

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ НА РЕСУРС ДРОБЯЩИХ ПЛИТ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ СТАЦИОНАРНОГО ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНОГО КОМПЛЕКСА

Алтынников Н.А., Надеин В.А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, дробильно-сортировочный комплекс, щековая дробилка, износ дробящих плит, ресурс футеровки, предварительное ослабление, гранит, негабаритный материал, надёжность дробильного оборудования.

Аннотация. При анализе отказов щековых дробилок на дробильно-сортировочном комплексе выявлен ключевой фактор, снижающий ресурс дробящих плит. Исходным материалом является гранит, отличающийся достаточным пределом прочности на сжатие. Негабаритные куски крепких горных пород создают пиковые ударные нагрузки, приводящие к преждевременному разрушению рабочей поверхности футеровки. По результатам статистического анализа производственных данных за 2024 год и первое полугодие 2025 года зафиксирован рост среднемесячного числа случаев попадания негабарита на 70,7% и увеличение среднего времени восстановления работоспособности после таких отказов на 133,9%. Статистическая значимость роста подтверждена критерием Уилкоксона. Рост интенсивности отказов свидетельствует о невозможности оперативного разрушения крупных кусков механическим способом в условиях действующего производства. Для решения этой проблемы предложена технология предварительной гидроабразивной обработки исходного материала. Суть метода заключается в формировании на поверхности кусков горной породы системы ослабляющих щелей посредством высоконапорной гидроабразивной струи, что снижает эффективную прочность материала до его поступления в камеру дробилки. Снижение контактных нагрузок на дробящие плиты уменьшает интенсивность их абразивного износа, увеличивая межремонтный интервал по перефутеровке.

EFFECT OF PRELIMINARY HYDROABRASIVE TREATMENT ON THE SERVICE LIFE OF JAW CRUSHER LINERS IN A STATIONARY CRUSHING AND SCREENING COMPLEX

Altynnikov N.A., Nadein V.A.

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg

Keywords: hydroabrasive treatment, crushing and screening complex, jaw crusher, liner wear, liner service life, rock pre-weakening, granite, oversize material, reliability of crushing equipment.

Abstract. When analyzing the failures of jaw crushers at the crushing and sorting complex, a key factor was identified that reduces the resource of the crushing plates. The initial material is granite, which has a sufficient compressive strength. Oversized pieces of hard rocks create peak impact loads that lead to premature destruction of the working surface of the lining. According to the results of a statistical analysis of production data for 2024 and the first half of 2025, there was a 70.7% increase in the average monthly number of oversized pieces and a 133.9% increase in the average time required to restore functionality after such failures. The statistical significance of the increase was confirmed using the Wilcoxon test. The increase in the frequency of failures indicates that it is not possible to quickly break large pieces using mechanical methods in the current production environment. To address this issue, a pre-treatment method using hydro-abrasive technology has been proposed. The essence of the method is to form a system of weakening slots on the surface of rock pieces using a high-pressure waterjet, which reduces the effective strength of the material before it enters the crusher chamber. Reducing the contact loads on the crushing plates reduces their abrasive wear, increasing the maintenance interval for relining.

Введение

Производство нерудных строительных материалов (НСМ) является одним из базовых звеньев строительной индустрии России. Суммарный объём производства НСМ в стране превышает 600 млн. м³ в год, причём значительная его часть приходится на дробление гранитов, диоритов и базальтов – пород с пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 150-180$ МПа

[1, 2]. Щековые дробилки первичного дробления, принимающие материал непосредственно с карьера, работают в наиболее тяжёлых условиях: крупный кусок, высокая абразивность, нерегулярное поступление негабаритного материала. Именно на этой стадии интенсивность износа дробящих плит максимальна, а межремонтный интервал по перефутеровке составляет в среднем 2,5-4 месяца [1, 2].

Традиционные подходы к увеличению ресурса дробящих плит – применение высокомарганцовистых сталей улучшенного состава, оптимизация профиля рифлений, нанесение износостойких покрытий. Все они направлены на повышение износостойкости материала футеровки, но не снижают уровень контактных нагрузок, являющихся первопричиной износа. Между тем снижение усилия дробления на 20-40% может быть достигнуто принципиально иным путём: предварительным ослаблением исходного материала до его поступления в камеру дробилки.

Предварительная гидроабразивная обработка представляет собой нанесение на поверхность породы системы ослабляющих щелей высоконапорной гидроабразивной. По данным литературы, предварительное ослабление снижает индекс работы Бонда W_i на 20-40% в зависимости от петрографического типа материала [3]. Снижение W_i уменьшает усилие дробления и, как следствие, контактные напряжения на дробящих плитах. Закономерности формирования гидроабразивной струи и её воздействия на материал экспериментально исследованы в СПбГАСУ [4-6]; разработан и апробирован стенд для проведения соответствующих испытаний.

