

**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ
GEOTECHNOLOGY**

Научная статья

УДК 004.94 : 622.256.753 : 622.678.53

DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-134-143

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ
ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙНОЙ ПРОСЫПИ
ШАХТНОГО СКИПА****Аксенов Владимир Валерьевич¹, Копытов Александр Иванович²,
Пашков Дмитрий Алексеевич², Вети Ахмед Аиманович^{2,3}**¹ Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева³ ЗСФ ООО «АЗОТ МАЙНИНГ СЕРВИС»

* для корреспонденции: 55vva42@mail.ru

Аннотация.

В процессе реконструкции горных предприятий важное значение имеет совмещение углубки вертикального ствола с работой эксплуатационного подъема, осуществляющего выдачу горной массы на поверхность. Безопасность проходчиков при этом обеспечивается предохранительными полками.

В соответствии с проектными решениями горное предприятие проходит несколько этапов реконструкции на протяжении всего жизненного цикла, что необходимо для поддержания или наращивания производственной мощности и максимального извлечения полезного ископаемого в границах горного отвода.

Углубка вертикальных стволов является ключевым этапом реконструкции, поскольку только после ее завершения становится возможным выполнение горнопроходческих работ на очередном горизонте. Эти работы направлены на подготовку к очистной выемке новых запасов.

При углубке ствола в условиях действующего эксплуатационного подъема для защиты рабочих от возможного падения содержимого подъемных сосудов требуется сооружение предохранительных полков, способных воспринимать значительные ударные нагрузки.

Существующие методы определения ударных нагрузок на предохранительные полки в полной мере не отвечают современным требованиям. Это обусловлено тем, что расчетные формулы основаны преимущественно на эмпирических зависимостях, содержащих множество трудноопределяемых коэффициентов, а при определении параметров полков не используются компьютерные математические модели и методы имитационного моделирования.

Разработка конструктивных решений клиновых предохранительных полков напрямую зависит от параметров математической модели имитационного моделирования.

В настоящем исследовании с целью обеспечения достоверности результатов моделирования в ПО Rocky DEM выполнен анализ влияния геометрии частиц и размера конечно-элементной сетки мишени на поверхности клинового предохранительного полка, применяемой для экспорта ударных нагрузок.

**Информация о статье**

Поступила:

24 декабря 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

15 января 2026 г.

Принята к публикации:

12 февраля 2026 г.

Опубликована:

29 июня 2026 г.

Ключевые слова:

Вертикальный ствол,
скиповой подъем, клиновой
предохранительный полк,
аварийная просыпь,
магнетитовая руда, МДЭ

Для цитирования: Аксенов В. В., Копытов А. И., Пашков Д. А., Вети А. А. Обоснование параметров

модели дискретных элементов для имитационного моделирования аварийной просыпи шахтного скипа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2026. № 2 (174). С. 134-143. DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-134-143, EDN: JLONIQ

Введение

При строительстве подземных инженерных сооружений, взаимодействующих с сыпучей средой, широко применяется метод дискретных элементов (Discrete Element Method, DEM), который позволяет моделировать поведение отдельных частиц сыпучей среды с учетом их геометрии, размеров и физико-механических свойств. Такой подход обеспечивает возможность анализа траекторий движения частиц горной массы, расчета контактных нагрузок и других параметров, возникающих при взаимодействии с инженерными сооружениями. Корректное задание параметров сыпучей среды и граничных условий является ключевым аспектом построения модели, определяющим достоверность и адекватность получаемых результатов [1–2].

Коллектив авторов на протяжении ряда лет проводит исследования по определению параметров клиновых предохранительных полков для углубки вертикальных стволов шахт, оснащенных многоканатными подъемами [3]. В рамках данной работы поставлена задача обоснования параметров модели дискретных элементов в программном комплексе Rocky DEM для определения нагрузок, возникающих при соударении просыпи горной массы с конструкцией предохранительного полка. Модель разработана для условий ствола «Скиповой» шахты «Шерегешская» и предназначена для имитационного моделирования соударения просыпи горной массы шахтного скипа 1СН-20 с клиновым предохранительным полком [4].

Основная часть

В программном комплексе Rocky DEM корректный выбор типа и геометрии частиц

является критически важным, поскольку он напрямую определяет точность моделирования физических процессов и достоверность получаемых результатов [5, 6]. Геометрические характеристики частиц существенно влияют на широкий спектр параметров моделирования, включая [7–9]:

- физико-механические свойства (плотность, модуль упругости, коэффициенты трения и восстановления);

- динамику движения частиц (траектория, скорость, характер вращения и стабилизация движения);

- характер взаимодействия частиц (контактные силы, величина деформаций, потери энергии, вероятность формирования стабильных структур);

- вычислительные параметры модели (точность расчетов, численная устойчивость, длительность и ресурсоемкость моделирования).

