

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЫЛЕПОДАВЛЕНИЯ ПРИЕМНОГО БУНКЕРА ДРОБИЛЬНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ УСЛОВИЙ КАРЬЕРА МУРУНТАУ

Л.Н. Атакулов¹, Н.Б. Камолов², Ш.Б. Хайдаров¹, Б.Х. Шомуродов¹

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет,
Навои, Узбекистан e-mail: shohidh@mail.ru

² АО «Навоийский горно-металлургический комбинат», Навои, Узбекистан

Аннотация: Приведен метод подавления пыли, образующейся при разгрузке автосамосвалов на дробильно-перегрузочном пункте № 10 карьера Мурунтау, основанный на конструктивных разработках. Бункер, питатель и дробилки являются основными элементами пункта дробления-перегрузки. Количество пыли, образующейся в бункере пункта перегрузки при разгрузке горных пород автосамосвалами, ее размер и скорость напрямую зависят от состояния окружающей среды. При разгрузке горной породы автосамосвалами в бункере образуется пыль, которая наносит вред окружающей среде. С учетом этого для подавления пыли вдоль бункера и питателя была создана закрытая система, в которую установлены трубы с водяными форсунками. Проведены расчеты по выбору форсунок, необходимых для подавления пылевых частиц, а также на основе экспериментов и расчетов определены размеры пылевых частиц, их скорости и диаметр. Разработанный метод подавления пыли показал зависимость пылеподавления водой от концентрации пыли, давления воды, диаметра форсунок и размера пылевых частиц в бункерах и питателях. Рассчитана экономическая эффективность использования метода закрытого орошения водой для подавления пыли, образующейся при разгрузке автосамосвалов.

Ключевые слова: бункер, питатель, труба, вода, форсунка, технология, пыль, количество пыли, самосвал, дробильный пункт, аспиратор, фильтр.

Для цитирования: Атакулов Л. Н., Камолов Н. Б., Хайдаров Ш. Б., Шомуродов Б. Х. Разработка системы пылеподавления приемного бункера дробильно-перегрузочной установки для условий карьера Мурунтау // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10. – С. 20–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_20.

Dust suppression systems for receiving bin of in-pit crushing and conveying plant at the Muruntau Mine

L.N. Atakulov¹, N.B. Kamolov², Sh.B. Khaydarov¹, B.Kh. Shomurodov¹

¹ Navoi State Mining and Technology University, Navoi, Uzbekistan, e-mail: shohidh@mail.ru

² JSC «Navoi Mining and Metallurgical Combinat», Navoi, Uzbekistan

Abstract: The article describes the method of dust suppression during unloading of dump trucks at in-pit crushing and conveying point No. 10 at the Muruntau Mine based on design developments. The bin, feeder and crushers are the main components of the IPCC point. Amount of

dust generated in the bin of the IPCC point during unloading of rocks from dump trucks, dust size and velocity directly depend on the environmental conditions. Dust generated during unloading of rocks from dump trucks harms the environment. In this respect, for the dust suppression, along the bin and feeder, a closed system was designed, where pipes with water jets were installed. The jets required for the dust suppression were selected based on calculation, and the sizes of dust particles, their velocity and diameter were determined experimentally and from calculations. The developed method of dust suppression shows the dependence of dust suppression with water on concentration of dust, pressure of water, diameter of jets and size of dust particles in the bin and feeder. The economic efficiency of the closed water spraying method to suppress dust generated during unloading of dump trucks is calculated.

Key words: bin, feeder, pipe, water, jet, technology, dust, dust amount, dump truck, crushing point, aspirator, filter.

For citation: Atakulov L. N., Kamolov N. B., Khaydarov Sh. B., Shomurodov B. Kh. Dust suppression systems for receiving bin of in-pit crushing and conveying plant at the Muruntau Mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(10):20-34. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_10_0_20.

Введение

В мире до 80% всего объема добываемой на открытых карьерах породы перемещается автомобильным транспортом. Известно, что с углублением карьеров затраты на добычу породы возрастают в несколько раз. Для снижения затрат целесообразно использовать в открытой добыче пород циклично-поточный транспорт (ЦПТ). В системе ЦПТ порода, загруженная в автосамосвалы, выгружается в бункеры, а выгруженная порода измельчается и загружается на конвейерный транспорт, откуда по конвейеру доставляется в пункт назначения [1, 2]. Использование комплексов ЦПТ позволяет увеличить годовую производительность карьеров на несколько миллионов тонн и сократить расстояния и время транспортировки.

Одна из главных проблем, с которыми в настоящее время сталкивается открытая добыча полезных ископаемых в мире, — это чрезмерное количество пыли, которая наносит серьезный ущерб окружающей среде, людям, рабочим элементам карьерной техники и другому оборудованию. С применением взрыв-

ных работ размягчается до 2 млн м³ породы и одновременно в воздух выбрасывается пылевое облако объемом 15–20 млн м³, содержащее до 250 т пыли и 6–10 тыс. м³ вредных газов. Иногда выделение газа длится до 10–15 ч, и оно еще больше увеличивается во время выемки и погрузки породы [3]. Практически все производственные процессы, осуществляемые в карьерах (взрывные работы, бурение, выемка, транспортировка рудной массы, разгрузка в бункеры), сопровождаются пылеобразованием. Взрыв горных пород в карьере отбрасывает камни на высоту 150–300 м, а частицы пыли рассеиваются на большие расстояния (10–14 км) по направлению ветра [3, 4].

По оценкам экспертов, мировое потребление минерального сырья составляет около 12 млрд т/год, в то время как добыча горных пород из земной коры составляет около 100 млрд т/год. Это свидетельствует о серьезности воздействия источников пыли на горнодобывающих предприятиях на окружающую среду [5].

При транспортировке горных пород в карьерах автосамосвалами и их вы-

грузке в бункеры наблюдается значительное пылеобразование (на угольных месторождениях $3000 - 4000 \text{ мг/м}^3$, на рудных $1200 - 3200 \text{ мг/м}^3$) [6 – 8]. Это негативно сказывается как на организме человека, так и на используемых вблизи машинах и механизмах. Поэтому горнодобывающие и обогащательные предприятия должны разрабатывать и применять новые методы пылеподавления. Улавливание пыли при транспортировке, дробильно-сортировочных и обогащательных работах осуществляется с помощью механических, гидравлических, фильтрующих и электростатических пылеуловителей [9, 10].

