

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-61-68

Дубинкин Дмитрий Михайлович*, Ялышев Алексей Витальевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: ddm.tm@kuzstu.ru

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ СЕТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В СРЕДЕ DEM****Информация о статье**

Поступила:

05 апреля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 апреля 2025 г.

Принята к печати:

20 июня 2025 г.

Опубликована:

05 июня 2025 г.

Ключевые слова:

Добыча полезных ископаемых, моделирование, МДЭ, размерная сетка, износ

Аннотация.

В горном деле метод дискретных элементов нашел свое применение благодаря возможности моделировать отдельные частицы сыпучего материала. В работе исследовано влияние размерности сетки, описывающей поверхности горного оборудования, на точность расчета контактных давлений в методе дискретных элементов (DEM). Представлено краткое описание механизма расчета контактного давления. Приведены способы задания поверхностей для моделирования взаимодействий с частицами. Приведены рекомендации с обоснованием и учетом опыта других исследователей по рациональному выбору сетки поверхностей для решения различных задач с помощью моделирования, в результате чего введен коэффициент $K_{s/d}$, отражающий отношения размерной сетки к размеру частиц. Выбран ряд коэффициентов для проведения исследования $K_{s/d}=4; 2; 1; 0.5; 0.25$. Проведено моделирование с различным масштабом размерной сетки для исследования изменения распределения нагрузок. Каждой сетке соответствовали частицы с одинаковыми свойствами, моделирование было проведено для частиц сфер с точечным контактом и частиц кубов с контактом по площади. В результате моделирования определено распределение контактного давления для частиц сфер и частиц кубов. В результате создан ряд рациональных значений отношения размерности сетки и частиц в зависимости от задач исследователя, так, $K_{s/d} = 0.5...1$ наиболее универсален и позволяет оценить как нагрузки, так и износ поверхностей горного оборудования, другие отношения также могут быть применимы в специфических задачах

Для цитирования: 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

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Введение

Проектирование любого оборудования сопровождается проведением прочностных расчетов [1-3]. Так, в горном деле машины и оборудование взаимодействуют с горной породой, представляющей

собой гранулированную среду. Для моделирования гранулированной среды широкое применение получил метод дискретных элементов, в зарубежной литературе Discrete element method, либо сокращенно DEM [4-6].

Особенностью DEM является возможность рассматривать отдельные частицы сыпучего материала с учетом их взаимодействия [7], что позволяет определять характер движения частиц при взаимодействии с оборудованием, рассчитывать контактные силы и т. п. Все это применимо для исследования взаимодействия различного горного оборудования с горными породами.

Зарубежные исследователи в своих работах активно применяют метод дискретных элементов [8–10]. Для моделирования DEM необходимо ввести параметры гранулометрической среды. В целом обоснование большинства параметров для DEM моделей довольно стандартизировано и связано с калибровочными тестами [11]. Завершающим этапом разработки модели является оценка ее качества.

В случае общей оценки качества модели исследователи руководствуются принципом «правдоподобия», который заключается в оценке модели по общему поведению, не пролетают ли частицы сквозь поверхности, не приобретают ли они чрезмерного ускорения и т. п. При этом должно сохраняться качество получаемых из модели данных при небольших затратах на моделирование, что особенно важно при решении прикладных инженерных задач.

Одним из элементов модели является сетка поверхностей, в значительной мере влияющая на качество моделирования, в связи с чем сформирована цель работы, которая заключается в определении рациональной сетки поверхностей при моделировании в среде дискретных элементов.

Для достижения поставленной цели необходимо установить зависимости между размером частиц d и размером сетки поверхностей S .

Взаимодействие частиц с поверхностями в DEM

При моделировании DEM под поверхностью подразумевается заданная геометрия, способная взаимодействовать с частицами. В общем виде взаимодействие поверхностей и частиц происходит через контактную модель [10].

