

## ОБОСНОВАНИЕ ФОРМЫ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ МАГНИТНОГО ПЕРИСТАЛЬТИЧЕСКОГО НАСОСА

*Васильева М.А., Волчихина А.А., Атрощенко В.А., Зеленцова А.А.  
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** перистальтический насос, транспортирование смесей, механические деформации, эквивалентное напряжение, форма сечения, волнообразное перемещение, магнитоактивный эластомер.

**Аннотация.** Статья посвящена транспортированию вязких и пастообразных сред при помощи магнитного перистальтического насоса. В материале рассматривается принцип перистальтического транспортирования смеси посредством перемещения волн локальной деформации рабочей камеры-канала. Проведен математический и статистический анализ влияния коэффициента формы и толщины стенок перистальтического насоса на механическую деформацию и эквивалентное напряжение трубки при взаимодействии магнитоактивного элемента с рабочей камерой-каналом, который жестко зафиксирован в зоне контакта. На основании полученных данных было выявлено, что при изменении коэффициента формы от 1,4 до 2 (переход от эллиптического сечения к круглому) происходит резкое уменьшение деформации сечения с незначительным уменьшением эквивалентных напряжений, что также характерно при переходе от равномерной к неравномерной толщине стенок трубки и способствует увеличению полостей утечек при воздействии магнитоактивного элемента.

## JUSTIFICATION OF THE SHAPE OF THE WORKING CHAMBER OF A MAGNETIC PERISTALTIC PUMP

*Vasilyeva M.A., Volchikhina A.A., Atroshchenko V.A., Zelentsova A.A.  
Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg*

**Keywords:** peristaltic pump, transportation of mixtures, mechanical deformations, equivalent stress in the material, cross-sectional shape, undulating movement, magnetically active elastomer.

**Abstract.** The article is devoted to the transportation of viscous and pasty media using a magnetic peristaltic pump. The material discusses the principle of peristaltic transportation of the mixture by moving the waves of local deformation of the working chamber-channel. Mathematical and statistical analysis of the effect of the shape factor and wall thickness of the peristaltic pump on the mechanical deformation and equivalent stress of the tube during the interaction of the magnetically active element with the working chamber-channel, which is rigidly fixed in the contact zone, is carried out. Based on the data obtained, it was revealed that when the shape factor changes from 1.4 to 2 (transition from an elliptical to a circular section), there is a sharp decrease in the deformation of the section with a slight decrease in the equivalent stresses, which is also characteristic of the transition from uniform to non-uniform tube wall thickness and contributes to an increase in leakage cavities when exposed to a magnetically active element.

### Введение

Перистальтические насосы с магнитно-индукционным активатором предлагаются к использованию уже с 70-х годов прошлого столетия. В разное время были предложены различные варианты конструкций насосных агрегатов, позволяющих транспортировать сильно сгущенные и высоковязкие вещества [1-4]. В качестве источника переменного магнитного поля, чаще всего предлагается линейный электромагнитный двигатель [5].

Насосы с перистальтическим способом перекачивания жидкости с помощью магнитного поля условно можно разделить на два типа:

– с ферромагнитной гибкой мембраной, которая воздействует на перемещаемую массу, или сжимает гибкий шланг;

– с немагнитным гибким рукавом, мембраной – воздействие на рукав или мембрану производится с помощью магнитной жидкости на которое воздействует переменное магнитное поле [5].

Принципиально новым подходом к транспортированию вязких и пастообразных сред является применение разработанного магнитного перистальтического насосного агрегата

(МПНА), конструкция которого сочетает в себе основные достоинства объемных насосов – низкие требования к обслуживанию и возможность работать с абразивными и агрессивными средами, а также обеспечивает необходимую активацию закладочного материала на всем протяжении длины транспортирования [6-9]. Данное оборудование реализовано благодаря применению гибридных магнитоактивных материалов.

Основными элементами конструкции является источник электромагнитного поля - магнитный активатор 2 (рис. 1,а), на котором сверху располагается гибкая рабочая камера-канал (рис. 1,б), изготовленная из магнитоактивного эластомера с концентрацией наполнителя 60% по массе с изотропным распределением в матрице.

