

РАЗМЕРНО-МАССОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЫЛИ ПРИ ПОГРУЗКЕ ГРАНИТНОЙ МАССЫ

Алимпиев В.Н.¹, Репкина К.С.², Михайлов А.В.²

¹АО «Гавриловское карьероуправление», пос. Гаврилово;

²Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

Ключевые слова: добыча гранита, карьерный гидравлический экскаватор, погрузка, пылеобразование, размерно-массовые характеристики пыли.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования размерно-массовых характеристик гранитной и органоминеральной пыли, образующейся в рабочей зоне карьерного гидравлического экскаватора при погрузке взорванной гранитной массы. Приведены условия эксплуатации карьерных экскаваторов на месторождении гранитов «Гавриловское», характеризующиеся влажным климатом и запыленностью рабочей зоны, что влияет на состояние гидравлической системы. Показано, что при добыче гранита основным видом минерального загрязнения является гранитная пыль, однако в рабочей зоне экскаватора также формируется органоминеральная пыль, возникающая при смешении минеральных частиц с грунтовыми включениями, остатками органического происхождения. Выполнен инструментальный анализ гранулометрического состава и морфологии частиц с применением методов лазерной дифракции, растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа. Установлено процентное содержание частиц пыли размером менее 50 мкм, способных длительно находиться во взвешенном состоянии и проникать в гидросистему экскаватора, вызывая загрязнение гидравлической жидкости. Определен медианный диаметр как средний кумулятивный диаметр по совокупности органоминеральной пыли 32,986 мкм и гранитной пыли 16,847 мкм. Определено процентное содержание частиц пыли размерами менее 50 мкм, (32,99% для органоминеральной и 16,85% для гранитной), которые способны проникать в гидросистему экскаватора, вызывая загрязнение гидравлической жидкости.

DUST SIZE-MASS CHARACTERISTICS DURING GRANITE LOADING

Alimpiev V.N.¹, Repkina K.S.², Mikhailov A.V.²

¹JSC «Gavrilovskoe karieroupravlenie», Gavrilovo;

²Empress Catherine II Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg

Keywords: granite mining, mining hydraulic excavator, loading, dust formation, size-mass characteristics of dust.

Abstract. This article presents the results of a study of the size and mass characteristics of granite and organomineral dust generated in the working area of a hydraulic mining excavator during the loading of blasted granite material. The article examines the operating conditions of mining excavators at the Gavrilovskoye granite deposit, characterized by a humid climate and dusty working area, which impacts the hydraulic system. It is shown that granite dust is the primary mineral contaminant generated during granite mining. However, organomineral dust also forms in the excavator working area, resulting from the mixing of mineral particles with soil inclusions and organic residues. An instrumental analysis of the particle size distribution and morphology was performed using laser diffraction, scanning electron microscopy, and X-ray spectral analysis. The percentage of dust particles smaller than 50 µm in size, which can remain suspended for extended periods and penetrate the excavator's hydraulic system, causing contamination of the hydraulic fluid, was determined. The median diameter was determined as the average cumulative diameter for organomineral dust (32,986 µm) and granite dust (16,847 µm). The percentage content of dust particles smaller than 50 µm (32,99% for organomineral and 16,85% for granite) that can penetrate into the excavator hydraulic system, causing contamination of the hydraulic fluid, was determined.

Введение

Открытая разработка месторождений строительного камня сопровождается интенсивным пылеобразованием, оказывающим негативное воздействие на окружающую среду, технологическое оборудование и условия его эксплуатации [1]. При выполнении погрузочно-транспортных операций в рабочей зоне карьерных экскаваторов формируется аэрозольная среда, содержащая значительное количество мелкодисперсных минеральных частиц. К основным источникам пылевых выбросов при открытой добыче полезных ископаемых относятся погрузка горной массы [2].

Для карьеров по добыче твердых горных пород пылеобразование является одним из устойчивых эксплуатационных факторов, влияющих на надежность машин и качество технического обслуживания. В условиях повышенной запыленности рабочей зоны на элементы гидравлической системы машин воздействуют минеральные и органические частицы, атмосферная влага. При этом пыль оседает не только на наружных поверхностях оборудования, но и на штоках гидроцилиндров, рукавах высокого давления, соединениях гидролиний, проникает через сапуны в гидробаки.

В реальных условиях эксплуатации надежность гидропривода гидравлического экскаватора снижается при сочетании нескольких факторов: высокого уровня запыленности воздуха рабочей зоны, повышения температуры рабочей жидкости, загрязнения гидросистемы твердыми частицами и недостаточного уровня организации технического обслуживания [3].

