



СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-259-266>

Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса

С. О. Марков^{1,2} , Е. В. Мурко^{1,3} , Ф. С. Непша¹ ¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (КузГТУ), г. Кемерово, Российская Федерация² Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (филиал в г. Междуреченске), г. Междуреченск, Российская Федерация³ Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» (филиал в г. Прокопьевске), г. Прокопьевск, Российская Федерация markovso@kuzstu.ru

Аннотация

Гранулометрический состав как структурная характеристика отвальных и насыпных массивов при ведении горных и строительных работ приобретает количественные значения в процессе взрывной подготовки горных пород, погрузочных операций и транспортирования горной массы. Такие физико-механические и структурно-текстурные параметры скального массива горных пород, как предел прочности пород и массива, трещиноватость, диаметр естественной отдельности горных пород, оказывают значительное влияние на гранулометрический состав взорванной горной массы. С другой стороны, такие характеристики, как устойчивость, проницаемость отвальных массивов, во многом зависят от литологического и гранулометрического состава разрыхленных горных пород, слагающих отвалы, и их распределения по высоте. В статье описаны результаты исследования гранулометрического состава горных пород отвалов разрезов Кузбасса и особенности его пространственного изменения в теле отвалов. Изучение текстур насыпных массивов и физико-технических свойств укладываемых пород проводилось как на отвалах Кузбасса, так и в лабораторных условиях. Гранулометрический состав мелкокусковой части отвалов с размерами кусков пород до 50 мм исследовался ситовым методом по ГОСТ 12536–2014, а средне- и крупнокусковой – методом косоугольной фотопланиметрии. Полевые наблюдения показали, что нижняя часть отсыпанных по бульдозерной периферийной или экскаваторной технологии отвальных массивов сформирована крупной фракцией со средним размером кусков $d_{cp} = 0,8–1$ м, средняя часть – кусками породы размером $d_{cp} = 0,4–0,6$ м, верхняя – преимущественно мелкой фракцией с размером кусков менее 0,1 м. Соотношение длины, ширины и толщины у кусков взорванных горных пород составляет 1:0,85:0,8, что соответствует удлиненно-уплощенной форме частиц. Это требует значительного числа координат при описании положения кусков в массиве, а также учета моментов инерции при моделировании движения таких частиц до достижения ими устойчивого положения. Для учета неизометричной формы частиц при моделировании может быть использовано современное некоммерческое и коммерческое программное обеспечение при наличии необходимых аппаратных мощностей.

Ключевые слова

горные породы, отвал, сыпучая среда, гранулометрический состав, трещиноватость, геомеханические расчеты, Кузбасс

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№075-03-2021-138/3).

Для цитирования

Марков С. О., Мурко Е. В., Непша Ф. С. Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса. *Горные науки и технологии*. 2021;6(4):259–266. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-259-266>

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

Grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines

S. O. Markov^{1,2} , E. V. Murko^{1,3} , F. S. Nepsha¹ ¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation² T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (branch in Mezhdurechensk), Mezhdurechensk, Russian Federation³ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (branch in Prokopyevsk), Prokopyevsk, Russian Federation markovso@kuzstu.ru

Abstract

Grain size distribution as a structural characteristic of waste rock and bulk masses in the course of mining and construction works acquires quantitative values in the process of rock blasting and hauling of rock mass. Such physical-mechanical and structural-textural parameters of a rock mass, as the ultimate strength



of rocks and rock mass, fracturing, diameter of the natural rock jointing, have a significant impact on the blasted rock mass grain size distribution. On the other hand, such characteristics as stability, permeability of waste rock masses largely depend on the lithology and grain size distribution of the loosened rocks composing waste rock dumps and their height distribution within a dump. The paper describes the findings of the study of the grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines and the features of its spatial variations within the masses. The textures of the bulk masses and physical and technical properties of the stacked rocks were studied both at the Kuzbass waste rock sites and in laboratory conditions. The grain size distribution of the fine lump part of the dumps with the lump size up to 50 mm was investigated by sieve method according to GOST 12536–2014, and the medium and large lump part was studied using oblique photoplanimetry. The field observations showed that the bottom part of the rock dumps, dumped by peripheral bulldozer or excavator methods was composed of coarse fraction with average lump size of: $d_{cr} = 0.8–1$ m, while the middle part, of rock lumps of $d_{cr} = 0.4–0.6$ m, and the upper part, mainly of fine fraction with lump size of less than 0.1 m. The ratio of length, width, and thickness of the blasted rock lumps was 1:0.85:0.8, which corresponds to elongated-flattened shape of the lumps. This requires significant number of coordinates for describing the lump positions in the rock mass, as well as taking into account the moments of inertia when modeling the motion of such lumps until they reach a stable position. Up-to-date non-commercial or commercial software and corresponding hardware can be used to take into account non-isometric shape of the lumps when modeling their motion.

