

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ И СОРТИРОВКИ ЩЕБНЯ НА КАРЬЕРЕ «САМАРСКИЙ»

И.В. Клишин¹, А.А. Еременко²

¹ Сибирский государственный университет водного транспорта, Новосибирск, Россия

² Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, Россия, e-mail: yeryom@misd.ru

Аннотация: С целью подтверждения теоретических изысканий по совершенствованию технологического процесса выполнен обзор, который позволил сформировать общие закономерности и разработать мероприятия по оптимизации процесса дробления и сортировки щебня на карьере «Самарский» с учетом геологических особенностей. Проанализирована существующая технология добычи и переработки горной массы для выпуска щебня по показателю лещадности не более 15%. Выполнен расчет параметров отбойки в зависимости от стоимости буровзрывных работ для разных диаметров скважин. Установлен рациональный диаметр скважин, определяющий необходимое количество горной массы с минимальным (менее 5%) наличием негабаритных кусков размером более 400 мм, исходя из параметров дробильносортировочного комплекса, который оснащен системами автоматизации, позволяющими повысить эффективность дробления и сортировки. Предложены новые технические и методические решения, позволяющие за счет внедрения четвертой стадии дробления увеличить выход щебня фракции 8–16 мм и уменьшить выход щебня таких фракций, как 0–4 мм, 4–8 мм и 16–22,4 мм. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании полного цикла освоения недр, начиная с горногеологического изучения и заканчивая выпуском готовой продукции, с целью оптимизации карьерного производства в зависимости от выхода конечного материала и затрат, например, на бурение, взрывные работы, транспортировку, дробление, хранение и отгрузку готовой продукции.

Ключевые слова: добыча, карьер, горная масса, технология, переработка, щебень, оптимизация, дробление.

Для цитирования: Клишин И. В., Еременко А. А. Оптимизация процесса дробления и сортировки щебня на карьере «Самарский» // Горный информационноаналитический бюллетень. – 2026. – № 9. – С. 40–53. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_40.

Optimization of crushing and classification of breakstone at the Samarsky quarry

I.V. Klishin¹, A.A. Eremenko²

¹ Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russia

² N.A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia, e-mail: yeryom@misd.ru

Abstract: Aimed at approval of theoretic research on process flow improvement, the survey was carried out, which allowed forming general regularities and developing a program on op-

timization of breakstone crushing and classification with regard to geological features at the Samarsky quarry. The current technology of rock excavation and treatment for the breakstone production is estimated by the flakiness and elongation index not higher than 15%. The breaking design is performed as function of drill-and-blast cost for different diameters of blastholes. The rational diameter of blastholes is found. It governs the required quantity of rock mass with the minimal oversize larger than 400 mm (less than 5%) based on the parameters of the crushing and classification facility equipped with the automation systems which enhance efficiency of crushing and classification. New technical and methodical solutions are proposed. The introduction of the fourth stage of crushing allows an increase in the yield of the breakstone fraction of 8–16 mm and a decrease in the yield of the breakstone fractions of 0–4 mm, 4–8 mm and 16–22.4 mm. The research findings are applicable to design of a complete subsoil use cycle, starting from geological exploration and finishing with the finished-product output, with a view to optimizing quarrying performance depending on the yield of the end material and expenditure connected, for instance, with drilling, blasting, haulage, crushing, storage and shipment of finished products.

Key words: mining, quarry, rock mass, technology, processing, breakstone, optimization, crushing.

For citation: Klishin I. V., Eremenko A. A. Optimization of crushing and classification of breakstone at the Samarsky quarry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(9):40–53. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_9_0_40.

Введение

Развитие ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения месторождений полезных ископаемых и процесса добычи строительного материала на карьерах выявило необходимость применения прогрессивных технологий, таких как цифровизация производственных процессов, управление качеством продукции, оценка геодинамического состояния природно-технических систем при реализации проектов освоения месторождений [1, 2]. Комплексная оценка геозекологических рисков при открытых горных работах достаточно хорошо освещена в публикациях [3, 4]. Для совершенствования технологии добычи и производства щебня следует качественно спроектировать наиболее экономически эффективный процесс дробления горной массы. В некоторых случаях это может быть отдельная дробилка, многостадийная линия или комплексная установка.

Выбранная система может включать целый ряд операций, таких как дробление и грохочение, конвейерная транспортировка, сортировка, промывка и предварительная обработка, складирование, хранение, погрузка и разгрузка и др. К наиболее важным относятся контроль состояния окружающей среды и геозекологический мониторинг при ведении горных работ [5, 6].

На карьере «Самарский» авторами была спроектирована сбалансированная схема технологического процесса по добыче строительного материала. Разработаны мероприятия по интеграции и оптимизации всех процессов производства, обеспечивающие безубыточное функционирование на протяжении всего периода комплексного освоения с учетом местных особенностей и условий разработки месторождения «Самарское».

Добыча на карьере состоит из следующих процессов: бурение, взрывные работы, дробление негабарита, погрузка и транспортировка.

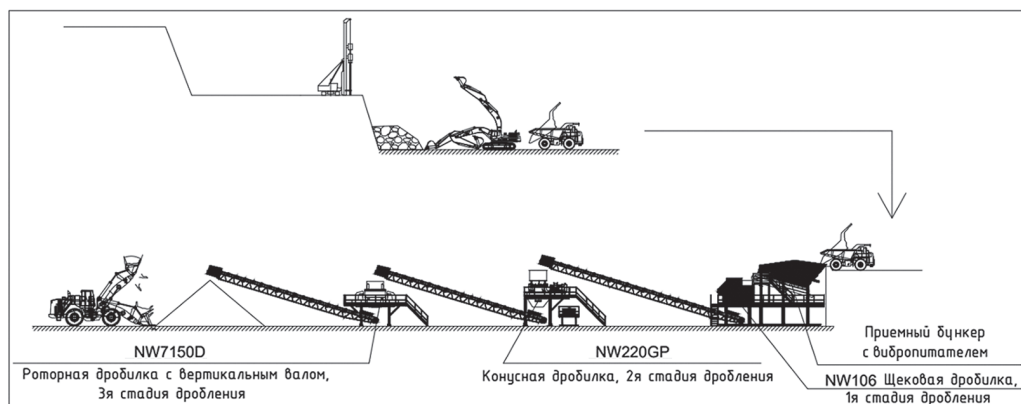


Рис. 1. Стационарный карьерный комплекс на карьере «Самарский»

Fig. 1. Stationary quarry complex at the Samarsky quarry

Методы исследования

К настоящему времени проведен значительный объем теоретических и опытно-экспериментальных исследований и накоплен обширный практический материал в области повышения эффективности технологического процесса, его интеграции и оптимизации, что позволило авторам внедрить на карьере «Самарский» технологию стационарного производства, которая показана на рис. 1.

