



УДК 622.271

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ВСКРЫШНОЙ ПОРОДЫ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОГРУЗКИ И РАЗГРУЗКИ ПОРОДНОЙ ГРУЗОВОЙ ПЛАТФОРМЫ КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА

Дубинкин Д.М., Исмаилова Ш.Я., Ялышев А.В.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева



Информация о статье

Поступила:

9 ноября 2023 г.

Рецензирование:

8 декабря 2023 г.

Принята к печати:

14 декабря 2023 г.

Ключевые слова:

открытые горные работы, карьерный самосвал, породная грузовая платформа, вскрышная порода, МДЭ, песчаник, аргиллит, алевролит

Аннотация.

Обоснование конструктивных параметров грузовой платформы карьерного самосвала зависит от различных факторов, среди которых основным являются свойства перевозимой горной массы (вскрышная порода – песчаники, аргиллиты, алевролиты). Целью данного исследования является определение параметров модели сыпучего материала – вскрышной породы – для имитационного моделирования процессов погрузки и разгрузки грузовой платформы карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн методом дискретных элементов. Проведен анализ параметров вскрышной породы как сыпучей среды. Определены параметры модели песчанико-алевролитно-аргиллитовой сыпучей среды для имитационного моделирования методом дискретных элементов. Представлены результаты исследования по определению параметров модели вскрышной породы в зависимости от коэффициента сопротивления качению и насыпной плотности. Проведена валидация полученных результатов путем сравнения угла откоса полученных моделей и реальной геометрией песчанико-алевролитно-аргиллитовой шапки.

Для цитирования: Дубинкин Д.М., Исмаилова Ш.Я., Ялышев А.В. Определение параметров модели вскрышной породы для имитационного моделирования погрузки и разгрузки грузовой платформы карьерного самосвала // Техника и технология горного дела. – 2023. – № 4(23). – С. 76-90. – DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-76-90, EDN: UZTLLW

Введение

Экономические обстоятельства и развитие технологий способствуют совершенствованию процессов добычи полезных ископаемых [1, 2]. Исследования экскаваторно-автомобильного комплекса методом имитационного моделирования позволяет подбирать наилучшие решения выбора и создания новых горных машин [3, 4].

Одним из основных узлов карьерного самосвала (КС) является грузовая платформа (ГП) [5-11], основными характеристиками которой в зависимости от перевозимого сыпучего материала являются: грузоподъемность, т; геометрическая емкость, м³; объем SAE 2:1, м³. Обоснование конструктивных параметров породных ГП (массы, габаритных размеров несущих элементов конструкции, геометрии и материала) формирует ее основные характеристики для моделирования взаимодействия с сыпучей средой. Одновременно с этим определение параметров модели вскрышной породы как сыпучего материала является актуальной задачей для создания новых ГП КС, используемых для транспортирования горной массы.

Целью исследования является определение параметров модели вскрышных пород как сыпучего материала для дальнейших исследований процессов погрузки и разгрузки породной



грузовой платформы карьерного самосвала грузоподъемностью 240 тонн методом дискретных элементов.

Метод дискретных элементов

Моделирование методом дискретных элементов (Discrete element method – DEM, МДЭ) позволяет создавать имитационные модели, учитывающие особенности сыпучей среды и взаимодействие ее с конструкцией исследуемого объекта. Имитационное моделирование сыпучих материалов методом дискретных элементов позволяет учитывать множество параметров и факторов при построении различных моделей погрузки горной массы в транспортные сосуды. Все МДЭ основаны на моделировании сыпучего материала как совокупности отдельных частиц. В основе МДЭ лежат общеизвестные выражения баланса механического движения частицы.

Качество моделирования МДЭ зависит от выбора механических характеристик и гранулометрического состава сыпучего материала, коэффициентов, отражающих показатели взаимодействия частиц и поверхностей [12]. Принцип МДЭ позволяет моделировать каждую отдельную частицу и их взаимодействие [12-14].

Для определения параметров модели вскрышной породы (песчаника, аргиллита, алевролита) предстоит решить следующие задачи: рассмотреть возможность применения МДЭ для моделирования взорванных горных пород как сыпучих сред; определить требуемые параметры для получения модели вскрышной породы; выбрать параметры модели вскрышной породы, соответствующие реальным условиям эксплуатации при ее погрузке в ГП КС.

Исследования проводились с использованием программного обеспечения (ПО) *Rocky DEM*. Для определения параметров песчаника, алевролита и аргиллита выбраны модели частиц в виде сфер, для которых характерно использование модели линейного упругого контакта с линейными характеристиками адгезионных сил.

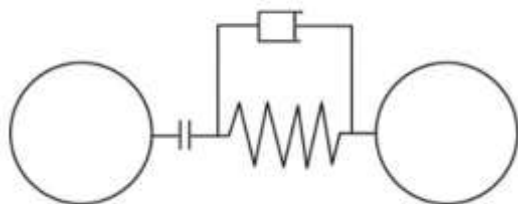


Рис. 1. Модель взаимодействия дискретных частиц

Fig. 1. Model of interaction of discrete particles

Выбранная модель взаимодействия дискретных частиц характеризуется следующими параметрами:

$\mu_{\text{покоя}}$ – коэффициент взаимодействия пар материалов в состоянии покоя;

$\mu_{\text{движения}}$ – коэффициент взаимодействия пар материалов в движении;

K_{COR} – коэффициент восстановления (реституции), представляет собой отношение конечной относительной скорости к начальной скорости после взаимодействия тел.

Параметры модели вскрышной породы (песчаника, аргиллита, алевролита)

Горные породы характеризуются различными физико-механическими характеристиками: твердость, удельный вес, разрыхляемость, пористость, влажность, набухание, водонепроницаемость, угол естественного откоса и т.п. [16].

Основные физические и физико-механические характеристики песчаников, алевролитов и аргиллитов приведены в Таблице 1 [16-25].

Песчаник, алевролит и аргиллит (Рис. 2) – три разных типа собственно-осадочных горных пород, которые образуются в результате катагенеза и литификации осадочных отложений различного гранулометрического состава [26-28].