Keywords

rocks, waste dump, loose medium, grain size distribution, fracturing, geotechnical calculations, Kuzbass

Acknowledges

The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 075-03-2021-138/3).

For citation

Markov S. O., Murko E. V., Nepsha F. S. Grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(4):259–266. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-4-259-266>

Введение

Мониторинг гранулометрического состава отвалов вскрышных пород на действующих разрезах имеет важное значение, поскольку именно он во многом определяет несущую способность отвальных массивов. Это влияние выражается в неравномерном распределении кусков горных пород с различными размерами по высоте. Вместе с тем размеры кусков взорванных пород имеют прямую корреляцию с прочностью пород в массиве [1]. Данные гранулометрического состава взорванных вскрышных пород применяются при математическом моделировании отвалов для геомеханических расчетов их устойчивости.

Актуальность работы также обусловлена тем, что в настоящее время уделяется очень мало внимания исследованиям, направленным на изучение параметров забойных блоков гидравлических экскаваторов. В связи с тем что фирмы-производители предоставляют данные, описывающие параметры черпания экскаваторов, только по усредненным графикам, невозможно сделать вывод об устойчивости экскаватора, расположенного на верхней площадке уступа, при его работе нижним черпанием [2–4]. Угол откоса уступа в этом случае должен рассчитываться индивидуально для каждого из вариантов горно-геологических условий, которых может быть множество из-за разнообразия литотипов разрабатываемых горных пород. Кроме того, надо учитывать связность пород, их кусковатость и другие физико-технические свойства.

Помимо решения задач устойчивости массива взорванной горной массы, определенный интерес вызывает оценка использования разрушенных горных пород в качестве наполнителя для очистных со-

оружений шахтных и карьерных сточных вод. Влияние гранулометрического и петрографического состава горной массы на фильтровальные характеристики искусственных фильтрующих массивов показано в работах [5, 6]. Изучение гранулометрического состава взорванных пород позволит определить первоочередные подходы к решению вышеуказанных задач.

Материалы и методы

Изучение гранулометрического состава отвального массива имеет своим объектом отдельные куски породы с различными формой и размерами, а предметом – размеры кусков, по которым производится разделение на фракции взорванной горной массы [7]. В гранулометрии геоматериалов форма кусков породы имеет не меньшее значение, чем их размер, поскольку выступает своего рода «определятелем» размера.

Интегрально размер и форма куска породы могут быть выражены через среднюю длину секущих, т.е. среднее расстояние между случайными парами точек, принадлежащих поверхности куска:

$$l_{average} = 4 \frac{V}{S}, \quad (1)$$

где V , S – объем и площадь поверхности куска породы соответственно.

Из-за неизометричности кусков породы их средний линейный размер можно принять за $1,5l_{average}$. Для изометричных тел средний линейный размер совпадает с их истинными размерами (для шара – это диаметр, для куба – ребро). В качестве среднего размера кусков на практике зачастую принимают

среднее геометрическое или среднее арифметическое максимального и минимального значений линейного размера.

В гранулометрии разрушенных горных пород часто используется понятие эквивалентного диаметра. И для куска породы из развала взорванной горной массы, и для шара, имеющего тот же объем, что и рассматриваемый кусок породы, объем определяется как

$$V = \frac{1}{6} \pi l_{average}^3, \quad (2)$$

где $l_{average}$ – средний размер куска или его эквивалентный диаметр (d_{eq}).

В плоском случае эквивалентный диаметр куска породы будет равен диаметру круга, площадь которого равна средней площади сечений куска случайными плоскостями.

Вмещающие породы Кузбасса представлены в основном аргиллитами, алевролитами и песчаниками. В значительно меньшей степени встречаются магматические плутонические и метаморфические породы. Замеры длины A , ширины B и толщины C кусков различных размеров для осадочных пород показали соотношение $A : B : C = 1 : 0,85 : 0,8$ (усредненные значения). Полученное соотношение практически совпадает с аналогичным соотношением для кусков взорванных аргиллитов, алевролитов и песчаников разрезов Кузбасса $A : B : C = 1 : 0,8 : 0,75$, описанного в работах [8, 9].