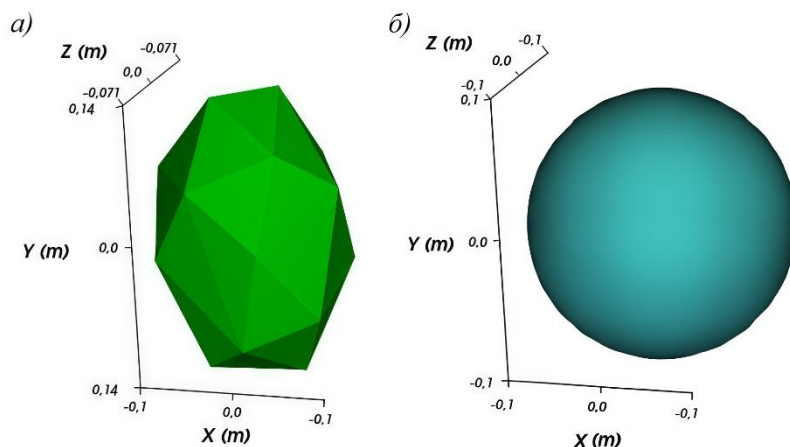
Параметры моделируемых частиц представлены на Рис. 1.

Геометрические характеристики частицы «Многогранник» включают (Рис. 2, а) [10–12]:

- соотношение сторон по вертикали (Vertical Aspect Ratio) – отношение высоты частицы к ее ширине. Параметр определяет форму и размер частицы, а также позволяет задавать ее линейные размеры, адаптируясь к реальным условиям;

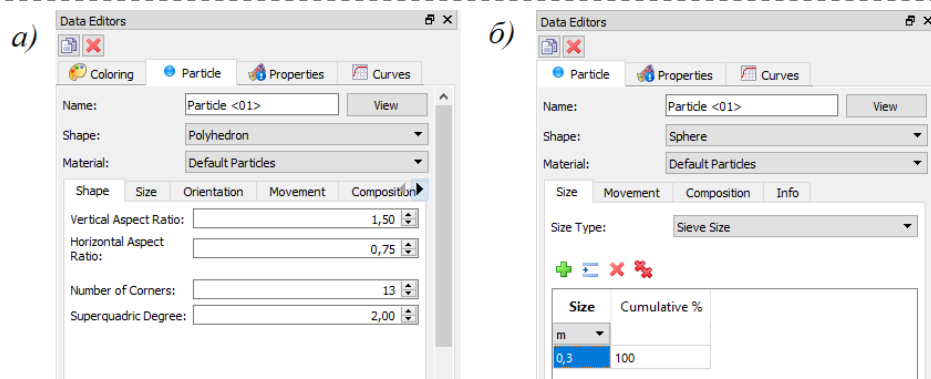
- соотношение сторон по горизонтали (Horizontal Aspect Ratio) – отношение ширины частицы к ее высоте. Параметр определяет форму частицы относительно оси, параллельной горизонтали, и позволяет создавать частицы с разными пропорциями;

- количество углов (Number of Corners) – определяет число углов и вершин многогранника. От этого параметра зависит



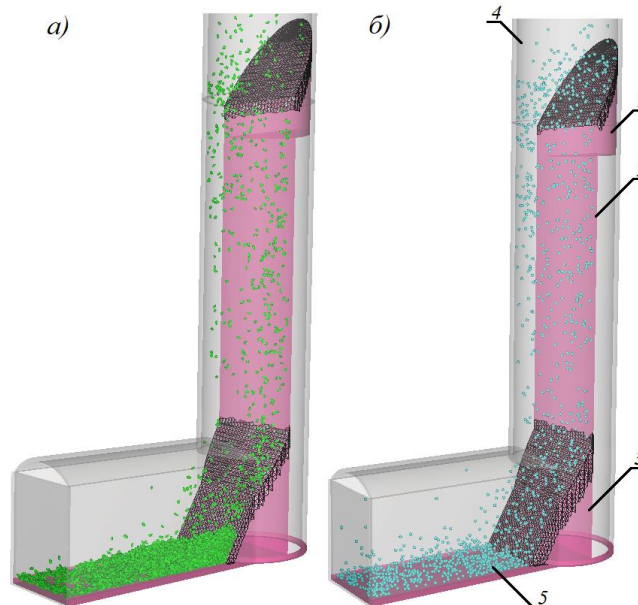
а – частица многогранник (polyhedron); б – частица сфера (sphere)

Рис. 1. Геометрия частиц в ПО Rocky DEM
Fig. 1. Particle geometry in Rocky DEM software



а – многогранник; б – сфера

*Рис. 2. Интерфейс характеристик частиц в ПО Rocky DEM
Fig. 2. Particle properties interface in Rocky DEM software*



а – частица многогранник; б – частица сфера

1 – верхний предохранительный полок; 2 – разделительная стенка; 3 – нижний предохранительный полок;

4 – вертикальный ствол; 5 – отбойная ниша

*Рис. 3. DEM-модели, импортированные в ПО Rocky DEM
Fig. 3. DEM models imported into Rocky DEM software*

точность аппроксимации реальной формы частицы. Большое количество углов позволяет точнее передать сложную геометрию, но увеличивает вычислительную нагрузку.

– степень суперквадрика (Superquadric Degree) – параметр, задающий форму многогранника и степень отклонения от базового кубоида. Изменение степени позволяет моделировать частицы различной формы (от кубообразных до сфероподобных или звездчатых).