Главным ограничением большинства программных пакетов является «жесткость» поверхностей,

когда кинематика поверхностей не зависит от взаимодействия с частицами. Для большинства задач считается допустимым, когда «жесткость» системы достаточно велика и не зависит от движения гранулометрической среды.

Для описания поверхностей существует несколько методов – NURBS, Mesh и другие. Наиболее универсальным является описание поверхности сеткой. Большинство DEM в качестве сетки требуют триангулированную поверхность – в случае, если первоначальная модель построена прямоугольными или иными элементами, каждый такой элемент разбивается на пару треугольных областей.

Для создания геометрии с целью геометрического ограничения области моделирования необязательно иметь регулярную (Рис. 1, а), мелкую сетку. В случае, если исследователя не интересует взаимодействие отдельных частиц с поверхностью, то оптимизация сетки может быть сосредоточена на минимальном количестве треугольников (Рис. 1, б), формирующих точную геометрию, так как поведение частицы в общем случае зависит только от угла контакта с поверхностью.

Контактные силы между частицами и поверхностями описываются различными контактными моделями, учитывающими упругость, вязкость и трение. Частицы в DEM взаимодействуют с поверхностью через контактные силы, которые зависят от их размера, формы и других параметров [14]. Контакт в DEM работает так, что каждая ячейка будет иметь список сопоставленных с ней частиц, и каждая частица будет сопоставлена с определенной ячейкой. Схема контакта частицы с поверхностью приведена на Рис. 2. В случае, если частица имеет сложную форму, контакт определяется для каждой ячейки сетки.

Стоит отметить, что большинство моделей контакта поверхности и частиц проводится через контактное давление, этот же показатель используется и для оценки абразивного износа в DEM [15]. В основе расчета контактного давления лежит площадь ячейки и силы, возникающие от частиц, взаимодействующих с ней.

Ввиду этой особенности расчета значения контактного давления для поверхности, получаемые

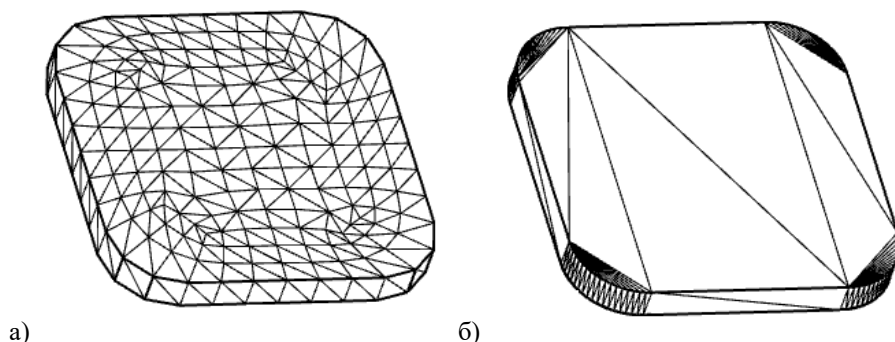


Рис. 1. Различные подходы к триангуляции поверхности
а – регулярная триангуляция; б – общая триангуляция
Fig. 1. Various approaches to surface triangulation
a – regular triangulation; b – general triangulation

при контакте с частицей, являются репрезентативными только для минимальной единицы описанной геометрии, в нашем случае треугольника. Поэтому необходимо определить рациональный размер сетки относительно размера частиц, так как контактное давление, рассчитываемое на минимальном элементе геометрии, зависит от его площади.

Для определения рационального размера регулярной сетки предлагается ввести коэффициент $K_{s/d}$.

$$K_{s/d} = \frac{S_p}{d_p}$$

Зная то, что для каждой ячейки контакт рассчитывается отдельно, мы предполагаем, что рациональным размером сетки будет та, где размер частицы равен размеру ячейки, то есть $K_{s/d}=1$ (Рис. 3.)