В результате опрокидывания груза автосамосвалами на дробильно-перегрузочном пункте в воздух поднимаются частицы пыли диаметром от 1 до 75 мкм. Эти частицы пыли естественным образом оседают в течение нескольких часов и вызывают загрязнение воздуха. Здоровье людей, работающих в таких условиях каждый день, подвергается серьезной опасности [11 – 13].

Работа механических пылеуловителей основана на разделении и осаждении частиц пыли под действием их собственного веса, инерционной и центробежной силы [14, 15]. Работа гидравлических пылеуловителей основана на

подавлении частиц пыли с помощью жидкости, то есть «промывке» запыленного воздуха. В фильтрующих пылеуловителях частицы пыли улавливаются в пористых фильтрующих элементах. Работа электрических пылеуловителей основана на ионизации частиц пыли под действием электрического тока и их накоплении вокруг положительного электрода [16, 17].

Методика

Большое значение в загрязнении окружающей среды пылью имеет процесс загрузки горных пород в бункер при их транспортировке автомобильным транспортом. Проведенные исследования показали, что в карьере Мурунтау на пункте дробления и перегрузки в установленный бункер в среднем каждые 3 – 5 мин поступает горная порода от автосамосвалов (рис. 1, а). После того как автосамосвал выгружает горную породу в бункер, пыль движется со скоростью 6 – 7 м/с вдоль бункера и питателя (рис. 1, б).

На участке дробления и перегрузки в карьере Мурунтау во время разгрузки породы в бункер автосамосвала количество пыли измерялось с помощью аспиратора типа PU-2Р, а скорость распространения пыли — с помощью ане-

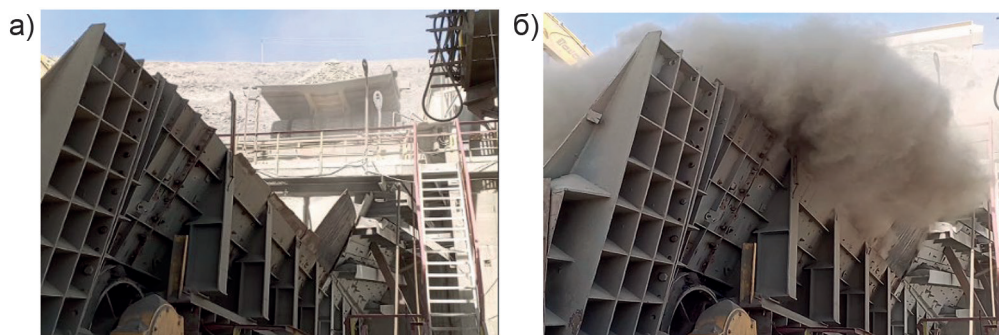


Рис. 1. Внешний вид частиц пыли, образующихся при разгрузке автосамосвалом: автосамосвал выгружает горную породу в бункер (а); пыль распространяется по бункеру и питателю (б)

Fig. 1. The appearance of dust particles formed during unloading by a dump truck: dump truck unloads rock into the bunker (а); dust spreads through the bunker and feeder (б)



Рис. 2. Процесс исследования количественной оценки пыли
Fig. 2. The process of researching the quantitative assessment of dust

мометра АПР-2. Эта процедура проводилась восемь раз (рис. 2).

Содержание пыли в воздухе определяли прямым гравиметрическим методом путем фильтрации пыли с использованием аспиратора PU-2P.

В табл. 1 представлены метеорологические параметры эксперимента на 10-м пункте ДПП карьера Мурунтау.

Аспиратор типа PU-2P в течение 3 мин всасывал пыльный воздух со скоростью 20,0 л/мин, и пыль собиралась на фильтре. На экране прибора были отображены следующие показатели: температура воздуха 37,90 °С, барометрическое давление 731 мм рт. ст., влажность воздуха 29%.

Результаты

Объем анализируемой пробы определяется по следующей формуле:

$$V_t = \frac{q \cdot t}{100} = \frac{20 \cdot 3}{100} = 0,6 \text{ л} = 0,0006 \text{ м}^3,$$

где q — объем воздуха во время отбора проб, л/мин; t — время, затраченное на отбор проб, мин.

Объем пробы воздуха, взятой для анализа, нормируется при температуре 20 °С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст. и определяется по следующей формуле:

$$V_0 = \frac{V_t \cdot 273 \cdot P}{(273 + T) \cdot 760} = \frac{0,0006 \cdot 273 \cdot 731}{(273 + 37,9) \cdot 760} = \frac{119,74}{236284} = 0,000506 \text{ м}^3$$

где V_0 — объем воздуха, прошедшего через фильтр и доведенного до норм, м³.

Определение массовой доли пыли в воздухе основано на прохождении определенного объема воздуха (V_0) через

Таблица 1

Метеорологические условия во время эксперимента
Meteorological conditions during the experiment

Название	Аспиратор PU-2P
Время отбора проб, мин	3
Температура воздуха, T , °С	37,9
Атмосферное давление, P , мм рт. ст.	731
Влажность воздуха, %	29
Скорость воздушного потока, м/с	1,04
Скорость пыли, м/с	6–7

Таблица 2

Количество пыли вдоль бункера и питателя**Amount of dust along the bunker and feeder**

№	m_1 , мг	m_2 , мг	t , мин	q , л/мин	V_r , м ³	V_0 , м ³	C , мг/м ³
1	1,7300	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	2332,01
2	1,7040	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	2280,63
3	1,6920	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	2256,91
4	1,8803	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	2629,05
5	1,9660	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	2798,42
6	2,1175	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	3097,82

фильтровальную бумагу и измерении массы этой фильтровальной бумаги до (m_1) и после (m_2). Концентрация пыли C (мг/м³) определяется по следующей формуле:

$$C = \frac{(m_2 - m_1)}{V_0} = \frac{(1,7300 - 0,5500)}{0,000506} = \frac{1,18}{0,000506} = 2332,01 \text{ мг/м}^3,$$

где m_1 — начальная масса фильтра, мг; m_2 — новая масса фильтра после удлинения, мг;

Все метрологические условия и результаты экспериментальных измерений приведены в табл. 2. Относительная суммарная погрешность при измерении массовой концентрации указанных веществ в атмосферном воздухе не долж-

на превышать $\pm 25\%$, в соответствии со стандартами.