С целью подтверждения теоретических изысканий по совершенствованию

технологических схем на основании обработанных экспериментальных данных была составлена типовая схема расходов по горным работам на карьере. Основные составляющие расходов по процессу горнодобычи, а также структуры затрат, воздействующие на них факторы и их взаимодействие показаны на рис. 2.

Наиболее дорогостоящая операция, показанная на этой схеме, — это дробление и грохочение — 23% от всех производственных затрат. Оптимизация расходов по этим затратам является одним

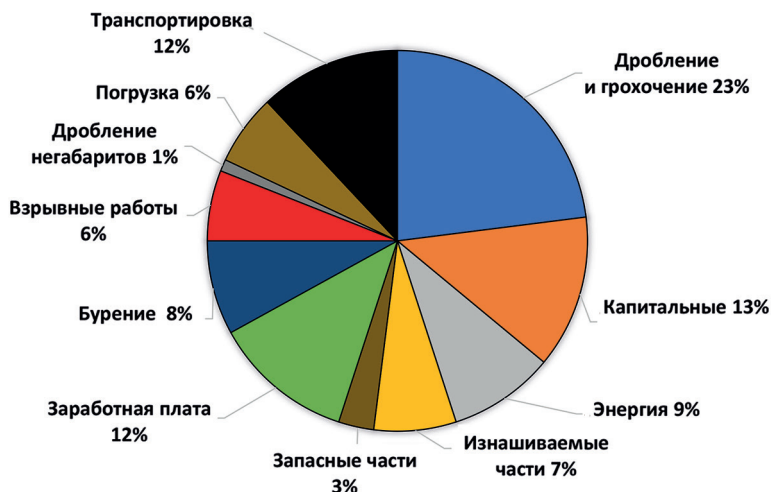


Рис. 2. Типовая схема расходов по горным работам на карьере «Самарский»

Fig. 2. Typical cost diagram for mining operations at the Samarsky open pit

из важнейших компонентов при открытой разработке полезных ископаемых. Полученные результаты свидетельствуют о наиболее энергосберегающей и эффективной схеме эксплуатации внедренного стационарного карьерного комплекса.

Рассмотрены вопросы развития горнодобывающих предприятий в период рисков и глобальных вызовов с определением основных направлений цифровизации горного производства и повышения уровня организации всех технологических процессов, создания доверия к новым цифровым технологиям у всех заинтересованных лиц при разработке месторождений полезных ископаемых с применением интеллектуальных систем и цифровых технологий с учетом специфики горного производства [7].

Понимание, что горное производство включает массу взаимодействующих операций, вызывает необходимость применения так называемого интегрированного подхода. Это позволяет произвести цифровое описание горнотехнической системы на протяжении всего полного цикла комплексного освоения недр, начиная с горногеологического изучения участка недр и заканчивая выпус-

ком готовой продукции. Рассмотрены современные системы управления горнотранспортными комплексами, позволяющие производить оптимизацию грузопотоков на карьере в зависимости от выхода конечного материала и затрат [8].

В результате анализа определенного периода освоения месторождения «Самарское» авторами была внедрена на этом предприятии интеллектуальная геоинформационная система с использованием методов прогнозной аналитики, позволяющая определить устойчивое развитие горнотехнической системы на базе установленных закономерностей взаимодействия природных и инновационных геотехнологических процессов в условиях ведения добычных работ.

Результаты

Выполненный обзор позволил сформировать общие закономерности и методы интегрированной оценки производства щебня на карьере «Самарский» (рис. 3).

На месторождениях щебня горные массивы имеют различную крепость по шкале М.М. Протоdjяконова, равную $f = 8 \dots 20$, поэтому для ведения добыч-

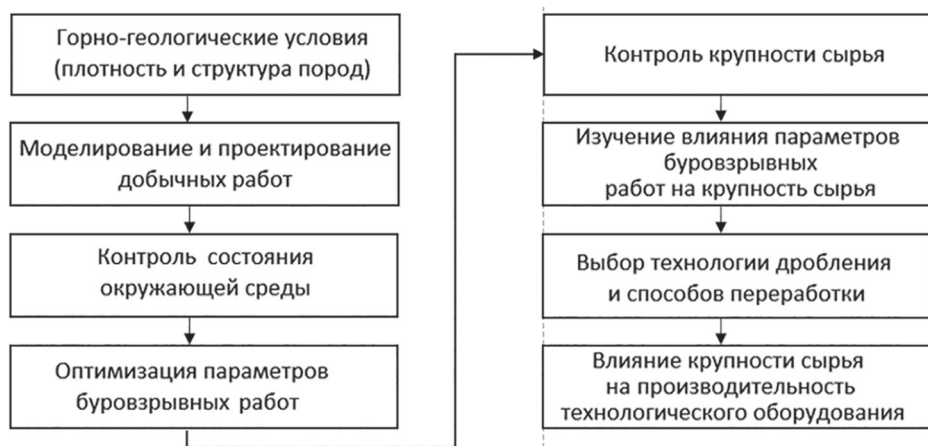


Рис. 3. Методы интегрированной оценки производства щебня на карьере «Самарский»

Fig. 3. Methods for integrated assessment of crushed stone production at the Samarsky quarry

ных работ необходимо использование буровзрывных технологий со значительным расходом взрывчатых веществ [9–12]. Эффективность взрывных работ на карьерах зависит от показателей горной породы по крепости, трещиноватости и структурного строения. Тем не менее на практике необходимо учитывать физико-механические свойства и однородность взрываемого массива. Поэтому технология взрывных работ должна подбираться под различные типы пород, поскольку они имеют разные свойства и в итоге можно получить различную крупность сырья [13–16].