Стоит отметить, что большинство методов по определению контактного давления не используют барицентрические координаты для определения точки приложения силы, так как это значительно увеличивает ресурсы на вычисления. Иными словами, ячейке не важно, в какую ее часть ударит частица, для нее вектор силы, приложенный к краю, будет равнозначен для интерпретации

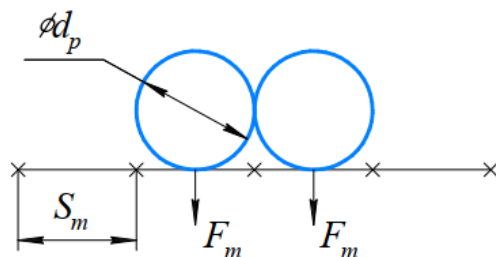


Рис. 2. Схема контакта частицы с поверхностью

S_m – размер ячейки сетки, d_p – размер частицы, F_m – сила действующая от частицы на поверхность

Fig. 2. The scheme of particle contacts with the surface

S_m – size of the grid cell, d_p – size of the particle, F_m – force acting from the particle on the surface

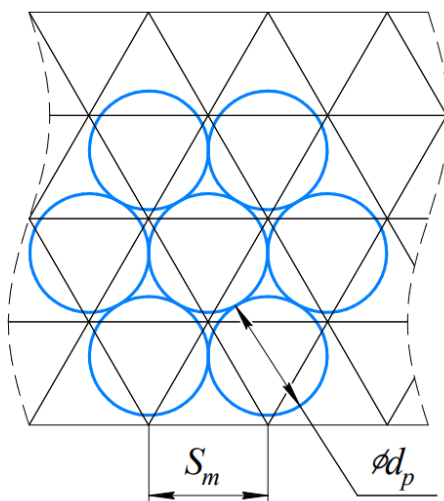


Рис. 3. Вид сетки, в которой размер частиц совпадает с размером ячеек

Fig. 3. A type of grid in which the particle size matches the cell size

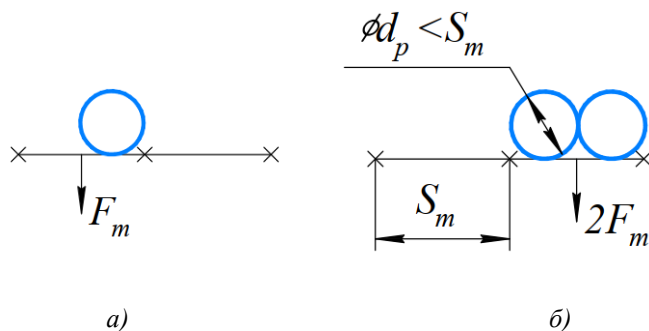


Рис. 4. Примеры контактов частиц с поверхностью

а – контакт одной частицы с поверхностью; б – контакт нескольких частиц с поверхностью

Fig. 4. Examples of contact of particles with a surface

а – contact of one particle with a surface; б – contact of several particles with a surface

нагрузки и приложен к геометрическому центру ячейки. Аналогичная интерпретация – если частиц в ячейке больше одной, в центре ячейки складываются нагрузки от всех контактов (Рис. 4).

Таким образом, применение сеток с $K_{s/d}$, отличным от 1, может иметь смысл в зависимости от задачи. Например, если основной целью ставится определение точной формы износа при абразивном воздействии, следует обратиться к исследованиям [16, 17], в которых авторы разработали подход для рационализации сетки, подходящей для изучения точного характера износа с учетом формы частицы.

Если говорить об общей оценке износа материала, например футеровки, то влияние отношения размерностей частиц и сетки показано в работе [18], в которой авторы делают вывод, что для общей оценки износа достаточно использования отношения $K_{s/d}=1...0,5$.

Для того, чтобы определить влияние размерного коэффициента $K_{s/d}$ на контактное давление, проведем моделирование в программном обеспечении

Rocky DEM.

