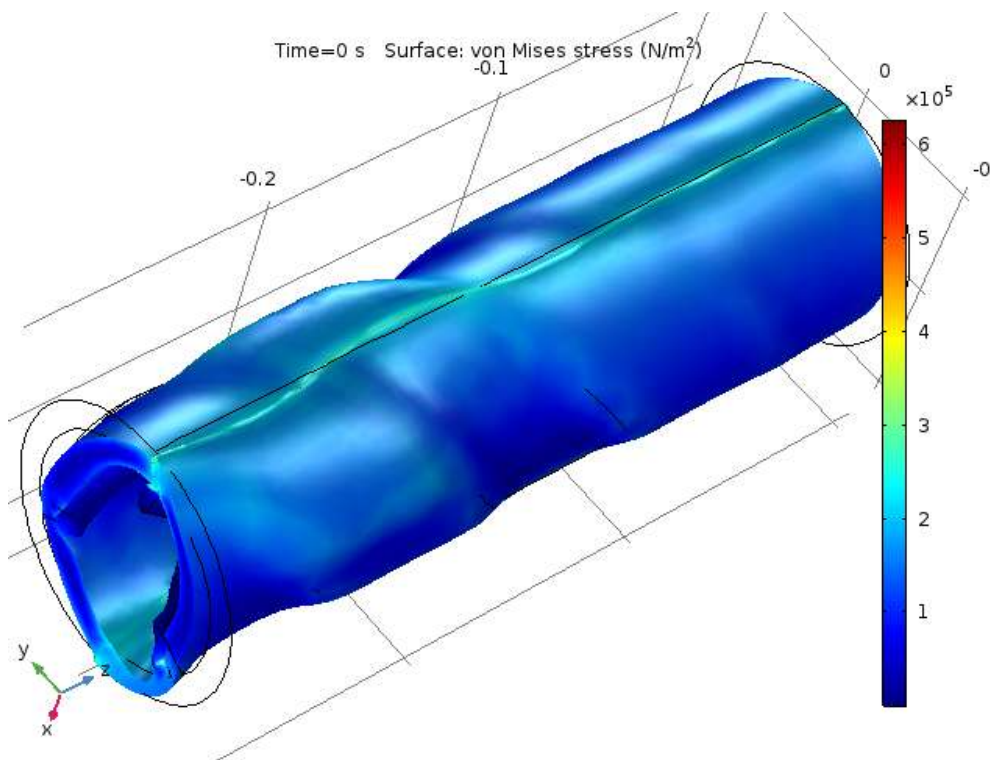


Рисунок 2. Прохождение волны локальной деформации по рабочей камере-каналу переменного сечения.
Figure 2. Passage of a local deformation wave along the working chamber-channel of variable cross section.

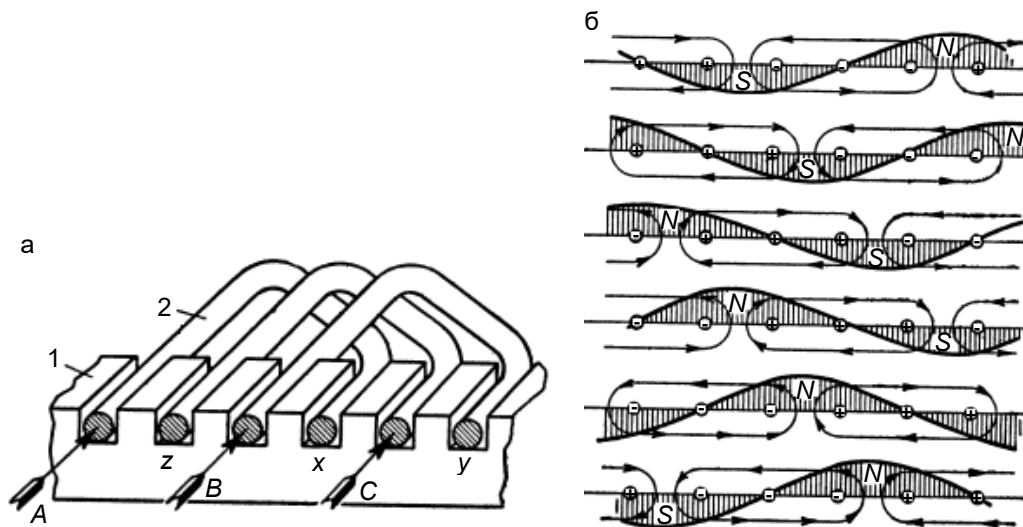


Рисунок 3. Механизм образования бегущего магнитного поля. а – индуктор, б – направления токов в проводниках индукторов:
 1 – магнитопровод, 2 – обмотка, +/- направление тока.
Figure 3. Mechanism of formation of a walking magnetic field. а – magneto, б – directions of currents in conductors of magneto: 1 – magnet core, 2 – winding, +/- current direction.