Проведенные испытания показали, что при разгрузке автосамосвала количество пыли, выделяющейся по бункеру и питателю, составляет от 2256,91 до 3097,82 мг/м³ (рис. 3). В результате пыль распространяется в окружающей среде объемом 500 – 600 м³. Расчеты показали, что при наименьшем результате испытаний (2332,01 мг/м³) и объеме распространения 500 – 650 м³ выделяется от 1 166 005 до 1 515 806 мг, или от 1,166 до 1,515 кг пыли. При наибольшем результате (3097,82 мг/м³) и том же объеме распространения выделяется от 1 548 910 до 2 013 583 мг, или от 1,55 до 2,01 кг пыли. Таким образом, при однократной разгрузке автосамосвала в бункер выделяется от 1,1 до 2,1 кг пыли.

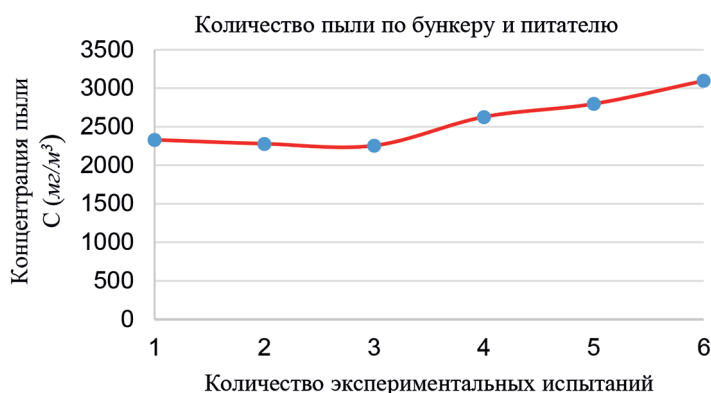


Рис. 3. Уровень пыли вдоль бункера и питателя в ходе экспериментальных испытаний

Fig. 3. Dust level along the bunker and feeder during experimental tests



Рис. 4. Эксперимент по определению размера частиц пыли на приборе Thermoscientific
Fig. 4. Experiment on determining the size of dust particles on the Thermoscientific device

Учитывая, что автосамосвал может выгружать груз до 15 раз в час, общее количество пыли может достигать от 23,25 до 30,15 кг. За смену это количество составит от 260,4 до 337,68 кг. А за год, при работе 365 дней в году и двух сменах, общее количество пыли может достигать от 190 092 до 246 506,4 кг. Установлено, что эта пыль наносит вред окружающей среде и приводит к преждевременному выходу из строя находящихся поблизости оборудования и механизмов.

На ДПП карьера Мурунтау с помощью аспиратора типа PU-2P были отобраны пробы пыли. Для определения размера частиц пыли, в частности максимального диаметра, были проведены эксперименты на приборе Thermoscientific. На этом приборе были определены структурные параметры пылевых частиц, образующихся при выгрузке горной массы из автосамосвала в бункер (см. рис. 2).

В результате было установлено, что размер пыли составляет от 5 до 25 мкм (рис. 4).

Известно, что пылевые частицы можно подавлять методом распыления воды, но в настоящее время, при дефиците воды, необходимо использовать ее минимальное количество для подавления максимального количества пыли. Для подавления частиц пыли используются форсунки, то есть жидкость разлагается на мелкие частицы под высоким давлением в атмосфере.

В интервале давлений 4–7 бар создана оптимальная аэрозольная среда. В этом случае степень пылеподавления достигает максимального значения [18].

В результате подачи воды в форсунки ее угловой момент изменяется незначительно, но вследствие сужения потока увеличивается скорость вращения, что приводит к увеличению центробежной силы. Эта сила сжимает жидкость у стенки на выходе, в результате чего образуется тонкий слой, который превращается в мелкие капли на выходе из форсунки.

Таблица 3

Зависимость производительности форсунки от ее диаметра и давления воды
The relationship between nozzle performance, nozzle diameter and pressure

$d_{\text{форсунки}}$	3 бара	4 бара	5 бар	6 бар	7 бар	8 бар	9 бар	10 бар
1 мм	0,226	0,261	0,292	0,320	0,345	0,369	0,391	0,413
2 мм	0,905	1,045	1,168	1,280	1,382	1,478	1,568	1,652
3 мм	2,038	2,354	2,631	2,880	3,114	3,329	3,531	3,722

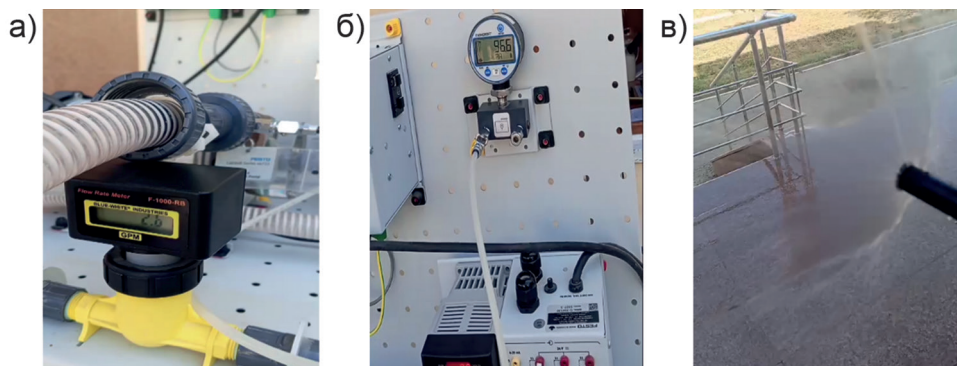


Рис. 5. Экспериментальная установка для анализа функциональных режимов работы центробежного насоса с автоматизированной системой: датчик производительности (а); датчик давления (б); процесс распыления воды из форсунки (в)

Fig. 5. Experimental setup for analyzing the functional operating modes of a centrifugal pump with an automated system: productivity sensor (a); pressure sensor (b); water spraying process from the nozzle (v)

Для анализа функциональных режимов работы центробежного насоса с автоматизированной системой в Навоийском государственном горно-технологическом университете были протестированы различные форсунки на экспериментальной установке (рис. 5). Полученные результаты представлены в табл. 3.