Исследование влияния размерного коэффициента $K_{s/d}$ на контактное давление

Для сравнения изменений картины нагрузок разработана сравнительная модель (Рис. 5). Модель состоит из плоскостей одинакового габаритного размера, но с различными параметрами дискретизации сетки, и разной формы частиц. Размер сетки варьируется от $S_m=0,5d_p...2d_p$, где d_p – размер частицы, помещенной в центре рассматриваемой поверхности.

На Рис. 6 представлены результаты моделирования, а именно значения контактного давления P_m , действующего на поверхность с различной сеткой.

Результаты моделирования показывают, что размер сетки существенно влияет на определяемое поверхностное давление от частиц. Это закономерно ввиду уменьшения площади отдельных треугольников, для которых определяется контакт.

Таким образом, несоответствие масштабов приводит к искажению распределения нагрузок при

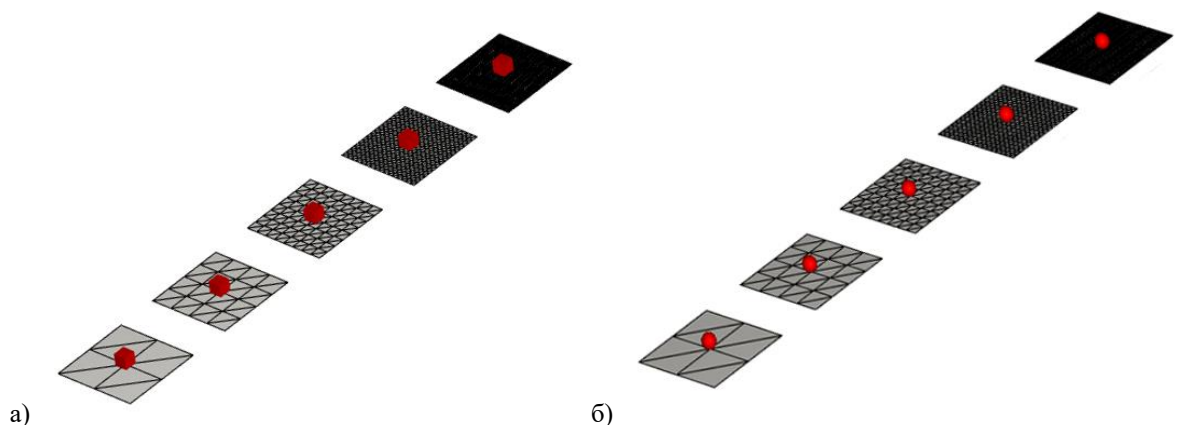


Рис. 5. Общий вид модели
 а – частица в форме куба; б – частица в форме сферы
 Fig. 5. The general view of the model
 а – a cube-shaped particle; б – a sphere-shaped particle