Производственная пыль представляет собой аэрозоль, как совокупность мелкодисперсных частиц твердого вещества, образующихся в процессе производства и находящихся продолжительное время во взвешенном состоянии в воздушной среде рабочей зоны [4].

Практика эксплуатации гидравлических систем технологического оборудования показывает, что надежность гидроагрегатов на 70-90% зависит от загрязнения гидравлической жидкости. Наибольшее негативное влияние оказывают частицы размером 7-10 мкм на золотниковые пары распределителя, (способствуют изнашиванию и заклиниванию золотниковых устройств, нарушению герметичности клапанов); а частицы размером 10-25 мкм – на аксиально-поршневые насосы [5].

Наиболее опасны для гидропривода неорганические частицы: кварц, полевой шпат, окислы алюминия, железа. Твердость этих частиц, особенно кварца и окислов алюминия существенно выше твердости металлов, из которых производятся детали гидросистемы, в т.ч. пары трения (золотник – корпус гидрораспределителя, детали качающего узла, гидромотора или насоса). Например, радиальный зазор в прецизионных парах новых гидрораспределителей составляет от 6-8 мкм, то в процессе эксплуатации в результате абразивного изнашивания он увеличивается до 32-46 мкм [6].

По данным ГОСНИТИ при эксплуатации гидросистем в гидравлической жидкости основную часть механических примесей составляют частицы кварца – 70-85%, окиси алюминия – 10-15%, окиси железа – 5-10%. По гранулометрическому составу частиц находящихся в гидравлической жидкости: 30% составляют частицы размером от 5 до 10 мкм; 60% – от 10 до 25 мкм; 10% – от 25 до 50 мкм [5].

При разработке месторождений гранита гранитная пыль представляет собой полидисперсную систему, содержащую частицы различного размера и формы [7]. В условиях карьера загрязнение гидросистемы не ограничивается только минеральной гранитной пылью. В соответствии с классификацией производственной пыли, загрязнения могут иметь минеральное, органическое и смешанное происхождение [4]. Такая смешанная пыль отличается более сложным составом и может удерживать влагу, что дополнительно повышает риск ухудшения свойств гидравлической жидкости. Форма частиц пыли влияет на их поведение в воздухе, при этом частицы неправильной формы способны более длительное время находиться в воздухе рабочей зоны [4].

Согласно Британскому институту стандартов (BSI 1994, Characterization of air quality – Part 2), пыль определяется как мелкие твердые частицы, условным диаметром менее 75 мкм, которые оседают под действием собственного веса, но могут некоторое время оставаться во взвешенном состоянии. Частицы пыли горных пород обычно имеют неправильную форму [8]. Размер частиц и химический состав являются наиболее важными свойствами пыли. Такие индикаторы, как PM_{10} (частицы с аэродинамическим диаметром меньше или равным номинальным 10 мкм) и $PM_{2,5}$, обычно используются для определения запыленности.

В каждом рабочем цикле погрузки мелкая гранитная пыль проникает в гидросистему экскаватора. В связи с этим состояние гидравлической жидкости целесообразно

рассматривать как самостоятельный фактор управления техническим состоянием гидравлической системы горных машин [9].

Цель работы состоит в экспериментальном определении размерно-массовых характеристик пыли, образующейся в рабочей зоне карьерного гидравлического экскаватора при погрузке взорванной массы гранита в условиях влажного климата.

Материалы и методы исследований

Анализ пыли проводился на образцах месторождения гранитов «Гавриловское» расположенного в Выборгском районе Ленинградской области, и являющегося сырьевой базой АО «Гавриловское карьероуправление». Климат района переходный от морского к умеренно-континентальному с повышенной влажностью воздуха, частыми атмосферными осадками и значительной сезонной изменчивостью температур (СНИП 23-01-99* Строительная климатология).

По данным АО «Гавриловское карьероуправление» граниты по минералогическому составу относятся в основном к микроклиновым разновидностям. Состав их измеряется в следующих пределах:

- калиевые полевые шпаты: от 5,1 до 76,5%;
- плагиоклазы плагиоклазы: от 9,6 до 60,8%;
- кварц: до 28,4%;
- биотит: до 13,5%;
- амфиболы: от 0,3 до 16,0%.

