

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ ЗАКЛАДОЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ К ГИДРОАБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ

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

**Ключевые слова:** горнодобывающие предприятия, гидротранспорт, гидроабразивный износ, футеровочные материалы, износостойкость, полиуретан, шероховатость.

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследования изменения параметров рабочей поверхности труб, выполненных из различных материалов, из которых формируется линейная часть гидротранспортной системы закладочного комплекса горного предприятия. Для оценки параметров, оказывающих наибольшее влияние на интенсивность процесса разрушения рабочей поверхности трубы, проведена серия экспериментальных исследований, целью которых было воссоздать механический процесс ударного воздействия объемов жидкости и абразива на поверхность трубы. Полученные результаты позволили обосновать механизм снижения потерь напора при перекачивании гидросмеси с постоянной концентрацией и сформулировать рекомендации по выбору сортамента труб для изготовления участков гидротранспортной системы в составе комплексов для закладки выработанного пространства продуктами обогащения минерального сырья.

## INVESTIGATION OF ABRASION RESISTANCE OF STOWING EQUIPMENT PIPELINES

*Atroshchenko V.A., Volchikhina A.A., Vasilyeva M.A.*  
*Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg*

**Keywords:** mining enterprises, hydrotransport systems, hydroabrasion erosion, moisture abrasion, wear resistance, polyurethane, roughness.

**Abstract.** The article presents the results of a study of changes in the parameters of the working surface of pipes made of various materials, from which the linear part of the hydraulic transport system of the backfilling complex of a mining enterprise is formed. To assess the parameters that have the greatest influence on the intensity of the process of destruction of the working surface of the pipe, a series of experimental studies was carried out, the purpose of which was to recreate the mechanical process of the impact of volumes of liquid and abrasive on the surface of the pipe. The results obtained made it possible to substantiate the mechanism for reducing pressure losses when pumping slurry with a constant concentration and to formulate recommendations on the choice of pipe assortment for the manufacture of sections of the hydrotransport system as part of complexes for backfilling the mined-out space with mineral processing products.

### Введение

Гидроабразивный износ трубопроводов и оборудования является одним из основных факторов, определяющих эффективность применения гидротранспортных систем [1-2].

Применяемые в гидротранспортных системах закладочных комплексов традиционные стальные трубопроводы обладают высокой шероховатостью, которая влияет на величину потерь напора при гидротранспортировании. Анализ работы гидротранспортных систем закладочных комплексов позволил выявить, что их производительность не соответствует технической возможности из-за интенсивного гидроабразивного износа трубопроводов, приводящего к значительному увеличению шероховатости рабочей поверхности трубопроводов [3-4]. Это в свою очередь приводит к увеличению линейных сопротивлений движению гидравлической смеси, снижению скорости потока и неизбежно приводит к расслоению закладочной смеси за счет высоких потерь напора в гидросистеме. В конечном итоге формируемый закладочный массив не обладает требуемыми параметрами прочности и не способен полноценно участвовать в управлении горным давлением. Это снижает безопасность ведения горных работ и увеличивает стоимость добычи полезных ископаемых за счет необходимости проведения дополнительных работ по дозакладке образующихся пустот [5].

Основными параметрами потока, определяющими степень изнашивания трубопровода, является скорость движения гидросмеси, концентрация твердых частиц, их масса и направление траектории движения относительно изнашиваемой поверхности [6-7]. При гидротранспорте горных пород основное влияние на изнашиваемую поверхность оказывает гидроабразивный износ [8-9]. Его механизм при движении по трубопроводу гидросмеси обусловлен характером движения жидкости с беспорядочным движением частиц, сталкивающихся между собой и со стенками трубопровода. При этих соударениях нарушается целостность изнашиваемой поверхности, микроскопические частицы изнашиваемого материала отделяются и уносятся с потоком, вызывая общую усталостную напряженность поверхности, приводящую к ее разрушению [10-11]. Также это приводит к повышению шероховатости поверхности трубопровода, что дополнительно приводит к росту потерь напора.