Научная новизна настоящей работы состоит в том, что предварительная гидроабразивная обработка впервые рассматривается как инструмент повышения надёжности дробильного оборудования через снижение контактных нагрузок, а не как самостоятельная технологическая операция. Цель исследования – обосновать механизм влияния предварительной гидроабразивной обработки на ресурс дробящих плит щековой дробилки первичного дробления стационарного ДСК и предложить конструктивную схему соответствующего узла.

Анализ отказов дробильного оборудования, связанных с попаданием негабаритного материала

Группировка данных по отказам, связанных с попаданием негабарита в приемный бункер, на полотно питателя или в приемную камеру щековой дробилки, показывает распределение количества негабарита и общее время восстановления работоспособного состояния после отказа из-за негабарита. Коэффициент технической готовности (КТГ) линии крупного дробления равен 0,87. Данные за 2024 и половину 2025 года представлены в таблице 1.

Табл. 1. Статические данные за 2024 и первую половину 2025 года

2024 год					
<i>Месяц</i>	<i>Количество негабарита, шт.</i>	<i>Общее время восстановления, ч.</i>	<i>Доступное время работы линии дробления, ч.</i>	<i>Среднее время восстановления работоспособности после каждого отказа из-за негабарита, ч</i>	<i>Интенсивность отказов, отказ/час.</i>
январь	10	5,33	641,95	0,53	0,0156
февраль	20	12,33	593,19	0,62	0,0337
март	6	6,50	640,78	1,08	0,0094
апрель	7	10,33	616,07	1,48	0,0114
май	3	2,67	644,61	0,89	0,0047
июнь	11	22,58	603,82	2,05	0,0182
июль	10	5,33	641,95	0,53	0,0156
август	27	27,33	619,95	1,01	0,0436
сентябрь	12	4,33	622,07	0,36	0,0193
октябрь	11	8,00	639,28	0,73	0,0172
ноябрь	27	18,50	607,9	0,69	0,0444
декабрь	47	39,58	607,7	0,84	0,0773
Итого 24г.	191	162,83	7479,25	0,85	0,0255

Табл. 1. Продолжение

2025 год					
Месяц	Количество негабарита, шт.	Время восстановления, ч.	Доступное время работы линии дробления, ч.	Среднее время восстановления работоспособности после каждого отказа из-за негабарита, ч	Интенсивность отказов, отказ/час.
январь	30	24,50	622,78	0,82	0,0482
февраль	27	33,17	551,47	1,23	0,0490
март	34	28,75	618,53	0,85	0,0550
апрель	22	14,75	611,65	0,67	0,0360
май	15	72,83	574,45	4,86	0,0261
июнь	35	16,42	609,98	0,47	0,0574
Итог 25г.	163	190,42	3588,86	1,16	0,0454

Рассчитаем доступное время работы линии крупного дробления и интенсивность отказов.

Доступное время работы линии дробления:

$$T_{\text{дост}} = T_{\text{м}} \cdot KTT - T_{\text{вост}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{м}}$ – общее время работы в месяц, ч; KTT – коэффициент технической готовности линии крупного дробления (0,87); $T_{\text{вост}}$ – время восстановления работоспособности после отказа из-за негабарита, ч.

Среднее время восстановления работоспособности после каждого отказа из-за негабарита:

$$T_{\text{вост.ср}} = T_{\text{общ}} / k, \quad (2)$$

где $T_{\text{общ}}$ – общее время восстановления работоспособности после отказа из-за негабарита в месяц, ч; k – количество негабаритов в месяц, шт.

Интенсивность отказов:

$$\lambda = n_o / T_{\text{дост}}, \quad (3)$$

где n_o – количество отказов, шт.; $T_{\text{дост}}$ – доступное время работы линии дробления, ч.

Проанализируем выборки за первую половину 2024 и 2025 года и определим, является ли увеличение количества негабаритов статистически значимым. Так как выборка является малой, зависимой, с неизвестным законом распределения воспользуемся непараметрическим критерием Уилкоксона для парных выборок.

Нулевая гипотеза (H_0): сдвиг количества негабаритов между полугодиями 2024г. и 2025г. случаен (нет статистически значимого преобладания увеличения или уменьшения).

Альтернативная гипотеза (H_1): сдвиг количества негабаритов статистически значим и имеет определенную направленность (преобладает увеличение или уменьшение).

Полученные значения для расчета критерия Уилкоксона представлены в таблице 2.