Вскрышные породы представлены органической почвой, песками, супесями и суглинками. На вскрышных и добычных работах применяются гидравлические экскаваторы САТ-374 и автосамосвалы САТ-772 (рис. 1). В процессе погрузки взорванной гранитной массы в рабочей зоне экскаваторов происходит интенсивное пылеобразование.

Программа экспериментальных исследований включила в себя отбор образцов пыли в рабочей зоне карьерного гидравлического экскаватора при выполнении погрузочных операций и проведение анализа в лабораторных условиях.

Для анализа были выделены два типа образцов: минеральная гранитная пыль и органоминеральная пыль (рис. 2). Минеральная гранитная пыль рассматривается как продукт разрушения и перемещения гранитной горной массы. Органоминеральная пыль – как смешанная система, включающая гранитные частицы, грунтовые включения и частицы органического происхождения.



Рис. 1. Запыленность рабочей зоны карьерного экскаватора при погрузке гранита



Рис. 2. Образцы гранитной и органоминеральной пыли

Предварительная подготовка образцов осуществлялась с использованием набора сит С-200 (Механобр техника) на цифровом встряхивателе для сит LMSM-300/450 с отсевом частиц менее 50 мкм.

Насыпную плотность образцов пыли находили путем взвешивания известного объема пыли и делением найденной массы на объем [10]. Измерения влажности образцов пыли проводилось методом высушивания до постоянной массы в анализаторе влажности AND MF-50. Определение зольности органоминеральной пыли выполнялось по ГОСТ 11306-2013.

Для определения гранулометрического состава пыли использовался лазерный анализатор LA-950 Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer. Анализ распределения размеров частиц осуществлялся методом лазерной дифракции [11].

Исследования морфологии и структуры частиц проводились методом растровой электронной микроскопии с использованием электронно-ионного растрового двухлучевого микроскопа со сфокусированным ионным пучком JIB-4500 фирмы JEOL, включающий РЭМ с LaB₆-катодом и Ga⁺ ионную пушку. Рентгеноспектральный анализ выполнялся для определения химического состава гранитной пыли. Дополнительно выполнялся анализ морфологии частиц органоминеральной и гранитной пыли.

Результаты

Образец органоминеральной пыли представляет собой тонкодисперсную систему светло-коричневого цвета. По результатам лабораторных измерений насыпная плотность органоминеральной пыли составила 532 кг/м³ при влажности 13,16%.

Зольность на сухое вещество органоминеральной пыли составила $A^c = 62\%$, что соответствует содержанию органического вещества 38%.

Образец гранитной пыли представляет собой тонкодисперсную систему светло-серого цвета. По результатам лабораторных измерений насыпная плотность гранитной пыли составила 783 кг/м³ при влажности 1,45%.

На рисунке 3 представлены результаты распределения размеров частиц органоминеральной и гранитной пыли.

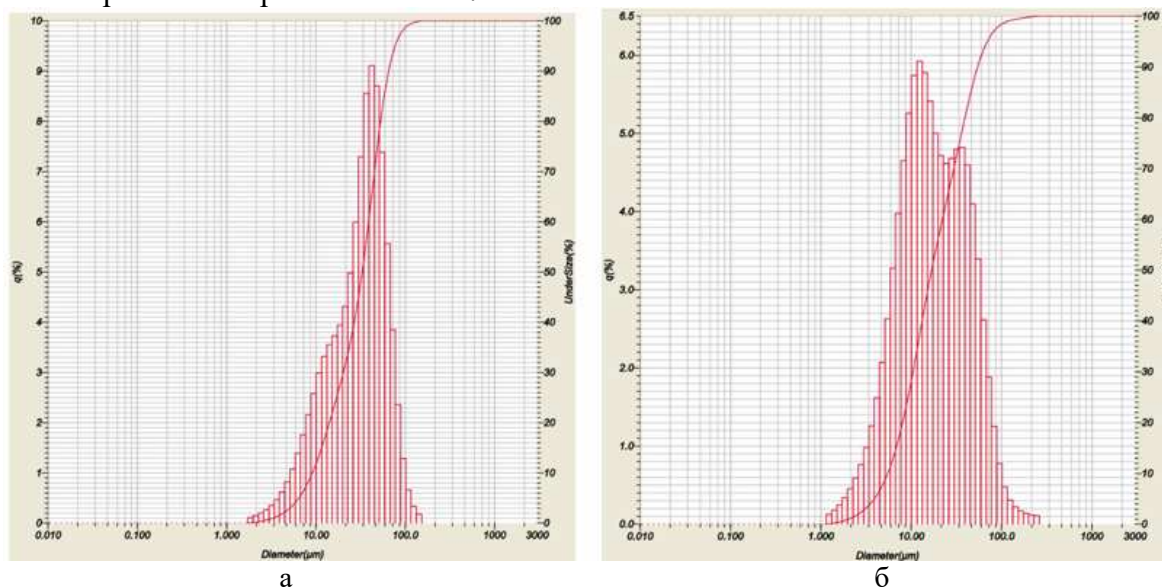


Рис. 3. Графические результаты распределения размеров частиц органоминеральной (а) и гранитной (б) пыли

В таблице 1 приведены статистические характеристики размеров частиц органоминеральной и гранитной пыли.