По геологическому строению, вещественному составу и технологическим свойствам полезного ископаемого, гидрогеологическим, горнотехническим условиям разработки месторождение относится к 1-й группе сложности (горизонтально залегающие или пологозалегающие пластообразные тела, ненарушенные или слегка нарушенные тектоническими процессами), по типу — линзообразные и пластообразные залежи, по размеру — мелкие и средние. Полезное ископаемое представлено интрузивными породами основного состава: габбро-диабазы, диабазы, диабазовые порфиристы, секущие полосой субширотного простираивания вулканогенные образования Буготакской толщи. Диабазы, габбро-диабазы — мелкокристаллические темно-зеленые, серо-зеленые породы плотного сложения, массивные, однородные, местами слаборассланцованные.

Разрабатываемые горные породы характеризуются следующими показателями: крепость пород по шкале М.М. Протодьяконова колеблется от 8 до 20; объемный вес полезного ископаемого — 2,91 т/м³; категория трещиноватости — III; группа по классификации СНиП — X; категория по буримости — VIII—XI.

На карьере принята сплошная поперечная углубочная система разработ-

ки с переменным положением рабочей зоны. Предварительное рыхление горной массы обусловлено высокой крепостью полезного ископаемого.

Наиболее эффективным способом рыхления горной массы при большом объеме добычи является буровзрывной способ, который и применяется на действующем карьере.

При буровзрывных работах (БВР) необходимо применение короткозамедленного взрывания, которое предполагает взрывание серии зарядов с интервалом по времени, исчисляемым тысячными долями секунды (миллисекундами), и взрывание каждого последующего заряда происходит в момент, когда часть горной массы уже частично взорвана предыдущим зарядом. Короткозамедленное взрывание существенно влияет на грансостав горной массы и снижает сейсмическое воздействие на окружающую среду, что в итоге является его определяющими особенностями [17–19].

В качестве средств инициирования на карьере «Самарский» применяется неэлектрическая система инициирования повышенной безопасности СИНВ для взрывных работ, которая обеспечивает высокий уровень управляемости массовыми взрывами за счет возможности индивидуального замедления каждого скважинного заряда, широкого выбора времени замедления и реализации самых разнообразных схем взрывания.

Обсуждение результатов

Основной целью развития карьерного производства является максимальное увеличение выхода продукции, приведенное к производственным затратам.

Оптимизация карьерного производства, в зависимости от выхода конечного материала и затрат, весьма сложная задача, оправдана она только в том случае, если масштаб проводимых работ достаточно велик.

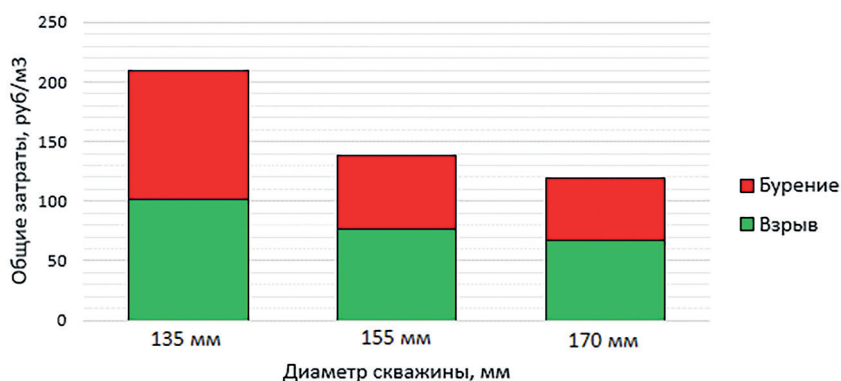


Рис. 4. Влияние диаметра скважины на стоимость буровзрывных работ

Fig. 4. Impact of well diameter on cost of drilling and blasting operations

Рассмотрено влияние ключевых моментов на карьерные работы. Рациональный диаметр скважин, как правило, выбирается на основе технико-экономических расчетов с учетом минимума суммарных приведенных затрат, а также исходя из физикомеханических свойств пород (прочности) и назначения взрыва (выброс, рыхление или сброс). При этом решающее значение имеет производительность и стоимость бурения [20 – 22].

С целью получения результатов по распределению кусковатости взорван-

ной горной массы на месторождении строительного камня «Самарское» выполнен расчет параметров в зависимости от стоимости БВР для диаметра скважин 135, 155 и 170 мм.

Диаметр скважины (влияет на себестоимость БВР), а также параметры, которые важны для дальнейших стадий технологического процесса, определяют выход конечного материала и его качество (представлены на рис. 4, и в табл. 1).

Согласно существующему опыту производства БВР на карьере «Самарский»,

Таблица 1

Себестоимость буровзрывных работ

(диаметр скважин 135, 155, 170 мм, высота уступа 12 м)

Cost of drilling and blasting operations (well diameter 135, 155, 170 mm, bench height 12 m)

Параметр	Диаметр скважин, мм		
	135	155	170
Объем работ, м³	30 600	30 240	28 080
Сетка, м	2,5×3,0	3,5×4,0	4,5×4,0
Глубина скважин, м	13,6	13,6	13,6
Количество скважин, шт.	340	180	130
Расход взрывчатых материалов, т	57 834	43 545,6	35 661,6
Удельный расход взрывчатых материалов, кг/м³	1,89	1,44	1,27
Стоимость буровых работ, руб./м³	107,91	62,71	51,89
Стоимость взрывных работ, руб./м³	101,13	76,01	67,53
Стоимость буровзрывных работ, руб./м³	209,04	138,72	119,42

рабочий диаметр скважин был принят равным 155 и 170 мм (рис. 5).