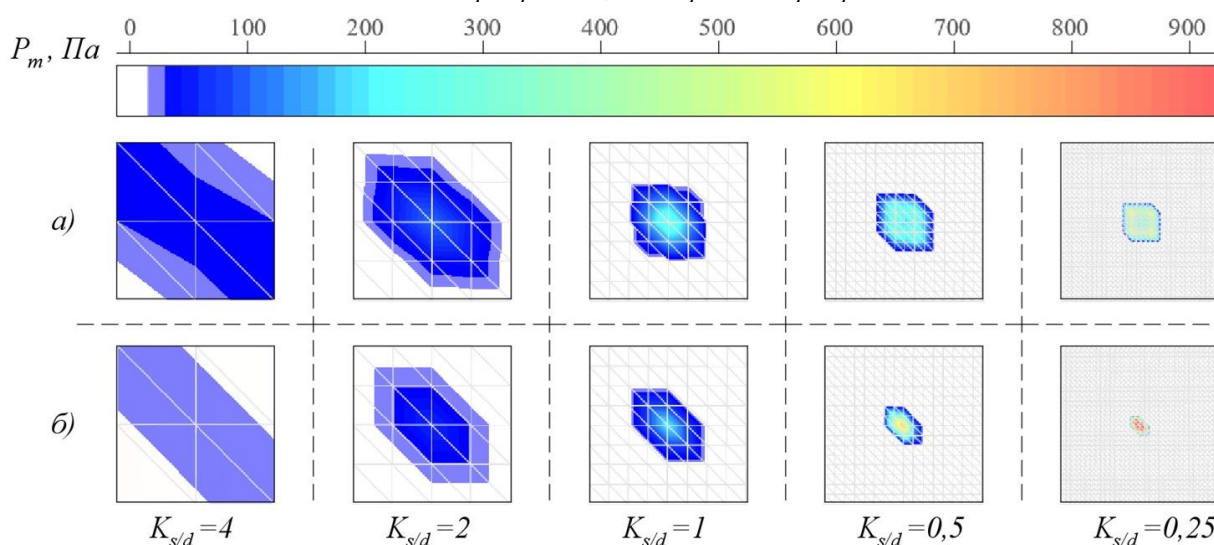
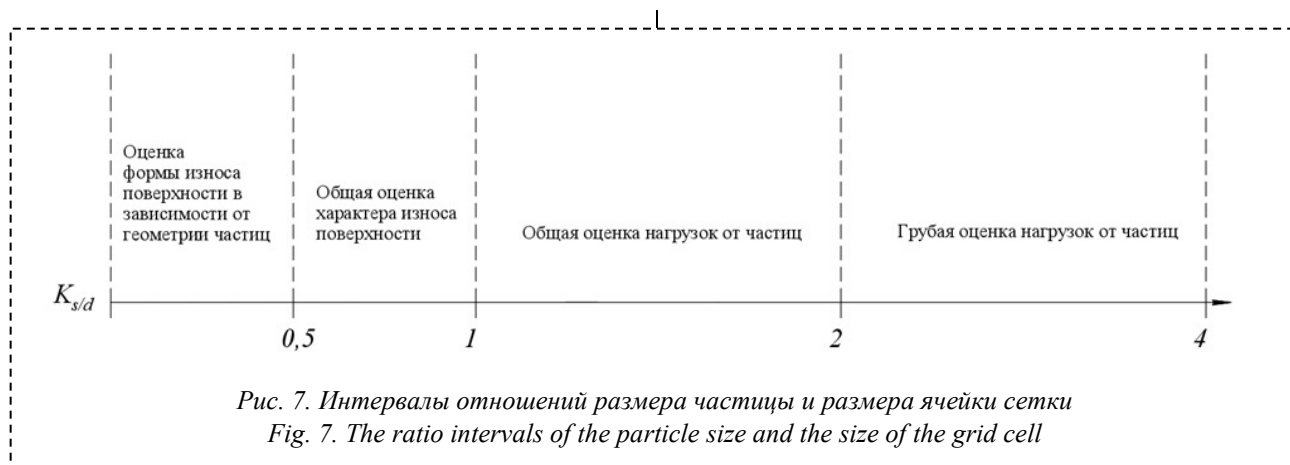


Рис. 6. Картина контактного давления на поверхности
 а – от частицы куба б – от частицы сферы
 Fig. 6. The pattern of contact pressure on the surface
 а – a cube particle б – is from a sphere particle



моделировании, что может привести к ошибкам при дальнейшей работе [19].

Чтобы минимизировать размытие нагрузок в случае, если важен учет контактов отдельных частиц, имеет смысл использовать $K_{s/d} \leq 1$.

Таким образом, для исследуемых поверхностей, имеющих разное назначение, необходимо применять и различный подход к назначению сетки.

Описывая плоскую поверхность в случае, если нас не интересуют локальные воздействия на нее частиц, допустимо использовать менее регулярную сетку без потери качества поведения частиц (Рис. 1, б). В случае же, когда нам необходимо определить величину износа или контактное давление, необходимо использовать более регулярную сетку (Рис. 1, б).