В процессе выемки, погрузки, транспортировки и отвалообразования горной массы острые и выступающие ребра кусков породы откальваются, что приближает форму частиц породы к удлиненно-уплощенной.

Для моделирования отвальных (в общем случае – любых насыпных) массивов с применением современного свободно распространяемого (YADE, MercuryDPM и аналогичных) и коммерческого программного обеспечения (PLAXIS, PFC2D, Altair EDEM) формой модельного представления частиц может служить как сфера, так и любая другая объемная фигура с топологически замкнутой поверхностью. Если в начале 2000-х годов последнее было практически невозможно из-за аппаратных ограничений [10, 11], то в настоящее время технически это реализуемо в рамках отдельной лаборатории. Тем не менее моделирование кусков горных пород телами неизометричной формы целесообразно лишь с применением серьезных вычислительных мощностей на современных графических процессорах с распределенной средой моделирования, с применением архитектуры CUDA и PhysX и значительными объемами как графической, так и оперативной памяти, при использовании локальных рабочих станций.

За размер куска породы при моделировании структуры насыпного массива принимается эквивалентный диаметр, вычисленный по данным гранулометрического состава пород, укладываемых в такой массив.

Теоретические основы математического моделирования зернистых сред, заложенные отечествен-

ными [10–14] и зарубежными авторами [15–18], показывают, что наиболее приемлемой модельной формой частицы зернистой среды является либо одна сфера, либо объемная фигура, представленная сближенными (межцентровое расстояние от 0,2 радиуса) сферами – в объемном или кругами – в плоском случае. Это подтверждается тем, что указанные формы частиц являются наиболее приемлемыми для моделирования сыпучих сред с применением, в частности, свободно распространяемых программных кодов Yade и MercuryDPM, без существенной потери скорости моделирования, в отличие от более сложной формы кусков, состоящих, например, из трех и более сопряженных сфер. Использование сложных форм кусков моделируемой среды приводит к увеличению времени моделирования аналогичного объема среды на один-два порядка даже с применением современных конфигураций персональных компьютеров (твёрдотельный накопитель формата M.2 с поддержкой NVMe, центральный процессор 4,2 ГГц, оперативная многоканальная память 64 Гб, графический процессор 1,7 ГГц, графическая видеопамять 4 Гб, поддержка CUDA и PhysX).

Изучение текстур насыпных массивов и физико-технических свойств укладываемых пород проводилось как на отвалах Кузбасса, так и в лабораторных условиях [19, 21, 22]. Гранулометрический состав мелкокусовой части отвалов с размерами кусков пород до 50 мм исследовался ситовым методом по ГОСТ 12536–2014, а средне- и крупнокусовой – методом косоугольной фотопланиметрии. При этом при обработке фотографий откосов применялась демо-версия программного обеспечения «Split-Desktop».

Результаты

Результаты исследований гранулометрического состава представлены на рис. 1 и 2. На рис. 2 представлено процентное содержание всех частиц массива (соответствующее кривой 4 на рис. 1).

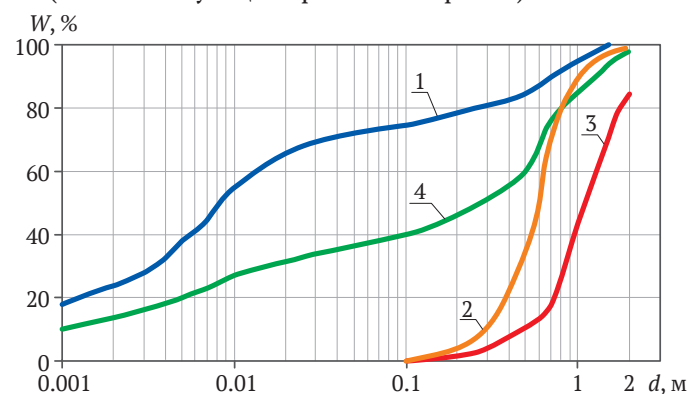


Рис. 1. Интегральные (суммарные) кривые гранулометрического состава отвалов $W_{I(d)}$ по объемному содержанию фракций:

1, 2, 3 – для нижней, средней, верхней частей отвала соответственно; 4 – для всего отвала

Fig. 1. Integral (cumulative) curves of the waste dumps grain size distribution $W_{I(d)}$ by the volumetric content of fractions: 1, 2, 3 – for the lower, middle, upper parts of the waste dump, respectively; 4 – for the whole waste dump

Из рис. 1 видно, что нижняя треть отвалов содержит преимущественно куски крупных размеров ($d_{eq} \approx 0,8$ м), средняя часть – средних размеров ($d_{eq} \approx 0,4$ м), верхняя часть – мелких размеров ($d_{eq} \approx 0,04$ м). Сегрегация размеров кусков по высоте отвала обусловлена прямой пропорциональностью расстояния перемещения куска по откосу его размеру.