На основании проведенного расчета влияния диаметра скважины на стоимость буровзрывных работ получаем диаметр 155 мм, определяющий необходимое качество горной массы с минимальным (менее 5%) наличием негабаритных кусков размером 400 мм, исходя из рабочих параметров дробильно-сортировочного комплекса.

Все дробилки имеют ограничения по коэффициенту измельчения, что подразумевает многоэтапность процесса дробления. Количество стадий зависит от начальной крупности материала и требуемых конечных характеристик (см. рис. 6).

Размер исходного подаваемого материала составляет $F_{80} = 400$ мм (взрыванная порода, 80% имеет меньший размер, чем 400 мм).

Крупность материала равна $P_{80} = 16$ мм.

Дорожные наполнители: 80% имеет меньший размер, чем 16 мм; общий коэффициент измельчения (R) $F_{80}/P_{80} = 400/16 = 25$; коэффициент измельчения на первой стадии дробления $R_1 = 3$; коэффициент измельчения на второй стадии дробления $R_2 = 4$.

Стадии дробления дают следующее: $R_1 \times R_2 = 3 \times 4 = 12$ (недостаточно). Поэтому нужен третий этап дробления. Поскольку существует необходимость в разделении процесса на три стадии, можно уменьшить коэффициент измельчения на каждой стадии, чтобы придать контуру большую эксплуатационную гибкость. Например, измельчение на первой стадии $R_1 = 3$; на второй стадии $R_2 = 3$; на третьей стадии $R_3 = 3$.

Три этапа дают следующий результат: $R_1 \times R_2 \times R_3 = 3 \times 3 \times 3 = 27$ — достаточный коэффициент измельчения (рис. 6).

Дробилка является не единственным компонентом в контуре дробления. Поэтому ее производительность будет также зависеть от правильного выбора и надлежащей эксплуатации питателей, конвейеров, грохотов, рам, электродвигателей, приводов и бункеров [23, 24].

Дробильно-сортировочные комплексы оснащены системами автоматизации, позволяющими повысить эффективность процессов дробления и сортировки и уменьшить человеческий фактор — это ключевой инструмент для повышения производительности и достижения максимальной рентабельности оборудования.

Увеличение производительности обычно начинается с максимального увели-

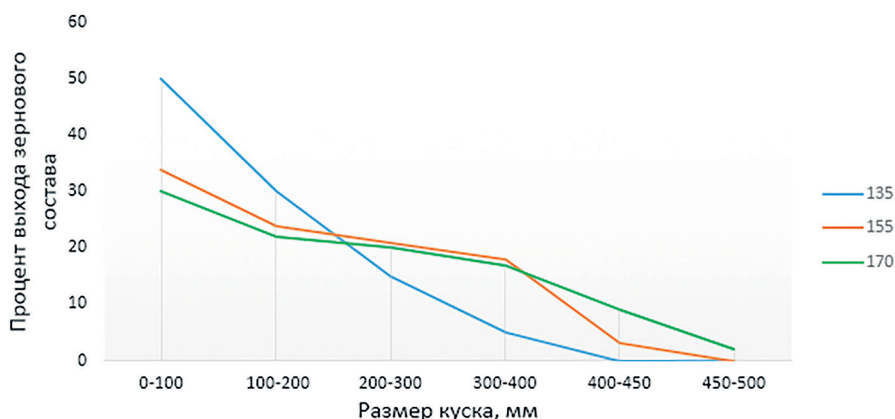


Рис. 5. Влияние диаметра скважины на дробление горных пород

Fig. 5. Effect of borehole diameter on rock crushing

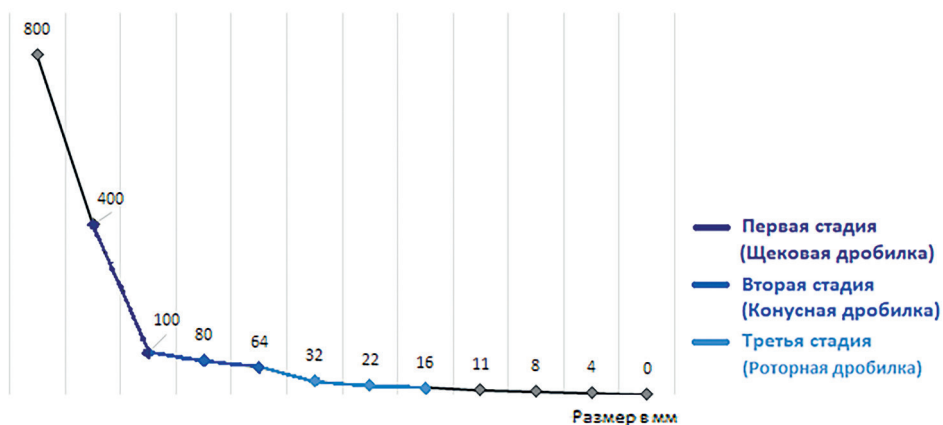


Рис. 6. Изменение коэффициентов измельчения R (1:3) при разных стадиях дробления

Fig. 6. Variation of grinding ratios R (1:3) at different crushing stages

чения объема исходного материала, подаваемого в дробильносортировочный комплекс. Для получения такого результата и поддержания его на должном уровне необходимым условием является автоматизация всех производственных процессов [25].

Системы автоматизации позволяют эксплуатировать дробильно-сортировочные комплексы с максимальной производительностью путем устранения перегрузок и уменьшают время простоев на ремонт и обслуживание. На карьере «Самарский» для производства щебня был выбран 3-стадийный комплекс METSO. Схема дробильно-сортировочного комплекса METSO на карьере «Самарский» представлена на рис. 7.

Процесс производства на данном комплексе выглядит следующим образом.