Таблица 1. Физические и физико-механические характеристики вскрышной породы [16-25]
Table 1. Physical and mechanical characteristics of overburden [16-25]

Наименование	Песчаники	Алевролиты	Аргиллиты
Содержание в общей массе вскрыши, %	31÷80	14÷57	До 17
Угол внутреннего трения – ϕ , град.	30÷32	26÷30	26÷30
Плотность – ρ , т/м ³	2,32÷2,92	2,39÷2,81	2,43÷2,53
Модуль Юнга – E , ГПа	2,10÷6,40	1,30÷4,34	0,71÷3,03
Коэффициент Пуассона – ν	0,14÷0,33	0,18÷0,29	0,20÷0,32
Категория пород по экскавации	IV		

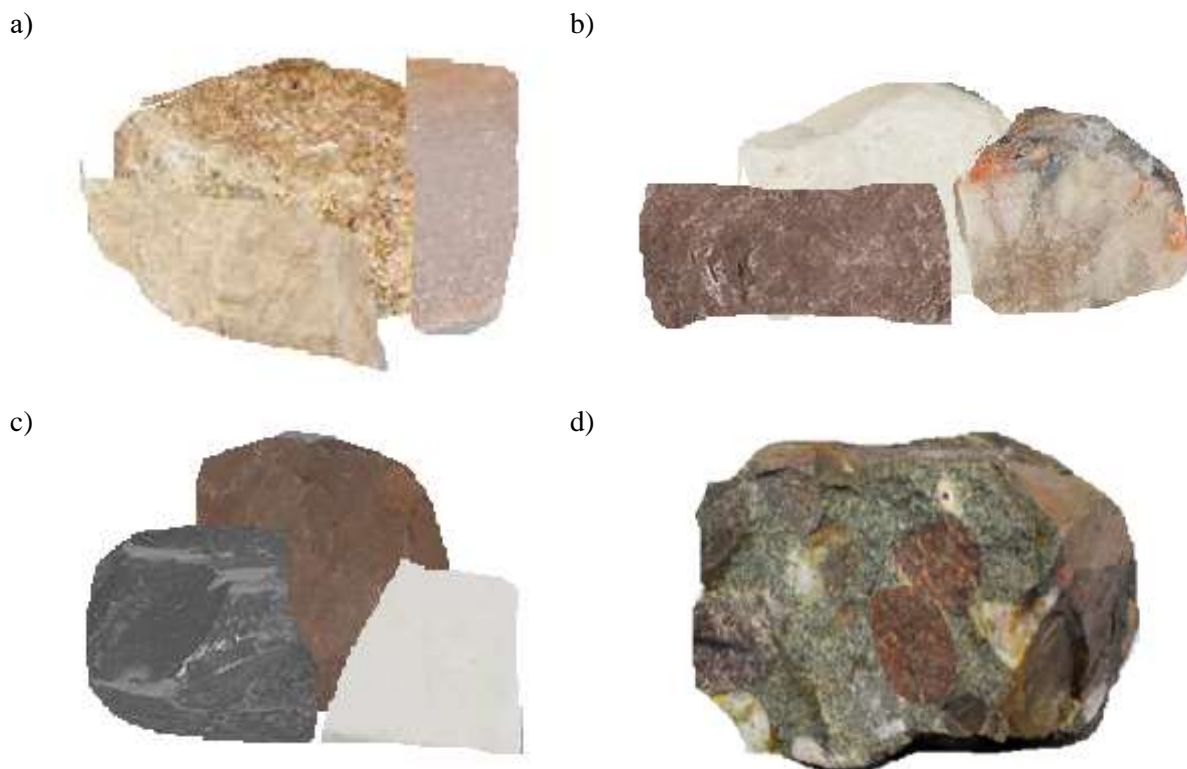


Рис. 2. Вскрышные горные породы: а) песчаники; б) алевролиты; в) аргиллиты; д) песчаник, алевролит и аргиллит под микроскопом
Fig. 2. Overburden rocks: a) sandstone; b) siltstone; c) mudstone; d) sandstone, siltstone and mudstone under the microscope

Песчаник – это обломочная осадочная горная порода с псаммитовой структурой, которая состоит главным образом из сцементированных песчаных частиц с размерами от 0,05 до 2 мм.

Алевролит – это обломочная осадочная горная порода с алевритовой структурой, состоящая главным образом из сцементированных пылеватых частиц с размерами от 0,002 до 0,05 мм. Алевролит обычно имеет сланцеватую текстуру.

Аргиллит – это глинистая осадочная горная порода с пелитовой структурой, состоящая из сцементированных глинистых частиц с размерами менее 0,002 мм.

Для имитационного моделирования МДЭ необходимо знать физико-механические свойства перевозимого сыпучего материала, к которым относятся:

- коэффициент покоя ($\mu_{\text{покоя}}$), отражает взаимодействие пар материалов в состоянии покоя;
- коэффициент движения ($\mu_{\text{движения}}$), отражает взаимодействие пар материалов в движении;



- коэффициент восстановления или реституции (K_{COR}), представляет собой отношение конечной скорости частиц после их взаимодействия к начальной скорости;
- модуль упругости Юнга (E , МПа), отражает способность твердого тела упруго деформироваться при приложении к нему силы;
- коэффициент Пуассона (ν), величина отношения относительного поперечного сжатия (расширения) к относительному продольному растяжению (сжатию);
- плотность моделируемой частицы (ρ_s , т/м³) – отношение массы минеральной частицы (без учета пор и трещин) к занимаемому ей объему;
- плотность горной породы в массиве (ρ , т/м³) – величина, которая определяется как отношение массы горной породы к занимаемому ей объему с учетом всех внутренних пор, трещин и воды в трещинах;
- насыпная плотность (ρ_n , т/м³) – зависит от плотности горной породы в массиве и от коэффициента разрыхления горной породы K_p , который, в свою очередь, зависит от гранулометрического состава и плотности укладки частиц [16, 36].

Насыпная плотность ρ_n определяется по формуле:

$$\rho_n = \frac{\rho}{K_p}, \text{ т/м}^3 \quad (1)$$

При моделировании дискретной среды в зависимости от принятой плотности горной породы по результатам исследования необходимо оценивать значение получаемой насыпной плотности.

В процессе экскавации и последующей загрузки насыпная плотность будет определять количество загружаемых ковшей и геометрию шапки насыпного материала в ГП КС. В случае моделирования МДЭ на насыпную плотность влияет гранулометрический состав и форма частиц. При определении объема насыпи значение насыпной плотности более значимо, чем значение плотности моделируемой частицы. Плотность, задаваемая в модели, при моделировании отдельных частиц сферами может отличаться от фактической в большую сторону для поддержания значения насыпной плотности.

Существует ряд работ, в которых описаны методы и порядок определения параметров модели горной массы для МДЭ [29-36]. В Таблице 2 приведены основные параметры модели вскрышных пород МДЭ [12-36].

Таблица 2. Параметры модели вскрышных пород

Table 2. Overburden model parameters

Показатель (коэффициент)	Вскрышная порода / Сталь	Вскрышная порода / Вскрышная порода
Трения покоя – $\mu_{\text{покоя}}$	0,35	0,60
Трения движения – $\mu_{\text{движения}}$	0,32	0,50
Восстановления (реституции) – K_{COR}	0,30	0,45
Литологическая разность	Песчаник, алевролит, аргиллит	
Плотность моделируемой частицы – ρ_s , т/м ³	2,54	
Насыпная плотность – ρ_n , т/м ³	1,90	
Модуль Юнга – E , ГПа	2,80	
Коэффициент Пуассона – ν	0,28	

Значения угла естественного откоса, угла внутреннего трения и т.п. вычисляются по результатам имитационного моделирования или задаются косвенно через параметры частиц и характер их взаимодействия. Поэтому существует ряд виртуальных экспериментов, которые помогают при валидации параметров модели и результатов исследований.