То есть способ задания поверхности в общем случае не влияет на поведение частиц при взаимодействии, в случае если геотермия поверхности одинакова и не используются расширенные контактные модели по типу JKR и т.п. [7]. Сетка позволяет получать данные о взаимодействии частиц с исследуемой поверхностью, качество получаемых результатов напрямую зависит от настройки модели.

Заключение

Опираясь на принципы работы DEM, исследования других авторов и проведенное моделирование, можно сделать вывод, что рациональное отношение $K_{s/d}$, а следовательно, и рациональный размер сетки для решения различных задач, связанных с моделированием горных машин в среде DEM, можно представить в виде интервалов, представленных на Рис. 7.

Для каждого диапазона $K_{s/d}$ можно выделить свою степень применимости:

- $K_{s/d} < 0,5$ характерен для оценки формы износа поверхности в зависимости от геометрии частиц;
- $K_{s/d} = 0,5 \dots 1$ наиболее универсален и позволяет оценить как нагрузки, так и износ поверхностей оборудования;
- $K_{s/d} = 1 \dots 2$ подходит для оценки нагрузок, действующих на поверхность, для большинства случаев;
- $K_{s/d} = 2 \dots 4$ имеет смысл, если модулируется слеживающийся (глина) или очень сыпучий материал (песок).

Коэффициент $K_{s/d} > 4$ имеет смысл только в случае создания ограничений в модели.

Соблюдение рациональной размерности сетки в зависимости от поставленной исследователем задачи позволит минимизировать затраты на вычисления, необходимые для получения интересующих его данных, а также снизит вероятность ошибок, связанных с погрешностью результатов.

Дальнейшие исследования направлены на определение разницы во времени моделирования для решения прикладной задачи с различным значением $K_{s/d}$ и обоснование рационального способа переноса данных о нагрузках из дискретно-элементной модели (DEM) в конечно-элементный решатель (FEM).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревуженко А. Ф. О двух концепциях описания кинематики деформирования сплошной среды: полем смещений точек и полями смещений материальных площадок // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 4. С. 42–51. DOI: 10.15372/FTPRPI20240403.
2. Аксенов В. В., Пашков Д. А., Дубинкин С. Д. Методики расчета расхода топлива карьерных самосвалов // Уголь. 2024. № S11(1187). С. 102–107. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-102-107.
3. Ильясов Б. Т. Исследование кинетики деформаций массива горных пород с использованием метода конечно-дискретных элементов: специальность 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромышленная геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ильясов Булат Тагирович, 2017. 138 с.
4. 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.
5. Zhan L., Peng C., Zhang B., Wu W. A surface mesh represented discrete element method (SMR-DEM) for particles of arbitrary shape // Powder Technology. 2021. Vol. 377. Pp. 760–779. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.09.046.

6. Rojas E., Vergara V., Soto R. Case study: Discrete element modeling of wear in mining hoppers // *Wear*. 2019. Vol. 430–431. Pp. 120–125. DOI: 10.1016/j.wear.2019.04.020.
7. O'Sullivan C. Particulate Discrete Element Modelling: A Geomechanics Perspective. 1st ed. Boca Raton : CRC Press, 2011. DOI: 10.1201/9781482266498.
8. Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid FE-DEM granular material model // *Computational Particle Mechanics*. 2020. Vol. 8. DOI: 10.1007/s40571-020-00372-z.
9. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В. Влияние процесса погрузки угля в грузовую платформу на коэффициент использования грузоподъемности карьерного самосвала БелАЗ-7530 (220 т) // *Уголь*. 2023. № S12. С. 11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-11-19.
10. Shen Y., Liu Ch., Zhou D., Wang Zh., Zhou L., Ma H., Zhao Y. A parallel coupling framework for DEM-MBD: Model verification and application // *Powder Technology*. 2024. Vol. 448. P. 120257. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.120257.
11. 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.
12. Pöschel T. Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms. Berlin : Springer, 2005. DOI: 10.1007/3-540-27720-X.
13. Orosz Á., Bagi K. Comparison of contact treatment methods for rigid polyhedral discrete element