Горная масса размером 0–400 мм автосамосвалами подается в питатель NW 106. С питателя исходная горная масса подается на щековую дробилку NW 106. Далее фракция 0–40 мм (гравевого потока) по конвейеру поступает на склад щебня. Дробленая фракция 0–150 мм через конвейер поступает в перегружочный бункер и вибрационный стол. С бункера по конвейеру подается в конусную дробилку NW220 GPD и

грохот DS1855. После сортировки щебень разделяется на фракции. Материал крупнее 40 мм поступает для дальнейшего дробления и сортировки. Щебень фракции 0–4 мм доставляется конвейером на склад щебня данной фракции. Более мелкая фракция поступает в перегружочный бункер и на вибрационный стол. Далее через конвейер — на роторную дробилку NW 7150D, грохот DS 1855. Фракция более 22 мм передается через конвейеры для дальнейшего дробления и сортировки. После сортировки на грохоте продукция делится по складам на следующие фракции: отсев 0–4 мм, щебень фракции 4–8 мм, щебень фракции 8–16 мм, щебень фракции 16–22,4 мм.

Основываясь на конъюнктуре рынка, авторы предложили модернизацию текущего комплекса METSO путем добавления еще одной стадии дробления (дробилка конусная BM-SCH300). Далее комплекс стал уже 4-стадийным и выглядел следующим образом (рис. 8).

Процесс производства на данном модернизированном комплексе осуществляется следующим образом: горная масса размером 0–400 мм автосамосвалами подается в питатель NW 106; с питателя исходная горная масса подается на

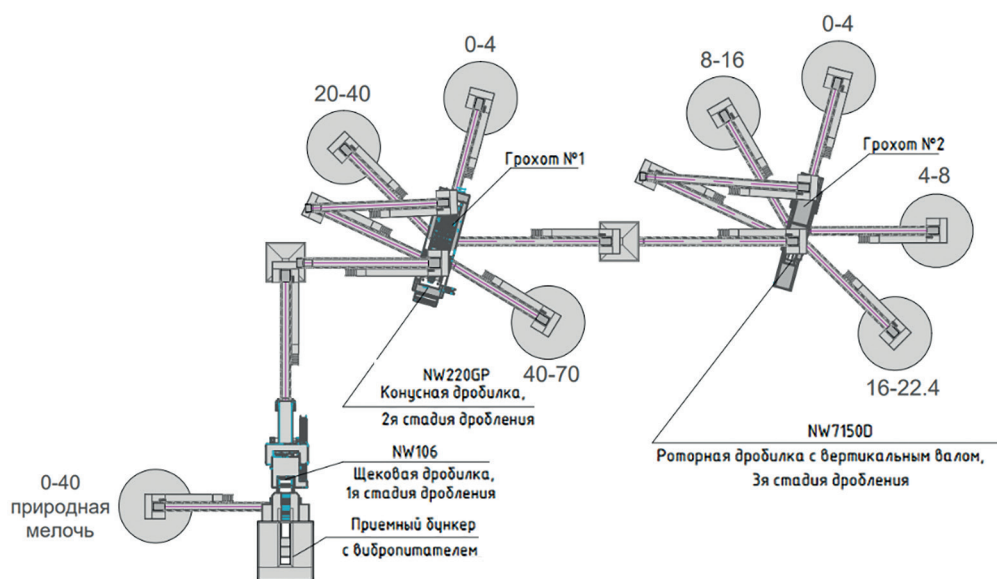


Рис. 7. 3-стадийный комплекс METSO на карьере «Самарский»
Fig. 7. 3-stage METSO complex at the Samarsky quarry

щековую дробилку NW 106. Далее фракция 0—40 мм (грязевой поток) по конвейеру поступает на склад щебня. Дробленая фракция 0—150 мм через конвейер поступает в перегружной бункер и на вибрационный стол. С бункера

по конвейеру — в конусную дробилку NW220 GPD и грохот DS1855.

После сортировки щебень разделяется на фракции. Материал крупнее 70 мм направляется на соответствующие конвейеры для дальнейшего дроб-

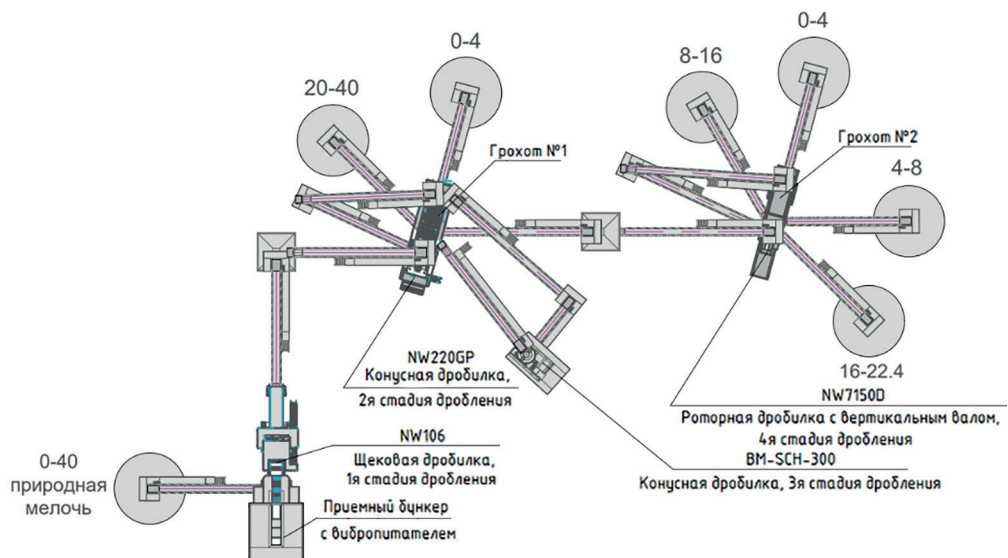


Рис. 8. 3-стадийный комплекс METSO с добавлением конусной дробилки 4-й стадии
Fig. 8. METSO Stage 3 with addition of Stage 4 cone crusher

Таблица 2

Количественно-качественные показатели при разных стадиях дробления
Quantitative and qualitative indicators at different stages of crushing