Геометрия насыпи вскрышной породы в ГП КС оценивается статическим (естественным) углом откоса. Данный показатель получают прямыми измерениями или фотограмметрическим



методом (Рис. 3) [31]. Для разных разрушенных горных пород, таких как песчаник, алевролит и аргиллит, углы естественного откоса имеют различные значения. Угол естественного откоса разрушенного песчаника обычно составляет приблизительно $\alpha \approx 30^\circ \div 35^\circ$ в зависимости от физических свойств минеральной массы этой горной породы. Угол естественного откоса разрушенного алевролита может изменяться в зависимости от пропорций глинистых, пылеватых и песчаных частиц в составе породы, и в среднем составляет приблизительно $\alpha \approx 25^\circ \div 30^\circ$. Угол естественного откоса аргиллита может быть относительно низким из-за высокой вязкости и большого содержания глинистых частиц в этой породе и обычно составляет приблизительно $\alpha \approx 15^\circ \div 20^\circ$ градусов. Однако следует отметить, что эти значения являются ориентировочными и могут варьироваться в зависимости от конкретных условий окружающей среды и минерального состава горных пород. На основе вышесказанного угол средний естественного откоса рассматриваемых вскрышных пород (песчаника, аргиллита, алевролита) принят за табличный $\alpha \approx 30^\circ$ [29, 33].

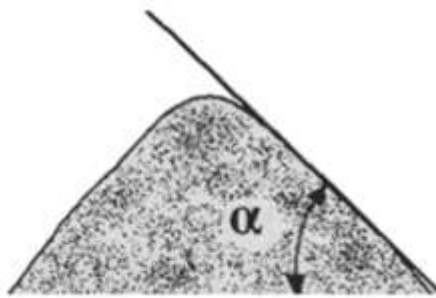


Рисунок 3. Угол естественного откоса
Figure 3. Angle of repose

Для моделирования сыпучей среды важно выбрать такую геометрию частиц, чтобы их поведение было приближено к поведению реальных частиц породы. МДЭ позволяет создавать различные частицы: сферы; составные частицы из совокупности сфер; полигональные; смешанные [24]. Наиболее распространенные частицы – сферы, они наименее требовательны к вычислительным ресурсам [14], что является важным критерием в случае моделирования частиц в ГП КС. Чтобы приблизить поведение частиц в виде сфер к поведению произвольных частиц в массиве использует коэффициент сопротивления качению (μR , КСК).

КСК – отношение, определяющее силу, противодействующую движению, когда тело катится по поверхности. КСК зависит от множества факторов, например, таких как материалы и характер взаимодействующих поверхностей и условия окружающей среды. Поскольку этот параметр влияет на эффективность передвижения и расход энергии, точное определение КСК имеет большое значение для определения параметров модели вскрышной породы (песчаника, аргиллита, алевролита).

Исследование модели вскрышной породы МДЭ

Для исследования модели вскрышной породы (песчаника, аргиллита, алевролита) МДЭ применялся метод SAOR – Static Angle of Repose [14, 30, 34-36]. Метод SAOR позволял определять статический (естественный) угол откоса полученной геометрии насыпи горной массы. Для этого в ПО *Rocky DEM* вводились параметры модели вскрышной породы, приведенные в таблице выше. Далее (Рис. 4) сыпучий материал помещался в полый цилиндр, который затем поднимался с постоянной скоростью на высоту до полного высыпания сыпучего материала. В результате формировалась геометрия шапки (насыпи) исследуемого сыпучего материала и определялся статический угол естественного откоса.

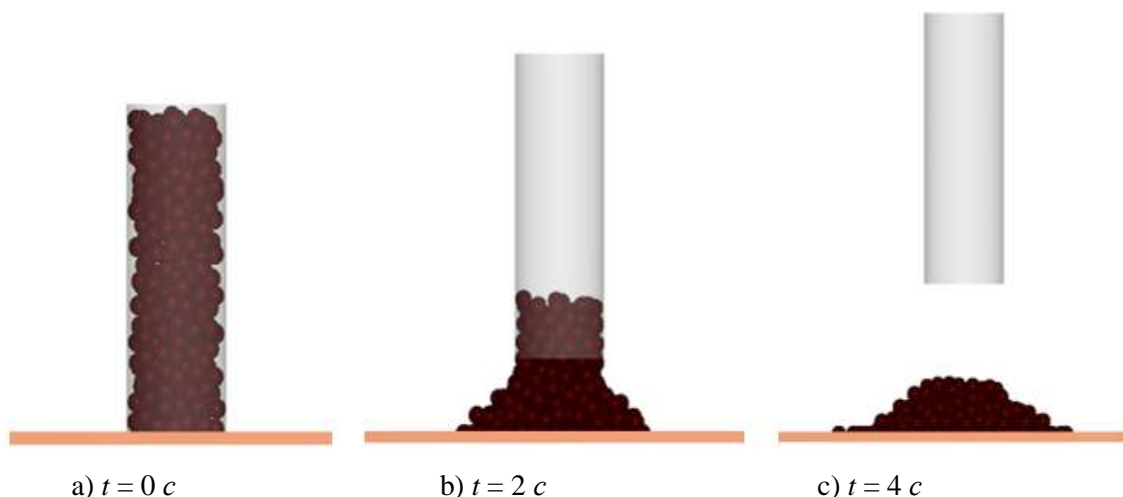


Рис. 4. Исследование модели вскрышной породы МДЭ методом SAOR
Fig. 4. Research overburden model by the SAOR method (DEM)

Эксперименты по исследованию зависимости влияния КСК на угол естественного откоса вскрышных пород показали, что увеличение или уменьшение КСК оказывает влияние на устойчивость геометрии насыпи вскрышных пород.

Результаты экспериментов по исследованию влияния КСК для вскрышных пород на угол естественного откоса приведены в Таблице 3.

Таблица 3. Результаты определения угла естественного откоса вскрышных пород
Table 3. The results of determining the angle of repose of overburden rocks

Коэффициент сопротивления качению, μR	Угол естественного откоса α , град.					Среднее значение α , град.
	1 случай	2 случай	3 случай	4 случай	5 случай	
0,25	27,80	27,10	19,60	29,10	25,60	25,84
0,30	25,50	28,00	30,20	29,10	24,00	27,36
0,35	34,80	32,10	29,90	32,20	27,40	31,28
0,40	30,90	34,50	28,40	32,30	34,20	32,06

Полученные данные, приведенные в Таблице 3, свидетельствуют о том, что средний угол естественного откоса находится в диапазоне от $25,84^\circ$ до $32,06^\circ$, что соответствует реальным значениям. Для более детального сравнения геометрии насыпей вскрышных пород (Рис. 5) выбраны два значения КСК $\mu R = 0,30$ ($\alpha = 28,0^\circ$) и $\mu R = 0,35$ ($\alpha = 32,1^\circ$).