На основе параметров экспериментальной установки расход воды в форсунке определяется по следующей формуле [2]:

$$Q = m \cdot S_0 \sqrt{\frac{2g \frac{p}{\gamma}}{1 - \left(\frac{d_f}{d_q}\right)^2}} = m \cdot \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g \frac{p}{\rho g}}{1 - \left(\frac{d_f}{d_q}\right)^2}} =$$

$$= 0,62 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,003^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot \frac{6 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9,81}}{1 - \left(\frac{0,003}{0,058}\right)^2}} = 4,38 \cdot 10^{-6} \cdot 10,970 =$$

$$= 0,000048 \text{ м}^3/\text{с} = 0,048 \text{ л/с} = 2,88 \text{ л/мин},$$

где p — давление воды в форсунке, $p = 6 \cdot 10^4$ кг/м²; m — коэффициент расхода, $m = 0,62$; S_0 — площадь поперечного сечения на выходе из форсунки; d_f — площадь поверхности воды, выходящей из форсунки, $d_f = 3$ мм; d_q — внутренняя поверхность трубы, $d_q = 58$ мм.

В табл. 3 показана зависимость эффективности форсунки от ее диаметра и давления воды.

В результате данного эксперимента было установлено, что для подавления пыли на ДПП рудника Мурунтау можно использовать форсунки с отверстиями диаметром 3 мм. Определено, что расход воды через такую форсунку составляет 2,6–2,8 л/мин при давлении 96,6 psi, что эквивалентно 6,6 бар. Исходя из этого экспериментального анализа, далее давление принимаем 6 бар (см. табл. 3).

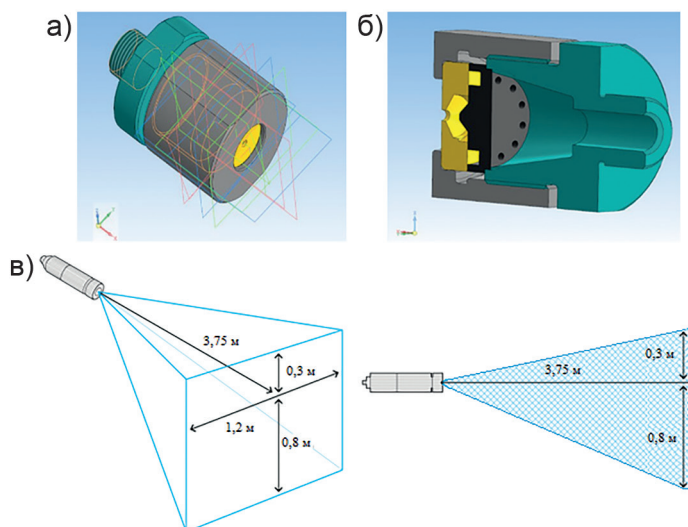


Рис. 6. Форсунка для распыления воды: общий вид форсунки (а); форма форсунки (б); дальность распыления форсунки (в)

Fig. 6. Water spray nozzle: nozzle general view (a); nozzle shape (b); nozzle spraying range (v)

Одной из основных задач в проводимых исследовательских работах является правильный выбор диаметра форсунки, которая выпускает количество капель воды, способных подавлять частицы пыли. В зависимости от параметров пылевого поля (ширина питателя $B = 3,5$ м, длина питателя $L = 9,6$ м, ширина бункера $B = 4,8$ м и длина бункера $L = 7$ м) установлено 22 форсунки и выбран выходной диаметр форсунки 3 мм.

На основании результатов экспериментальных испытаний установлено, что диаметр выходного отверстия форсунки составляет 3 мм, давление — 6 бар, дальность распыления форсунки — 3,75 м, ширина зоны распыления воды — 1,2 м, высота — 0,8 м (рис. 6).

Для подавления пыли в бункере и питателе на дробильно-перегрузочном пункте карьера Мурунтау необходимо выбирать тип насоса, исходя из того, что расход воды составляет 2,88–3,11 л/мин при диаметре форсунки 3 мм и давлении воды из насоса 6 бар.

1. Определение часового расхода воды:

$$Q = q \cdot n_{\text{son}} \cdot n_{\text{авто}} = 2,88 \cdot 22 \cdot 15 = 950,4 \text{ л/мин} = 57\,024 \text{ л/ч} = 57,024 \text{ м}^3/\text{ч},$$

где q — производительность 1 форсунки, л/мин; n_{son} — количество форсунок; $n_{\text{авто}}$ — количество автосамосвалов.

2. Определение нагрузки насоса [2]:

$$H = H_h + iL = 10 + 0,05 \cdot 70 = 13,5 \text{ м},$$

где H_h — высота нагнетания, м; i — коэффициент гидравлических потерь, 0,025–0,05; L — общая длина труб, м.

Для таких параметров потребуется погружной насос марки Unipump ETSV 5-20-60.

3. Определение диаметров труб.

Определение диаметра водопроводной трубы [2]:

$$d_{\text{наг}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v_{\text{наг}} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 60}{3,14 \cdot 2 \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{240}{22608}} = \sqrt{0,01061} = 0,103 \text{ м} = 103 \text{ мм}$$

$$d_{\text{всас}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot v_{\text{всас}} \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 60}{3,14 \cdot 1,2 \cdot 3600}} = \sqrt{\frac{240}{13564,8}} = \sqrt{0,0177} = 0,133 \text{ м} = 133 \text{ мм}$$

где Q — производительность насоса, м³/ч; $v_{\text{наг}}$ — скорость потока воды в нагнетательном трубопроводе, 1,8–2,5 м/с; $v_{\text{всас}}$ — скорость потока воды во всасывающем трубопроводе, 1–1,5 м/с.

На основе приведенных выше выражений, таблиц и расчетов были выполнены расчеты для форсунки, предназначенной для подавления пыли, исходя из параметров ее диаметра и расхода воды 2,88 л/мин. Принимая во внимание параметры ширины, длины и высоты распыления форсунки, было определено, что необходимо установить 22 форсунки, соответствующие ширине бункера и питателя на ДПП. Таким образом, из установленных 22 форсунок будет распыляться $2,88 \times 22 = 63,36$ л/мин. Эту пыль (см. рис. 3) можно подавить за 30 с. Поэтому можно рассчитать подавление пыли при разгрузке горной породы на примере одного автосамосвала следующим образом: $63,36 \text{ л/мин} \times 0,5 = 31,68 \text{ л/мин}$. За 1 ч может быть разгружено 12–15 автосамосвалов. При максимальном использовании это составит $15 \times 31,68 \text{ л} = 475,2 \text{ л/ч}$. Чтобы подавлять количество пыли в течение одной смены, умножим на 11,2 ч, получим следующее выражение: $475,2 \text{ л/ч} \times 11,2 \text{ ч} = 5322,24 \text{ л}$, то есть в течение смены можно подавлять пыль с помощью 5322,24 л воды.