Табл. 2. Значения для расчета критерия Уилкоксона

Y_{24}	Y_{25}	$d=Y_{25}-Y_{24}$	Ранжирование абсолютных величин сдвигов $ d $
10	30	+20	4
20	27	+7	1
6	34	+28	6
7	22	+15	3
3	15	+12	2
11	35	+24	5

В нашем случае типичным сдвигом являются положительные значения, и их количество равно 6, а нетипичным – отрицательные, таких нет. За эмпирическое значение принимаем сумму нетипичных критериев:

$$T_{\text{эмп}} = \sum R_i, \quad (4)$$

где R_i – нетипичное значение.

Эмпирическое значение по нашим данным $T_{\text{эмп}} = 0$.

Критическое значение $T_{\text{крит}}$ при числе выборок 6 и уровне значимости $p < 0,05$ равно 2.

Условие $T_{\text{эмп}} \leq T_{\text{крит}}$ ($0 \leq 2$) выполняется, соответственно увеличение количества негабарита является статистически значимым (при уровне значимости $p < 0,05$).

Определим, насколько изменились среднеарифметические значения попадания негабарита и общего времени восстановления работоспособности после отказа, связанного с попаданием негабарита.

Среднеарифметическое значение попадания негабарита:

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_{1i}}{n}, \quad (5)$$

где X_{1i} – количество негабарита в месяц, шт.; n – количество месяцев (для 2024 года $n = 12$, для 2025 года $n = 6$);

$$\bar{X}_{1\ 2024} = \frac{10 + 20 + 6 + 7 + 3 + 11 + 10 + 27 + 10 + 11 + 27 + 47}{12} = 15,92 \text{ шт.};$$

$$\bar{X}_{1\ 2025} = \frac{30 + 27 + 34 + 22 + 15 + 35}{5} = 27,17 \text{ шт.}$$

Среднеарифметическое время восстановления работоспособности после отказа от негабарита:

$$\bar{X}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_{2i}}{n}, \quad (6)$$

где X_{2i} – общее время восстановления работоспособности, после отказа из-за негабарита в месяц, ч;

$$\bar{X}_{2\ 2024} = \frac{5,33 + 12,33 + 6,50 + 10,33 + 2,67 + 22,58 + 5,33 + 27,33 + 4,33 + 8 + 18,50 + 39,58}{12} = 13,57 \text{ ч};$$

$$\bar{X}_{2\ 2025} = \frac{24,50 + 33,17 + 28,75 + 14,75 + 72,83 + 16,42}{6} = 31,74 \text{ ч.}$$

Таким образом, среднее количество негабаритов за первое полугодие 2025 года увеличилось на 11,25 шт. в месяц или на 70,7%, а среднее время восстановления работоспособного состояния после отказа из-за негабарита увеличилось на 18,17 ч в месяц или на 133,9%. Сравнение интенсивности отказов за половину 2024 года и половину 2025 года предоставлено на рисунке 1.

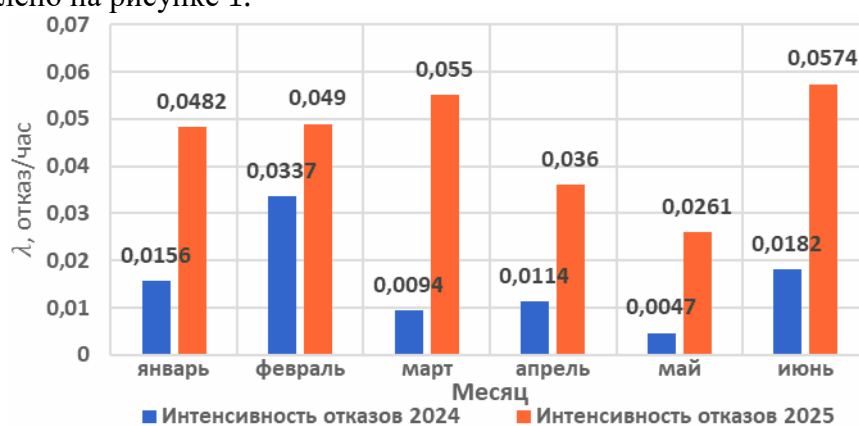


Рис. 1. Сравнение интенсивности отказов

Возрастание среднего времени восстановления после отказа из-за негабарита на 133,9% может быть связано не только с увеличением их количества, а также с увеличением физико-механической прочности входящего материала. Рост интенсивности отказов свидетельствует

о невозможности оперативного разрушения материала механическим способом. В приемном бункере зачастую невозможно правильно позиционировать рабочий инструмент гидромолота. Увеличение количества негабарита так же может быть связано с ухудшением контроля гранулометрического состава после буровзрывных работ [7, 8].