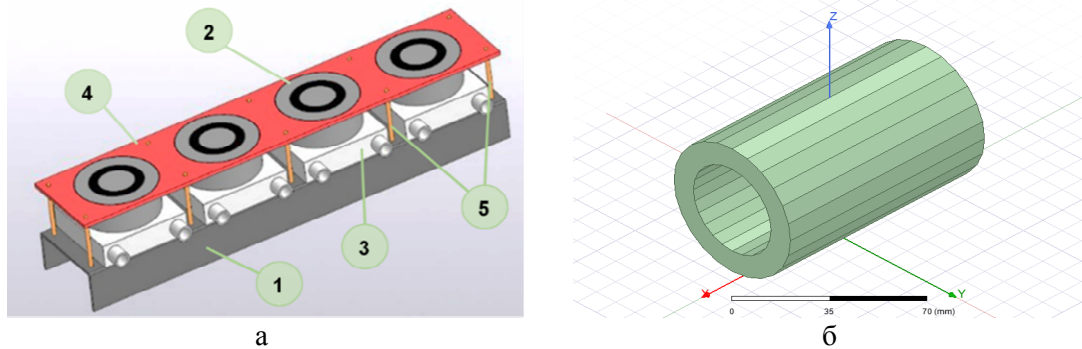


Рис. 1. Основные узлы магнитного перистальтического насоса: а – магнитный активатор: 1 – станина, 2, магнитоактивный элемент, 3 – радиатор-охладитель, 4 – основание-крепление рабочей камеры-канала, 5 – направляющие; б – гибкая рабочая камера-канал

Насос реализует принцип перистальтического транспортирования посредством перемещения волн локальной деформации рабочей камеры-канала, изготовленной из магнитоактивного эластомера, возникающих под воздействием управляющего импульса магнитного активатора [10-12].

Насосная установка в значительной степени освобождена от присущих традиционным объемным агрегатам недостатков, а именно ее производительность находится в зависимости от рабочих характеристик магнитного активатора и определяется алгоритмом его работы, минимизированы гидравлические потери напора, вызываемые свойствами перекачиваемой среды [13-15].

### Материалы и методы

Сечение рабочей камеры-канала характеризуется совокупностью конструктивных параметров (рис. 2), представленных в таблице 1.

Для определения формы сечения рабочей камеры-канала, предложен разработанный коэффициент формы –  $\varphi$ . Данный параметр определяется согласно выражению:

$$\varphi = S_1 / S_2, \quad (1)$$

где  $S_1$  – площадь прямоугольника, описывающего фигуру,  $m^2$ ;  $S_2$  – площадь прямоугольника, вписанного в фигуру,  $m^2$ .

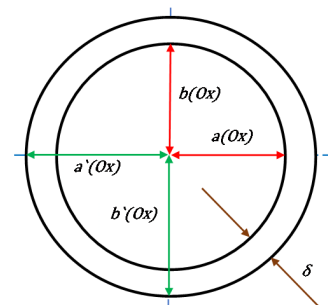


Рис. 2. Характерные размеры сечения рабочей камеры-канала насоса

Табл. 1. Параметры сечения рабочей камеры-канала насоса

| Параметр | Характеристика   |
|----------|--|
| $a(Ox)$  | внутренний размер канала по горизонтали (половина ширины канала) |
| $b(Oy)$  | внутренний размер канала по вертикали (половина высоты канала)   |
| $a'(Ox)$ | внешний размер канала по горизонтали (половина ширины трубки)    |
| $b'(Oy)$ | внутренний размер канала по вертикали (половина высоты трубки)   |
| $\delta$ | толщина сечения стенки   |

Используя известные математические выражения, были определены значения коэффициента  $\varphi$ , однозначно характеризующие геометрическую форму контуров сечений трубки рабочей камеры-канала. Схемы для определения приведены на рисунке 3.

При использовании в качестве формы контура кругового сечения, соответствующий коэффициент определяется с учетом условия, что  $a(Ox) = b(Oy) = r$  (рис. 3,а). При использовании в качестве формы контура прямоугольного сечения, соответствующий коэффициент определяется с учетом условия, что площади вписанного и описанного прямоугольника практически совпадают. Их различия будут обусловлены скруглением краев формы, что сопутствует технологическому процессу производства рабочей камеры-канала (рис. 3,б). При использовании в качестве формы контура эллипсоидного или ромбического сечения, соответствующий коэффициент определяется с учетом условия, что площади вписанного и описанного прямоугольника имеют свои максимальные значения площади. При изменении параметров горизонтального и вертикального параметра (ширины и высоты канала), значения коэффициента формы не превысят референсное значение, а будут только уменьшаться. Чем меньше численного значение приобретет данный параметр, тем сильнее будет выражена вытянутость формы поперечного сечения рабочей камеры-канала (рис. 3,в).