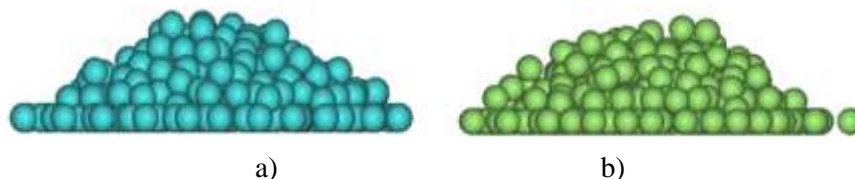


Рис. 5. Модели насыпей с различными коэффициентами сопротивления качению
Fig. 5. Models of embankments with different rolling resistance coefficients:
a) $\mu R = 0,30$; b) $\mu R = 0,35$



Результаты значений координат (минимальные (min), максимальные (max) и средние (avg)) расположений частиц в зависимости от высоты (h, м) и расстояния от центра насыпи (l, м) для КСК $\mu R = 0,35$ представлены в Таблице 4. Определение значений координат расположений частиц позволило построить геометрию шапок (насыпей) горной массы для различных КСК (Рис. 6).

Таблица 4. Координаты расположений частиц в зависимости от высоты (h, м) и расстояния от центра шапки (l, м)

Table 4. Coordinates of particle locations depending on height (h, m) and distance from the center of the cap (l, m)

max		min		avg	
l, м	h, м	l, м	h, м	l, м	h, м
0	1,5	0	1,5	0	1,5
0,5	1,65	0,5	1,30	0,5	1,40
1,2	1,60	1,2	1,00	1,2	1,25
1,8	1,20	1,80	0,50	1,80	0,8
2,4	0,80	2,40	0,20	2,40	0,50

По полученным значениям средних координат частиц строилась линейная линия тренда и графическим способом определялся естественный угол откоса (α , град.) модели вскрышной породы. Координаты расположений частиц в зависимости от высоты (h, м) и расстояния от центра шапки (l, м) изображены на Рис. 6.

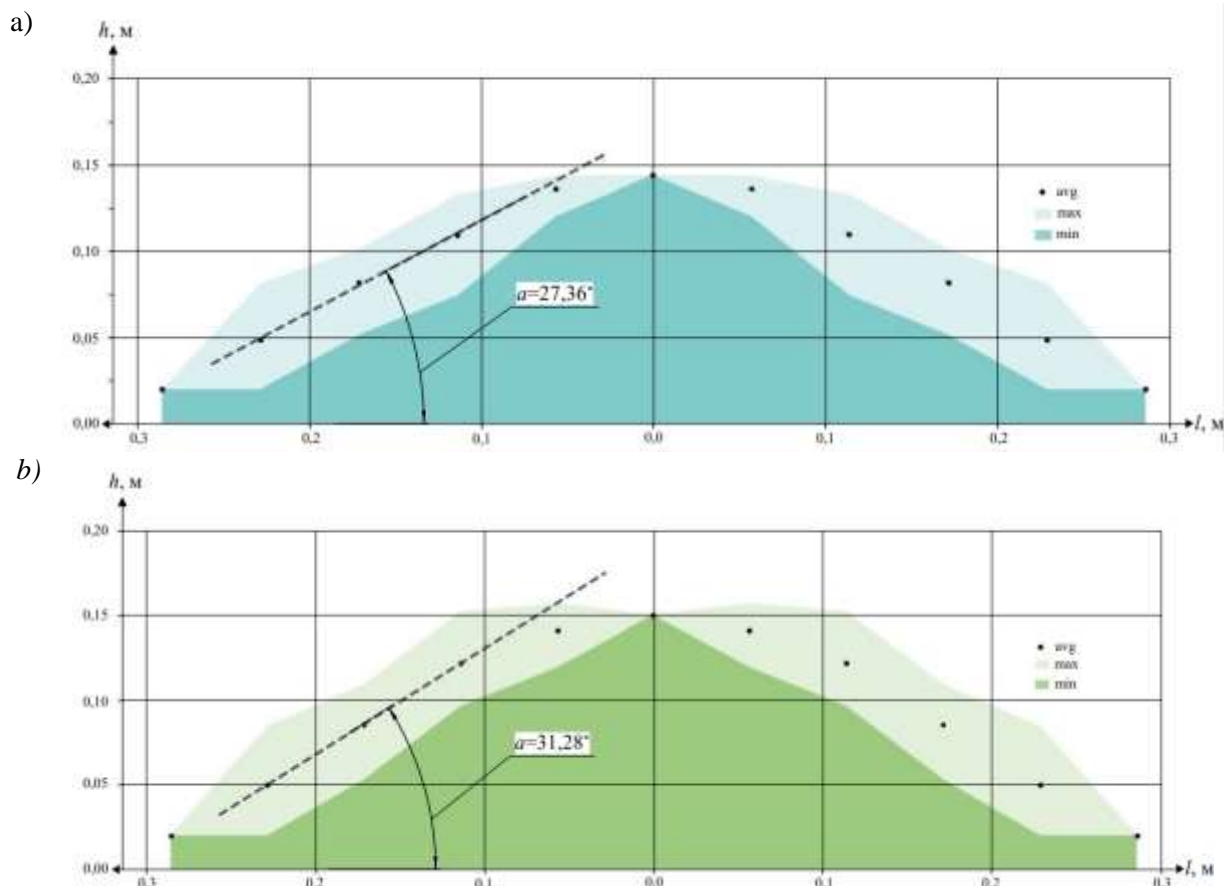


Рис. 6. Геометрии шапок в зависимости от коэффициентов сопротивления качению
Fig. 6. Geometry caps depending on rolling resistance coefficients a) $\mu R = 0,30$; b) $\mu R = 0,35$

Анализ геометрии насыпей вскрышных пород (песчаника, аргиллита, алевролита) в зависимости от КСК (Рис. 5; Рис. 6; Таблица 3) показывает, что:



- увеличение или уменьшение КСК оказывает влияние на устойчивость геометрии насыпей вскрышных пород;
- при повышении КСК угол естественного откоса увеличивается;
- средний угол естественного откоса находится в диапазоне от $25,84^\circ$ до $32,28^\circ$, что соответствует реальным значениям;
- среди рассмотренных моделей вскрышных пород наиболее близкой к реальному естественному углу откоса, является модель с $\alpha = 31,28^\circ$ и КСК $\mu R = 0,35$.