Уменьшение количества пыли может способствовать здоровому образу жизни многих людей, а также предотвращать технические неисправности конвейерных

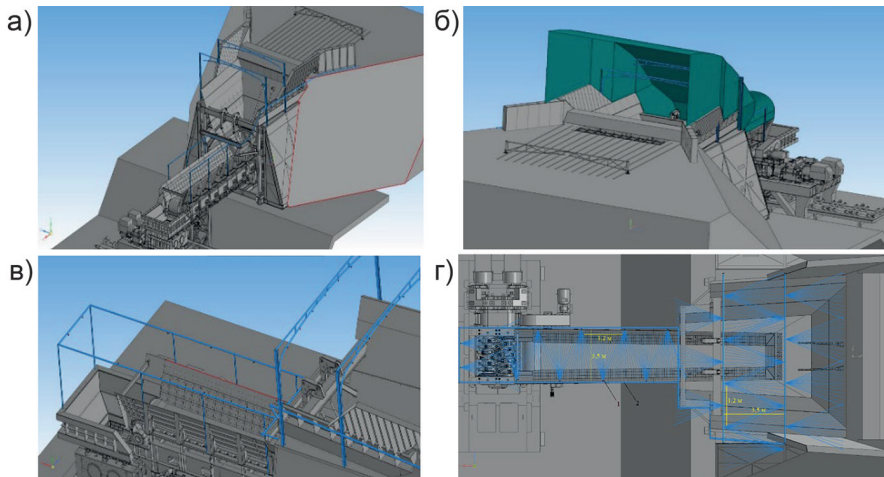


Рис. 7. Схема установки оборудования для распыления воды в зоне пылеобразования: схема распыления сверху (а); закрытая схема распыления сверху (б); вид сверху (в); установка форсунки (вид по длине) (г)

Fig. 7. Diagram of the installation of water spraying equipment in the dust generation zone: top spraying diagram (a); top spraying closed diagram (b); top view (v); installation of a nozzle (longitudinal view) (g)

Таблица 4

Количество пыли при подавлении водой в закрытом пункте перегрузки через 30 с
Quantity after 30 seconds when dust is suppressed with water at a closed reloading point

№	m_1 , мг	m_2 , мг	t , мин	q , л/мин	V_1 , м ³	V_0 , м ³	C , мг/м ³
1	0,6010	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	100,79
2	0,6107	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	119,96
3	0,6158	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	130,04
4	0,6260	0,5500	3	20	0,0006	0,000506	150,19

редукторов, барабанов и роликов, обеспечивая длительную работу людей и техники на карьере и прилегающей территории. Как нам известно, при разгрузке автосамосвала скорость пыли может достигать 6–7 м/с. Независимо от количества распыляемой воды, при такой скорости распространения пыль нельзя подавить полностью, то есть эффективность пылеподавления снижается. С этой точки зрения рекомендуется и требуется, чтобы автосамосвал был закрыт во время разгрузки. Предлагаемая схема показана на рис. 7.

Представленная схема установки оборудования для распыления воды в зоне пылеобразования (рис. 7) предотвращает подъем пыли вверх, а закрытое помещение позволяет снизить скорость пыли с 6–7 м/с до 1 м/с; пыль подавляется за 30 с.

Результаты измерений с помощью аспиратора PU-2P после подавления пыли в закрытом измельчающем пункте перегрузки приведены в табл. 4.

Эффективность пылеподавления определялась по следующей формуле [18] (на основе схемы на рис. 7, б):

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \cdot 100\% = \frac{3097,82 - 150,19}{3097,82} \cdot 100\% = 95,15\%$$

где η — эффективность пылеподавления, %; C_0 — исходная концентрация пыли, мг/м³ (см. табл. 2); C — концент-

рация пыли после распыления воды в закрытой среде, мг/м³ (табл. 4).

Таким образом, экспериментальные и теоретические результаты, полученные в условиях карьера Мурунтау, не исключают подавления пыли на 95–96% за счет распыления воды по схеме (см. рис. 7) в закрытой зоне пылеобразования.

Обсуждение результатов

При выгрузке породы автосамосвалом для увлажнения пыли, образующейся в бункере и питателях, при давлении 6 бар, были представлены объемы распыления воды за 1 минуту при диаметрах форсунок 1, 2, 3, 4 мм, количестве форсунок в бункере 10 штук (синего цвета) и 12 штук в питателе (коричневого цвета), рис. 8. На оси абсцисс графика расположен диаметр форсунки, а на правой оси ординат показаны размеры частиц пыли, и можно определить, что с увеличением диаметра форсунки подавление пыли также увеличивается (зеленая линия). Например, форсунка диаметром 3 мм подавляет частицы пыли размером 0,25 мм. На графике красным цветом показана зависимость времени подавления пыли в бункере и питателе от диаметра форсунки. Установлено, что при распылении воды форсункой диаметром 1 мм время составляет 100 с, при 1,5 мм — 70 с, при 2 мм — 55 с, при 2,5 мм — 40 с, при 3 мм — 30 с, и при 4 мм — 25 с (красная линия). Исходя из результатов расчетов было доказано,

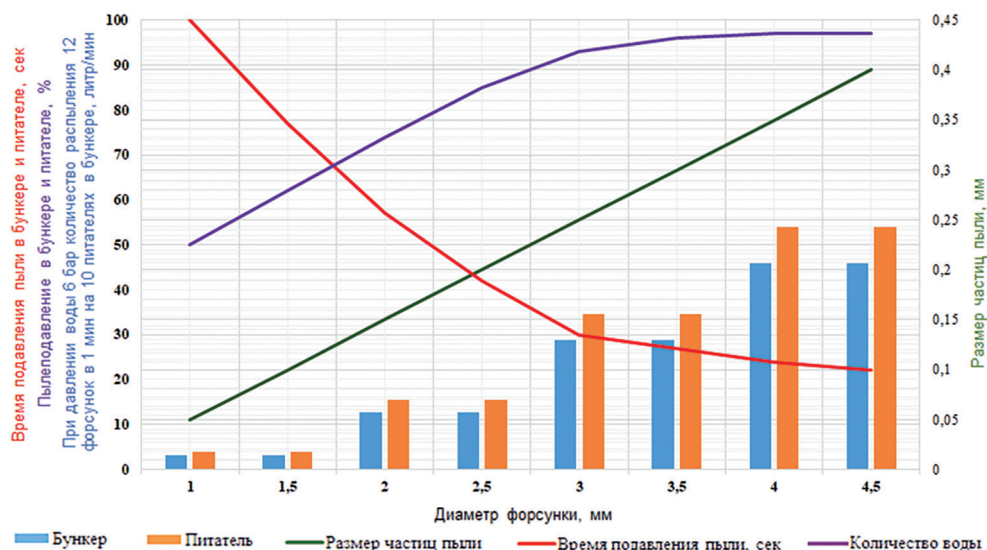


Рис. 8. График зависимости концентрации пыли, давления воды, диаметра форсунки и размера частиц пыли от водоподавления пыли в бункерах и питателях