Геометрические характеристики частицы «Сфера» включают (Рис. 2, б):

– размер (Size) – параметр, определяющий диаметр сферической частицы. Данная характеристика является основной для описания геометрии сферы и напрямую влияет на все аспекты ее поведения в модели.

Обоснование выбора типа частиц выполнено на основе анализа DEM-моделей предохранительного полка, параметры которых приведены в Таблице 2 и на Рис. 1, 3.

На Рис. 4 представлена динамика изменения нормальной нагрузки (кН/м²) на верхний и нижний предохранительные полки (ВПП и НПП) в зависимости от времени. График отражает результаты моделирования для сферических частиц и многогранников при высоте сброса 100 метров.

Анализ графика позволяет выделить следующие особенности:

1) Фазы взаимодействия частиц

– начальная фаза (4-8 с) характеризуется резким возрастанием нагрузки по мере

Таблица 1. Параметры DEM-модели для определения геометрии частиц
Table 1. Parameters of the DEM model for defining particle geometry

Параметр	DEM – модель 1	DEM – модель 2
Геометрия частиц	Сфера	Многогранник
Высота сброса частиц, м	100	100
Диаметр вертикального ствола, м	6,5	
Массовый расход частиц, т/сек*	2,5	
Время генерирования частиц, сек*	20	
Размер частиц, м**	0,30	
Размеры впускного отверстия:*		
высота, мм	840	
ширина, мм	1900	
Угол наклона верхнего ПП, град	60	
Угол наклона нижнего ПП, град	60	

* Соответствует времени и скорости разгрузки для скипа 1СН-20

** В соответствии с принятой технологией дробления магнетитовой руды в условиях шахты «Шерегешская» АО ЕВРАЗ-ЗСМК максимальный размер фракции составляет 0,3 метра.

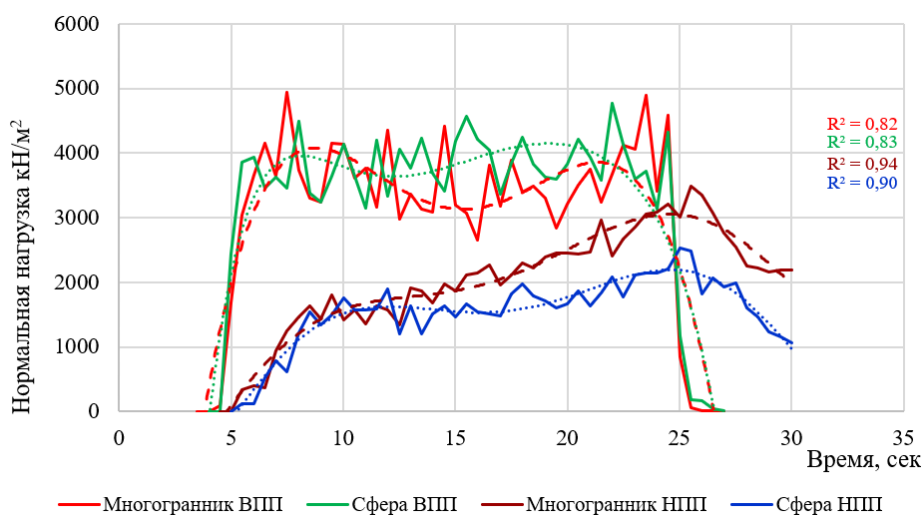


Рис. 4. Изменение нормальной нагрузки на ПП для сферических частиц и многогранников при высоте сброса 100 метров
Fig. 4. Change in normal load on the protective shelf for spherical particles and polyhedron at a drop height of 100 meters

увеличения числа соударений частиц с поверхностью;

– стационарная фаза (8-24 с): устанавливается динамическое равновесие, при котором средняя нагрузка остается практически постоянной, а ее колебания обусловлены случайным характером соударений;

– завершающая фаза (24-30 с): нагрузка снижается вследствие уменьшения плотности потока частиц и прекращения их активного взаимодействия с поверхностью.

2) Величина нагрузок

– максимальная нормальная нагрузка на верхний предохранительный полк для многогранников на 4,49% больше, чем для сфер, а на нижний предохранительный полк – на 38,26%. Это объясняется сложной геометрией многогранников и большим количеством граней, что приводит к неравномерному распределению

нагрузки и, как следствие, к увеличению локальных напряжений;

– в интервале времени с 30-й по 32-ю секунду наблюдается накопление частиц на наклонной плоскости амортизирующего устройства нижнего предохранительного полка, что приводит к созданию дополнительной статической нагрузки (Рис. 5).

На основании проведенного анализа можно заключить, что форма частиц оказывает значительное влияние на величину нормальной нагрузки, причем многогранники создают более интенсивное воздействие на предохранительный полк, чем сферические частицы.

Для дальнейшего исследования приняты частицы в форме многогранников.