По результатам анализа распределения размеров частиц образца органоминеральной пыли за основу при дальнейшем анализе процесса осаждения пылевых частиц на поверхности карьерного экскаватора принят медианный диаметр как средний кумулятивный диаметр по совокупности 32,986 мкм. При этом содержание твердых частиц с эквивалентным

аэродинамическим размером частиц менее 50 мкм в диаметре составляет 32,99%; содержание частиц пыли диаметром менее PM₁₀ составляет 9,13%, а диаметром менее PM_{2,5} составляет 0,18%.

Для гранитной пыли медианный диаметр частиц составил 16,85 мкм. Содержание твердых частиц с эквивалентным аэродинамическим размером частиц менее 50 мкм в диаметре составляет 16,85%; содержание частиц пыли диаметром менее PM₁₀ составляет 5,51%. Содержание частиц пыли диаметром менее PM_{2,5} составляет 0,53%.

Табл. 1. Статистические характеристики размеров частиц пыли

Характеристики	Образцы пыли	
	органоминеральная	гранитная
Медианный размер, мкм	32,986	16,847
Средний размер, мкм	35,575	25,341
Размер моды, мкм	42,036	12,383
Стандартное отклонение, мкм	22,698	24,989
Диаметр по кумулятивной кривой, мкм:		
2,50 (%)	0,183	0,532
10,00 (%)	9,1252	5,506
50,00 (%)	32,986	16,847
90,00 (%)	65,351	54,537

Наличие в образцах фракций PM₁₀ и PM_{2,5} свидетельствует о способности части пылевых частиц длительно находиться во взвешенном состоянии, перемещаться воздушными потоками и оседать на поверхности машины и проникать в гидросистему экскаватора.

Микроскопические исследования показали, что частицы пыли имеют неправильную форму с острыми гранями и сколами. Значительная часть частиц характеризуется пластинчатой и игольчатой морфологией, способствующей длительному нахождению пыли в воздушной среде [7]. На рисунке 4 представлена микроструктура органоинеральной пыли и гранитной пыли. Видно, что минеральные частицы имеют выраженные угловатые контуры, что связано с механизмом их образования при механическом разрушении гранитной массы.