- models // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023. Vol. 170. P. 105550. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105550.
14. Ji S., Sun S., Yan Y. Discrete Element Modeling of Rock Materials with Dilated Polyhedral Elements // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 102. P. 1793–1802. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.316.
15. 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.
16. Yan Y., Helmons R., Schott D. Pin-on-Disc Modelling with Mesh Deformation Using Discrete Element Method // *Materials*. 2022. Vol. 15. P. 1813. DOI: 10.3390/ma15051813.
17. Thompson J. A., Berry L., Southern S., Walls W. K., Holmes M. A., Brown S. G. R. The effect of mesh discretisation on damage and wear predictions using the Discrete Element Method // *Applied Mathematical Modelling*. 2022. Vol. 105. P. 690–710. DOI: 10.1016/j.apm.2022.01.001.
18. Дубинкин Д. М., Ялышев А. В., Исмаилова Ш. Я. К выбору программного обеспечения для имитационного моделирования погрузки горной массы в карьерные самосвалы // *Горное оборудование и электромеханика*. 2024. № 5(175). С. 42–51. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-42-51.
19. Xiao J., Xue L., Zhang D., Sun S., Bai Y., Shi J. Coupled DEM-FEM methods for analyzing contact stress between railway ballast and subgrade considering real particle shape characteristic // *Computers and Geotechnics*. 2023. Vol. 155. P. 105192. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.105192.

© 2025 Автор. 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:

Дубинкин Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; ORCID 0000-0002-8193-9794; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Ялышев Алексей Витальевич, аспирант, младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии», Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28; Scopus ID 58034289400; e-mail: jalyshevav@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Дубинкин Дмитрий Михайлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Ялышев Алексей Витальевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

DEFINITION OF A RATIONAL SURFACE MESH FOR MINING EQUIPMENT MODELING IN A DEM ENVIRONMENT



Article info

Received:

05 April 2025

Accepted for publication:

30 April 2025

Accepted:

20 June 2025

Published:

26 June 2025

Keywords: Mining, modeling, MDE, dimensional grid, wear

Abstract.

In mining, the discrete element method has found its application due to the ability to simulate individual particles of bulk material. The paper examines the influence of the dimension of the grid describing the surface of mining equipment on the accuracy of calculating contact pressures using the discrete element method (DEM). A brief description of the contact pressure calculation mechanism is provided. The methods of defining surfaces for modeling interactions with particles are given. Recommendations are given with justification and taking into account the experience of other researchers on the rational choice of a surface grid for solving various problems using modeling. As a result, the coefficient $K_{s/d}$ was introduced, reflecting the ratio of the dimensional grid to the particle size. A number of coefficients have been selected for the $K_{s/d}$ study: 4; 2; 1; 0,5; 0,25. A simulation with a different scale of the dimensional grid was carried out to study changes in the load distribution. Particles with the same properties corresponded to each grid. The simulation was carried out for spherical particles with point contact and cubic particles with area contact. As a result of the simulation, the distribution of contact pressure is determined for both spherical and cubic particles. As a result, a number of rational values of the ratio of the mesh dimension and particles were created, depending on the researcher's tasks, so $K_{s/d} = 0.5...1$ is the most versatile and allows you to evaluate both loads and wear of mining equipment surfaces, other ratios can also be applied in specific tasks.

For citation: Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Definition of a rational surface mesh for mining equipment modeling in a DEM environment. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 3(179):61-68 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-3-61-68, EDN: TURLMI

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement № 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle «Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life» (the «Clean Coal – Green Kuzbass» Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project «Development and creation of an unmanned shuttle-type mining dump truck with a payload of 220 tons» in terms of research, development and experimental-design work.