### Материалы и методы исследований

Методы прогнозирования изнашиваемости трубопровода базируются на расчетных зависимостях интенсивности износа и срока надежной эксплуатации трубопроводов [12]. Так как затраты энергии на гидроабразивный износ трубопроводов пропорциональны полным затратам энергии всего взвесенесущего потока, то процесс гидроабразивного износа может быть описан с помощью энергетических показателей [13]. Интенсивность гидроабразивного износа определяется по формуле:

$$\Delta_a = \frac{k_{из} \cdot f_a \cdot D_B \cdot v \cdot \rho_r \cdot \Phi}{4 \cdot \rho_M}, \quad (1)$$

где  $k_{из}$  – эмпирический коэффициент, учитывающий интенсивность износа и зависящий от потерь напора;  $f_a$  – коэффициент, учитывающий абразивность частиц;  $D_B$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $v$  – средняя скорость движения гидросмеси, м/с;  $\rho_r$  – плотность гидросмеси, т/м<sup>3</sup>;  $\Phi$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения износа по сечению трубопровода;  $\rho_M$  – плотность металла трубопровода, т/м<sup>3</sup>.

Коэффициент  $k_{из}$  является переменной величиной. Он зависит от режима транспортирования и представляет собой зависимость:

$$k_{из} = f(I_r), \quad (2)$$

где  $I_r$  – потери напора. Коэффициент  $k_{из}$  определяется по номограммам на рисунке 1.

Параметры интенсивности износа трубопровода определяют срок его эксплуатации. Для этого определяется минимально допустимая толщина стенки трубопровода по формуле:

$$\delta_{min} = \frac{P \cdot D_B}{200 \cdot \sigma_{доп}}, \quad (3)$$

где  $P$  – давление в трубопроводе, Па;  $\sigma_{доп}$  – допускаемые напряжения на разрыв, Па.

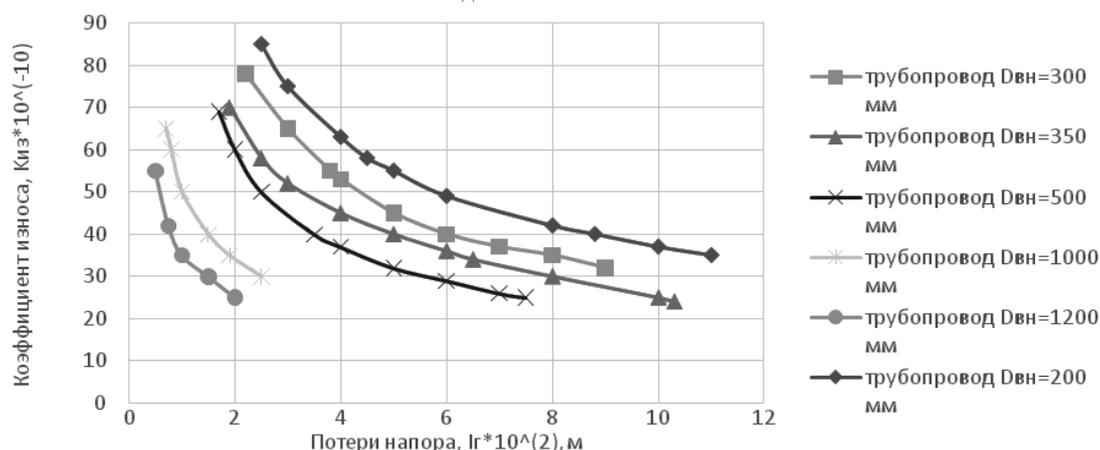


Рис. 1. График зависимости коэффициента износа от потерь напора

Пропускная способность трубопровода до полного износа стенки при однократном ее использовании определяется согласно выражению:

$$Q_T = Q_G \cdot \delta_H. \quad (4)$$

Увеличение срока службы трубопроводов обеспечивается за счет применения трубопроводов из износостойких материалов [14-15]. Для повышения износостойкости сталей применяется корундирование и закалка, увеличивающая данный параметр у среднеуглеродистой стали в 2,2-2,5 раза. Используются также полимерные покрытия внутренней поверхности труб. Для этой цели используются эпоксидная смола, амины, а также бензилбутилфталат и триоктилтримелитан. Трубы диаметром 150-200 мм футеруются также полуэтиленом высокой плотности. Они успешно применяются для агрессивных и кислых сред. Срок службы их по сравнению с трубами из углеродистых сталей выше в 8-10 раз.

Для транспортирования высокоабразивных гидросмесей применяются трубы, футерованные полиуретановыми эластомерами. Данный тип покрытия получил широкое распространение в России и за рубежом. Так, при толщине слоя футеровки 10-13 мм такие трубы эксплуатируются при транспортировании кварцевого песка крупностью 5-6 мм в течение 8 лет [16].

### Результаты

При проведении экспериментальных исследований процесса гидроабразивного изнашивания было отмечено, что в основе процесса разрушения лежит механический процесс ударного воздействия объемов жидкости и абразива на поверхность трубы. Основной целью исследований являлась оценка параметров, оказывающих наибольшее влияние на величину износа, и обоснование способов снижения образуемой шероховатости поверхности, приводящей к росту потерь напора. [17-18].

Для выполнения экспериментальных исследований влияния свойств поверхности трубопроводов при перекачивании гидросмеси были изготовлены опытные образцы с покрытием и полиуретановые трубки, их характеристики представлены в таблице 1. Изделия с покрытиями отличаются друг от друга твердостью поверхности, причем расхождение по твердости незначительно.

Для измерения шероховатости поверхности использовался прибор SurfTest SJ-210. Он позволяет измерить величину неровности поверхности различных изделий по различным стандартам шероховатости.

В качестве материала твердого наполнителя использовались хвосты обогащения железной руды Михайловского ГОКа. Гранулометрический состав твердой фракции приведен в таблице 2.

Табл. 1. Характеристики экспериментальных образцов

№	Наименование изделия	Изготовитель	Полиуретан	Твердость по Шору
1	Труба Ду50 (Т21)	ООО «ПКФ «Уретан Тех-М»	СКУ-7Л	95
2	Труба Ду50 (Т22)	АО «СОМЕКС»	Е-83	83
3	Труба Ду50 (Т23)		Э-243	85
4	Труба Ду50 (Т24)		Н-802	90
5	Втулка (В0)	УМ Санкт-Петербургского горного университета	Сталь 3	HRC -35

Табл. 2. Средний гранулометрический состав гидросмеси

Размер фракции, мм	+2	-2+1	- 1+0,5	-0,5+0,25	-0,25+0,1	-0,1 +0,05	-0,05 +0	Итого
Содержание фракции, %	0,1	0,7	1,5	3,5	9,0	8,8	76,4	100

Для наработки шероховатости внутренней поверхности полиуретановых образцов труб подготовленная гидросмесь многократно перекачивалась по кольцевому трубопроводу лабораторной гидротранспортной установки, схема которой приведена на рисунке 2.

Гидросмесь бака-смесителя объемом 0,5 м<sup>3</sup> перекачивалась по участку исследуемого трубопровода посредством центробежного насоса центробежного насоса по закольцованной схеме.