Дробилка	Щебень фракции, мм	3 стадии			4 стадии		
		производство, т/ч	выход продукции в каждой стадии от переработанной в ней, %	выход продукции по общей горной массе, %	производство, т/ч	выход продукции в каждой стадии от переработанной в ней, %	выход продукции по общей горной массе, %
Щековая дробилка	подача в бункер	200		100	200		100
	грязевой 0–40	30	15	15	30	15	15
	дробленная фракция 0–150	170	85		170	85	
		170	100	85	170	100	85
Конусная дробилка NW220 GPD	отсев 0–4	25,5	15	13	34	20	17
	щебень фракции 4–40	144,5	85				
	щебень фракции 40–70 (додрабливается на конусной дробилке NW220 GPD)	68	40				
	щебень фракции 4–25				136	80	
	щебень фракции 25–70 (отправляется на дробление в конусную дробилку BM-SCH300)				102	60	
Конусная дробилка BM-SCH300	щебень фракции 0–25				102	100	
		144,5	100	72	136	100	68
Роторная дробилка NW 7150D	отсев 0–4	57,6	40	29	40,8	30	20
	щебень фракции 4–8	28,9	20	14	20,4	15	10
	щебень фракции 8–16	36,3	2	18	61,2	45	31
	щебень фракции 16–22,4	21,7	15	11	13,6	10	7

ления и сортировки. Щебень фракции 25–70 мм поступает на конвейер и далее в дробилку конусную BM-SCH300, а с дробилки щебень фракции 0–25 мм по конвейерам возвращается на грохот DS1855. Щебень фракции 0–4 мм по конвейеру перемещается на склад щебня фракции 0–4 мм.

Мелкая фракция 4–25 мм через конвейер доставляется в перегружной бун-

кер и на вибрационный стол. Далее через конвейер поступает в роторную дробилку NW 7150D, грохот DS 1855. Щебень фракции более 22 мм поступает на конвейеры для дальнейшего дробления и сортировки. После сортировки на грохоте продукция делится по складам на следующие фракции: отсев 0–4 мм, щебень фракции 4–8 мм, щебень фракции 8–16 мм, щебень фракции 16–22,4 мм.

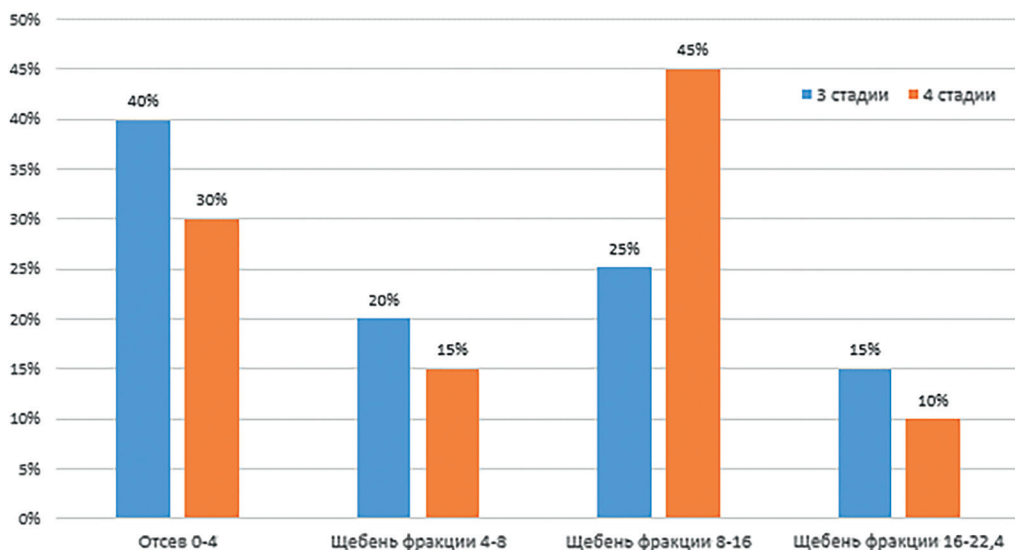


Рис. 9. Процент выхода конечной продукции при разных стадиях дробления

Fig. 9. Percentage of rock yield at different crushing stages

Путем применения 4-й стадии дробления был значительно увеличен выпуск конечного материала, а именно наиболее востребованной продукции — щебня фракции 8—16 мм (табл. 2, рис. 9), а также уменьшен выпуск наименее востребованной продукции — отсева 0—4.

Закключение

Таким образом, технология добычи и переработки строительного камня на карьерах Новосибирского промышленного района продолжает развиваться, совершенствоваться и внедряться в производственные процессы. Авторами на примере карьера «Самарский» определен рациональный диаметр скважин, основанный на расчете влияния диаметра скважин на стоимость буровзрывных

работ. Полученный рациональный диаметр скважин (155 мм) дает необходимое качество горной массы с минимальным (менее 5%) наличием негабаритных кусков размером 400 мм, исходя из рабочих параметров дробильно-сортировочного комплекса. Оптимизация процесса дробления и сортировки щебня является комплексным подходом, включающим выбор оборудования, автоматизацию и управление производством, а также учет энергосбережения. Применение современных технологий и оборудования позволяет внедрить дополнительную 4-ю стадию дробления, используя существующий грохот, оптимизировать процесс сортировки щебня, регулируя процент выхода конечной продукции при разных стадиях дробления в зависимости от конъюнктуры рынка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Балашов А. М. Тенденции цифровизации производственных процессов в горном деле // Горная промышленность. — 2023. — № 3. — С. 134—137.
2. Шестаков В. А. Управление качеством продукции на горных предприятиях. 2-е изд. — Новочеркасск: УПЦ «Набла» ЮРГТУ (НПИ), 2001. — 262 с.