REFERENCES

1. Revuzhenko A.F. On two concepts for describing the kinematics of deformation of a continuous medium: the displacement field of points and displacement fields of material sites. *Physico-technical problems of mining*. 2024; 4:42–51. DOI: 10.15372/FTPRPI20240403.

2. Aksenov V.V., Pashkov D.A., Dubinkin S.D. Methods of calculating fuel consumption in quarry dump truck. *Coal*. 2024; S11(1187):102–107. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-102-107.

3. Ilyasov B.T. Investigation of the kinetics of rock mass deformations using the method of finite discrete elements: specialty 25.00.16 "Mining and oil and gas field geology, geophysics, surveying and geometry of the subsoil": dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Ilyasov Bulat Tagirovich, 2017. 138 p.

4. 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 ma-

terial. *Engineering Failure Analysis*. 2016; 66:274–283. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.04.007.

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

6. Rojas E., Vergara V., Soto R. Case study: Discrete element modeling of wear in mining hoppers. *Wear*. 2019; 430-431:120–125. DOI: 10.1016/j.wear.2019.04.020.

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

8. Svanberg A., Larsson S., Mäki R., Jonsén P. Full-scale simulation and validation of bucket filling for a mining rope shovel by using a combined rigid FE-DEM granular material model. *Computational Particle Mechanics*. 2020; 8. DOI: 10.1007/s40571-020-00372-z.

9. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. The influence of the coal loading process into the cargo platform on the utilization factor of the BelAZ-7530 dump truck (220 tons). *Coal*. 2023; S12:11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-S12-11-19.

10. Shen Y., Liu Ch., Zhou D., Wang Zh., Zhou L., Ma H., Zhao Y. A parallel coupling framework for DEM-MBD: Model verification and application. *Powder Technology*. 2024; 448:120257. DOI: 10.1016/j.powtec.2024.120257.

11. 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.

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

13. Orosz Á., Bagi K. Comparison of contact treatment methods for rigid polyhedral discrete element models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2023; 170:105550. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105550.

14. Ji S., Sun S., Yan Y. Discrete Element Modeling of Rock Materials with Dilated Polyhedral Elements. *Procedia Engineering*. 2015; 102:1793–1802. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.316.

15. 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.

16. 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.

17. Thompson J.A., Berry L., Southern S., Walls W.K., Holmes M.A., Brown S.G.R. The effect of mesh discretisation on damage and wear predictions using the Discrete Element Method. *Applied Mathematical Modeling*. 2022; 105:690–710. DOI: 10.1016/J.apm.2022.01.001.

18. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V., Ismailova Sh.Ya. On the choice of software for simulation modeling of loading rock mass into mining dump trucks. *Mining equipment and electromechanics*. 2024; 5(175):42–51. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-42-51.

19. Xiao J., Xue L., Zhang D., Sun S., Bai Y., Shi J. Coupled DEM-FEM methods for analyzing contact stress between railway ballast and subgrade considering real particle shape characteristic. *Computers and Geotechnics*. 2023; 155:105192. DOI: 10.1016/j.compgeo.2022.105192.

© 2025 The Author. 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 author:

Dmitry M. Dubinkin, C. Sc. in Engineering, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesenyaya St., Kemerovo, 650000, Russia, ORCID 0000-0002-8193-9794; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Aleksey V. Yalyshev, Postgraduate Student, Junior Researcher, Scientific Center "Digital Technologies", T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 Vesenyaya St., Kemerovo, 650000, Russia; e-mail: jalyshevav@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Dmitry M. Dubinkin – research problem, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of the study, data collection and analysis, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

Aleksey V. Yalyshev – research problem, scientific management, review of relevant literature, conceptualization of the study, data collection and analysis, review of relevant literature, conclusions, writing the text.

The claimed contribution of the authors:

Authors have read and approved the final manuscript.