Попадание негабарита в камеру щековой дробилки повышает вероятность внезапных отказов дробящих плит. При взаимодействии рабочего органа дробилки с материалом, прочность которого значительно превышает расчетные значения, возникают значительные ударные нагрузки. Это вызывает хрупкое разрушение и интенсивный абразивный износ рабочей поверхности. Кроме того, заклинивание негабарита в камере дробления способствует возникновению пиковых нагрузок на валу привода. Таким образом, наличие негабарита является не только причиной простоя, но и фактором ускоренного износа дробящих плит, снижая их ресурс.

Поступающим материалом является гранит, обладающий высокой плотностью (в среднем 2600-2700 кг/м³) и значительным пределом прочности на одноосное сжатие (100-250 МПа) [9]. Технологический процесс на стадии крупного дробления представляет собой последовательную механическую цепочку: исходный материал из карьера поступает в приемный бункер, откуда питателем подается в камеру щековой дробилки для первичного измельчения, далее измельченный материал транспортируется ленточным конвейером на последующие стадии.

В качестве научно обоснованно решения предлагается внедрение технологии предварительного гидроабразивного ослабления, для увеличения комплексных показателей надежности и снижения вероятности скрытых внезапных отказов от негабаритов.

Предварительная гидроабразивная обработка как метод снижения нагрузки на дробящие плиты

Традиционные подходы к увеличению ресурса дробящих плит сводятся к:

- 1) применению высокомарганцовистых сталей повышенной износостойкости;
- 2) оптимизации профиля рифлений;
- 3) использованию сменных футеровок из хромистого чугуна.

Все эти способы воздействуют на следствие, но не на первопричину интенсивного износа. Первопричина состоит в высоком уровне контактных напряжений при дроблении крепкой породы. Граниты, диориты и гранодиориты, составляющие основную долю сырьевой базы щебёночных заводов центральной и северо-западной России, имеют предел прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 150-180$ МПа и крепость по шкале Протодяконова $f = 14-18$ [1]. При таких характеристиках сырья пиковые усилия дробления в щековой дробилке первичного дробления достигают от 12 до 17 МН, что обуславливает интенсивный абразивный износ рабочих поверхностей дробящих плит и сокращение межремонтного интервала до 2,5-4 месяцев [1, 2].

Предварительная гидроабразивная обработка исходного материала воздействует непосредственно на прочностные характеристики породы до её поступления в камеру дробилки. Высоконапорная гидроабразивная струя нарезает на поверхности кусков породы систему ослабляющих щелей глубиной h . Щель выполняет роль искусственного концентратора напряжений: в зоне её вершины локальные растягивающие напряжения многократно превышают среднее напряжение в куске, что при последующем механическом нагружении в камере дробилки инициирует разрушение куска при значительно меньшем внешнем усилии по сравнению с необработанным материалом. Для гранита с $\sigma_{сж} = 150-180$ МПа высокое отношение предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение ($\sigma_{сж} / \sigma_p = 20-30$) обеспечивает максимальную чувствительность материала к наличию концентраторов – именно поэтому эффект ослабляющей щели наиболее выражен для хрупких кристаллических пород [8, 9]. Закономерности формирования гидроабразивной струи при воздействии на материал различной природы исследованы экспериментально;

получены эмпирические коэффициенты модели, характеризующей процесс разрушения и позволяющей задавать рациональные режимы работы инструмента [5].

Количественно глубина ослабляющей щели h определяется расчётной зависимостью, полученной Жабиным А.Б. с соавторами на основе экспериментальных данных по широкому спектру твердых пород [11]:

$$\frac{h}{d_0} = 0,0041 \cdot \left(\frac{P_0}{\sigma_{сж}} \right)^{0,97} \cdot \left(\frac{l_0}{l_u} \right)^{-0,44} \cdot \left(\frac{v_0}{v_n} \right)^{0,75} \cdot n_c^{0,3}, \quad (7)$$

где d_0 – диаметр отверстия насадки, мм; P_0 – давление воды, МПа; l_0 – расстояние от среза насадки до поверхности породы, мм; l_u – длина цилиндрического участка насадки, мм; v_0 – скорость струи, мм/с; v_n – скорость перемещения инструмента относительно породы, мм/с; n_c – число проходов струи.

Зависимость (7) верифицирована в диапазоне давлений 100-500 МПа и пределов прочности пород 11,5-159,1 МПа [11].