Fig. 8. Graph of the dependence of dust concentration, water pressure, nozzle diameter, and dust particle size on water-suppressed dust in bunkers and feeders

что наиболее оптимальной является форсунка диаметром 3 мм, подавляющая пыль за 30 с. На графике также представлено процентное соотношение подавления пыли в бункере и питателе (фиолетовый цвет). При увеличении диаметра форсунки, естественно, возрастает степень подавления пыли. Однако было доказано, что форсунка диаметром 3 мм обеспечивает оптимальное подавление на уровне 95—96% и, в свою очередь, экономит воду (фиолетовая линия). Этот эффект достигается в пределах укрытий, представленных на рис. 7. Данный процент подавления пыли установлен экспериментально (эксперимент проведен на кафедре «Горная электромеханика» на установке для анализа функциональных режимов работы центробежного насоса с автоматизированной системой, см. рис. 5); данная эффективность пылеподавления является расчетной для изготовленных укрытий с распылителями по схеме рис. 7. Причина выбора времени в 30 с для всего про-

цесса заключается в том, что для наблюдения за процессом дробления и перегрузки в комнате оператора установлено видеонаблюдение. Оно теряет свою эффективность из-за воздействия пыли в течение 30 с. Следовательно, за оптимальное время для распыления воды и подавления пыли можно принять 30 с (см. рис. 8).

Расчет экономической эффективности пылеулавливания

Количество воды, расходуемое при распылении воды через форсунку в одну смену для подавления пыли, поступающей в питатель:

$$Q_{CM} = 60 \cdot q \cdot n \cdot T_{CM} = 60 \cdot 2,88 \cdot 12 \cdot 11,2 = 23\,224,32 \text{ л/смену} = 23,224 \text{ м}^3/\text{смену}.$$

Количество воды, расходуемой при распылении через форсунку за одну смену для подавления пыли в приемном бункере:

$$Q_{CM} = 60 \cdot q \cdot n \cdot T_{CM} = 60 \cdot 2,88 \cdot 10 \cdot 11,2 = 19\,353,6 \text{ л/смену} = 19,353 \text{ м}^3/\text{смену},$$

где q — расход одной форсунки, л/мин; n — количество форсунок; $T_{\text{см}}$ — продолжительность смены, ч.

Количество воды, расходуемой в месяц на подавление пыли в питателе:

$$Q_{\text{мес}} = Q_{\text{см}} \cdot n_{\text{см}} \cdot n_{\text{ден}} \cdot k_n = 23,224 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 0,8 = 1114,75 \text{ м}^3.$$

Месячный расход воды на подавление пыли в приемном бункере:

$$Q_{\text{мес}} = Q_{\text{см}} \cdot n_{\text{см}} \cdot n_{\text{ден}} \cdot k_n = 19,353 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 0,8 = 928,944 \text{ м}^3.$$

Расходы на количество воды для подавления пыли в питателе и бункере в месяц определяются следующим образом:

$$C = Q_{\text{мес}} \cdot C_x = (1114,75 + 928,944) \cdot 7649,35 = 15,633 \text{ млн сум.},$$

где C_x — стоимость технической воды, сум.

Расход электроэнергии определяется по следующей формуле:

- часовой расход электроэнергии насоса

$$W = P \cdot t = 5,5 \cdot 1 = 5,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

- расход электроэнергии насоса в смену

$$W_{\text{см}} = P \cdot t = 5,5 \cdot 11,2 = 61,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где P — мощность, кВт; t — время работы, ч.

Месячное потребление электроэнергии:

$$W_{\text{мес}} = W_{\text{см}} \cdot n_{\text{см}} \cdot n_{\text{ден}} \cdot k_n \cdot C_{\text{эл}} = 61,6 \cdot 2 \cdot 30 \cdot 0,8 \cdot 927,051 = 2,7411 \text{ млн сум.},$$

где $n_{\text{см}}$ — число смен; $n_{\text{ден}}$ — дней в месяце; k_n — коэффициент использования времени; $C_{\text{эл}}$ — стоимость электроэнергии, сум.

В настоящее время количество воды, расходуемой в месяц на подавление пыли в питательных и приемных бунке-

рах, а также затраты на работу гидромонитора УТ (100 м³) определяются по следующей формуле:

$$C = Q_{\text{мес тек}} \cdot C_x + Q_{\text{час}} \cdot C_{\text{г}} = 6200 \cdot 7649,35 + 62 \cdot 1\,200\,000 = 116,87 \text{ млн сум.},$$

где $Q_{\text{мес тек}}$ — количество воды, расходуемой в месяц на подавление пыли в современных питательных и приемных бункерах, м³; $Q_{\text{час}}$ — расход воды гидромонитора, м³; $C_{\text{г}}$ — расходы на орошение гидромонитора, сум.

В предлагаемом варианте расход воды и электроэнергии в месяц на подавление пыли в питательных и приемных бункерах определяется по следующей формуле:

$$C = C_{\text{мес}} + W_{\text{мес}} = 15,633 + 2,7411 = 18,3741 \text{ млн сум.}$$

Ожидаемый экономический эффект за один месяц:

$$C = C_{\text{текущ}} - C_{\text{пред}} = 116,87 - 18,3741 = 98,4959 \text{ млн сум.} = 8102,76 \text{ долл.}$$

Ожидаемый экономический эффект за один год:

$$C_{\text{год}} = C_{\text{мес}} \cdot 12 = 1181,95 \text{ млн сум.} = 97\,233 \text{ долл.}$$

Как видно из расчетов, предлагаемый вариант позволяет достичь экономической эффективности в размере 1181,95 млн сум. или 97 233\$ в год, что очень хорошо для пустынного региона. Это, в свою очередь, снижает нагрузку на водоснабжение и очень полезно в условиях растущего спроса на воду из-за увеличения мощностей по переработке руды.