Для экспорта нагрузок, возникающих при соударении частиц с поверхностями верхнего и нижнего предохранительных полков, в

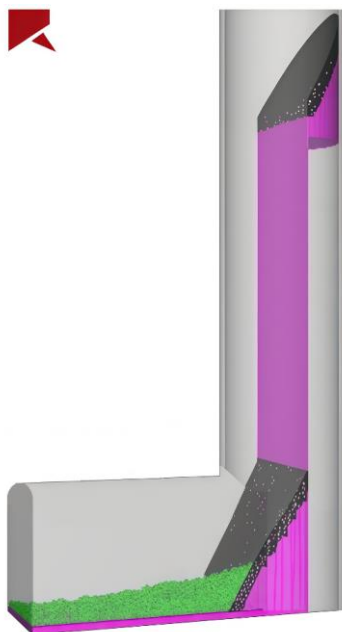


Рис. 5. Накапливание частиц на нижнем предохранительном полке
Fig. 5. Particle accumulation on the lower protective shelf

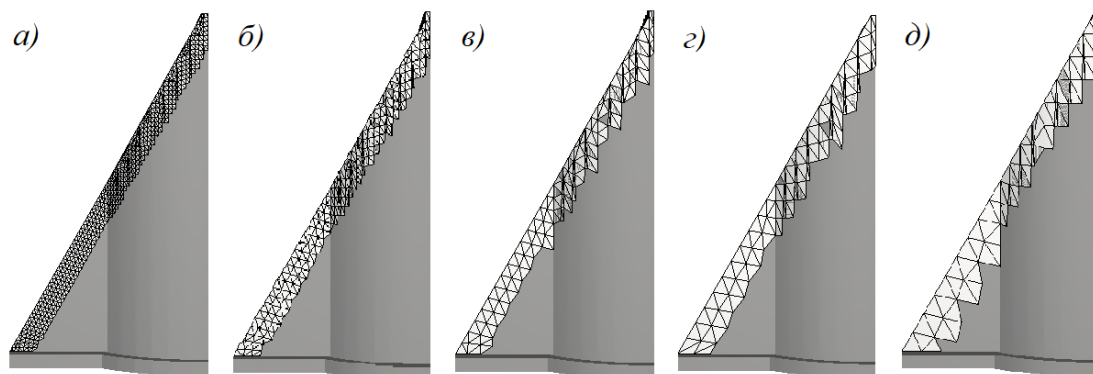
программном комплексе Rocky DEM выполняется построение конечно-элементной сетки на поверхностях-мишенях (Рис. 6–7) [13].

Размер ячеек КЭ-сетки влияет на точность определения контактных нагрузок [13]. Для определения оптимального размера ячейки рассматриваются DEM-модели, параметры которых представлены в Таблице 2.

На Рис. 8 представлен график изменения нормальной нагрузки (кН/м^2) на нижний предохранительный полок от времени при различных размерах ячеек КЭ-сетки.

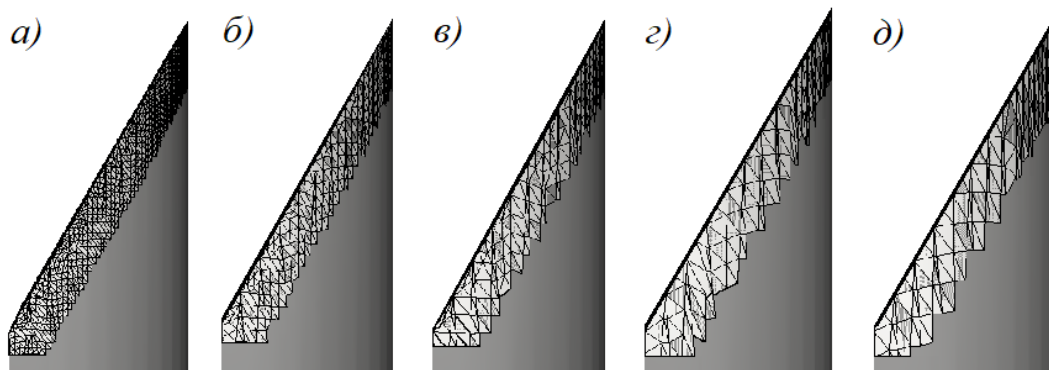
График, представленный на Рис. 8, показывает, что:

- при размере КЭ-сетки 0,1 м максимальная нагрузка составляет $16677,98 \text{ кН/м}^2$;
- при размере КЭ-сетки 0,2 м максимальная нагрузка составляет $5302,63 \text{ кН/м}^2$, что на 68,2% меньше, чем при размере КЭ-сетки 0,1 м;
- при размере КЭ-сетки 0,3 м максимальная нагрузка составляет $2526,88 \text{ кН/м}^2$, что на 52,4% меньше, чем при размере КЭ-сетки 0,2 м;
- при размере КЭ-сетки 0,4 м максимальная нагрузка составляет $1726,84 \text{ кН/м}^2$, что на 31,7%



а – размер КЭ-сетки 0,1 м; б – размер КЭ-сетки 0,2 м; в – размер КЭ-сетки 0,3 м; г – размер КЭ-сетки 0,4 м;
д – размер КЭ-сетки 0,5 м

Рис. 6. КЭ-сетка нижнего предохранительного полка
Fig. 6. Finite element mesh of the lower protective shelf



а – размер КЭ-сетки 0,1 м; б – размер КЭ-сетки 0,2 м; в – размер КЭ-сетки 0,3 м; г – размер КЭ-сетки 0,4 м;
д – размер КЭ-сетки 0,5 м