Различные методы предварительного ослабления горных пород такие как: тепловая обработка; микроволновый нагрев; высоковольтные электрические импульсы, все они обеспечивают снижение индекса работы Бонда W_i на 10-65% в зависимости от метода и типа породы [3]. Применительно к гидроабразивному воздействию экспериментальных данных по измерению W_i до и после обработки в доступной литературе не выявлено. Количественная оценка изменения W_i под воздействием гидроабразивной обработки для гранитов, характерных для щебёночных заводов центральной и северо-западной России, составляет предмет экспериментального этапа будущего исследования. Тем не менее, снижение эффективной прочности породы вследствие формирования системы ослабляющих щелей создаёт предпосылки для уменьшения потребляемой дробилкой мощности и снижения пиковых контактных нагрузок на дробящие плиты.

В составе стационарного дробильно-сортировочного комплекса Юлок гидроабразивных головок располагается непосредственно над пластинчатым питателем первичного дробления. Низкая скорость движения транспортируемого материала (0,02-0,06 м/с) обеспечивает необходимое время контакта гидроабразивной струи с поверхностью кусков. Рабочим органом является гидроабразивный резак, который состоит из: форсунки, камеры смешивания и коллиматора. В резке абразив подаётся в камеру смешивания за счёт эффекта Вентури, возникающего при прохождении высоконапорной струи [4]. Экспериментально установлено, что оптимальное соотношение внутреннего диаметра коллиматора к диаметру форсунки составляет 2-3, что обеспечивает максимальную эффективность засасывания абразива в струю [4]. Форма форсунки оказывает существенное влияние на скорость струи. Конструкция с максимальной разницей между входным и выходным диаметрами без промежуточных ступеней обеспечивает наибольшую кинетическую энергию струи на выходе [4, 6]. Блок гидроабразивных головок состоит из:

- 1) насосной станции высокого давления;
- 2) системы дозированной подачи абразива (гранатовый песок зернистостью 80-120 меш. с размером частиц 0,12-0,18 мм);
- 3) поперечный ряд головок (с шириной перекрытия, равной ширине полотна питателя);
- 4) замкнутый водяной контур с отстойником.

Крепление блока головок выполняется независимо от корпуса питателя на виброизолирующих опорах.

Конкретные режимные параметры узла гидроабразивной обработки подлежат экспериментальному определению применительно к петрографическому составу перерабатываемого сырья конкретного месторождения. Зависимость (7) позволяет выполнить предварительную оценку глубины щели и тем самым обосновать диапазон варьирования параметров при стендовых испытаниях. Конструкция стенда для проведения таких испытаний разработана и апробирована в СПбГАСУ [4-6].

Ожидаемое влияние предварительной гидроабразивной обработки на ресурс дробящих плит

Связь между уровнем контактных нагрузок и интенсивностью износа дробящих плит описывается законом Арчарда – интенсивность абразивного изнашивания прямо пропорциональна нормальной контактной нагрузке на рабочую поверхность плиты [10]. Предварительная гидроабразивная обработка формирует на поверхности кусков породы набор ослабляющих щелей, которые снижают эффективную прочность материала до поступления в камеру дробилки. Это создаёт предпосылки для уменьшения усилия дробления и, в соответствии с законом Арчарда, пропорционального снижения интенсивности износа дробящих плит. Таким образом, предварительная гидроабразивная обработка создаёт предпосылки для увеличения межремонтного интервала для перефутеровки без изменения конструкции дробилки и материала футеровки.

Экспериментально установлено, что эффективность гидроабразивного воздействия на материал напрямую определяется его пределом прочности на сжатие $\sigma_{сж}$. В работе [5] получена зависимость коэффициента k , отражающего сопротивляемость материала воздействию гидроабразивной струи, от $\sigma_{сж}$ в виде:

$$k = 3,626 \cdot 10^{-8} \cdot e^{2,448 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma_{сж}}. \quad (8)$$

Зависимость (8) показывает, что с ростом прочности породы эффективность гидроабразивной обработки снижается по экспоненциальному закону. Для гранита с $\sigma_{сж} = 150-180$ МПа значение k существенно меньше, чем для менее прочных пород, что означает необходимость применения более высокого давления или большего числа проходов для достижения требуемой глубины ослабляющей щели [5]. Это согласуется с зависимостью (7) раздела 3 и подтверждает взаимосвязь параметров гидроабразивной обработки с прочностными характеристиками перерабатываемого сырья.

Практическая реализуемость метода гидроабразивного воздействия в лабораторных условиях подтверждена стендовыми испытаниями, проведёнными в СПбГАСУ [4-6]. В ходе экспериментов при давлении воды 10 МПа, диаметре форсунки 1 мм и скорости перемещения инструмента $20 \cdot 10^{-3}$ м/с достигнута максимальная глубина разрушения льда $h = 21 \cdot 10^{-3}$ м при оптимальном расходе абразива [5]. Результаты свидетельствуют о том, что уже при относительно низких давлениях (10 МПа) гидроабразивный инструмент обеспечивает значительную глубину воздействия на материал с прочностью, схожей с прочностью льда. При переходе к породам с $\sigma_{сж} = 150-180$ МПа потребуются более высокие давления в соответствии с зависимостью (7), что определяет направление дальнейших экспериментальных исследований.