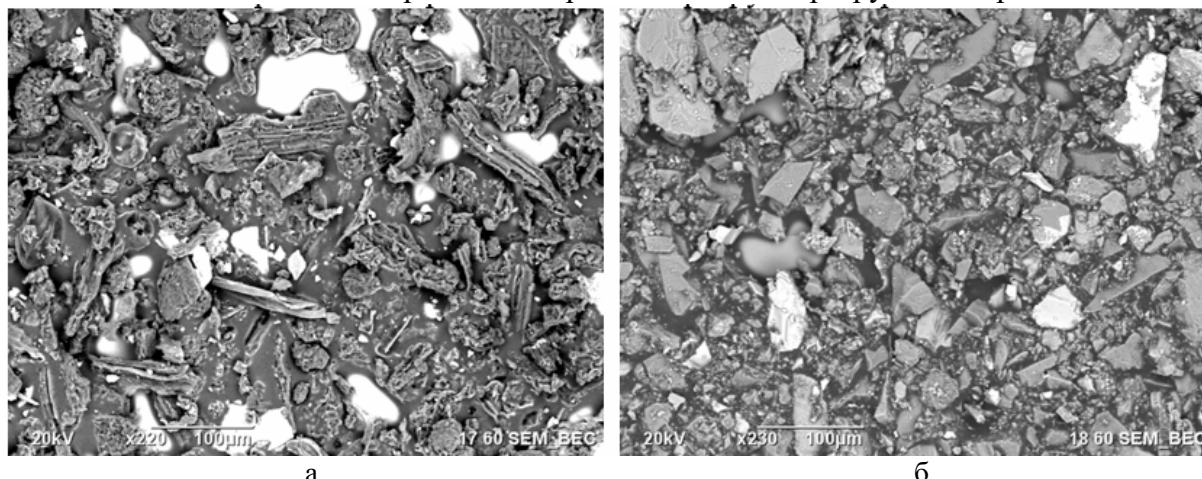


Рис. 4. Микроструктура органоинеральной (а) и гранитной (б) пыли

Результаты рентгеноспектрального анализа (табл.2) подтверждают наличие в составе гранитной пыли значительного количества кварца SiO₂, плагиоклазов Na(AlSi₃O₈)-Ca(Al₂Si₂O₈) и калиевого полевого шпата KAlSi₃O₈, и окислов железа, отличающихся высокой твердостью, что определяет высокую абразивность гранитной пыли, и при попадании в гидравлическую жидкость вызывает интенсивное изнашивание трущихся поверхностей [7]. Вариант обработки образцов: кислород по стехиометрии (нормализованный).

Табл. 2. Результаты рентгеноспектрального анализа гранитной пыли (массовые доли в процентах)

Spectrum	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	O
Spectrum 1	0,89	1,28	5,73	19,86	2,48	7,56	21,30	39,24
Spectrum 2			0,24	46,53				53,23
Spectrum 3	0,29		9,45	29,12	16,15			44,99
Spectrum 4	5,51		15,14	27,11	0,25	4,06		47,94
Spectrum 5		0,06	0,34	45,36	0,13	0,02	0,12	52,08
Spectrum 6				46,74				53,26
Spectrum 7	0,19		7,67	27,23	22,42			42,49
Spectrum 8	1,95	0,35	6,66	31,91	5,70	1,14		45,46
Max	5,51	1,28	15,14	46,74	22,42	7,5	21,30	53,26
Min	0,19	0,06	0,24	19,86	0,13	0,02	0,12	39,42

Минералогический состав гранитной пыли, возникающей в процессе добычи практически идентичен минералогическому составу тех разрабатываемых горных пород, из которых образуется пыль [12].

Заключение

В результате проведенных исследований определены размерно-массовые характеристики гранитной и органоминеральной пыли, образующейся в рабочей зоне карьерного гидравлического экскаватора при погрузке взорванной гранитной массы вскрышных работах на месторождении «Гавриловское». Установлено, что исследуемые образцы представляют собой тонкодисперсные системы различного происхождения: гранитная пыль формируется при разрушении и перемещении гранитной горной массы, а органоминеральная пыль связана с проведением вскрышных работ и включает минеральные, грунтовые и органические компоненты.

Установлено, что исследуемые образцы содержат частицы размером менее 50 мкм, способные длительное время находиться во взвешенном состоянии и переноситься воздушными потоками. Для органоминеральной пыли медианный диаметр частиц составил 32,986 мкм, для гранитной пыли – 16,847 мкм. Доля частиц размером менее 50 мкм в органоминеральной пыли составляет 32,99%, в гранитной пыли – 16,85%. При этом содержание фракции РМ₁₀ для органоминеральной пыли равно 9,13%, а фракции РМ_{2,5} – 0,18%. Для гранитной пыли содержание частиц РМ₁₀ составляет 5,51%, а РМ_{2,5} – 0,53%.

Микроскопический анализ показал, что частицы пыли имеют неправильную форму, острые грани, сколы, а также пластинчатые и игольчатые элементы. Это согласуется с минералогическим составом разрабатываемых гранитов, представленных калиевыми полевыми шпатами, плагиоклазами, кварцем. Установленные размерно-массовые характеристики могут быть использованы для анализа загрязнения гидравлической жидкости при эксплуатации карьерных гидравлических экскаваторов на добыче гранита и выбора методов ее очистки при проведении технического обслуживания.

Список литературы

1. Волкодаева М.В., Киселев А.В. О развитии системы экологического мониторинга качества атмосферного воздуха // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 589-596. – DOI: 10.25515/PMI.2017.5.589.
2. Singh G., Perwez A. Estimation of assimilative capacity of the airshed in iron ore mining region of Goa // Indian Journal of Science and Technology. 2015, vol. 8, pp. 1-7. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i23/54671.
3. Шибанов Д.А., Иванов С.Л., Емельянов А.А., Пумпур Е.В. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – №10. – С. 86-94. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
4. Куренкова Г.В., Жукова Е.В., Лемешевская Е.П. Пыль как вредный фактор производственной среды. – Иркутск: ИГМУ, 2023. – 85 с.
5. Лялякин В.П., Петрищев Н.А., Капусткин А.О. Очистка масел в гидравлических системах на примере КИ-28286.50 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecoserv.ru/articles/15-28286>.