Закключение

Было доказано, что при проведении работ по подавлению и контролю пыли, образующейся в результате опрокидывания автосамосвалов на дробильно-

перегрузочном пункте, пылеудаление в открытых условиях невозможно из-за увеличения скорости пылевых частиц. По этой причине одной из главных задач стала разработка метода подавления скорости пыли, образующейся при разгрузке автосамосвалов, на основе закрытых конструктивных разработок. Параметры условий окружающей среды, количества пыли, образующейся в результате опрокидывания автосамосвалов в бункере дробильно-перегрузочного пункта, размера частиц пыли и скорости пыли основаны на результатах экспериментальных испытаний, проведенных на производственном и лабораторном оборудовании. На основе разработанного метода подавления пыли

удалось предотвратить выброс в окружающую среду 246,5 т/год (в условиях сухого климата карьера Мурунтау) на одном дробильно-перегрузочном пункте. Такое количество пыли могло бы негативно повлиять на здоровье человека, горнодобывающую технику и оборудование, а также на окружающую среду. В результате данной научно-исследовательской работы была достигнута экономическая эффективность в размере 1181,95 млн сумов или же 97 233\$ в год и было доказано, что пыль, образующаяся при опрокидывании грузов автосамосвалами в местах дробления и перегрузки, может быть подавлена на 95–96% путем распыления воды закрытым методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хорешок А. А., Дубинкин Д. М., Зеляева Е. А. Обзор конструкций несущих систем (рам) карьерных автосамосвалов грузоподъемностью до 110 т // *Техника и технология горного дела*. — 2022. — № 1 (16). — С. 4–16. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-1-4-15.
2. Латипов К. Ш. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. — Ташкент, 1992. — 336 с.
3. Дылдин Г. П., Косарев Н. П., Мартынов В. В., Дылдин А. Г. Анализ технологии и оборудования предприятия по добыче и переработке щебня как источника загрязнения атмосферы // *Известия Уральского государственного горного университета*. — 2024. — № 3 (75). — С. 95–106. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-3-95-106.
4. Rabatuly M., Myrzathan S. A., Toshov J. B., Nasimov J., Khamzaev A. Views on drilling effectiveness and sampling estimation for solid ore minerals // *Integrated Use of Mineral Raw Materials*. 2026, no. 1, article 336. DOI: 10.31643/2026/6445.01.
5. Tong Wu, Zhuo Yanga, Kai Zhanga Optimization study on the application of induced dust suppression cover in primary crushing station of open-pit mine. Contents lists available at ScienceDirect *Heliyon* 9 (2023) DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16492
6. Wang G., Zhou W., Wang Z. Characterization and concentration prediction of dust pollution in open-pit coal mines // *Atmosphere*. 2024, vol. 15, no. 12, article 1408. DOI: 10.3390/atmos15121408.
7. Greth A., Ghaychi Afrouz S., Keles C. Characterization of respirable coal mine dust recovered from fibrous polyvinyl chloride filters by SEM-EDX // *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024, vol. 41, pp. 1145–1154. DOI: 10.1007/s42461-024-00999-z.
8. Liu Z., Ao Z., Zhou W., Zhang B., Niu J., Wang Z., Liu L., Yang Z., Xu K., Lu W., Zhu L. Research on the physical and chemical characteristics of dust in open-pit coal mine crushing stations and closed dust reduction methods // *Sustainability*. 2023, vol. 15, article 12202. DOI: 10.3390/su151612202.
9. Аннакулов Т. Ж., Темиров К. М., Отажонов Б. О., Юнусов Ж. Ф., Норимонов Ш. Н. Обоснование параметров оборудования мобильных дробильно-перегрузочных-конвейерных комплексов для открытых горных работ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2025. — № 12-3. — С. 5–22. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_5.
10. Zokhidov O. U., Khoshimov O. O., Khalilov Sh. Sh. Experimental analysis of microges installation for existing water flows in industrial plants // *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 463, article 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/202346302023.
11. Shibanov D., Agaguena A., Annakulov T. Extraction of inclined exit ledges in coal mines in presence of mobile crushing and conveyor complexes // *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024, vol. 37, no. 8, pp. 1658–1666. DOI: 10.5829/ije.2024.37.08b.17.

12. Zokhidov O. U., Khoshimov O. O., Sunnatov S. Z. Selection of the type and design of special water turbines based on the nominal parameters of Navoi mine metallurgical combine engineering structures // AIP Conference Proceedings. 2025, vol. 3331, article 050022. DOI: 10.1063/5.0306554.
13. Khamzaev A. A., Mambetsheeripova A., Arislanbek N. Thyristor-based control for high-power and high-voltage synchronous electric drives in ball mill operations // E3S Web of Conferences. 2024, vol. 498, article 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202449801011.
14. Toshov B. R., Khamzaev A. A. Development of technical solutions for the improvement of the smooth starting method of high voltage and powerful asynchronous motors // AIP Conference Proceedings. 2023, vol. 2552, article 040018. DOI: 10.1063/5.0116131.
15. Zhuraev A. S., Turdiyev S. A., Jurayev S. T., Salimova S. S. Q. Characteristics of packing gland seals in hydraulic systems of quarry excavators and results of comparative analysis of experimental tests // Vibroengineering Procedia. 2024, vol. 54, pp. 252 – 257. DOI: 10.21595/vp.2024.24051.
16. Zhuraev A., Turdiyev Sh. Analyses and studies of working fluid flow in the hydraulic system of hydraulic excavators at the Auminzo-Amantaytau open pit mine // AIP Conference Proceedings. 2025, vol. 3331, no. 1, article 030067. DOI: 10.1063/5.0305703.
17. Мислибаев И. Т., Махмудов А. М., Махмудов Ш. А. Теоретическое обобщение режимов работы и моделирование эксплуатационных показателей экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 1. — С. 102 – 110. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.
18. Yapeng Wang, Zhongan Jiang, Feng Xu, Jiuzhu Wang, Guoliang Zhang, Fabian Zeng Study on parameters of a new gas – water spray in ore pass dedusting based on experiment and numerical simulation // ACS Omega. 2020, vol. 5, no. 35, article 21988. DOI: 10.1021/acsomega.0c00918. **TMAB**