Количественная оценка прироста межремонтного интервала для конкретного петрографического типа перерабатываемого сырья требует проведения лабораторных испытаний на образцах гранита с заданными параметрами гидроабразивной обработки с последующим определением коэффициента снижения W_i и верификацией связи между снижением W_i и снижением контактной нагрузки на дробящие плиты. Эти задачи составляют предмет последующего экспериментального этапа исследования. Тем не менее, на основе литературных данных [13, 3] можно утверждать, что при снижении W_i на 20-40% следует ожидать сопоставимого снижения интенсивности износа плит и соответствующего прироста межремонтного интервала.

Помимо увеличения ресурса дробящих плит, предварительная гидроабразивная обработка обеспечивает снижение пылевыведения в рабочей зоне цеха первичного дробления. Предварительное насыщение поверхностного слоя кусков водой и образование системы микротрещин изменяет характер разрушения в камере дробилки: вместо образования большого количества мелкодисперсных частиц реализуется преимущественно крупноблочный раскол вдоль ослабленных зон [10]. При дроблении гранита снижение пылевыведения имеет особое значение с точки зрения производственной безопасности – кварцевая пыль фракции менее 10 мкм является фиброгенным агентом и нормируется по ПДК значительно жёстче нейтральной пыли.

Обсуждение

Предложенный подход к повышению ресурса дробящих плит принципиально отличается от всех известных методов направлением воздействия. Применение высокомарганцовистых и хромистых сталей улучшенного состава, оптимизация геометрии рифлений дробящих плит, нанесение износостойких покрытий – повышают сопротивляемость самого материала плиты износу, то есть воздействуют на следствие. Предварительная гидроабразивная обработка воздействует на причину – снижает уровень контактных нагрузок, при которых происходит износ, не изменяя конструкцию дробилки и не повышая требований к материалу футеровки. Оба подхода не исключают, а дополняют друг друга – их совместное применение теоретически даёт мультипликативный эффект увеличения межремонтного интервала.

Сопоставление с альтернативными методами предварительного ослабления горных пород показывает конкурентные преимущества гидроабразивной обработки применительно к условиям стационарного ДСК. Предварительное ослабление высоковольтными электрическими импульсами [3] обеспечивает сопоставимое снижение $W_i = 10-52\%$, однако требует громоздкого высоковольтного оборудования, исключающего применение на открытых площадках при неблагоприятных погодных условиях. Микроволновая предобработка [3] даёт наибольший эффект снижения W_i до 65%, но потребляет значительную электрическую мощность и неприменима для непрерывного потока кускового материала крупностью 600-900 мм. Предварительное ослабление в валковых дробилках высокого давления снижает W_i на 15-23%, но представляет собой самостоятельную стадию дробления, а не предобработку. Гидроабразивная обработка лишена перечисленных недостатков: оборудование компактно, работает при атмосферных условиях, легко встраивается в существующую технологическую линию без остановки производства на период монтажа [4, 5].

Важным практическим преимуществом предложенного решения является его применимость на действующих предприятиях без замены или модернизации основного дробильного оборудования. Узел ГАО монтируется над пластинчатым питателем и подключается к существующей системе водоснабжения завода. Это принципиально отличает ГАО от решений, требующих замены дробилки или существенной перекомпоновки технологической линии. Капитальные затраты на внедрение узла ГАО складываются из стоимости насосной станции высокого давления, блока гидроабразивных головок и системы водоподготовки. А эксплуатационные затраты складываются из расхода абразива и электроэнергии на привод насосной станции. Экономическая оценка целесообразности внедрения выходит за рамки настоящей работы и составляет предмет отдельного исследования.

Изложенный подход имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при его практическом применении. Во-первых, закон Арчарда описывает установившийся режим абразивного износа и не учитывает начальный период приработки плит, в течение которого интенсивность износа повышена. Во-вторых, принятое допущение о линейной связи между снижением W_i и снижением контактной нагрузки верифицировано лишь качественно и требует экспериментального подтверждения на образцах гранита конкретного месторождения. В-третьих, в модели не учтено влияние влажности материала после ГАО на производительность грохочения и возможное налипание мелких частиц на дробящие плиты. Устранение указанных неопределённостей составляет предмет последующего экспериментального этапа исследования.