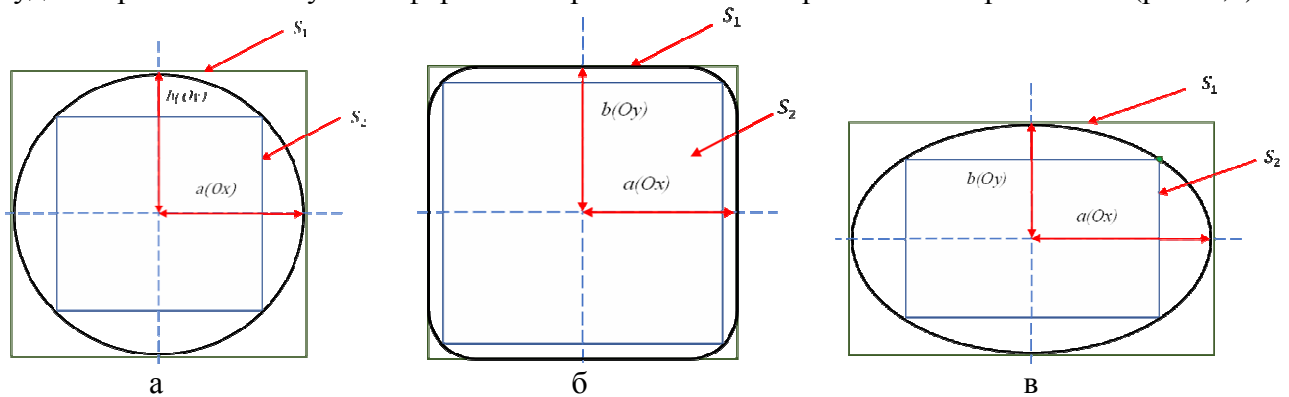


Рис. 3. Схема для определения коэффициента формы контура рабочей камеры-канала: а – круглое сечение,  $\varphi = 2$ ; б – прямоугольное сечение,  $\varphi = 1$ ; в – эллиптическое сечение,  $\varphi = 1,4$

Исследования взаимодействия трубки РКК и элемента магнитного активатора позволил определить влияние формы сечения рабочей камеры-канала на степень отклика при взаимодействии с магнитным активатором.

Трубка располагалась сверху на рабочей поверхности, ось ее совпадала с центром якоря элемента магнитного активатора. На рисунке 4 представлено расположение образца рабочей камеры-канала.

Критериями для оценки, определяющей выбор формы сечения рабочей камеры-канала, являлись:

- величина деформации трубки под действием магнитного поля;
- эквивалентное напряжение, распределенное в материале.

В качестве ограничивающих условий взаимодействия было применено:

- жесткая фиксация образца рабочей камеры в зоне контакта;
- отсутствие продольного перемещения на концах рабочей камеры.

Оценка распределения эквивалентных напряжений в материале трубки при деформации последней под воздействием магнитного поля оценивалась по критерию максимального напряжения по Мизесу основывается на теории энергии формоизменения.

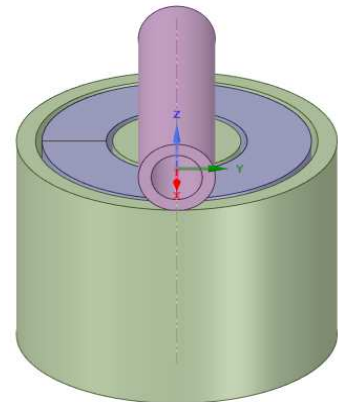


Рис. 4. Схема расположения образца рабочей камеры на элементе магнитного активатора

## Результаты

Результаты исследования по оценке деформации и эквивалентных напряжений участков трубки рабочей камеры-канала под воздействием магнитного активатора в зависимости от коэффициента формы сечения представлена на рисунке 5.