а)



б)



в)



Рис. 7. Угол естественного откоса вскрышных пород в грузовой платформе карьерного самосвала БелАЗ: а) крупная фракция; б) средняя фракция; в) мелкая фракция

Fig. 7. The angle of the natural slope of the overburden in the dump body BelAZ: a) large fraction; b) medium fraction; c) small fraction



Валидация параметров модели вскрышной породы

При моделировании МДЭ существует возможность подбирать коэффициенты до тех пор, пока модель горной массы не будет соответствовать фактическому поведению сыпучей среды. Параметры модели вскрышной породы, требуемые для моделирования, определяются на специализированном лабораторном оборудовании и/или путем виртуальных испытаний МДЭ. Угол естественного откоса, наблюдаемый в действительных условиях эксплуатации КС, представлен на Рис. 7.

Результаты моделируемой геометрии насыпи вскрышной породы (смеси песчаника, аргиллита, алевролита) в ГП КС представлены на Рис. 8.

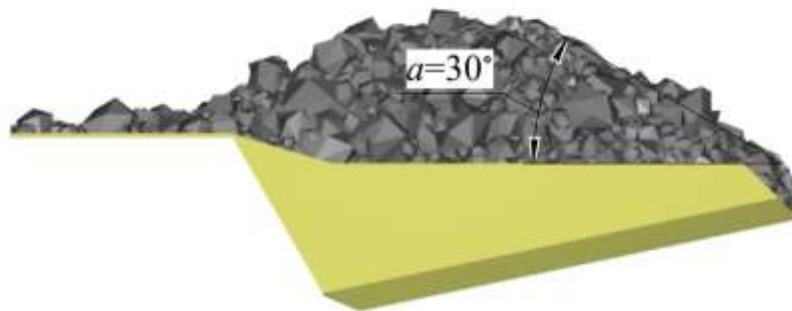


Рис. 8. Модель геометрии насыпи вскрышной породы в грузовой платформе БелАЗ
Fig. 8. Simulated geometry of the overburden cap in the dump body mining truck BelAZ

Анализ фактических углов естественного откоса и полученной в модели вскрышных пород в грузовой платформе КС БелАЗ (Рис. 7, 8), показывает высокую валидацию моделируемой и реальной геометрии насыпи вскрышной породы в ГП КС при имитационном моделировании МДЭ.

По результатам имитационного моделирования определены параметры модели вскрышной породы (смеси песчаника, аргиллита, алевролита) как сыпучей среды. Разработанная модель вскрышной породы необходима для дальнейших исследований процесса погрузки и разгрузки, а также обоснования конструктивных параметров породных ГП КС; кроме того, использование этой модели позволяет применять полученные результаты при решении геоэкологических проблем горного производства, в частности, при моделировании параметров искусственных фильтрующих массивов из отходов горного производства – вскрышных пород [37-40].

Заключение

В статье представлены значения параметров модели вскрышной породы (смеси песчаника, аргиллита, алевролита): коэффициент сопротивления качению $\mu R = 0,35$; средний естественный угол откоса разрушенной породы $\alpha = 31,28^\circ$; насыпная плотность $\rho_n = 1,9 \text{ т/м}^3$, полученные опытным путем.

Установлено, что увеличение или уменьшение коэффициента сопротивления качению μR оказывает влияние на устойчивость геометрии насыпей вскрышных пород: при повышении коэффициента сопротивления качению угол естественного откоса увеличивается, геометрия насыпи более стабильна, чем при меньших значениях μR .

Проведенная валидация моделируемой МДЭ и реальной геометрии насыпи вскрышной породы выявила соответствие применяемой модели формы частиц горной породы и их взаимодействия друг с другом и с материалом ГП КС. Таким образом, полученные значения параметров модели вскрышной породы предполагается использовать в качестве исходных данных для последующего имитационного моделирования процессов погрузки и разгрузки при разработке новой геометрии ГП КС грузоподъемностью 240 тонн.



Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2022-016 от 07.04.2022 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Создание высокотехнологичного производства автономных карьерных самосвалов грузоподъемностью 240 тонн с отечественным тяговым приводом для работы в системе цифровой добычи полезных ископаемых открытым способом», при участии ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2023 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Информация об авторах

Дубинкин Дмитрий Михайлович, к.т.н., доцент кафедры горных машин и комплексов
e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Исмаилова Шахназ Ямиловна, аспирант, младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии»
e-mail: ismailovashja@kuzstu.ru

Ялышев Алексей Витальевич, аспирант, младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии»
e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева
650000, Российская Федерация, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

Список литературы

1. Хазин М.Л. Направления развития карьерного автотранспорта // Недропользование. – 2021. – Т. 21. – № 3. – С. 144-150. – DOI 10.15593/2712-8008/2021.3.7.
2. Воронов А.Ю., Хорешок А.А., Воронов Ю.Е., Дубинкин Д.М., Воронов А.Ю. Оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов // Горная промышленность. – 2022. – № 5. – С. 92-98. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-92-98.
3. Дубинкин Д.М. Основы цифрового создания автономных карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 2(160). – С. 39-50. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50.
4. Дубинкин Д.М. Методика определения нагрузок, действующих при погрузке и разгрузке грузовой платформы (кузова) карьерного самосвала // Горное оборудование и электромеханика. – 2022. – № 3(161). – С. 31-49. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-3-31-49.
5. Яковлев В.Л., Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Мариев П.Л. Требования к совершенствованию конструкций карьерных автосамосвалов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – № 3-4(20-21). – С. 86-92.
6. Журавлев А.Г. Выбор рациональной грузоподъемности карьерных автосамосвалов для конкретных условий транспортирования // Транспорт Урала. – 2014. – № 4(43). – С. 96-101.
7. Дубинкин Д.М., Исмаилова Ш.Я. Анализ технических характеристик карьерных самосвалов грузоподъемностью от 218 т до 255 т // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2022 : Сборник материалов XIX Международной научно-практической конференции, 23–24 ноября 2022 года – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 4061-4066.