для перевода амплитудного значения индукции магнитного поля в действующее.

Средняя электромагнитная сила, приходящаяся на единицу длины проводника, равна:

$$F = B^2 \tau f \gamma,$$

где γ – проводимость металла проводника.

Волна деформации материала рабочего канала под

действием бегущего магнитного поля движется вслед за ним со скоростью $v_{\text{деф}}$. При этом для оценки уменьшения относительной скорости магнитного поля и деформации рабочего канала целесообразно использовать понятие величины скольжения:

$$s = \frac{v_c - v_{\text{деф}}}{v_c}.$$

Давление, развиваемое электромагнитными силами, определяется как отношение суммы электромагнитных

сил по ширине канала, к площади его поперечного сечения:

$$D = \frac{\sum F_s}{l\Delta} = B^2 \tau f \gamma s l \quad (1)$$

где Δ – толщина слоя гидросмеси, l – длина рабочего канала в направлении движения поля.

Давление, развиваемое насосом, зависит от формы контуров индукционных токов, наведенных бегущим магнитным полем. Если рабочий канал узкий и контуры индукционных токов имеют вытянутую форму, соотношение активных и неактивных участков контуров получается неблагоприятным и напор, развиваемый электромагнитными силами при прочих равных условиях, значительно меньше, чем при относительно широком рабочем канале. Эта особенность ограничивает вытекающую из формулы (1) возможность повышения напора путем произвольного увеличения полюсного шага обмотки.

Кроме того, растекание индукционных токов на поперечных участках контуров при подходе к краю канала вызывает неравномерность распределения электромагнитных сил по площади поперечного сечения канала. Указанные явления составляют поперечный краевой эффект, который снижает развиваемое давление. С учетом этого явления величина давления, развиваемого электромагнитными силами, определяется формулой П. А. Фридкина [15]:

$$D = B^2 \tau f \gamma s l K_{\Delta},$$

где K_{Δ} – коэффициент, учитывающий геометрию контуров индукционных токов.

Для определения величины K_{Δ} используется аналитическая формула А.И. Вольдека [16]:

$$K_{\Delta} = 1 - \text{th}(\pi c/\tau)/\pi c/\tau,$$

где c – половина ширины канала.

Наблюдения показали, что скорость движения волны локальной деформации при перемещении различных материалов достаточно стабильна и незначительно зависит от вязкости вещества (рис. 4).

В отличие от существующих конструкций насосов, применяемых для транспортирования закладочных смесей, магнитные перистальтические насосы позволяют изменять скорость транспортирования в широком диапазоне непосредственно в процессе работы.

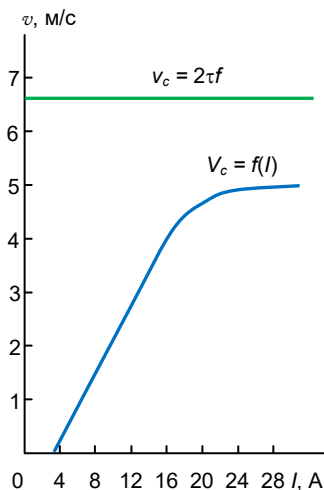


Рисунок 4. График, отражающий влияние силы тока в катушках обмотки генератора магнитного поля на скорость движения локальной волны деформации рабочего канала.
Figure 4. Graph reflecting the effect of current strength in the coils of a winding of a magnetic field generator on the speed of a local wave of deformation of a working channel.

Выводы

Известные достоинства подземной геотехнологии разработки месторождений полезных ископаемых с закладкой выработанного пространства в ряде случаев не реализуются и требуют совершенствования применяющихся для этого технологий. В последнее время активное развитие получило развитие технологий и соответствующей техники, работа которых основана на принципе природоподобия.

Замена основного исполнительного органа насоса на рабочий канал, выполненный из магнитоактивного эластомера (взамен традиционной роликовой системы, передавливающей канал), структурирующий поток и препятствующий его расслоению, позволит расширить область применения насосного оборудования.

Конструктивное исполнение насосного оборудования, при котором скорость перемещения закладочного материала и давление, развиваемое насосом, не зависят от вязкости вещества, а находятся в прямой зависимости от электрических параметров, позволит эффективно проводить закладочные работы в удаленных выработках.