3. Сидоров Д. В., Пономаренко Т. В. Методология оценки геодинамического состояния природотехнических систем при реализации проектов освоения месторождений // Горный журнал. — 2020. — № 1. — С. 49–52.
4. Куликова Е. Ю., Баловцев С. В., Скопинцева О. В. Комплексная оценка геоэкологических рисков при ведении открытых и подземных горных работ // Устойчивое развитие горных территорий. — 2024. — Т. 16. — № 1. — С. 205–216. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.
5. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Развитие научно-методических основ устойчивости функционирования горнотехнических систем в условиях внедрения нового технологического уклада // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2020. — № 4. — С. 24–39.
6. Исаков В. С. Мониторинг экологической обстановки при ведении горных работ // Вестник науки. — 2023. — Т. 2. — № 2 (59). — С. 295–298.
7. Трубецкой К. Н., Пыталев И. А., Рыльников А. Г. Автоматизированные системы управления качеством рудопотоков на карьерах // Маркшейдерский вестник. — 2013. — № 6. — С. 5–10.
8. Рыльникова М. В., Клебанов Д. А., Князькин Е. А. Анализ данных как основа повышения эффективности работы горнотранспортного оборудования при ведении открытых горных работ // Горная промышленность. — 2023. — № 1. — С. 52–56.
9. Старков А. Е., Тальгамер Б. Л., Константинов И. А. Обоснование параметров буровзрывных работ на золоторудном месторождении Наседкино по результатам работы дробильного комплекса // Известия вузов. Горный журнал. — 2024. — № 2. — С. 79–91. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-79-91.
10. Катанов И. Б., Сысоев А. А. Буровзрывные работы на карьерах. — Кемерово: КузГТУ, 2019. — 202 с.
11. Казаков Н. Н., Викторов С. Д., Шляпин А. В., Лапики И. Н. Дробление горных пород взрывом в карьере. — М.: РАН, 2020. — 520 с.
12. Torres V. F. N., Castro C., Valencia M. E., Figueiredo J. R., Silveira L. Numerical modelling of blasting fragmentation optimization in a copper mine // Mining. 2022, vol. 2, no. 4, pp. 654–669. DOI: 10.3390/mining2040035.
13. Галушко Ф. И., Комячин А. О., Мусатова И. Н. Управление качеством взрывной подготовки горной массы на основе оптимизации параметров БВР // Взрывное дело. — 2017. — № 118/75. — С. 140–151.
14. Зенков И. В., Морин А. С., Вокин В. Н., Кирюшина Е. В. Совокупный производственный потенциал карьеров для обеспечения заводов по производству щебня в России: обзор // Евразийская горная промышленность. — 2021. — № 1. — С. 45–48. DOI: 10.17580/em.2021.01.09.
15. Тюпин В. Н. Геомеханическое поведение трещиноватого массива горных пород в зоне масштабного взрывного воздействия // Eurasian Mining. — 2020. — № 2. — С. 11–14. DOI: 10.17580/em.2020.02.03.
16. Дремин А. В., Великанов В. С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород // Горная промышленность. — 2023. — № 4. — С. 73–78. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-73-78.
17. Клишин И. В., Клишин Н. И. Разработка схемы короткозамедленного взрывания зарядов с учетом крепости горных пород при ведении взрывных работ на карьере «Самарский» // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2024. — Т. 11. — № 4. — С. 34–41. DOI: 10.15372/FPVGN202411405.
18. Арипов А. Т., Меликулов А. Д., Умедов Ш. Х., Сагдиев Х. С., Меликулов У. А. Натурные экспериментально-геофизические замеры изменчивости характеристик сейсмозврывных волн на карьерах // Горные машины и технологии. — 2023. — № 4. — С. 52–59.
19. Ишейский В. А., Мартынушкин Е. А., Васильев А. С., Смирнов С. А. Особенности сбора данных в процессе бурения взрывных скважин для формирования геоструктурных блочных моделей // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 4(50). — С. 608–619. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.
20. Хошро С., Табатабаи Моради С. Ш. Метод оптимизации, основанный на концепции удельной механической энергии, для повышения производительности бурения: пример практического применения // Записки горного института. — 2025. — Т. 276. — № 1. — С. 51–66.
21. Behboud M., Ramezanzadeh A., Tokhmechi B., Mehrad M. Estimation of geomechanical rock characteristics from specific energy data using combination of wavelet transform with ANFIS-PSO

algorithm // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2023, vol. 13, no. 8, pp. 1715–1740. DOI: 10.1007/s13202-023-01644-z.

22. Парамонов Г. П., Лисевич В. В. Прогнозирование параметров развала горной массы при производстве взрывных работ // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 4. — С. 100–103.

23. Арсентьев В. А., Вайсберг Л. А., Зарогатский Л. П., Шуляков А. Д. Производство кубовидного щебня и строительного песка с использованием вибрационных дробилок. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. — 112 с.

24. Chao Xiong, Zhong-Wei Huang, Huai-Zhong Shi, Rui-Yue Yang Performances of a Stinger PDC cutter breaking granite: Cutting force and mechanical specific energy in single cutter tests // Petroleum Science. 2023, vol. 20, no. 2, pp. 1087–1103. DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.006.

25. Бурнашев Р. Э., Логунова О. С. Интеллектуализация разработки автоматизированных систем управления дробильно-сортировочными комплексами: концепция и информационное обеспечение // Программные продукты и системы. — 2021. — Т. 34. — № 2. — С. 331–343. DOI: 10.15827/0236-235X.134.331-343. **ГИАБ**

REFERENCES

1. Balashov A. M. Trends in digitalization of production processes in mining. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 3, pp. 134–137. [In Russ].

2. Shestakov V. A. *Upravlenie kachestvom produktsii na gornykh predpriyatiyakh*, 2-e izd. [Product quality management at mining enterprises. 2nd ed.], Novocherkassk, 2001, 262 p.

3. Sidorov D. V., Ponarenko T. V. Methodology for assessing the geodynamic state of natural and technical systems in the implementation of field development projects. *Gornyi Zhurnal*. 2020, no. 1, pp. 49–52. [In Russ].

4. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V., Skopintseva O. V. Comprehensive assessment of geoeological risks in conducting open and underground mining. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024, vol. 16, no. 1, pp. 205–216. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-205-216.

5. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V. Development of scientific and methodological foundations for the sustainability of mining systems in the context of the introduction of a new technological order. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2020, no. 4, pp. 24–39. [In Russ].

6. Isakov V. S. Monitoring of the environmental situation during mining operations. *Bulletin of Science*. 2023, vol. 2, no. 2 (59), pp. 295–298. [In Russ].