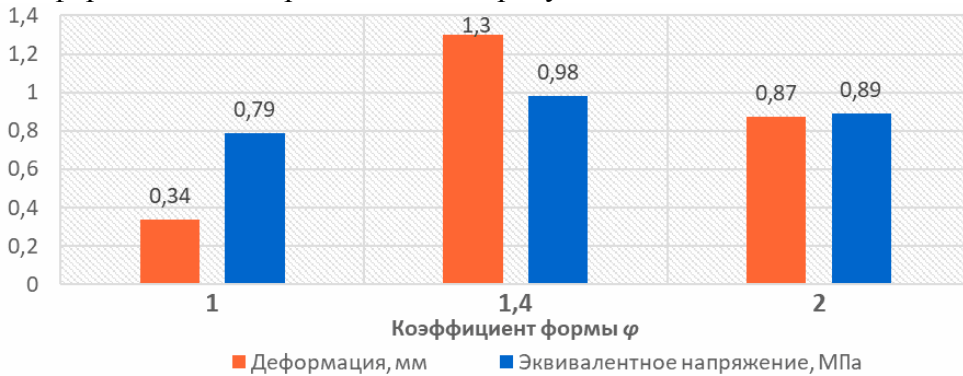


Рис. 5. Уровни механической деформации и эквивалентного напряжения образцов рабочей камеры-канала в зависимости от формы сечения

Самой низкой степенью деформации обладает образец с коэффициентом формы  $\varphi = 1$ . Высокие значения эквивалентных напряжений при незначительной деформации сечения свидетельствует от локализуемой на малом по площади участке рабочей камеры-канала, взаимодействующем с магнитным активатором. При работе насосного агрегата это вызовет высокий объем перетечек рабочей среды в рабочей камере и снизит производительность работы.

Деформация трубки достигает максимальных значений при коэффициенте формы  $\varphi = 1,4$ , что соответствует эллиптической форме образца рабочей камеры-канала. При этом уровень эквивалентного напряжения достигает максимального уровня, характеризующую значительную деформацию трубки.

Сопоставление динамики изменения значений исследуемых характеристик демонстрируют, что в трубке с коэффициентом  $\varphi = 1,4$  деформация сечения в среднем на 50% более выражена, чем в трубке с коэффициентом  $\varphi = 2$ . При этом, эквивалентные напряжения для трубки с коэффициентом  $\varphi = 1,4$  выше не более чем на 10%.

Следующим этапом оценивалось влияние распределения толщины по периметру стенки на деформационные способности образца рабочей камеры-канала.

Параметром, позволяющим количественно оценить соотношение форм внешнего и внутреннего контура трубки рабочей камеры-канала, предложен коэффициент сечения стенки  $\chi$ , определяющийся согласно выражению:

$$\chi = \varphi_{\text{вн}} / \varphi_{\text{вн}} \quad (2)$$

В случае, когда формы внешнего и внутреннего контуров в сечении трубки рабочей камеры-канала одинаковы, что характеризуется равенством коэффициентов  $\varphi_{\text{вн}}$  и  $\varphi_{\text{вн}}$ , данный показатель соответственно равен  $\chi = 1$ . Когда формы контуров в сечении не совпадают, то коэффициент принимается равным 0,7 (рис. 6).

Результаты численного эксперимента по определению деформации и эквивалентных напряжений участков трубки рабочей камеры-канала под воздействием магнитного активатора в зависимости от коэффициента сечения стенки трубок представлены на диаграмме (рис. 7).

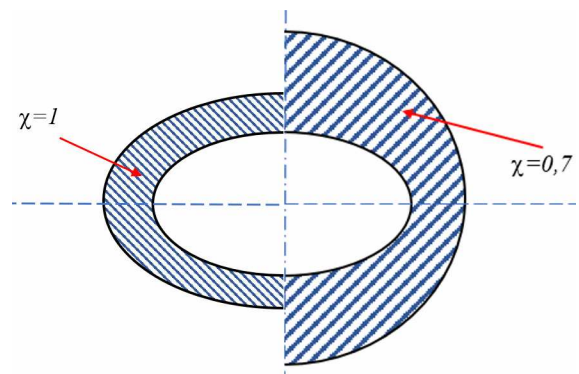


Рис. 6. Схемы рабочей камеры-канала с различными коэффициентами сечения стенки

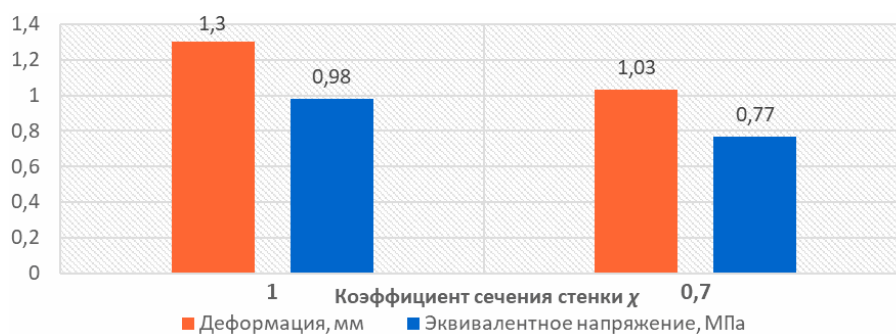


Рис. 7. Уровни механической деформации и эквивалентного напряжения образцов рабочей камеры-канала в зависимости от толщины стенки

Анализ полученных данных выявил, что при неравномерном распределении толщины стенки, деформация трубки снижается более чем на 20%. Также уменьшается и эквивалентное напряжение в материале – более чем на 25%.