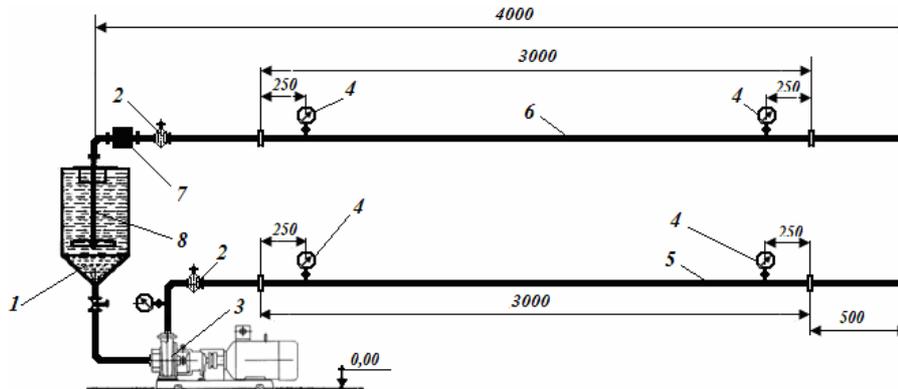


Рис. 2. Схема лабораторного стенда: 1 – бак-смеситель; 2 – кран шаровый; 3 – насос П12,5/12,5СП; 4 – манометр Wika 232.50.100; 5 – трубопровод стальной  $D_{ВН} = 50$  мм; 6 – исследуемый отрезок трубопровода; 7 – расходомер PDFM 5.1; 8 – лопастная мешалка

Из практики применения гидротранспорта известно, что установившаяся величина шероховатости стальных трубопроводов достигается ориентировочно после одного месяца непрерывной работы трубопровода, что соответствует 720 ч. При этом средняя скорость потока составляет не более 4,8 м/с в зависимости от диаметра трубопровода. Эти данные использовались для определения общего времени движения гидросмеси по трубопроводу и опытным образцам труб до наработки некоторой установившейся шероховатости внутренней поверхности.

Для определения характера и динамики изменения шероховатости полиуретановых покрытий опытных образцов труб, общее время работы составляло  $T_{раб} = 600$  ч и включало несколько отрезков времени  $t_i$ , так, что  $\sum_i^n t_i = T_{раб}$ . Эти отрезки времени составляли: 2 интервала по 50 ч, и 5 интервалов по 100 ч. Общее время составило 600 ч.

После каждого временного интервала  $t_i$  стенд выключался, опытные трубы демонтировались и производились измерения наработанной шероховатости.

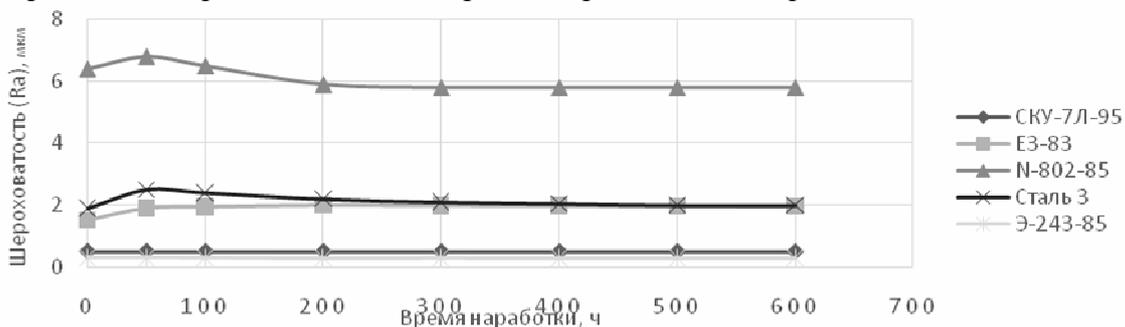


Рис. 3. Сводный график изменения шероховатости от времени наработки образцов

В числе исследованных изделий можно выделить образец с максимальным начальным значением шероховатости – N-802, и прочие, которые можно выделить в отдельную группу с меньшими значениями шероховатости: SKU-7Л-95А, E3-83, Э-243 и Сталь 3.

Был определен коэффициент эквивалентной шероховатости согласно выражению (ГОСТ 8.586 1-2005):

$$K_{\text{э}} = \pi \cdot R_a. \quad (5)$$

Ожидаемая величина эквивалентной шероховатости для трубопровода с покрытием N-802 после наработки трубопровода 720 часов при перекачивании гидросмеси с массовой концентрацией твердого около 10%, равна  $K_{\text{э}} = 16,07$  мкм; для труб, входящих в группу с низкой первоначальной шероховатостью,  $K_{\text{э}} = 1,29$  мкм.