REFERENCES

1. Khoreshok A. A., Dubinkin D. M., Zelyayeva E. A. Review of the designs of the load-bearing systems (frames) of quarry dump trucks with a lifting capacity of up to 110 tons. *Technique and Technology of Mining*. 2022, no. 1 (16), pp. 4 – 16. [In Russ]. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-1-4-15.
2. Latipov K. Sh. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* [Hydraulics, hydraulic machines, and hydraulic drives], Tashkent, 1992, 336 p.
3. Dyldin G. P., Kosarev N. P., Martynov V. V., Dyldin A. G. Analysis of the technology and equipment of a crushed stone mining and processing enterprise as a source of atmospheric pollution. *News of the Ural State Mining University*. 2024, no. 3 (75), pp. 95 – 106. [In Russ]. DOI: 10.21440/2307-2091-2024-3-95-106.
4. Rabatuly M., Myrathan S. A., Toshov J. B., Nasimov J., Khamzaev A. Views on drilling effectiveness and sampling estimation for solid ore minerals. *Integrated Use of Mineral Raw Materials*. 2026, no. 1, article 336. DOI: 10.31643/2026/6445.01.
5. Tong Wua, Zhuo Yanga, Kai Zhanga *Optimization study on the application of induced dust suppression cover in primary crushing station of open-pit mine*. Contents lists available at ScienceDirect Heliyon 9 (2023) DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16492
6. Wang G., Zhou W., Wang Z. Characterization and concentration prediction of dust pollution in open-pit coal mines. *Atmosphere*. 2024, vol. 15, no. 12, article 1408. DOI: 10.3390/atmos15121408.
7. Greth A., Ghaychi Afrouz S., Keles C. Characterization of respirable coal mine dust recovered from fibrous polyvinyl chloride filters by SEM-EDX. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2024, vol. 41, pp. 1145 – 1154. DOI: 10.1007/s42461-024-00999-z.
8. Liu Z., Ao Z., Zhou W., Zhang B., Niu J., Wang Z., Liu L., Yang Z., Xu K., Lu W., Zhu L. Research on the physical and chemical characteristics of dust in open-pit coal mine crushing stations and closed dust reduction methods. *Sustainability*. 2023, vol. 15, article 12202. DOI: 10.3390/su151612202.
9. Annakulov T. Zh., Temirov K. M., Otajonov B. O., Yunusov Zh. F., Norimonov Sh. Justification of equipment parameters of mobile crushing-transfer-conveyor complexes for open development. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2025, no. 12-3, pp. 5 – 22. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_123_0_5.
10. Zokhidov O. U., Khoshimov O. O., Khalilov Sh. Sh. Experimental analysis of microgases installation for existing water flows in industrial plants. *E3S Web of Conferences*. 2023, vol. 463, article 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/202346302023.
11. Shibonov D., Agaguena A., Annakulov T. Extraction of inclined exit ledges in coal mines in presence of mobile crushing and conveyor complexes. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2024, vol. 37, no. 8, pp. 1658 – 1666. DOI: 10.5829/ije.2024.37.08b.17.

12. Zokhidov O. U., Khoshimov O. O., Sunnatov S. Z. Selection of the type and design of special water turbines based on the nominal parameters of Navoi mine metallurgical combine engineering structures. *AIP Conference Proceedings*. 2025, vol. 3331, article 050022. DOI: 10.1063/5.0306554.

13. Khamzaev A. A., Mambetsheripova A., Arislanbek N. Thyristor-based control for high-power and high-voltage synchronous electric drives in ball mill operations. *E3S Web of Conferences*. 2024, vol. 498, article 01011. DOI: 10.1051/e3sconf/202449801011.

14. Toshov B. R., Khamzaev A. A. Development of technical solutions for the improvement of the smooth starting method of high voltage and powerful asynchronous motors. *AIP Conference Proceedings*. 2023, vol. 2552, article 040018. DOI: 10.1063/5.0116131.

15. Zhuraev A. S., Turdiyev S. A., Jurayev S. T., Salimova S. S. Q. Characteristics of packing gland seals in hydraulic systems of quarry excavators and results of comparative analysis of experimental tests. *Vibroengineering Procedia*. 2024, vol. 54, pp. 252 – 257. DOI: 10.21595/vp.2024.24051.

16. Zhuraev A., Turdiyev Sh. Analyses and studies of working fluid flow in the hydraulic system of hydraulic excavators at the Auminzo-Amantaytau open pit mine. *AIP Conference Proceedings*. 2025, vol. 3331, no. 1, article 030067. DOI: 10.1063/5.0305703.

17. Mislibayev I. T., Makhmudov A. M., Makhmudov Sh. A. Theoretical generalization of modes and modeling of performance criteria of cutter-loaders. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 102 – 110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-102-110.

18. Yapeng Wang, Zhongan Jiang, Feng Xu, Jiuzhu Wang, Guoliang Zhang, Fabian Zeng Study on parameters of a new gas – water spray in ore pass dedusting based on experiment and numerical simulation. *ACS Omega*. 2020, vol. 5, no. 35, article 21988. DOI: 10.1021/acsomega.0c00918.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Атакулов Лазизжон Неметович¹ – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой, e-mail: Laziz218@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3561-8850,

Камолов Нуриддин Бомуротович – Центральное рудоуправление АО «Навоийский горно-металлургический комбинат», начальник рудника «Мурунтау», Навои, Узбекистан, e-mail: miningnewmuruntau@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-8156-1687,

Хайдаров Шохиджон Бахридинович¹ – PhD, доцент, e-mail: shohidh@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-5661-3919,

Шомуродов Бахтиер Хамидович¹ – докторант, e-mail: baxtik.3008@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-7381-4201,

¹ Навоийский государственный горно-технологический университет, Навои, Узбекистан.

Для контактов: Хайдаров Ш.Б., e-mail: shohidh@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

L.N. Atakulov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair, e-mail: Laziz218@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-3561-8850,

N.B. Kamolov, Central Ore Administration of JSC «Navoi Mining and Metallurgical Combinat», Head of the «Muruntau» mine, 210100, Navoi, Uzbekistan, e-mail: miningnewmuruntau@gmail.com, ORCID ID: 0009-0006-8156-1687,

Sh.B. Khaydarov¹, PhD, Associate Professor, e-mail: shohidh@mail.ru, ORCID ID: 0009-0005-5661-3919,

B.Kh. Shomurodov¹, Doctoral Student, e-mail: baxtik.3008@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-7381-4201,

¹ Navoi State Mining and Technology University, 210100, Navoi, Uzbekistan.

Corresponding author: Sh.B. Khaydarov, e-mail: shohidh@mail.ru.

Получена редакцией 03.02.2026; получена после рецензии 18.05.2026; принята к печати 10.09.2026.

Received by the editors 03.02.2026; received after the review 18.05.2026; accepted for printing 10.09.2026.