ЛИТЕРАТУРА

- Шкуратский Д. Н., Русаков М. И. Использование отходов производства калийных удобрений в породных смесях для закладки выработанных пространств // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. 2015. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-othodov-proizvodstva-kaliyных-udobreniy-v-porodnyh-smesyah-dlya-zakladki-vyrobotannyh-prostranstv>
- Aleksandrov V. I., Kibirev V. I. The Kachkanarsky MCC iron ore processing tailings slurry hydraulic transport parameters determination // Obogashchenie Rud. 2018. № 1. P. 56–63. <http://doi.org/10.17580/or.2018.01.10>
- Блехман И. И. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения). М.: Физматлит, 2018. 752 с.
- Блехман И. И., Блехман Л. И., Вайсберг Л. А. Вибрация преодолевает гравитацию – нелинейные эффекты, простые модели // Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем: XVIII Междунар. симпоз., посвящ. 100-летию со дня рождения д. т. н., проф. А. Е. Кобринского. М., 2015. С. 64–72.
- Pushkarev A., Podoprigora N., Dobromirov V. Methods of providing failure-free operation in transport infrastructure objects // Transportation Research Procedia. 2018. № 36. P. 634–639. <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.140>
- Liss N. Y., Kremcheev E. A., Afanasiadi K. I. Reclamation of salinized land at tailings ponds at ALROSA // Gornyi Zhurnal. 2017. № 10. P. 65–69. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.14>
- Литвиненко В. С., Богуславский Э. И., Андреев М. Н. Технология и организация горных работ при выемке подкарьерных запасов кимберлитовых трубок Якутии в сложных гидрогеологических условиях // Записки Горного института. 2011. Т. 194. С. 79–83.
- Аглюков Х. И. Управление горным давлением с возведением высокоплотных искусственных массивов // Изв. вузов. Горный журнал. 2004. № 5. С. 9–15.
- Верхоланцева Т. В., Дягилев Р. А. Изучение влияния закладочных работ на сейсмический режим калийных рудников // ГИАБ. 2016. № 12. С. 222–224.

10. Борзаковский Б. А., Папулов Л. М. Закладочные работы на Верхнекамских калийных рудниках. М.: Недра, 1994. 234 с.
11. Адушкин В. В., Турунтаев С. В. Техногенная сейсмичность – индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.
12. Vasilyeva M. A. An overview of development trends for the pumping equipment of mining and processing enterprises // Obogashchenie Rud. 2019. Issue 1. P. 51–56. <http://doi.org/10.17580/or.2019.01.08>
13. Vasilyeva M. A. Perspectives of application of 3D shape memory composite materials for peristaltic transportation of slurries // Key Engineering Materials. 2016. № 685. P. 291–294. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.685.291>
14. Fuhrer R., Schumacher C. M., Zeltner M., Stark W. J. Soft iron/silicon composite tubes for magnetic peristaltic pumping: Frequency-dependent pressure and volume flow // Advanced Functional Materials. 2013. Vol. 23, issue 31. P. 3845–3849. <http://doi.org/10.1002/adfm.201203572>
15. Деменев А. Г., Белозёрова Т. С., Пономарев Р. С., Салгаева У. О., Сосунов А. В., Харебов П. В., Хеннер В. К. Изучение новых магнитных наноматериалов с помощью когерентных магнитодинамических эффектов // Вестник ПФИЦ УрО РАН. 2017. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-novyh-magnitnyh-nanomaterialov-s-pomoschyu-kogerentnyh-magnitodinamicheskikh-effektov>
16. Коваленко А. И., Климова Т. Г. Определение параметров синхронного генератора с использованием синхронизированных векторных измерений // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. № 1. С. 20–24. <http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2018-1-20-24>

Статья поступила в редакцию 05 декабря 2019 года

Magnetic peristaltic pumps for stowing operations

Maria Aleksandrovna VASILYEVA*

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Annotation

Relevance of the work. The use of laying the workings is intended to increase the safety of mining operations, namely, controlling mining pressure, reduce mineral loss during excavation, prevent the occurrence of underground fires, and reduce the risks of destruction of objects in residential areas.

Methodology of the work. The article is devoted to the study of the possibility of applying the system of peristaltic transportation of pasty slurries using the energy of a traveling magnetic field to work on the laying of the goaf. Taking into account the features of the materials used as the basis for filling mixtures, the specifics of the process of moving the latter to the place of laying, innovative technologies for transporting filling mixtures are becoming increasingly important.

Results and scope. A fundamentally new approach to the transportation of liquid and viscous media is the use of low-frequency magnetic peristaltic pumps. The design of this pump involves the use as an executive body of the working channel, made of a magneto-active elastomer. By its extension under the influence of a traveling magnetic, periodic waves of local deformation pass, moving the filling mixture.