Рис. 7. КЭ-сетка верхнего предохранительного полка
Fig. 7. Finite element mesh of the upper protective shelf

Таблица 2. Параметры DEM-модели для определения геометрии частиц
Table 2. Parameters of the DEM model for defining particle geometry

Параметр	DEM – модель 1	DEM – модель 2
Геометрия частиц	Сфера	Многогранник
Высота сброса частиц, м	100	100
Диаметр вертикального ствола, м		6,5
Массовый расход частиц, т/сек*		2,5
Время генерирования частиц, сек*		20
Размер частиц, м**		0,30
Размеры впускного отверстия:*		
высота, мм		840
ширина, мм		1900
Угол наклона верхнего ПП, град		60
Угол наклона нижнего ПП, град		60

* Соответствует времени и скорости разгрузки для скипа 1СН-20

** В соответствии с принятой технологией дробления магнетитовой руды в условиях шахты «Шерегешская» АО ЕВРАЗ-ЗСМК максимальный размер фракции составляет 0,3 метра.

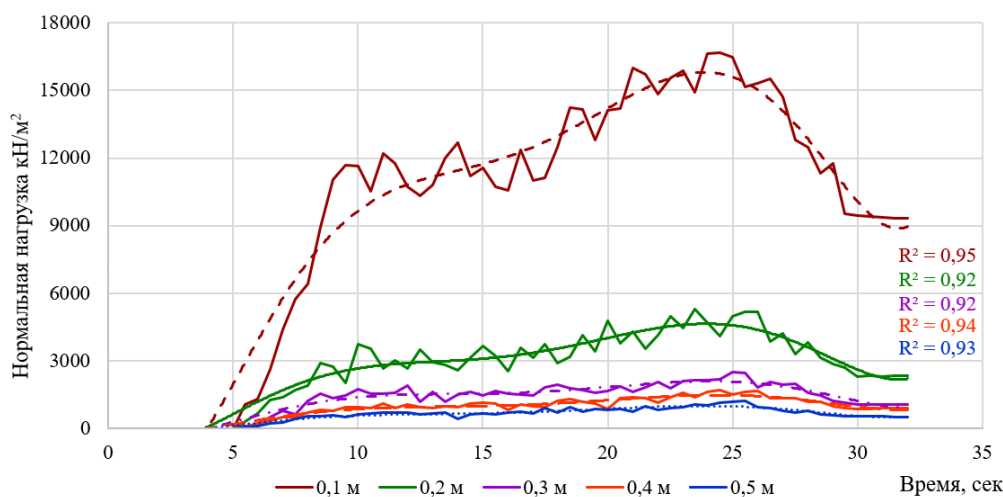


Рис. 8. График изменения нормальной нагрузки (кН/м²) на нижний предохранительный полок
Fig. 8. Graph of normal load (kN/m²) variation on the lower protective shelf

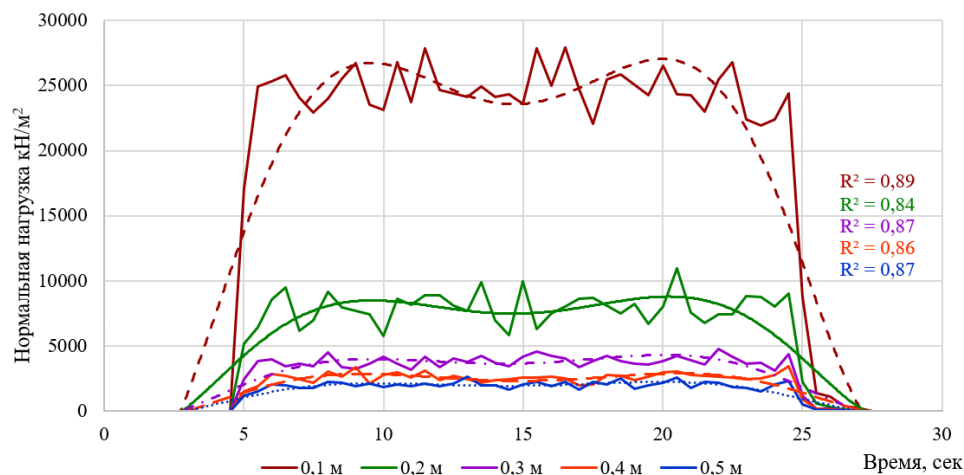


Рис. 9. График изменения нормальной нагрузки (кН/м²) на верхний предохранительный полок
Fig. 9. Graph of normal load (kN/m²) variation on the upper protective shelf

меньше, чем при размере КЭ-сетки 0,3 м;
– при размере КЭ-сетки 0,5 м максимальная нагрузка составляет 1217,22 кН/м², что на 29,5% меньше, чем при размере КЭ-сетки 0,4 м.

На Рис. 9 представлен график изменения нормальной нагрузки (кН/м²) на верхний предохранительный полок от времени при различных размерах ячеек КЭ-сетки.