Высокая однородность гранулометрического состава характерна для нижних слоёв отвала (для крупнукусковой массы коэффициент неоднородности $C_u = 2,4$, для среднекусковой – $C_u = 2,2$). Значение пористости в нижних слоях достигает значения $n = 40$ %, а абсолютные размеры пустот – нескольких десятков сантиметров. Нижние слои отвалов характеризуются в целом каркасной или каркасно-незаполненной внутренней текстурой.

Более сложная мелкокусковая система характерна для верхнего слоя отвалов. Текстура этого слоя отличается относительно выдержанной изотропностью из-за резкой разноразмерности частиц ($C_u > 20$) и хаотического чередования пространственных решеток различной конфигурации, вплоть до их полного отсутствия. По сравнению с нижней и средней третями отвального массива (по высоте) абсолютные размеры пор верхнего слоя на 1–3 порядка меньше.

Резкое уменьшение пористости и размеров пор обусловлено более интенсивным физическим выветриванием, разрушением кусков и их переупаковкой в верхнем слое с течением времени, по сравнению с нижними слоями. Интенсивность протекания процессов выветривания зависит от водоустойчивости и прочности пород.

Скальные и полускальные вскрышные породы угленасыщенных толщ Кузбасса представлены главным образом аргиллитами, алевролитами и песчаниками различной прочности. Предел прочности на сжатие R_c песчаников (как водонасыщенных, так и сухих) в 1,5 раза выше, чем соответствующий предел прочности аргиллитов и алевролитов. Для отложений Северного и Центрального Кузбасса коэффициент размягчаемости K_s (отношение предела прочности в водонасыщенном состоянии к пределу прочности в сухом состоянии) для песчаников составляет в среднем 0,65; для отложений Южного Куз-

басса – 0,7–0,9. Для алевролитов и аргиллитов всех отложений Кузбасса средние значения K_s находятся в пределах 0,5–0,6.

Низкой степенью уплотнения обладают массивы, отсыпанные преимущественно из крепких песчаников. При этом нижние грубообломочные слои отвалов, сложенные кусками с наибольшим пределом прочности на сжатие и наименее подверженные физическому и химическому выветриванию, остаются в течение длительного времени в разрыхленном состоянии. Изменение размеров пор в таких слоях происходит преимущественно за счет постепенного заиливания мелкодисперсной массой, проникающей из верхних слоев.

Для численного моделирования насыпных породных массивов целесообразно перейти от функции $F(d)$ распределения размеров кусков породы по объему (или по массе), теоретически обоснованной в работе [7], к функции распределения размеров кусков по числу частиц $F_n(d)$, где d – диаметр кусков, что описывается следующим выражением:

$$F_n(d) = \frac{\int_{d_0}^d \frac{1}{d^2} dF(d)}{\int_{d_0}^{d_1} \frac{1}{d^2} dF(d)}, \quad (3)$$

где d_0 и d_1 – наименьший и наибольший размеры кусков.

Для вычисления числа кусков i -й фракции предлагается формула:

$$N_i(d) = \frac{W_i}{d_i^2}, \quad (4)$$

где W_i – содержание i -й фракции (по объему) в массиве, %; d_i – средний диаметр кусков i -й фракции, м.

Анализ грансостава насыпных отвальных массивов показал, что суммарное содержание фракций (по объему) с размерами кусков меньше d аппроксимируется выражением:

$$W_{i(d)} = 81,5 \cdot d^{0,2754}. \quad (5)$$

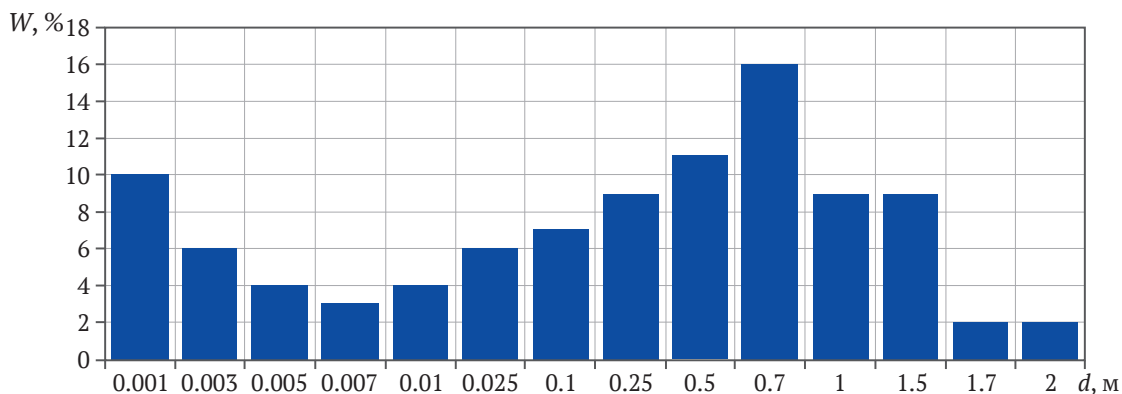


Рис. 2. Гистограмма дифференциального содержания кусков соответствующих фракций в отвале

Fig. 2. Histogram of the differential content of lumps of the corresponding fractions in the waste dump

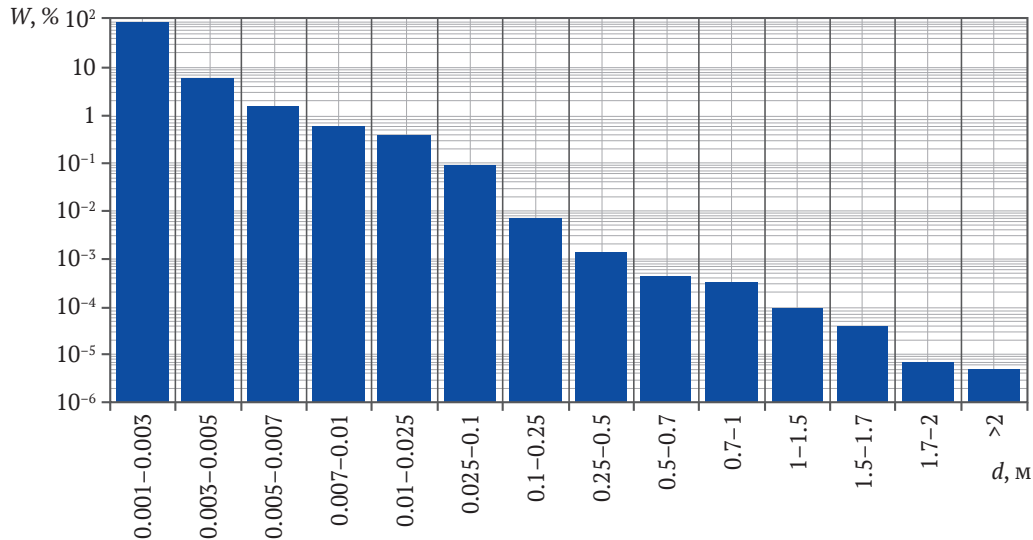


Рис. 3. Интегральное содержание $W_{D(d)}$ фракций соответствующего диаметра d (по числу частиц)

Fig. 3. Integral contents $W_{D(d)}$ of fractions of the corresponding diameter d (by number of particles)

Величина коэффициента корреляции регрессионной модели (5) $R^2 = 0,991$, что позволяет судить о достаточно высокой ее адекватности.

Интегральное процентное содержание $W_{D(d)}$ фракций пород отвалов по числу частиц (усредненные значения для Северного, Среднего и Южного Кузбасса) представлено на рис. 3.

Значения интегрального содержания фракций $W_{D(d)}$ по числу кусков аппроксимируются обратной степенной зависимостью:

$$W_{D(d)} = 9 \cdot 10^{-5} d^{-1,9699}. \quad (6)$$

Коэффициент корреляции регрессионной модели (6) $R^2 = 0,9855$.

Значения, полученные по формуле (6), интегрального содержания кусков по числу частиц используются в качестве исходных данных для определения размера кусков породы при численном моделировании насыпных массивов из разрушенных скальных и полускальных пород при использовании алгоритмов моделирования, не позволяющих учитывать данные granulометрического состава по объему или по массе [18, 20].

Выводы

1. Неоднородное строение отвальных массивов в большинстве случаев обусловлено особенностью гравитационного массопереноса складированных в отвал пород, связанной с различной крупностью кусков коренных пород вскрыши.

Полевые наблюдения показали, что нижняя часть отсыпанных по бульдозерной периферийной или экскаваторной технологии отвальных массивов сформирована крупной фракцией со средним размером кусков $d_{cp} = 0,8-1$ м, средняя часть – кусками породы размером $d_{cp} = 0,4-0,6$ м, верхняя – преимущественно мелкой фракцией с размером кусков менее 0,1 м. Неоднородность физико-технических параметров фракционированных по высоте отвалов определяется неоднородностью их текстурных характеристик.