8. Исмаилова Ш.Я. Удельная объемная грузоподъемность карьерных самосвалов // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Кемерово, 30 ноября – 01 декабря 2022 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 635-640.
9. Аксенов В.В., Дубинкин Д.М., Исмаилова Ш.Я., Ялышев А.В. Обзор конструкций породных платформ карьерных самосвалов // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте : Сборник материалов V Международной научно-практической конференции, 19–20 октября 2021 года, – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2021. – С. 324-332.
10. Исмаилова Ш. Я. Математическая модель и проведение имитационного моделирования породной грузовой платформы карьерного самосвала // Россия молодая : Сборник материалов XIV Всероссийской, научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 423051-423055.
11. Дубинкин Д.М., Ялышев А.В., Исмаилова Ш.Я. Тенденции развития грузовых платформ карьерных самосвалов // Горная промышленность. – 2023. – № 3. – С. 72-76. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-3-72-76.
12. Дубинкин Д.М., Ялышев А.В. Определение статических нагрузок на борт грузовой платформы карьерного самосвала // Горная промышленность. – 2022. – № 6. – С. 137-144. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-6-137-144.
13. Читалов Л.С., Львов В.В. Обзор компьютерных программ для моделирования процессов рудоподготовки и обогащения // Современные образовательные технологии в подготовке специалистов для минерально-сырьевого комплекса : Сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 05–06 марта 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 1517-1523.
14. Chitalov L.S., Lvov V.V. New approaches in mineral raw materials comminution tests modelling // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals, Saint-Petersburg, 27–29 ноября 2019 года. – Saint-Petersburg, 2021. – P. 146-151.
15. Литвин О.И., Хорешок А.А., Дубинкин Д.М., Марков С.О., Стенин Д.В., Тюленев М.А. Анализ методик расчета производительности карьерных гидравлических экскаваторов // Горная промышленность. – 2022. – № 5. – С. 112-120. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120.
16. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация : межгосударственный стандарт : издание официальное : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 июля 2020 г. № 384-ст : дата введения 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020. – III, 37, [1] с. – Текст : непосредственный.
17. Ольховатенко В.Е. Инженерно-геологические условия разработки открытым способом Алардинского угольного месторождения Кузбасса и оценка устойчивости бортов карьера [Текст] : монография – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. – 88 с.
18. Жариков В. П. Рекультивация гидроотвалов вскрышных пород на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 1. – С. 42-47.
19. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д., Мухина А.С. Инженерно-геологические и экологические проблемы при эксплуатации и рекультивации высоких отвалов на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 8. – С. 164-178. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_8_0_164.
20. Васильева А.Д. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса. дис. канд. техн. наук: 25.00.16 / Васильева Анастасия Дмитриевна – Санкт-Петербург. 2019. – 186 с.
21. Открытые горные работы – XXI век. Справочник. Том 1 / Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. и другие. Под ред. Анистратова К.Ю.: М., ООО «Система максимум», 2019. 640 с.: ил.
22. Открытые горные работы – XXI век. Справочник. Том 2 / Анистратов Ю.И., Анистратов К.Ю. и другие. Под ред. Анистратова К.Ю.: М., ООО «Система максимум», 2019. 872 с.: ил.
23. Шаламанов В.А. Исследование свойств горных пород для использования их при строительстве технологических дорог // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : сборник материалов XII международной научно-практической конференции, Кемерово, 22–23 ноября 2017 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2017. – С. 609.



24. Innovative numerical modelling of technogenic rock arrays structure / S. Markov, E. Tyuleneva, M. Tyulenev, O. Litvin // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 15. – Article no. 01011. – DOI 10.1051/e3sconf/20171501011. – EDN YMYQWV
25. Ожигин Д.С. Управление состоянием устойчивости прибортового массива на угольных разрезах. дис. канд. техн. наук: 6D070700 / Ожигин Дмитрий Сергеевич – Караганда. 2018. – 155 с.
26. Использование вскрышных пород для повышения экологической безопасности угледобывающего региона / Е. В. Макридин, М. А. Тюленев, С. О. Марков, Ю. В. Лесин, Е. В. Мурко // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 12. – С. 89-102. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102.
27. Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса / С. О. Марков, Е. В. Мурко, Ф. С. Непша // Горные науки и технологии. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 259-266. – DOI 10.17073/2500-0632-2021-4-259-266.
28. Open pit mine wastewater filtration in the overburden rock debris: case study / E. Makridin, S. Markov, E. Murko, I. Ondrejmisikova // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 303. – Article 01033. DOI 10.1051/e3sconf/202130301033
29. Andreas Svanberg. Full-Scale Modelling and Simulation of Bucket Filling and Wear for Mining Rope Shovels.2021. – 140 с.
30. Dominik Müller, Eric Fimbinger, Clemens Brand. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis. Powder Technology. – doi:10.1016/j.powtec.2021.01.010.
31. Wójcik A., Kłapa P., Mitka B., Śladek J. The use of the photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials. Measurement 2018, 115, 19–26.
32. Hamzah M. Beakawi Al-Hashemi, Omar S. Baghabra Al-Amoudi, A review on the angle of repose of granular materials, Powder Technology, Volume 330, 2018,397-417.
33. Oggeri C., Fenoglio T., Godio A, Vinai R.Overburden management in open pits: options and limits in large limestone quarries. International Journal of Mining Science and Technology 29(2). 2018, 12 с. DOI:10.1016/j.ijmst.2018.06.011
34. ASTM D 6773-02. Standard Shear Test Method for Bulk Solids Using the Schulze Ring Shear Tester (2006).
35. ASTM D7891-15 Standard Test Method for Shear Testing of Powders Using the Freeman Technology FT4 Powder Rheometer Shear Cell.
36. Heitor Otacilio Nogueira Altino, Giovani Aud Lourenço, Carlos Henrique Ataíde. System development for bulk density data acquisition of granular materials: Effect of operational conditions and optimization. Powder Technology. –. doi:10.1016/j.powtec.2021.06.013.
37. On the need to consider the lithological composition of overburden rocks in the design of waste water treatment plants at open pit mines / E. Murko, Ju. Janočko, E. Makridin, M. Kapko // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 315. – Article 02013. DOI 10.1051/e3sconf/202131502013
38. Theoretical Background of Quarry Wastewater Filtering Through Filters of Coarse-Grained Blasted Overburden Rocks / E. Makridin, S. Markov, E. Murko [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 174. – Article no. 01056. – DOI 10.1051/e3sconf/202017401056.
39. Using of Shell Filtering Constructions for Concentrating Plant's Coal Slurry Dewatering / E. Murko, V. Kalashnikov, A. Gorbachev, I. Mukhomedzyanov // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 105. – Article no. 02029. – DOI 10.1051/e3sconf/201910502029.
40. Синергетический подход к решению геоэкологических проблем угледобывающих и углеперерабатывающих субкластеров / А. А. Хорешок, О. И. Литвин, Д. М. Дубинкин [и др.] // Уголь. – 2022. – № 12(1161). – С. 82-87. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-12-82-87.

DETERMINATION OF OVERBURDEN MODEL PARAMETERS FOR SIMULATION MODELING OF LOADING AND UNLOADING OF ROCK CARGO PLATFORM OF QUARRY DUMP TRUCK

Dmitry M. Dubinkin, Shakhnaz Ya. Ismailova, Alexey V. Yalyshev

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University



Article info

Received:
09 November 2023

Revised:
08 December 2023

Accepted:
14 December 2023

Keywords: open pit mining, quarry dump truck, rock cargo platform, overburden, DEM, sandstone, mudstone, siltstone

Abstract.