Тем не менее, на основе литературных данных [13, 3] можно утверждать, что при снижении W_i на 20-40% следует ожидать сопоставимого снижения интенсивности износа дробящих плит и соответствующего прироста межремонтного интервала. Нижняя граница этого диапазона (снижение на 20%) достижима при весьма умеренных параметрах гидроабразивной обработки и представляется консервативной оценкой реального эффекта. Верхняя граница (снижение W_i на 40%) соответствует значениям, зафиксированным в литературе для хрупких кристаллических пород [3], и при экспериментальном

подтверждении для гранита означала бы существенное увеличение межремонтного интервала по сравнению с текущими 2,5-4 месяцами.

Заключение

По результатам выполненного теоретического исследования сформулированы следующие выводы.

1. Предварительная гидроабразивная обработка исходного материала перед первичным дроблением является принципиально новым подходом к повышению ресурса дробящих плит щековой дробилки, направленным на снижение контактных нагрузок, а не на повышение износостойкости самого материала футеровки. Предложенный подход не требует замены или модернизации основного дробильного оборудования и может быть реализован на действующих предприятиях путём монтажа узла гидроабразивная обработка на пластинчатый питатель первичного дробления.

2. Физический механизм воздействия гидроабразивной обработки основан на формировании системы ослабляющих щелей на поверхности кусков горной породы, которые выполняют роль искусственных концентраторов напряжений и снижают эффективную прочность материала перед поступлением в камеру дробилки. Для гранитов с $\sigma_{сж} = 150-180$ МПа данный эффект наиболее выражен ввиду высокого отношения $\sigma_{сж} / \sigma_p = 20-30$. Различные методы предварительного ослабления горных пород обеспечивают снижение индекса работы Бонда W_i на 10-65% [3]; применительно к гидроабразивной обработке количественная оценка снижения W_i для гранита конкретного месторождения составляет предмет экспериментального этапа настоящего исследования.

3. На основе закона Арчарда установлена качественная связь между снижением W_i вследствие гидроабразивной обработки и уменьшением интенсивности абразивного износа дробящих плит: снижение контактной нагрузки пропорционально снижению усилия дробления, что создаёт предпосылки для увеличения межремонтного интервала по перефутеровке. Сопутствующим эффектом является снижение пылевыведения в рабочей зоне цеха первичного дробления за счёт изменения характера разрушения кусков в камере дробилки.

Список литературы

1. Бочкова К.В., Потапов В.Я., Комиссаров А.П., Бочков В.С., Потапов В.В. Повышение эффективности дробильного оборудования // Горное оборудование и электромеханика. – 2024. – №6(176). – С. 15-25. – DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-15-25.
2. Ткаченко А.С., Бочков В.С., Скрипник Р.Д., Кухарева А.А. Модернизация дробильно-сортировочных комплексов: снижение воздействия на окружающую среду, улучшение микроклимата и видимости // Известия вузов. Горный журнал. – 2025. – №2. – С. 97-104. – DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-97-104.
3. Somani A., Nandi T. K., Pal S. K., Majumder A. K. Pre-treatment of rocks prior to comminution – A critical review of present practices // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, no. 6, pp. 1007-1016. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.10.003.
4. Лакомкин А.А., Колесниченко Д.С., Немиров В.А., Саковцев И.А., Жуковская Т.О. Стенд для исследования гидроабразивной очистки поверхностей от снежно-ледяных и грязевых отложений // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №26. – С. 54-59. – DOI: 10.26160/2658-3305-2024-26-54-59.
5. Пушкарев А.Е., Головин К.А., Абросимова А.А., Колесниченко Д.С., Жуковская Т.О. Экспериментальные исследования процесса формирования гидроабразивной струи и разрушения снежно-ледяных отложений гидроструйным инструментом // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2024. – Вып. 7. – С. 499-502. – DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-499-500.
6. Лакомкин А.А. Стенд для гидроструйной очистки поверхностей // Материалы международной научно-технической конференции MSTT-2025. – СПб.: СПбГАСУ, 2025. – С. 209-212. – DOI: 10.58168/MSTT2025_209-212.
7. Дремин А.В., Ситдикова С.В., Великанов В.С., Стожков Д.С., Гришин И.А. Анализ кусковатости горных пород в реальном времени на карьерах с применением нейронных сетей // Горная промышленность. – 2023. – № 4. – С. 88-93.
8. Гавришев С.Е., Калмыков В.Н., Пикалов В.А., Караулов Н.Г., Угольников Н.В. Разработка рекомендаций по регулированию кусковатости горной массы при взрывной отбойке на карьерах // Горная промышленность. – 2022. – №3. – С. 114-119.