6. Источники загрязнений рабочей жидкости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tradicia-k.ru/articles/istochniki-zagryazneniy-rabochey-zhidkosti/>
7. Gerasimova E., Kapustin F., Rogante M., Kochnev D. Granite Dust is the Possible Component of the Dry Construction Mixtures // KnE Materials Science. 2017, pp. 109-115. DOI: 10.18502/kms.v2i2.955.
8. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles. – New York: John Wiley & Sons, 1999. – 504 p.
9. Михайлов А.В., Репкина К.С. Гидравлическая жидкость как фактор управления техническим состоянием гидравлической системы горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – №5. – С. 39-51. – DOI: 10.25018/0236_1493_20265_0_39.
10. Свергузова С.В., Сапронова Ж.А., Зубкова О.С., Святченко А.В., Шайхиева К.И., Воронина Ю.С. Пыль электросталеплавильного производства как сырье для получения коагулянта // Записки Горного института. – 2023. – Т. 260. – С. 279-288. – DOI: 10.31897/PMI.2023.23.
11. Гембицкая И.М., Гвоздецкая М.В. Трансформация зерен технологического сырья при получении мелкодисперсных порошков // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 401-407. – DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.
12. Михайлов В.А. Борьба с пылью в рудных карьерах / В.А. Михайлов, П.В. Бересневич, В.Г. Борисов, А.И. Лобода. – М.: Недра, 1981. – 262 с.

References

1. Volkodaeva M.V., Kiselev A.V. About development of the environmental monitoring system of atmospheric air quality // Journal of Mining Institute. 2017, vol. 227, pp. 589-596. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.589.
2. Singh G., Perwez A. Estimation of assimilative capacity of the airshed in iron ore mining region of Goa // Indian Journal of Science and Technology. 2015, vol. 8, pp. 1-7. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i23/54671.
3. Shibanov D.A., Ivanov S.L., Emelyanov A.A., Pumpur E.V. Assessment of open-pit excavator performance indicators under real operating conditions // Mining informational and analytical bulletin. 2020, no. 10, pp. 86-94. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-86-94.
4. Kurenkova G.V., Zhukova E.V., Lemeshevskaya E.P. Dust as a harmful factor of industrial environment. – Irkutsk: ISMU, 2023. – 85 p.
5. Lyalakin V.P., Petrishchev N.A., Kapustkin A.O. Oil purification in hydraulic systems by the example of KI-28286.50 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.ecoserv.ru/articles/15-28286>.
6. Sources of hydraulic fluid contamination [Electronic resource]. Access mode: <https://www.tradicia-k.ru/articles/istochniki-zagryazneniy-rabochey-zhidkosti/>
7. Gerasimova E., Kapustin F., Rogante M., Kochnev D. Granite Dust is the Possible Component of the Dry Construction Mixtures // KnE Materials Science. 2017, pp. 109-115. DOI: 10.18502/kms.v2i2.955.
8. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles. – New York: John Wiley & Sons, 1999. – 504 p.
9. Mikhailov A.V., Repkina K.S. Hydraulic fluid as a controlling factor of hydraulic system technical condition of mining machines // Mining informational and analytical bulletin. 2026, no. 5, pp. 39-51. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_39.
10. Sverguзова S.V., Sapronova Zh.A., Zubkova O.S., Svyatchenko A.V., Shaikhieva K.I., Voronina Yi.S. Electric steelmaking dust as a raw material for coagulant production // Journal of Mining Institute. 2023, vol. 260, pp. 279-288. DOI: 10.31897/PMI.2023.23.
11. Gembitskaya I.M., Gvozdetskaya M.V. Transformation of technological raw material grains during production of fine powders // Journal of Mining Institute. 2021, vol. 249, pp. 401-407. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.9.
12. Mikhailov V.A., Beresnevich P.V., Borisov V.G., Loboda A.I. Dust control in ore quarries. – М.: Nedra, 1981. – 262 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Алимпиев Виктор Николаевич – начальник автотранспортного участка	Alimpiev Viktor Nikolaevich – head of the motor transport section
Репкина Ксения Сергеевна – аспирант	Repkina Ksenia Sergeevna – postgraduate student
Михайлов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроения	Mikhailov Aleksandr Viktorovich – doctor of technical science, professor, professor of mechanical engineering Department
repkinaks@mail.ru	

Получена 11.06.2026