2. Соотношение длины, ширины и толщины у кусков взорванных горных пород составляет 1:0,85:0,8, что соответствует удлиненно-уплощенной форме частиц. Это требует значительного числа координат при описании положения кусков в массиве, а также учета моментов инерции при моделировании движения таких частиц до достижения ими устойчивого положения. Для учета неизометричной формы частиц при моделировании может быть использовано современное некоммерческое и коммерческое программное обеспечение при наличии необходимых аппаратных мощностей.

3. Выбор размера кусков d при математическом моделировании структуры насыпного массива производится либо по интегральному содержанию фракций в массиве по объему (или по массе) по зависимости $W_{i(d)} = 81,5 \cdot d^{0,2754}$, либо по интегральному содержанию фракций в массиве по числу частиц по зависимости $W_{D(d)} = 9 \cdot 10^{-5} d^{-1,9699}$.

Список литературы

1. Васильева А. Д. *Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса*. [Автореф. дисс. ... канд. техн. наук]. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2020. 22 с.
2. Litvin O. I., Tyulenev M. A., Zhironkin S. A., Gasanov M. A. The influence of hydraulic backhoes' technological parameters on their capacity at overburden operations. *International Journal of Mining And Mineral Engineering*. 2020;11(3):203–217. <https://doi.org/10.1504/IJMMME.2020.109629>



3. Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E. Study of the Backhoe's Digging Modes at Rock Face Working-Out. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501024>
4. Tyulenev M., Litvin O., Zhironkin S., Gasanov M. The influence of parameters of drilling and blasting operations on the performance of hydraulic backhoes at coal open pits in Kuzbass. *Acta Montanistica Slovaca*. 2019;24(2):88–97. URL: <https://actamont.tuke.sk/pdf/2019/n2/2tyulenev.pdf>
5. Чжан Шэнжун, Королёв В. А. Влияние гранулометрического состава на физические и физико-механические свойства песчано-гравийных грунтовых смесей. В: Трофимов В. Т., Королев В. А. (ред.) *Труды Международной научной конференции «Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов»*. 27–28 сентября 2018. Москва, Российская Федерация. ООО «СамПринт»; 2018.
6. Макридин Е. В., Тюленев М. А., Марков С. О., Лесин Ю. В., Мурко Е. В. Использование вскрышных пород для повышения экологической безопасности угледобывающего региона. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(12):89–102. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102>
7. Бирюков А. В., Кузнецов В. И., Ташкинов А. С. *Статистические модели в процессах горного производства*. Кемерово: Кузбассвузиздат; 1996. 228 с.
8. Рыжков Ю. А., Орлов В. Н. Метод определения удельной поверхности кусковых закладочных материалов. *Известия вузов. Горный журнал*. 1975;(11):11–16.
9. Менжулин М. Г., Молдован Д. В., Борисенко Ю. Н., Легкова О. Е. Модель влияния естественных трещиноватости и блочности на взрывное разрушение горных пород. *Записки горного института*. 2007;(172):43–47. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/7616>
10. Müller D., Liebling Th. M. Using triangulations in computer simulations of granular media. *Mathematical Modelling and Scientific Computing*. 1996;6. URL: https://www.researchgate.net/publication/37428438_Using_triangulations_in_computer_simulations_of_granular_media
11. Oger L., Trodec J. P., Richard P., Gervois A., Rivier N. Voronoï tessellation of packing of equal spheres. In: *Proceedings of the Third International Conference on Powders & Grains*. Durham, North Carolina; 1997. Pp. 287–290.
12. Воробьев В. А., Кивран В. К., Корякин В. П. *Применение физико-математических методов в исследовании свойств бетона*. М.: Высшая школа; 1977. 271 с.
13. Temperley H. N. V., Rowlinson J. S., Rushbrook G. S. (eds.) *Physics of simple liquids*. Amsterdam: North Holland Publishing Company; 1968. 713 p.
14. Bonaccorso F., Succi S., Lauricella M., Montessori A., Tiribocchi A., Luo K. H. Shear dynamics of confined bijels. *AIP Advances*. 2020;10:095304. <https://doi.org/10.1063/5.0021016>
15. Campello E. M. B. A computational model for the simulation of dry granular materials. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2018;106:89–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.08.010>
16. Weinhart T., Orefice L., Post M. et al. Fast, flexible particle simulations – an introduction to MercuryDPM. *Computer Physics Communications*. 2019;249:107129. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107129>
17. Scholtes L., Donze F.-V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2012;52:18–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.02.009>
18. Бесимбаева О. Г., Хмырова Е. Н., Низаметдинов Ф. К., Олейникова Е. А. Оценка устойчивости бортового массива при отработке выходов угольного пласта. *Горные науки и технологии*. 2018;(2):51–59. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-2-51-57>
19. Марков С. О. *Структурное моделирование насыпных отвальных массивов разрезов Кузбасса*. [Дисс. ... канд. техн. наук]. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет; 2003. 127 с.
20. Гоголин В. А., Лесин Ю. В. Обзор методов исследования устойчивости природных и техногенных массивов горных пород. *Техника и технология горного дела*. 2018;(3):42–55. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2018-3-42-55>
21. Калашников В. А., Горбачев А. В. Разработка низкочастотной технологии обезвоживания угольного шлама обогатительных фабрик с применением оболочечных фильтровальных конструкций. *Техника и технология горного дела*. 2019;(3):36–59. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-36-59>
22. Murko E., Kalashnikov V., Gorbachev A., Mukhomedzyanov I. Using of shell filtering constructions for concentrating plant's coal slurry dewatering. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502029>