График, представленный на Рис. 9, показывает, что:

- при размере КЭ-сетки 0,1 м максимальная нагрузка составляет 27883,40 кН/м²;
- при размере КЭ-сетки 0,2 м максимальная нагрузка составляет 10936,77 кН/м², что на 60,8% меньше, чем при размере 0,1 м;
- при размере КЭ-сетки 0,3 м максимальная нагрузка составляет 4772,85 кН/м², что на 56,4% меньше, чем при размере 0,2 м;
- при размере КЭ-сетки 0,4 м максимальная нагрузка составляет 3429,65 кН/м², что на 28,1% меньше, чем при размере 0,3 м;
- при размере КЭ-сетки 0,5 м максимальная нагрузка составляет 2650,36 кН/м², что на 22,7% меньше, чем при размере 0,4 м.

На основании проведенного анализа можно заключить, что увеличение размера ячейки КЭ-сетки приводит к существенному снижению максимальной нагрузки. При увеличении размера ячейки с 0,1 м до 0,5 м нагрузка снижается в 13 раз для нижнего предохранительного полка и в 10 раз – для верхнего, при этом интенсивность снижения нагрузки замедляется.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что дальнейшее укрупнение элементов сетки оказывает все меньшее влияние на расчетные значения нагрузок.

Основываясь на принципах метода дискретных элементов, анализе литературных данных и результатах собственного моделирования, можно утверждать, что оптимальный размер сетки, выбираемый в соответствии с конкретной исследовательской задачей, позволяет достичь баланса между вычислительной эффективностью и точностью результатов, одновременно минимизируя погрешности вычислений [13, 15–20].

Для дальнейшего исследования принят размер ячейки конечно-элементной сетки на поверхностях-мишенях, равный 0,30 м.

Заключение

1) Обоснован тип частиц для имитационного моделирования просыпи шахтного скипа 1СН-20 в условиях ствола «Скиповой» шахты «Шерегешская» АО «ЕВРАЗ-ЗСМК».

2) Определен оптимальный размер ячейки КЭ-сетки на поверхности клинового предохранительного полка для моделирования аварийной просыпи шахтного скипа 1СН-20.

3) Полученные параметры модели дискретных элементов служат исходными данными для определения нагрузок на клиновой предохранительный полк при аварийной просыпи магнетитовой руды в ПО Rocky DEM.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Forsström D., Jonsén P. Calibration and

validation of a large scale abrasive wear model by coupling DEM-FEM: Local failure prediction from abrasive wear of tipper bodies during unloading of granular material // *Engineering Failure Analysis*. 2016. № 66. Pp. 274–283. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.007.

2. Zhan L., Peng C., Zhang B., Wu W. A surface mesh represented discrete element method (SMRDEM) for particles of arbitrary shape // *Powder Technology*. 2021. Vol. 377. Pp. 760–779. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.046.

3. Патент на полезную модель № 139338 «Клиновой предохранительный полк» Авторы: Копытов А. И., Войтов М. Д., Вети А. А., заявл. 28.11.2013 опубли. 14.03.2014.

4. Аксенов В. В., Копытов А. И., Пашков Д. А., Вети А. А. Определение параметров модели магнетитовой руды Шерегешевского железорудного месторождения для имитационного моделирования аварийной просыпи шахтного скипа // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2025. № 4 (170). С. 145–156. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-145-156, EDN: JUXARW.

5. Белоглазов И. И., Иконников Д. А. Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2016. Т. 59. № 9. С. 780786.

6. Кокоев С. Г., Юсупов Г. А., Феоктистов А. Ю., Трофимов А. В., Румянцев А. Е., Кузьмин С. В. Обоснование параметров капитального рудоспуска на основе дискретно-элементного моделирования // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. S37. С. 158–167.

7. Феоктистов А. Ю., Каменецкий А. А., Блехман Л. И., Васильков В. Б., Скрыбин И. Н., Иванов К. С. Применение метода дискретных элементов для моделирования процессов в горно-металлургической промышленности // *Записки Горного института*. 2011.

8. Boikov, A., Savelev R., Payor V., Potapov A. Universal Approach for DEM Parameters Calibration of Bulk Materials // *Symmetry*. 2021. № 13. 1088.

9. Müller D., Fimbinger E., Brand C. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis // *Powder Technology*. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.010.

10. Опалев А. С., Паливода А. А. Моделирование системы жидкость – твердые частицы при сопряженном решении задачи в Rocky Dem и Ansys Fluent // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 12-1. С. 78–93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_78.

11. Xu C., Liu Z., Zhou L., Zhao Y. Development of a DEM method for predicting wear distribution on particle scale // *Powder Technology*. 2024. Vol. 432. P. 119126. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119126.

12. Rojas E., Vergara V., Soto R. Case study: Discrete element modeling of wear in mining hoppers

// Wear. 2019. № 430–431 Pp. 120–125.

13. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В. Определение рациональной сетки поверхностей для моделирования горного оборудования в среде DEM // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 3 (179). С. 61–68. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-61-68. EDN: TURLMI.

14. Филиппов В. Н., Христоробов Е. А., Волков А. В. Определение оптимальных параметров распределения веерных скважинных зарядов ВВ при отбойке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 2 (156). С. 92–100. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-92-100. EDN: XJUIAK.

15. O'Sullivan C. Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective. 1st ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. DOI: 10.1201/9781482266498.