Justification of the design parameters of the load platform of the quarry dump truck depends on various factors, among which the main ones are the properties of the transported rock mass (overburden - sandstones, mudstones, siltstones). The purpose of this study is to determine the parameters of the model of bulk material - overburden rock - for simulation modeling of the loading and unloading processes of the cargo platform of a 240-ton quarry dump truck using the discrete element method. The parameters of overburden rock as a bulk medium are analyzed. The parameters of the model of sandstone-siltstone-mudstone bulk medium for simulation modeling by the method of discrete elements are determined. The results of the study on determination of overburden model parameters depending on the rolling resistance coefficient and bulk density are presented. Validation of the obtained results is carried out by comparing the slope angle of the obtained models and the real geometry of the sandstone-siltstone-mudstone cap.

For citation Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya., Yalyshev A.V. (2023) Determination of overburden model parameters for simulation modeling of loading and unloading of rock cargo platform of quarry dump truck, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 4(23):76. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-76-90, EDN: UZTLLW

The work is financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement dated 07.04.2022 № 075-11-2022-016 with PJSC KAMAZ on the integrated project "Development of high-tech production of autonomous mining dump trucks with a lifting capacity of 240 tons with a domestic traction drive for operation in an open-source digital mining system", with participation of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University in terms of research, development and technological works.

References

1. Hazin M.L. Napravleniya razvitiya kar'ernogo avtotransporta // Nedropol'zovanie. – 2021. – T. 21. – № 3. – S. 144-150. – DOI 10.15593/2712-8008/2021.3.7.
2. Voronov A.Ju., Horeshok A.A., Voronov Ju.E., Dubinkin D.M., Voronov A.Ju. Optimizacija parametrov jekskavatorno-avtomobil'nyh kompleksov razrezov // Gornaja promyshlennost'. – 2022. – № 5. – S. 92-98. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-92-98.
3. Dubinkin D.M. Osnovy cifrovogo sozdaniya avtonomnyh kar'ernyh samosvalov // Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. – 2022. – № 2(160). – S. 39-50. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-2-39-50.
4. Dubinkin D.M. Metodika opredelenija nagruzok, dejstvujushih pri pogruzke i razgruzke gruzovoj platformy (kuzova) kar'ernogo samosvala // Gornoe oborudovanie i jelektromehanika. – 2022. – № 3(161). – S. 31-49. – DOI 10.26730/1816-4528-2022-3-31-49.
5. Jakovlev V.L., Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Mariev P.L. Trebovanija k sovershenstvovaniju konstrukcij kar'ernyh avtosamosvalov // Mehanika mashin, mehanizmov i materialov. – 2012. – № 3-4(20-21). – S. 86-92.
6. Zhuravlev A.G. Vybor racional'noj gruzopod#emnosti kar'ernyh avtosamosvalov dlja konkretnyh uslovij transportirovanija // Transport Urala. – 2014. – № 4(43). – S. 96-101.
7. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ja. Analiz tehniceskikh harakteristik kar'ernyh samosvalov gruzopod#emnost'ju ot 218 t do 255 t // Prirodnye i intellektual'nye resursy Sibiri. Sibresurs 2022 : Sbornik materialov XIX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 23–24 nojabrja 2022 goda – Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2022. – S. 4061-4066.
8. Ismailova Sh.Ja. Udel'naja ob#emnaja gruzopod#emnost' kar'ernyh samosvalov // Innovacii v informacionnyh tehnologijah, mashinostroenii i avtotransporte : Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, Kemerovo, 30 nojabrja – 01 2022 goda. – Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tehniceskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2022. – S. 635-640.
9. Aksenov V.V., Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ja., Yalyshev A.V. Obzor konstrukcij porodnyh platform kar'ernyh samosvalov // Innovacii v informacionnyh tehnologijah, mashinostroenii i avtotransporte : Sbornik