Учитывая тот факт, что внутреннее сечение, характеризуемое коэффициентом  $\phi$ , у обоих образцов одинаково, изменение толщины стенки приводит к повышению количества материала, используемого для изготовления рабочей камеры-канала. Как следствие, ее вес увеличивается в среднем на 20%.

### Выводы и заключение

В рамках выполнения исследований для обоснования формы рабочей камеры-канала магнитного насосного агрегата сформулированы коэффициенты, характеризующие сечение:  $\phi$  – коэффициент формы контура (внутреннего и внешнего), определяемый как отношение площадей вписанной и описанной в форму геометрических фигур, а также  $\chi$  – коэффициент сечения стенки, определяемый отношением коэффициента форм внутреннего и внешнего контура.

На основании анализа результатов исследований величин деформации рабочей камеры, а также эквивалентных напряжений, возникающих в материале при воздействии магнитоактивного элемента обоснованно, что ромбическая форма сечения демонстрирует на 40% более выраженную деформацию в сравнении с традиционной круглой. При этом, применение постоянной толщины стенки рабочей камеры на 20% повышает деформируемость образца, что позволяет минимизировать полости утечки при воздействии магнитоактивного элемента.

### Список литературы

1. Анушенков А.Н., Стовманенко А.Ю., Волков Е.П. Основы процессов производства и транспортирования закладочных смесей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие. – Красноярск: СФУ, 2015. – 206 с.
2. Горбунов А.И., Михайлов В.П., Степанов Г.В. и др. Исследование свойств и новое применение магнитных силиконовых композитов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2008. – №1. – С. 90-107.
3. А.с. № 1488552 СССР. Электромагнитный насос перистальтического типа / Рудиев Е.В. – Заявл. 27.06.1988; опубл. 30.11.1990, Бюл. №44.
4. Vasilyeva M.A. Magnetic peristaltic pumps for backfill // Eurasian Mining. 2019, no. 1, pp. 34-36.
5. Патент № 2037653 РФ. Перистальтический насос / Кириллов И.Р., Огородников А.П., Остапенко В.П., Ионов А.В., Куприянов Н.Н. – № 93003331/29, заявл. 19.01.1993; опубл. 19.06.1995.
6. Патент № 2599696 РФ. Линейный перистальтический насос / Ферм Ф., Марин Ж., Венсан Э. – №2014152019/06, заявл. 21.05.2013; опубл. 10.10.2016, Бюл. №28.
7. Патент № 2141060 РФ. Насос перистальтический / Чилипенко Л.Л., Мацаев В.Т., Козлов Н.Н. – №98112021/06 заявл. 25.06.1998; опубл. 10.11.1999.
8. Aleksandrov V.I., Kibirev V.I. Estimation of efficiency of hydrotransport pipelines polyurethane coating application in comparison with steel pipelines // Obogashchenie Rud. 2016, no. 2, pp. 51-56. DOI: 10.17580/or.2016.02.07.
9. Александров В.И., Собега И. Вибродиагностика технического состояния грунтовых насосов // Записки Горного института. – 2016 – Т. 218. – С. 242-250.

10. Васильева М.А., Волчихина А.А., Морозов М.Д. Оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 6. – С. 133-144. DOI 0.25018/0236\_1493\_2021\_4\_7\_39.
11. Васильева М.А., Фейт С. Исследование полимерного материала рабочей камеры-канала магнитного насоса для перекачивания тяжелых нефтей // Записки Горного Института. – 2016. – Т. 221. – С. 651-654.
12. Александров В.И. Рабочий ресурс перистальтического насоса и показатели его надежности // Записки Горного института. – 1987. – Т. 110. – С. 79-82.
13. Рогачев М.К., Кузьмин М.И., Кондрашева Н.К. Исследование влияния магнитного поля на скорость коррозии металла насосно-компрессорных труб и реологические свойства скважинной продукции // Записки Горного института. – 2012 – Т. 199. – С. 379-383.
14. Овчинников Н.П., Портнягина В.В., Дамбуев Б.И. Установление предельного технического состояния пульпового насоса без разборки // Записки Горного института. – 2020 – Т. 241. – С. 53-57.
15. Свирский В.А. Гидравлическое транспортирование высококонцентрированных водоугольных суспензий // Записки Горного института. – 2002. – Т. 150(1). – С. 99-102.