16. Dratt M., Katterfeld A. Coupling of FEM and

DEM simulations to consider dynamic deformations under particle load // Granular Matter. 2017. Vol. 19. P. 49. DOI: 10.1007/s10035-017-0728-3.

17. Pöschel T. Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms. Berlin : Springer, 2005. DOI: 10.1007/3-540-27720-X.

18. Yan Z.; Wilkinson S. K.; Stitt E. H.; Marigo M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: Understanding their impact on model predictions using statistical analysis // Comput. Part. Mech. 2015. № 2. Pp. 283–299.

19. Westbrink F., Elbel A., Schwung A., Ding S. Optimization of DEM Parameters using Multi-Objective Reinforcement Learning // Powder Technol. 2021. № 309. Pp. 602–616.

20. Yan, Y., Helmons R., Schott D. Pin-on-Disc Modelling with Mesh Deformation Using Discrete Element Method // Materials. 2022. № 15. 1813. DOI: 10.3390/ma15051813.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Аксенов Владимир Валерьевич, докт. техн. наук, ФИЦ УУХ СО РАН, e-mail: 55vva42@mail.ru

Копытов Александр Иванович, докт. техн. наук, профессор кафедры РМПИ, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: L01BDV@yandex.ru

Пашков Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник НЦЦТ, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

Вети Ахмед Аиманович, горный инженер, научный сотрудник (Научно-исследовательская лаборатория цифровой трансформации предприятий минерально-сырьевого комплекса, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева; 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28). Ведущий технолог ГМК и ПВВ (ЗСФ ООО «АЗОТ МАЙНИНГ СЕРВИС» 653035, Россия, Кузбасс, г. Прокопьевск, ул. Пионерская, 15), e-mail: wetti_a@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Аксенов Владимир Валерьевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы.

Копытов Александр Иванович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования.

Пашков Дмитрий Алексеевич – научный менеджмент, концептуализация исследования, написание текста, сбор и анализ данных, выводы.

Вети Ахмед Аиманович – научный менеджмент, концептуализация исследования, написание текста, сбор и анализ данных, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

JUSTIFICATION OF DISCRETE ELEMENT METHOD PARAMETERS FOR SIMULATION OF EMERGENCY SPILLAGE FROM A MINE SKIP

Vladimir V. Aksenov¹, Aleksandr I. Kopytov²,
Dmitriy A. Pashkov², Akhmed A. Wetti^{2,3}

¹ Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

³ West Siberian Branch of Azot Mining Service LLC

* for correspondence: 55vva42@mail.ru



Article info

Received:

24 December 2025

Accepted for publication:

15 January 2026

Accepted:

12 February 2026

Published:

29 June 2026

Keywords: Vertical shaft, skip hoist, wedge-type protective shelf, emergency spillage, magnetite ore, DEM

Abstract.

During the reconstruction of mining enterprises, it is essential to integrate the deepening of vertical shafts with the continuous operation of the production hoist responsible for transporting mined rock to the surface. The safety of workers involved in shaft deepening is ensured by the installation of protective platforms. According to design specifications, a mining enterprise undergoes several reconstruction stages throughout its life cycle, which is necessary to maintain or increase production capacity and to maximize mineral recovery within the boundaries of the mining allotment. Deepening of vertical shafts represents a critical stage of reconstruction, as only upon its completion can development workings be carried out at the next level. These operations are aimed at preparing new ore reserves for subsequent extraction. When shaft deepening is performed under conditions of an active production hoist, protective platforms must be installed to safeguard workers from the potential falling contents of the hoisting vessels. These platforms must be capable of withstanding substantial impact loads. Existing methods for estimating impact loads on protective platforms do not fully satisfy modern engineering requirements. This is primarily due to the use of empirical design formulas containing numerous difficult-to-determine coefficients and the absence of computer-based mathematical modeling and simulation techniques in parameter determination. The development of design solutions for wedge-type protective platforms is directly dependent on the parameters of the simulation-based mathematical model. In this study, to ensure the reliability of simulation results in the Rocky DEM environment, an analysis was performed to evaluate the influence of particle geometry and the finite-element mesh size of the target surface of the wedge-type protective platform used for exporting impact load data.

For citation: Aksenov V.V., Kopytov A.I., Pashkov D.A., Wetti A.A. Justification of discrete element method parameters for simulation of emergency spillage from a mine skip. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2026; 2(174):134-143. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2026-2-134-143, EDN: JLONIQ

REFERENCES

1. Forsström D., Jonsén P. Calibration and validation of a large scale abrasive wear model by coupling DEM-FEM: Local failure prediction from abrasive wear of tipper bodies during unloading of granular material. *Engineering Failure Analysis*. 2016; 66:274–283. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.007.
2. Zhan L., Peng C., Zhang B., Wu W. A surface mesh represented discrete element method (SMRDEM) for particles of arbitrary shape. *Powder Technology*. 2021; 377:760–779. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.046.
3. Patent na poleznuyu model' № 139338 «Klinovoj predohranitel'nyj polok» Avtory: Kopytov A.I., Vojtov M.D., Veti A.A., zayavl. 28.11.2013 opubl. 14.03.2014.
4. Aksenov V.V., Kopytov A.I., Pashkov D.A., Veti A.A. Opredelenie parametrov modeli magnetitovoj rudy Sheregeshevskogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya dlya imitacionnogo modelirovaniya avarijnoj prosypy shahtnogo skipa. *Vestnik Kuzbasskogo*

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2025; 4(170):145–156. DOI: 10.26730/1999-4125-2025-4-145-156. EDN: JUXARW.