- materialov V Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii, 19–20 oktjabrja 2021 goda, – Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2021. – S. 324-332.
10. Ismailova Sh. Ja. Matematičeskaja model' i provedenie imitacionnogo modelirovanija porodnoj gruzovoj platformy kar'ernogo samosvala // Rossiya molodaja : Sbornik materialov XIV Vserossijskoj, nauchno-praktičeskoj konferencii molodyh učenyh s mezhdunarodnym uchastiem, Kemerovo, 18–21 aprelja 2023 goda. – Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2023. – S. 423051-423055.
 11. Dubinkin D.M., Jalyšev A.V., Ismailova Sh.Ja. Tendencii razvitiya gruzovyh platform kar'ernyh samosvalov // Gornaja promyšlennost'. – 2023. – № 3. – S. 72-76. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-3-72-76.
 12. Dubinkin D.M., Jalyšev A.V. Opredelenie statičeskikh nagruzok na bort gruzovoj platformy kar'ernogo samosvala // Gornaja promyšlennost'. – 2022. – № 6. – S. 137-144. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-6-137-144.
 13. Chitalov L.S., L'vov V.V. Obzor komp'juternyh programm dlja modelirovanija processov rudopodgotovki i obogashhenija // Sovremennye obrazovatel'nye tehnologii v podgotovke specialistov dlja mineral'no-syr'evogo kompleksa : Sbornik nauchnyh trudov III Vserossijskoj nauchnoj konferencii, Sankt-Peterburg, 05–06 marta 2020 goda. – Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskij gornyj universitet, 2020. – S. 1517-1523.
 14. Chitalov L.S., Lvov V.V. New approaches in mineral raw materials comminution tests modelling // Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals, Saint-Petersburg, 27–29 nojabrja 2019 goda. – Saint-Petersburg, 2021. – P. 146-151.
 15. Litvin O.I., Horeshok A.A., Dubinkin D.M., Markov S.O., Stenin D.V., Tjulenev M.A. Analiz metodik rasčeta proizvoditel'nosti kar'ernyh gidravličeskikh jekskavatorov // Gornaja promyšlennost'. – 2022. – № 5. – S. 112-120. – DOI 10.30686/1609-9192-2022-5-112-120.
 16. GOST 25100-2020. Soils. Classification : mezhdgosudarstvennyj standart : izdanie oficial'noe : vveden v dejstvije Prikazom Federal'nogo agentstva po tehničeskomu regulirovaniju i metrologii ot 21 ijulja 2020 g. № 384-st : data vvedenija 2021-01-01. – M.: Standartinform, 2020. – III, 37, [1] s. – Tekst : neposredstvennyj.
 17. Ol'hovatenko V.E. Inženerno-geologičeskie uslovija razrabotki otkrytym sposobom Alardinskogo ugol'nogo mestorozhdenija Kuzbassa i ocenka ustojčivosti bortov kar'era [Tekst] : monografija – Tomsk : Izd-vo Tom. gos. arhit.-stroit. un-ta, 2015. – 88 s.
 18. Zharikov V. P. Rekul'tivacija gidrootvalov vskryšnyh porod na razrezah Kuzbassa // Gornyj informacionno-analitičeskij bjulleten' (nauchno-tehničeskij zhurnal). – 2012. – № 1. – S. 42-47.
 19. Kutepov Ju.I., Kutepova N.A., Vasil'eva A.D., Muhina A.S. Inženerno-geologičeskie i jekologičeskie problemy pri jekspluatacii i rekul'tivacii vysokih otvalov na razrezah Kuzbassa // Gornyj informacionno-analitičeskij bjulleten' (nauchno-tehničeskij zhurnal). – 2021. – № 8. – S. 164-178. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_8_0_164.
 20. Vasil'eva A.D. Inženerno-geologičeskoe obosnovanie ustojčivosti vysokih otvalov ugol'nyh mestorozhdenij Kuzbassa. dis. kand. tehn. nauk: 25.00.16 / Vasil'eva Anastasija Dmitrievna – Sankt-Peterburg. 2019. – 186 s.
 21. Otkrytie gornye raboty – XXI vek. Spravočnik. Tom 1 / Anistratov Ju.I., Anistratov K.Ju. i drugie. Pod red. Anistratova K.Ju.: M., OOO «Sistema maksimum», 2019. 640 s.: il.
 22. Otkrytie gornye raboty – XXI vek. Spravočnik. Tom 2 / Anistratov Ju.I., Anistratov K.Ju. i drugie. Pod red. Anistratova K.Ju.: M., OOO «Sistema maksimum», 2019. 872 s.: il.
 23. Šalamanov V.A. Issledovanie svojstv gornyh porod dlja ispol'zovanija ih pri stroitel'stve tehnologičeskikh dorog // Bezopasnost' zhiznedejatel'nosti predprijatij v promyšlennno razvityh regionah : sbornik materialov XII mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii, Kemerovo, 22–23 nojabrja 2017 goda. – Kemerovo: Kuzbasskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet im. T.F. Gorbacheva, 2017. – S. 609.
 24. Innovative numerical modelling of technogenic rock arrays structure / S. Markov, E. Tyuleneva, M. Tyulenev, O. Litvin // E3S Web of Conferences. – 2017. – Vol. 15. – Article no. 01011. – DOI 10.1051/e3sconf/20171501011. – EDN YMYQWV.
 25. Ozhigin D.S. Upravlenie sostojaniem ustojčivosti pribortovogo massiva na ugol'nyh razrezah. dis. kand. tehn. nauk: 6D070700 / Ozhigin Dmitrij Sergeevich – Karaganda. 2018. – 155 s.
 26. Ispol'zovanie vskryšnyh porod dlja povyšhenija jekologičeskoj bezopasnosti ugledobывajushhego regiona / E. V. Makridin, M. A. Tjulenev, S. O. Markov, Ju. V. Lesin, E. V. Murko // Gornyj informacionno-analitičeskij bjulleten' (nauchno-tehničeskij zhurnal). – 2020. – № 12. – S. 89-102. – DOI 10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102.
 27. Granulometricheskij sostav otval'nyh massivov razrezov Kuzbassa / S. O. Markov, E. V. Murko, F. S. Nepsha // Gornye nauki i tehnologii. – 2021. – T. 6, № 4. – S. 259-266. – DOI 10.17073/2500-0632-2021-4-259-266.
 28. Open pit mine wastewater filtration in the overburden rock debris: case study / E. V. Makridin, S. Markov, E. Murko, I. Ondrejmkova // E3S Web of Conferences : The 10th Anniversary Russian-Chinese Symposium



- “Clean Coal Technologies: Mining, Processing, Safety, and Ecology”, Kemerovo, 19–21 октября 2021 года. Vol. 303. – Kemerovo: EDP Sciences, 2021. – P. 01033.
29. Andreas Svanberg. Full-Scale Modelling and Simulation of Bucket Filling and Wear for Mining Rope Shovels. 2021. – 140 c.
 30. Dominik Müller, Eric Fimbinger, Clemens Brand. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis. Powder Technology. – doi:10.1016/j.powtec.2021.01.010.
 31. Wójcik A., Klapa P., Mitka B., Śladek J. The use of the photogrammetric method for measurement of the repose angle of granular materials. Measurement 2018, 115, 19–26.
 32. Hamzah M. Beakawi Al-Hashemi, Omar S. Baghabra Al-Amoudi, A review on the angle of repose of granular materials, Powder Technology, Volume 330, 2018, 397–417.
 33. Oggeri C., Fenoglio T., Godio A, Vinai R. Overburden management in open pits: options and limits in large limestone quarries. International Journal of Mining Science and Technology 29(2). 2018, 12 c. DOI:10.1016/j.ijmst.2018.06.011
 34. ASTM D 6773-02. Standard Shear Test Method for Bulk Solids Using the Schulze Ring Shear Tester (2006).
 35. ASTM D7891-15 Standard Test Method for Shear Testing of Powders Using the Freeman Technology FT4 Powder Rheometer Shear Cell.
 36. Heitor Otacilio Nogueira Altino, Giovani Aud Lourenço, Carlos Henrique Ataíde. System development for bulk density data acquisition of granular materials: Effect of operational conditions and optimization. Powder Technology. – doi:10.1016/j.powtec.2021.06.013.
 37. On the need to consider the lithological composition of overburden rocks in the design of waste water treatment plants at open pit mines / E. Murko, Ju. Janočko, E. Makridin, M. Kapko // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 315. – Article 02013. DOI 10.1051/e3sconf/202131502013
 38. Theoretical Background of Quarry Wastewater Filtering Through Filters of Coarse-Grained Blasted Overburden Rocks / E. Makridin, S. Markov, E. Murko [et al.] // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 174. – Article no. 01056. – DOI 10.1051/e3sconf/202017401056.
 39. Using of Shell Filtering Constructions for Concentrating Plant's Coal Slurry Dewatering / E. Murko, V. Kalashnikov, A. Gorbachev, I. Mukhomedzyanov // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 105. – Article no. 02029. – DOI 10.1051/e3sconf/201910502029.
 40. Sinergeticheskiy podkhod k resheniyu geokologicheskikh problem ugledobyvayushchikh i uglererabatyvayushchikh subklasterov / A. A. Khoreshok, O. I. Litvin, D. M. Dubinkin [i dr.] // Ugol'. – 2022. – № 12(1161). – S. 82–87. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-12-82-87.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2023 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Information about the authors

Dmitry M. Dubinkin, C. Sc. in Engineering, associate professor
e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Shakhnaz Ya. Ismailova – postgraduate student, junior researcher of the Digital Technologies Research Center
e-mail: ismailovashja@kuzstu.ru

Alexey V. Yalyshev – postgraduate student, junior researcher of the Digital Technologies Research Center
e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University
650000, Russian Federation, Kemerovo, 28 Vesennaya St.