Полученные значения эквивалентной шероховатости применялись к расчету коэффициента гидравлических сопротивлений  $\lambda$  и удельных потерь напора  $I$ . Для этого использовались сведения о первичной шероховатости образца участка трубопровода равного  $R_a = 4,49$  мкм. В этом случае коэффициент эквивалентной шероховатости составит  $K_{\text{э}} = 14,1$  мкм.

Сопоставляя результаты исследования необходимо отметить, что  $K_{\text{э}}$  для образца N-802 значительно превышает значения для трубопроводов с покрытием, относящихся ко второй группе (практически в десять раз). Это повлечет за собой существенную разницу в коэффициентах гидравлических сопротивлений и скажется на удельных потерях напора в гидротранспортной системе в целом.

При проведении интерполяции полученных на экспериментальном стенде данных на реальный объект трубопроводного транспорта с  $D_{\text{ВН}} = 1196$  мм и футерованный полиуретановым покрытием, перекачивающий гидросмесь в турбулентном режиме в квадратичной области трения, применима формула Шифринсона:

$$\lambda_{\text{фут}} = 0,11 \cdot \epsilon^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{K_{\text{э}}}{D_{\text{ВН}}} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где  $\epsilon$  – относительная шероховатость рабочей поверхности.

Полученное значение определяется на уровне  $\lambda_{\text{фут}} = 0,003$ .

Коэффициент гидравлических сопротивлений для стального приработанного трубопровода будет определяться на уровне  $\lambda_{\text{СТ}} = 0,006$ .

Расчет удельных потерь напора при перекачивании гидросмеси выполненных с учетом полученных значений коэффициентов гидравлических сопротивлений  $\lambda_{\text{фут}}$  и  $\lambda_{\text{СТ}}$  выполнен согласно выражению:

$$I = I_B + \Delta I_B = \lambda_{\text{фут}} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot D} + k_p \cdot \delta \cdot \sqrt[4]{i} \cdot \sqrt[3]{c_{\text{об}}^2}. \quad (7)$$

Дополнительные потери напора  $\Delta I$  в расчетной формуле остаются неизменными, так как не зависят от коэффициента сопротивлений.

Итоговые потери напора в футерованных трубопроводах с низкой первоначальной шероховатостью определены на уровне  $I = 0,004$ . В стальном трубопроводе без покрытия  $I = 0,005$ .

Результаты расчетов коэффициентов шероховатости, гидравлических сопротивлений и удельных потерь напора приведены в таблице 3.

Табл. 3. Расчетные значения коэффициентов шероховатости, гидравлических сопротивлений и удельных потерь напора

Трубопровод	Параметры			
	Реальная шероховатость, $\Delta$ , мкм	Эквивалентная шероховатость $K_{\text{э}}$ , мкм	Коэффициент гидравлических сопротивлений, $\lambda$	Удельные потери напора $I$ , м вод. ст./км
Полиуретановое покрытие	0,719	1,29	0,003	3,1
Стальной	4,49	14,1	0,006	5

## Выводы

Проблеме снижения потерь напора вызванных повышенным гидроабразивным износом элементов гидротранспортных систем закладочных комплексов уделяется особое внимание, что обусловлено в том числе необходимостью применения гидросмесей повышенной концентрации и увеличением дальности подачи закладочного материала. В результате выполненных исследований было установлено:

1) потери напора в трубопроводах с полиуретановым покрытием, вызванные ростом шероховатости за счет гидроабразивного износа рабочей поверхности трубопровода при перемещении абразивной гидросмеси, приготовленной с использованием хвостов обогащения, находятся в линейной зависимости от времени эксплуатации и не зависят от содержания твердой фракции в потоке;

2) установленные значения относительной шероховатости рабочей поверхности труб с полиуретановым покрытием подтверждают эффективность их применения в системах гидротранспорта закладочных комплексов для снижения удельных потерь напора при перемещении закладочных гидросмесей.