5. Beloglazov I.I., Ikonnikov D.A. Primenenie metoda diskretnyh elementov dlya modelirovaniya processa izmel'cheniya gornyh porod v shchekovoj drobilke. *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2016; 59(9):780–786.

6. Kokoev S.G., Yusupov G.A., Feoktistov A.Yu., Trofimov A.V., Rumyancev A.E., Kuz'min S.V. Obosnovanie parametrov kapital'nogo rudospuska na osnove diskretno-elementnogo modelirovaniya. *Gornyy informacion-no-analiticheskij byulleten'*. 2019; S37:158–167.

7. Feoktistov A.Yu., Kameneckij A.A., Blekhman L.I., Vasil'kov V.B., Skryabin I.N., Ivanov K.S. Primenenie metoda diskretnyh elementov dlya modelirovaniya processov v gomo-metallurgicheskoy promyshlennosti. *Zapiski Gornogo instituta*. 2011.

8. Boikov A., Savelev R., Payor V., Potapov A. Universal Approach for DEM Parameters Calibration of Bulk Materials. *Symmetry*. 2021; 13:1088.

9. Müller D., Fimlinger E., Brand C. Algorithm for the determination of the angle of repose in bulk material analysis. *Powder Technology*. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.010.

10. Opalev A.S., Palivoda A.A. Modelirovanie sistemy zhidkost' – tverdye chasticy pri sopryazhennom reshenii zadachi v Rocky Dem i Ansys Fluent. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2022; 12-1:78–93. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_78.

11. Xu C., Liu Z., Zhou L., Zhao Y. Development of a DEM method for predicting wear distribution on particle scale. *Powder Technology*. 2024; 432:119126. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119126.

12. Rojas E., Vergara V., Soto R. Case study: Discrete element modeling of wear in mining hoppers. *Wear*. 2019; 430–431:120–125.

13. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Opredelenie racional'noj setki poverhnostej dlya modelirovaniya gorno-go oborudovaniya v srede DEM. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2025; 3(179):61–68. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-61-68. EDN: TURLMI.

14. Filippov V.N., Hristolyubov E.A., Volkov A.V. Opredelenie optimal'nyh parametrov raspredeleniya veernykh skvazhinnykh zaryadov VV pri otbojke. *Vestnik*

Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2023; 2(156):92–100. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-2-92-100. EDN: XJUIAK.

15. O'Sullivan C. Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective. 1st ed. Boca Raton: CRC Press; 2011. DOI: 10.1201/9781482266498.

16. Dratt M., Katterfeld A. Coupling of FEM and DEM simulations to consider dynamic deformations under particle load. *Granular Matter*. 2017; 19:49. DOI: 10.1007/s10035-017-0728-3.

17. Pöschel T. Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms. Berlin: Springer; 2005. DOI: 10.1007/3-540-27720-X.

18. Yan Z., Wilkinson S.K., Stitt E.H., Marigo M. Discrete element modelling (DEM) input parameters: Understanding their impact on model predictions using statistical analysis. *Comput. Part. Mech*. 2015; 2:283–299.

19. Westbrink F., Elbel A., Schwung A., Ding S. Optimization of DEM Parameters using Multi-Objective Reinforcement Learning. *Powder Technol.* 2021; 309:602–616.

20. Yan Y., Helmons R., Schott D. Pin-on-Disc Modelling with MeshDeformation Using Discrete ElementMethod. *Materials*. 2022; 15:1813. DOI: 10.3390/ma15051813.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Vladimir V. Aksenov, doctor of technical sciences, Institute of coal, Federal research center for coal and coal chemistry, Siberian branch of the Russian academy of sciences, e-mail: 55vva42@mail.ru

Alexander I. Kopytov, doctor of technical sciences, professor of the department of RMPI, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyaya St., 28), e-mail: L01BDV@yandex.ru

Dmitry A. Pashkov, candidate of technical sciences, Senior Researcher, Kemerovo, Russian Federation, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: pashkovda@kuzstu.ru

Ahmed A. Wetti, mining engineer, researcher (Research Laboratory for Digital Transformation of Mineral and Raw Materials Complex Enterprises, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russia, Kemerovo, Vesennyaya St., 28). Lead Technologist, GKK and PVV ZSF, AZOT MINING SERVICE LLC (653035, Russia, Kuzbass, Prokopyevsk, Pionerskaya Street, 15), e-mail: wetti_a@mail.ru

Contribution of the authors:

Vladimir V. Aksenov – research task formulation, scientific management, research conceptualization, conclusions.

Alexander I. Kopytov – research task formulation, scientific management, research conceptualization.

Dmitry A. Pashkov – scientific management, research conceptualization, data collection and analysis, writing, conclusions.

Ahmed A. Wetti – scientific management, research conceptualization, data collection and analysis, writing, conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.