9. Бочкова К.В., Бочков В.С. Исследование первичной рудоподготовки на труднодоступных месторождениях // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – №2. – С. 3-9.
10. Алтынников Н. А., Пушкарев А. Е. Постановка задачи повышения энергоэффективности и снижения пылевыведения путём использования гидроабразивного резания // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 21-й Международной научно-практической конференции. – Тула: ТулГУ, 2025. – С. 114-119.
11. Жабин А.Б., Пушкарев А.Е., Маликов А.А., Поляков А.В. Разрушение горных пород струями воды сверхвысокого давления // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2014. – Вып. 2. – С. 74-78.
12. Jiang H., Zhao H., Zhang X., Wu Z., Zhao M. Performance Analysis and Prediction of Rock Cutting with a Rotating Abrasive Water Jet // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2025, vol. 38, p. 63. DOI: 10.1186/s10033-025-01250-6.
13. Machado P.C., Pereira J.I., Sinatora A. Abrasion wear of austenitic manganese steels via jaw crusher test // Wear. 2021, vol. 476, p. 203726. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203726.

References

1. Bochkova K.V., Potapov V.Ya., Komissarov A.P., Bochkov V.S., Potapov V.V. Increasing the efficiency of crushing equipment // Mining equipment and electromechanics. 2024, no. 6(176), pp. 15-25. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-6-15-25.
2. Tkachenko A.S., Bochkov V.S., Skripnik R.D., Kukhareva A.A. Modernization of crushing and sorting complexes: reducing environmental impact, improving microclimate and visibility // News of the universities. Mining Journal. 2025, no. 2, pp. 97-104. DOI: 10.21440/0536-1028-2025-2-97-104.
3. Somani A., Nandi T. K., Pal S. K., Majumder A. K. Pre-treatment of rocks prior to comminution – A critical review of present practices // International Journal of Mining Science and Technology. 2017, vol. 27, no. 6, pp. 1007-1016. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.10.003.
4. Lakomkin A.A., Kolesnichenko D.S., Nemirov V.A., Sakovtsev I.A., Zhukovskaya T.O. Stand for the study of waterjet cleaning of surfaces from snow-ice and mud deposits // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 26, pp. 54-59. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-26-54-59.
5. Pushkarev A. E., Golovin K.A., Abrosimova A.A., Kolesnichenko D.S., Zhukovskaya T.O. Experimental studies of the process of forming a hydroabrasive jet and breaking down snow-ice deposits with a hydrojet tool // News of TulSU. Technical Sciences. 2024, iss. 7, pp. 499-502. DOI: 10.24412/2071-6168-2024-7-499-500.
6. Lakomkin A.A. Stand for water jet cleaning of surfaces // Materials of the international scientific and technical conference MSTT-2025. – SPb.: SPbGASU, 2025. – P. 209-212. – DOI: 10.58168/MSTT2025_209212.
7. Dremine A.V., Sitdikova S.V., Velikanov V.S., Stozhkov D.S., Grishin I.A. Real-time analysis of rock lumpiness in quarries using neural networks // Russian Mining Industry. 2023, no. 4, pp. 88-93.
8. Gavrishev S.E., Kalmykov V.N., Pikalov V.A., Karaulov N.G., Ugolnikov N.V. Development of recommendations for regulating the lumpsize of rock mass during explosive demolition in quarries // Russian Mining Industry. 2022, no. 3, pp. 114-119.
9. Bochkova K.V., Bochkov V.S. Research of primary ore preparation at hard-to-reach deposits // Mining equipment and electromechanics. 2023, no. 2, pp. 3-9.
10. Altynnikov N.A., Pushkarev A.E. Statement of the problem of increasing energy efficiency and reducing dust emission by using hydro-abrasive cutting // Social and economic and environmental problems of mining, construction and energy: materials of the 21st International scientific and practical conference. – Tula: Tula State University, 2025. – P. 114-119.
11. Zhabin A.B., Pushkarev A.E., Malikov A.A., Polyakov A.V. Destruction of rocks by water jets of ultra-high pressure // News of Tula State University. Earth Sciences. 2014, iss. 2, pp. 74-78.
12. Jiang H., Zhao H., Zhang X., Wu Z., Zhao M. Performance Analysis and Prediction of Rock Cutting with a Rotating Abrasive Water Jet // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2025, vol. 38, p. 63. DOI: 10.1186/s10033-025-01250-6.
13. Machado P.C., Pereira J.I., Sinatora A. Abrasion wear of austenitic manganese steels via jaw crusher test // Wear. 2021, vol. 476, p. 203726. DOI: 10.1016/j.wear.2021.203726.

Сведения об авторах:

Алтынников Николай Алексеевич – аспирант	Altynnikov Nikolay Alekseevich – postgraduate student
Надеин Вячеслав Александрович – аспирант	Nadein Vyacheslav Aleksandrovich – postgraduate student
altynnikov.n@mail.ru	

Information about authors:

Получена 11.06.2026