## Список литературы

1. Антоев К.П., Попов С.Н. Исследование стойкости к гидроабразивному износу стеклопластиковых труб с полиуретановым покрытием // Наука и образование. – 2017. – №1. – С. 87-90.
2. Антоев К.П., Заровняев Б.Н., Христофорова А.А. Исследование стойкости стеклопластиковых труб к гидроабразивному износу // Материалы докладов VIII Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные науки сегодня». – НИЦ «Академический», 2016. – С. 72-77.
3. Александров В.И., Храбров А.П. Исследование параметров транспортирования высоковязких нефтей в виде эмульсий с целью их оптимизации // Записки Горного института. – 2011. – Т. 189. – С. 175-178.
4. Александров В.И., Васильева М.А. Гидротранспорт сгущенных хвостов обогащения железной руды на качканарском ГОКе по результатам опытно-промышленных испытаний системы гидротранспорта // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 471-478.
5. 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.
6. Атрощенко В.А., Александров В.И. Повышение эффективности транспортных трубопроводов закладочного комплекса применением полиуретанового покрытия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №10-1. – С. 25-38.
7. Бранзбург А.Б., Коврига В.В., Пуце. Пульпопроводы: от дармштадтского метода к дармштадтскому ресурсу // Полимерные трубы. – 2015. – № . – С. 52-53.
8. Долганов А.В. Влияние гидроабразивного износа элементов проточной части на эксплуатационные качества центробежных насосов медно – колчеданных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №8. – С. 181-186.
9. Долганов А.В., Тимухин С.А. Гидроабразивный износ насосов рудничного водоотлива: научная монография. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2016. – 180 с.
10. Klaus Frisdrieh. Erosive wear of polymers surfaces by steel ball – blasting // Journal of Materials Science. 1986, no. 21(9), pp. 3317-3332.
11. Stein D., Brauer A. Abrasion resistance // Guide to selection of tube-based materials for municipal drainage systems. 2004, 12 p.
12. Покровская В.Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности. – М.: Недра, 1985. – 193 с.
13. Александров В.И., Собота И. Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья // Записки Горного института. – 2015. – Т. 213. – С. 9-16.
14. Кузнецова В.А., Шаповалов Г.Г. Тенденции развития в области эрозионностойких покрытий (обзор) // Труды ВИАМ. – 2018. – №11(71). – С. 74-85.
15. Меньшиков С.С., Васильева М.А. Коэффициент технического состояния грунтовых насосов в системах гидротранспорта хвостовых пульп // Записки Горного института. – 2014. – Т. 209. – С. 193-196.
16. Евсева К.А., Битт В.В., Скребнев В.И., Калугина Е.В. Новые полимерные трубы для промышленного применения // Российский химический журнал. – 2021. – №65(3). – С. 85-90.
17. Путилова И.В. Рекомендации по снижению абразивного износа гидротранспортных трубопроводов систем золошлакоудаления ТЭС // Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). – 2020. – №31-33. – С. 81-92.
18. Скребнев В.И., Сержан С.Л., Калугина Е.В. Исследование стойкости к гидроабразивному износу полимерных и стальных труб. Оценка основных параметров, влияющих на интенсивность износа гидротранспортных систем // Пластические массы. – 2020. – №9-10. – С. 40-44.