7. Trubetskoy K. N., Pytalev I. A., Rylnikov A. G. Automated quality management systems for ore flows in quarries. *Mine Surveying Bulletin*. 2013, no. 6, pp. 5–10. [In Russ].

8. Rylnikova M. V., Klebanov D. A., Knyazkin E. A. Data analysis as a basis for improving the efficiency of mining equipment in open-pit mining operations. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 1, pp. 52–56. [In Russ].

9. Starkov A. E., Talgamer B. L., Konstantinov I. A. Substantiation of the parameters of drilling and blasting operations at the Nasedkino gold deposit based on the results of the crushing complex. *Minerals and Mining Engineering*. 2024, no. 2, pp. 79–91. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-2-79-91.

10. Katanov I. B., Sysoev A. A. *Burovzryvnye raboty na kar'erakh* [Drilling and blasting operations at quarries], Kemerovo, KuzGTU, 2019, 202 p.

11. Kazakov N. N., Viktorov S. D., Shlyapin A. V., Lapikov I. N. *Droblenie gornykh porod vzryvom v kar'ere* [Fragmentation by blasting in open-pit mines], Moscow, 2020, 520 p.

12. Torres V. F. N., Castro C., Valencia M. E., Figueiredo J. R., Silveira L. Numerical modelling of blasting fragmentation optimization in a copper mine. *Mining*. 2022, vol. 2, no. 4, pp. 654–669. DOI: 10.3390/mining2040035.

13. Galushko F. I., Komyachin A. O., Musatova I. N. Quality management of explosive preparation of rock mass based on optimization of BVR parameters. *Explosion technology*. 2017, no. 118/75, pp. 140–151. [In Russ].

14. Zenkov I. V., Morin A. S., Vokin V. N., Kiryushina E. V. The total production potential of quarries to supply crushed stone plants in Russia: review. *Eurasian mining industry*. 2021, no. 1, pp. 45–48. [In Russ]. DOI: 10.17580/em.2021.01.09.

15. Tyupin V. N. Geomechanical behavior of a fractured rock mass in a zone of large-scale explosive impact. *Eurasian Mining*. 2020, no. 2, pp. 11–14. [In Russ]. DOI: 10.17580/em.2020.02.03.

16. Dremn A. V., Velikanov V. S. On the issue of the granulometric composition of blasted rocks. *Russian Mining Industry Journal*. 2023, no. 4, pp. 73 – 78. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-4-73-78.
17. Klishin I. V., Klishin N. I. Development of a scheme for short-range detonation of charges, taking into account the strength of rocks during blasting operations at the Samarsky quarry. *Fundamental and applied issues of Mining Sciences*. 2024, vol. 11, no. 4, pp. 34 – 41. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN202411405.
18. Aripov A. T., Melikulov A. D., Umedov Sh. Kh., Sagdiev Kh. S., Melikulov U. A. Full-scale experimental and geophysical measurements of the variability of seismic and explosive wave characteristics in quarries. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, no. 4, pp. 52 – 59. [In Russ].
19. Isheisky V. A., Martynushkin E. A., Vasiliev A. S., Smirnov S. A. Features of data collection during drilling of explosive wells for the formation of geostructural block models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 4(50), pp. 608 – 619. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-4-608-619.
20. Khoshro S., Tabatabai Moradi S. S. Optimization method based on the concept of specific mechanical energy to increase drilling productivity: an example of practical application. *Journal of Mining Institute*. 2025, vol. 276, no. 1, pp. 51 – 66. [In Russ].
21. Behboud M., Ramezanzadeh A., Tokhmechi B., Mehrad M. Estimation of geomechanical rock characteristics from specific energy data using combination of wavelet transform with ANFIS-PSO algorithm. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2023, vol. 13, no. 8, pp. 1715 – 1740. DOI: 10.1007/s13202-023-01644-z.
22. Paramonov G. P., Lisevich V. V. Forecasting the parameters of rock mass collapse during blasting operations. *International Scientific Research Journal*. 2016, no. 4, pp. 100 – 103. [In Russ].
23. Arsent'ev V. A., Vaysberg L. A., Zarogatskiy L. P., Shuloyakov A. D. *Proizvodstvo kubovidnogo shchebnya i stroitel'nogo peska s ispol'zovaniem vibratsionnykh drobilok* [Production of cuboid crushed stone and construction sand using vibrating crushers], Saint-Petersburg, 2004, p. 112.
24. Chao Xiong, Zhong-Wei Huang, Huai-Zhong Shi, Rui-Yue Yang Performances of a Stinger PDC cutter breaking granite: Cutting force and mechanical specific energy in single cutter tests. *Petroleum Science*. 2023, vol. 20, no. 2, pp. 1087 – 1103. DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.006.
25. Burnashev R. E., Logunova O. S. Intellectualization of the development of automated control systems for crushing and sorting complexes: information support and concept. *Software products and systems*. 2021, vol. 34, no. 2, pp. 331 – 343. [In Russ]. DOI: 10.15827/0236-235X.134.331-343.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Клишин Игорь Валентинович — канд. техн. наук, доцент,
Сибирский государственный университет водного транспорта, e-mail: Klishin66@ya.ru,
Еременко Андрей Андреевич — д-р техн. наук, профессор,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,
e-mail: yeryom@misd.ru, ORCID ID: 0000-0002-7342-7617.
Для контактов: Еременко А.А., e-mail: yeryom@misd.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I. V. Klishin, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Siberian State University of Water Transport,
630099, Novosibirsk, Russia, e-mail: Klishin66@ya.ru,
A. A. Eremenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia,
e-mail: yeryom@misd.ru, ORCID ID: 0000-0002-7342-7617.
Corresponding author: A. A. Eremenko, e-mail: yeryom@misd.ru.

Получена редакцией 03.02.2026; получена после рецензии 20.05.2026; принята к печати 10.08.2026.
Received by the editors 03.02.2026; received after the review 20.05.2026; accepted for printing 10.08.2026.