Conclusions. The rejection of the traditional roller system, which presses the channel, and the replacement of the main executive body of the pump with the working channel, the structuring flow and preventing its separation, will expand the scope of application of pumping equipment during filling operations. The pressure developed by the pump depends on the energy characteristics of the traveling magnetic field. Studies have shown that the speed of movement of a wave of local deformation when moving various materials is sufficiently stable and slightly depends on the viscosity of a substance.

Keywords: backfilling, magnetic pumps, hybrid materials, pipelines, nature-like technologies, pumping equipment.

REFERENCES

1. Shkuratsky D. N., Rusakov M. I. Use of production wastes of potash fertilizers in rock mixtures for laying the mined-out spaces // News of the TSU. Earth Sciences. 2015. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-otходov-proizvodstva-kaliynih-udobreniy-v-porodnyh-smesyah-dlya-zakladki-vyrabotannyh-prostranstv>
2. Aleksandrov V. I., Kibirev V. I. The Kachkanarsky MCC iron ore processing tailings slurry hydraulic transport parameters determination // Obogashchenie Rud. 2018. № 1. pp. 56–63. <http://doi.org/10.17580/or.2018.01.10>
3. Blekhman I. I. Vibrational mechanics and vibrational rheology (theory and applications). M.: Fizmatlit, 2018. 752 p.
4. Blekhman I. I., Blekhman L. I., Weisberg L. A. Vibration overcomes gravity - non-linear effects, simple models // Dynamics of vibro-impact (highly non-linear) systems. XVIII International Symposium dedicated to the 100th anniversary of the birth of Dr. Sc., Prof. A. E. Kobrinskiy. 2015. pp. 64–72.
5. Pushkarev A., Podoprigora N., Dobromirov V. Methods of providing failure-free operation in transport infrastructure objects // Transportation Research Procedia. 2018. № 36. pp. 634–639. <http://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.140>
6. Liss N. Y., Kremcheev E. A., Afanasiadi K. I. Reclamation of salinized land at tailings ponds at ALROSA // Gornyi Zhurnal. 2017. № 10. pp. 65–69. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.10.14>
7. Litvinenko V. S., Boguslavsky E. I., Andreev M. N. The technology and organization of mining operations during the excavation of podkaremye reserves of Yakutian kimberlite pipes in difficult hydrogeological conditions // Notes of the Mining Institute. 2011. Vol. 194. pp. 79–83.
8. Aglyukov Kh. I. Management of rock pressure with the construction of high-density artificial massifs // News of universities // Mining Journal. 2004. № 5. pp. 9–15.
9. Verkholantseva T. V., Dyagilev R. A. Study of the influence of backfilling on the seismic regime of potash mines // GIAB. 2016. № 12. pp. 222–224.
10. Borzakovsky B. A., Papulov L. M. Laying works at Verkhnekamsk potash mines. M.: Nedra, 1994. 234 p.
11. Adushkin V. V., Turuntaev S. V. Technogenic Seismicity – Induced and Trigger. M.: IDG RAS, 2015. 364 p.
12. Vasilyeva M. A. An overview of development trends for the pumping equipment of mining and processing enterprises // Obogashchenie Rud. 2019. Issue 1. pp. 51–56. <http://doi.org/10.17580/or.2019.01.08>
13. Vasilyeva M. A. Perspectives of application of 3D shape memory composite materials for peristaltic transportation of slurries // Key Engineering Materials. 2016. № 685. pp. 291–294. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.685.291>
14. Fuhrer R., Schumacher C. M., Zeltner M., Stark W. J. Soft iron/silicon composite tubes for magnetic peristaltic pumping: Frequency-dependent pressure and volume flow // Advanced Functional Materials. 2013. Vol. 23, issue 31. pp. 3845–3849. <http://doi.org/10.1002/adfm.201203572>
15. Demenev A. G., Belozerova T. S., Ponomarev R. S., Salgaeva U. O., Sosunov A. V., Kharebov P. V., Henner V. K. The study of new magnetic nanomaterials using coherent magnetodynamic effects // Bulletin of the Perm Scientific Center. 2017. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izuchenie-novyh-magnitnyh-nanomaterialov-s-pomoschyu-kogerentnyh-magnitodinamicheskikh-effektov>
16. Kovalenko A. I., Klimova T. G. Determining the parameters of a synchronous generator using synchronized vector measurements // Proceedings of higher educational institutions. Electromechanics. 2018. № 1. pp. 20–24. <http://dx.doi.org/10.17213/0136-3360-2018-1-20-24>

The article was received on Desember 05, 2019

✉ Saturn.sun@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2594-748X>