## References

1. Antoev K.P., Popov S.N. Investigation of resistance to hydroabrasive wear of fiberglass pipes with polyurethane coating // Science and Education. 2017, no.1, pp. 87-90.
2. Antoev K.P., Zarovnyayev B.N., Khristoforova A.A. Study of resistance of fiberglass pipes to hydroabrasive wear. Proceedings of VIII International Scientific and Practical Conference "Fundamental and Applied Sciences Today". – SRCenter "Academician", 2016. – P. 72-77.
3. Aleksandrov V.I., Khrabrov A.P. Study of parameters of transportation of high-viscosity oils in the form of emulsions in order to optimize them // Journal of Mining Institute. 2011, vol. 189, pp. 175-178.
4. Aleksandrov V.I., Vasilyeva M.A. Hydrotransport of thickened tailings of iron ore concentration at the Kachkanar mine based on the results of pilot tests of the hydrotransport system // Journal of Mining Institute. 2018, vol. 233, pp. 471-478.
5. Vasilieva M.A., Volchikhina A.A., Morozov M.D. Equipment and technologies for the work on additional stowing of mined-out space // Mining informational and analytical bulletin. 2021, no. 6, pp. 133-144.
6. Atroshchenko V.A., Aleksandrov V.I. Increase of efficiency of transport pipelines of filling complex using polyurethane coating // Mining informational and analytical bulletin. 2022, no. 10-1, pp. 25-38.
7. Branzburg A.B., Kovriga V.V., Puce. Pulp Pipelines: from Darmstadt method to Darmstadt resource // Polymer Pipes. 2015, no. 1, pp. 52-53.
8. Dolganov A.V. Influence of hydroabrasive wear of elements of a flow part on operational qualities of centrifugal pumps of copper-coal-bearing mines // Mining informational and analytical bulletin. 2015, no. 8, pp. 181-186.
9. Dolganov A.V., Timukhin S.A. Hydroabrasive Wear of Mine Drainage Pumps: Scientific Monograph. – M.: Publ. House of the Academy of Natural Sciences, 2016. – 180 p.
10. Klaus Frisdrich. Erosive wear of polymers surfaces by steel ball – blasting // Journal of Materials Science. 1986, no. 21(9), pp. 3317-3332.
11. Stein D., Brauer A. Abrasion resistance // Guide to selection of tube-based materials for municipal drainage systems. 2004, 12 p.
12. Pokrovskaya V.N. Pipeline transport in the mining industry. – M.: Nedra, 1985. – 193 p.
13. Alexandrov V.I., Sobota I. Specific energy intensity of hydraulic transportation of mineral products // Journal of Mining Institute. 2015, vol. 213, pp. 9-16.
14. Kuznetsova V.A., Shapovalov G.G. Development trends in the field of erosion-resistant coatings // The works of RARM. 2018, no. 1, vol. 71, pp. 74-85.
15. Menshikov S.S., Vasilyeva M.A. Technical condition coefficient of groundwater pumps in the systems of hydraulic transport of tailings slurries // Journal of Mining Institute. 2014, vol. 209, pp. 193-196.
16. Evseeva K.A., Bitt V.V., Skrebnev V.I., Kalugina E.V. New polymeric pipes for industrial applications // Russian Journal of General Chemistry. 2021, no. 65, vol. 3, pp. 85-90.
17. Putilova I.V. Recommendations to reduce abrasion wear of hydrotransport pipelines of ash and slag removal systems of TPPs // Alternative Energy and Environment (ISJAE). 2020, no. 31-33, pp. 81-92.
18. Skrebnev V.I., Serzhan S.L., Kalugina E.V. Research of resistance to hydroabrasive wear of polymeric and steel pipes. Estimation of main parameters influencing the wear rate of hydrotransport systems // Plastic masses. 2020, no. 9-10, pp. 40-44.

### Сведения об авторах:

### Information about authors:

<b>Атрощенко Виктор Александрович</b> – аспирант	<b>Atroshchenko Victor Aleksandrovich</b> – postgraduate student
<b>Волчихина Александра Алексеевна</b> – аспирант	<b>Volchikhina Aleksandra Alekseevna</b> – postgraduate student
<b>Васильева Мария Александровна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических процессов и машин alexandravolchikhina@yandex.ru	<b>Vasilyeva Maria Aleksandrovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of transport technological processes and machines

Получена 30.11.2022