References

1. Vasilyeva A. D. *Geotechnical substantiation of high waste dumps stability at coal deposits of Kuzbass*. [Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation.] St. Petersburg: St. Petersburg Mining University Publ.; 2020. 22 p. (In Russ.)
2. Litvin O. I., Tyulenev M. A., Zhironkin S. A., Gasanov M. A. The influence of hydraulic backhoes' technological parameters on their capacity at overburden operations. *International Journal of Mining And Mineral Engineering*. 2020;11(3):203–217. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2020.109629>



3. Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E. Study of the Backhoe's Digging Modes at Rock Face Working-Out. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910501024>
4. Tyulenev M., Litvin O., Zhironkin S., Gasanov M. The influence of parameters of drilling and blasting operations on the performance of hydraulic backhoes at coal open pits in Kuzbass. *Acta Montanistica Slovaca*. 2019;24(2):88–97. URL: <https://actamont.tuke.sk/pdf/2019/n2/2tyulenev.pdf>
5. Zhang Shengzhong, Korolev V. A. Influence of grain size distribution on physical and physical-mechanical properties of sand-gravel soil mixtures. In: Trofimov V.T., Korolev V.A. (eds.). *Proceedings of the International Scientific Conference "Geotechnical and ecological-geological study of sands and sandy masses"*. September 27–28, 2018. Moscow: Russia LLC "SamPrint" Publ.; 2018. (In Russ.)
6. Makridin E. V., Tyulenev M. A., Markov S. O., Lesin Yu. V., Murko E. V. Overburden management towards higher safety in coal mining regions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(12):89–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102>
7. Biryukov A. V., Kuznetsov V. I., Tashkinov A. S. *Statistical models in mining processes*. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat Publ.; 1996. 228 p. (In Russ.)
8. Ryzhkov Yu. A., Orlov V. N. The method for determination of the specific surface of lumpy stowing materials. *Izvestiya Vuzov. Gornyi Zhurnal*. 1975;(11):11–16 (in Russian).
9. Menzhulin M. G., Moldovan D. V., Borisenko Y. N., Legkova O. E. Model of the influence of natural fracturing and blockiness on the explosive rupture of rocks. *Journal of Mining Institute*. 2007;(172):43–47. (In Russ.). URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/7616>
10. Müller D., Liebling Th. M. Using triangulations in computer simulations of granular media. *Mathematical Modelling and Scientific Computing*. 1996;6. URL: https://www.researchgate.net/publication/37428438_Using_triangulations_in_computer_simulations_of_granular_media
11. Oger L., Troadec J. P., Richard P., Gervois A., Rivier N. Voronoï tessellation of packing of equal spheres. In: *Proceedings of the Third International Conference on Powders & Grains*. Durham, North Carolina; 1997. Pp. 287–290.
12. Vorobyev V. A., Kivran V. K., Koryakin V. P. *Application of physical and mathematical methods in the study of concrete properties*. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1977. 271 p. (In Russ.)
13. Temperley H. N. V., Rowlinson J. S., Rushbrook G. S. (eds.) *Physics of simple liquids*. Amsterdam: North Holland Publishing Company; 1968. 713 p.
14. Bonaccorso F., Succi S., Lauricella M., Montessori A., Tiribocchi A., Luo K. H. Shear dynamics of confined bijels. *AIP Advances*. 2020;10:095304. <https://doi.org/10.1063/5.0021016>
15. Campello E. M. B. A computational model for the simulation of dry granular materials. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2018;106:89–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.08.010>
16. Weinhart T., Orefice L., Post M. et al. Fast, flexible particle simulations – an introduction to MercuryDPM. *Computer Physics Communications*. 2019;249:107129. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107129>
17. Scholtes L., Donze F.-V. Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2012;52:18–30. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2012.02.009>
18. Bessimbaeva O. G., Khmyrova E. N., Nizametdinov F. K., Oleinikova E. A. Estimation of near-wall rock mass stability when extracting exposed coal seam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2018;(2):51–59. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2018-2-51-57>
19. Markov S. O. *Structural modeling of piled dump masses of Kuzbass coal strip mines*. [Extended abstract of Cand. Sci. (Eng.) Dissertation.] Kemerovo: Kuzbass State Technical University; 2003. 127 p. (In Russ.)
20. Gogolin V. A., Lesin Yu. V. The research methods' review of the natural and tech-nogenic rock massifs stability. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2018;(3):42–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2018-3-42-55>
21. Kalashnikov V.A., Gorbachev A.V. Development of a low-cost technology for coal slurry dewatering from concentration plants with the use of shell filter constructions. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2019;(3):36–59 (In Russ.). <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-3-36-59>
22. Murko E., Kalashnikov V., Gorbachev A., Mukhomedzyanov I. Using of shell filtering constructions for concentrating plant's coal slurry dewatering. In: *IVth International Innovative Mining Symposium*. 14–16 October, 2019, Kemerovo, Russian Federation. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502029>