### References

1. Anushenkov A.N., Stovmanenko A.Yu., Volkov E.P. Fundamentals of the processes of production and transportation of filling mixtures in underground mining of mineral deposits. – Krasnoyarsk: SFU, 2015. – 206 p.
2. Gorbunov A.I., Mikhailov V.P., Stepanov G.V. Investigation of properties and new application of magnetic silicone composites // Bulletin of the Moscow State Technical University named N.E. Bauman. Series "Engineering". 2008, no. 1, pp. 90-107.
3. A.s. No. 1488552 USSR. Electromagnetic pump of peristaltic type / Rudiev E.V. – Application 27.06.1988; publ. 30.11.1990, Bul. No. 44.
4. Vasilyeva M.A. Magnetic peristaltic pumps for backfill // Eurasian Mining. 2019, no. 1, pp. 34-36.
5. Patent No. 2037653 RU. Peristaltic pump / Kirillov I.R., Ogorodnikov A.P., Ostapenko V.P., Ionov A.V., Kupriyanov N.N. – No. 93003331/29, application 19.01.1993; publ. 19.06.1995.
6. Patent No. 25996 RU. Linear peristaltic pump / Ferm F., Marin J., Vincent E. – No. 2014152019/06, application 21.05.2013; publ. 10.10.2016, Bul. No.
7. Patent No. 2141060 RU. Peristaltic pump / Chilipenko L.L., Matsaev V.T., Kozlov N.N. – No. 98112021/06 application 25.06.1998; publ. 10.11.1999.
8. Aleksandrov V.I., Kibirev V.I. Estimation of efficiency of hydrotransport pipelines polyurethane coating application in comparison with steel pipelines // Obogashchenie Rud. 2016, no. 2, pp. 51-56. DOI: 10.17580/or.2016.02.07.
9. Alexandrov V.I., Sobota I. Vibrodiagnostics of the technical condition of soil pumps // Journal of Mining Institute. 2016, vol. 218, pp. 242-250.
10. Vasilyeva M.A., Volchikhina A.A., Morozov M.D. Equipment and technologies for carrying out work on additional backfilling of mined-out space // Journal of Mining Institute. 2021, vol. 6, pp. 133-144. DOI 0.25018/0236\_1493\_2021\_4\_7\_39.
11. Vasilyeva M.A., Vöth S. Study of the polymer material of the working chamber-channel of a magnetic pump for pumping heavy oils // Journal of Mining Institute. 2016, vol. 221, pp. 651-654.
12. Aleksandrov V.I. Operating life of the peristaltic pump and indicators of its reliability // Journal of Mining Institute. 1987, vol. 110, pp. 79-82.
13. Rogachev M.K., Kuzmin M.I., Kondrasheva N.K. Investigation of the influence of a magnetic field on the corrosion rate of tubing metal and the rheological properties of well products // Journal of Mining Institute. 2012, vol. 199, pp. 379-383.
14. Ovchinnikov N.P., Portnyagina V.V., Dambuev B.I. Establishment of the limiting technical state of a pulp pump without disassembly // Journal of Mining Institute. 2020, vol. 241, pp. 53-57.
15. Svirsky V.A. Hydraulic transportation of highly concentrated water-coal suspensions // Journal of Mining Institute. 2002, vol. 150(1), pp. 99-102.

### Сведения об авторах:

### Information about authors:

|  |  |
|--|--|
| <b>Васильева Мария Александровна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин | <b>Vasilyeva Maria Alexandrovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of transport technological processes and machines |
| <b>Волчихина Александра Алексеевна</b> – аспирант  | <b>Volchikhina Aleksandra Alekseevna</b> – graduate student  |
| <b>Атрощенко Виктор Александрович</b> – аспирант   | <b>Atroshchenko Viktor Aleksandrovich</b> – graduate student   |
| <b>Зеленцова Анна Александровна</b> – студент  | <b>Zelentsova Anna Aleksandrovna</b> – student   |
| saturn.sun@mail.ru   |  |

Получена 16.06.2022