Информация об авторах

Сергей Олегович Марков – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геологии, Горный институт, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Российская Федерация; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева (филиал в г. Междуреченске), г. Междуреченск, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-3209-0296](https://orcid.org/0000-0002-3209-0296), Scopus ID [57193791816](https://orcid.org/57193791816), ResearcherID [L-3084-2017](https://orcid.org/L-3084-2017); e-mail markovso@kuzstu.ru



Елена Викторовна Мурко – кандидат технических наук, начальник отдела аспирантуры, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Российская Федерация; доцент кафедры технологии и комплексной механизации горных работ, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва (филиал), г. Прокопьевск, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9349-6874](https://orcid.org/0000-0001-9349-6874), Scopus ID [57194042949](https://scopus.com/authorid/57194042949), ResearcherID [AAE-2547-2019](https://orcid.org/AAE-2547-2019); e-mail zhev.httte@kuzstu.ru

Федор Сергеевич Непша – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры электроснабжения горных и промышленных предприятий, Горный институт, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачёва, г. Кемерово, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-7468-2548](https://orcid.org/0000-0002-7468-2548), Scopus ID [57197712059](https://scopus.com/authorid/57197712059), ResearcherID [R-6873-2016](https://orcid.org/R-6873-2016); e-mail nepshafs@kuzstu.ru

Information about authors

Sergey O. Markov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Surveying and Geology, Mining Institute, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (branch in Mezhdurechensk), Mezhdurechensk, Russian Federation; ORCID [0000-0002-3209-0296](https://orcid.org/0000-0002-3209-0296), Scopus ID [57193791816](https://scopus.com/authorid/57193791816), ResearcherID [L-3084-2017](https://orcid.org/L-3084-2017); e-mail markovso@kuzstu.ru

Elena V. Murko – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Postgraduate Study Department, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; Associate Professor of the Department of Technology and Integrated Mechanization of Mining Works, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (Prokopyevsk Branch), Prokopyevsk, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9349-6874](https://orcid.org/0000-0001-9349-6874), Scopus ID [57194042949](https://scopus.com/authorid/57194042949), ResearcherID [AAE-2547-2019](https://orcid.org/AAE-2547-2019); e-mail zhev.httte@kuzstu.ru

Fedor S. Nepsha – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Electricity Supply of Mining and Industrial Enterprises, Mining Institute, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; ORCID [0000-0002-7468-2548](https://orcid.org/0000-0002-7468-2548), Scopus ID [57197712059](https://scopus.com/authorid/57197712059), ResearcherID [R-6873-2016](https://orcid.org/R-6873-2016); e-mail nepshafs@kuzstu.ru

Поступила в редакцию	10.09.2021	Received	10.09.2021
Поступила после рецензирования	11.11.2021	Revised	11.11.2021
Принята к публикации	01.12.2021	Accepted	01.12.2021