

Научная статья

УДК 622.271

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-42-51

Дубинкин Дмитрий Михайлович*, Ялышев Алексей Витальевич,
Исмаилова Шахназ Ямиловна

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева

*E-mail: ddm.tm@kuzstu

К ВЫБОРУ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОГРУЗКИ ГОРНОЙ МАССЫ В КАРЬЕРНЫЕ САМОСВАЛЫ**Информация о статье**

Поступила:

31 октября 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

15 ноября 2024 г.

Принята к печати:

22 ноября 2024 г.

Опубликована:

11 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

добыча полезных ископаемых, открытые горные работы, карьерный самосвал, грузовая платформа, МДЭ, Rocky DEM, вскрышиная порода.

Аннотация.

В статье рассматривается программное обеспечение на основе метода дискретных элементов для имитационного моделирования взаимодействия сыпучей среды с горным оборудованием. Анализируются достоинства, недостатки и технические возможности различных программных продуктов, включая EDEM, Rocky DEM, ThreeParticle, LIGGGHTS и Yade. Оцениваются функциональные возможности, производительность вычислений, а также публикационная активность, посвященная исследованиям взаимодействия сыпучего материала с металлоконструкцией или узлом горной машины, соответствующая государственным рубрикам научнотехнической информации 52.00.00 – Горное дело и 55.33.00 – Горное машиностроение, для рассматриваемых программных продуктов. Программное обеспечение Rocky DEM и EDEM имеет встроенные алгоритмы расчетов и контактные модели разрушения частиц (Ab-T10, Tavares) и сглаженных частиц (SPH). Приводятся результаты имитационного моделирования, методом дискретных элементов, взаимодействия горной массы с грузовой платформой (кузовом) карьерного самосвала грузоподъемностью 220 т в программном обеспечении Rocky DEM и EDEM. Сравнительный анализ программных продуктов на основе метода дискретных элементов показал, что Rocky DEM является оптимальным программным обеспечением для решения задач, связанных с имитационным моделированием взаимодействия сыпучей среды с грузовой платформой карьерного самосвала, и соответствует тематикам научных исследований в области горных машин.

Для цитирования: Дубинкин Д. М., Ялышев А. В., Исмаилова Ш. Я. К выбору программного обеспечения для имитационного моделирования погрузки горной массы в карьерный самосвал грузоподъемностью 220 т // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 5 (175). С. 42-51. DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-42-51, EDN: EUDHOE

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») 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

Моделирование методом дискретных элементов (МДЭ (DEM)) позволяет создавать имитационные

модели, учитывающие особенности сыпучей среды, что позволяет оценить производительность различных видов оборудования, в том числе погрузку

горной массы в карьерный самосвал (КС) грузоподъемностью 220 т [1-3] с целью обоснования параметров грузовых платформ (ГП) КС.

В настоящее время имеется различное специализированное программное обеспечение (ПО) на основе МДЭ. Выбор ПО на основе МДЭ необходимо производить исходя из различных факторов работы горного оборудования, особенностей сыпучей среды, встроенных алгоритмов расчетов и контактных моделей. Поэтому повышение эффективности работы существующих горных машин и создание нового инновационного оборудования с отработкой мультивариантных решений на основе МДЭ, в том числе для обоснования параметров ГП КС, является актуальной целью.

Постановка цели и задач

Целью исследования является обоснование выбора ПО на основе МДЭ для исследований процессов погрузки и разгрузки ГП КС.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать особенности эксплуатации ГП КС и функциональные возможности ПО на основе МДЭ;

- провести и оценить имитационное моделирование погрузки ковшем горной массы в ГП КС грузоподъемностью 220 т.

Данные исследования применялись в ходе выполнения работ по проекту «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» [1-4] на этапе разработки математических моделей и проведения имитационного моделирования режимов эксплуатации ГП КС.

Особенности эксплуатации ГП КС

При погрузке горной массы в ГП КС происходят столкновения как между кусками (частицами), так и кусков с ГП, характер этих взаимодействий определяет эксплуатационные свойства ГП КС. Анализ особенностей эксплуатации ГП КС [1, 2, 4] в карьерах и разрезах выявил ряд типичных проблем: налипание и намерзание перевозимой горной массы; износоустойчивость ГП КС; пылеобразование при разгрузке КС; распределение нагрузок в ГП КС.

Налипание характерно для определенных типов перевозимых материалов в период межсезонья. Слипание частиц между собой и поверхностью ГП КС может быть смоделировано МДЭ с использованием алгоритма расчета и контактной модели адгезионной связи JKR (Johnson-Kendall-Roberts). Модель основана на создании нормальных связей. Данная модель подразумевает ввод величины эффективной поверхностной энергии (также называемой энергией поверхностного сцепления) на единицу площади. Эта модель вместе с моделью теплопереноса [5] может использоваться и при смерзании материала ГП КС, например, с помощью связи температуры и силы адгезии [6]. Фазовые переходы или жидкости в ГП КС могут быть учтены при использовании SPH-моделирования, метода сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics), ко-

торый позволяет создавать гидродинамическую среду из дискретных частиц.

Для некоторых типов перевозимых материалов, испытывающих пластическую деформацию – грунты, глины, суглинки, можно использовать алгоритм расчета и контактные модели упругопластического и адгезионного – ЕЕРА (Edinburgh-Elasto-Plastic-Adhesive) [7]. Модель позволяет учитывать увеличение площади контакта и улучшению сцепных свойств.

Износоустойчивость оценивается алгоритмом расчета и контактной моделью относительного износа (relative wear model) – это способ определения областей ударного (нормального) и абразивного (тангенциального) износа в рамках МДЭ. Мощность износа рассчитывается на основе нормальной энергии при ударе и тангенциальной энергии при скольжении. Мощность износа дает нам общие представления о зонах и областях износа. Для определения потери массы изнашиваемой поверхности, глубины износа используются дополнительные алгоритмы расчета и контактные модели, такие как Ока (Oka) [8] или Арчарда (Archard) [9], которые основаны на использовании безразмерного коэффициента, определяющего степень износа поверхности для пары материалов.

Пылеобразование напрямую не влияет на эксплуатационные свойства ГП КС, но снижение пылеобразования способствует улучшению условий труда, защите окружающей среды и здоровья работников. Наибольшее количество пыли образуется при загрузке и выгрузке материала, перевозимого в ГП КС. Для оценки пылеобразования используется алгоритм расчета и контактная модель CFD [10], основанная на скорости потока частиц и движении потоков воздуха.

На распределение нагрузок на поверхности ГП КС влияет последовательность погрузки ковшем в ГП КС, перевозимый материал (физико-механические характеристики, форма кусков и гранулометрический состав) [11, 12]. Для моделирования формы частиц кусков полезных ископаемых или породы недостаточно использования только частиц-сфер. Это связано с различиями алгоритмов расчета и контактных моделей. Большинство исследователей, занимающихся моделированием МДЭ, сходятся во мнении, что для создания моделей, которые соответствуют наблюдаемым характеристикам реальных сыпучих сред, требуется использование сложной формы отдельных частиц [13, 14]. При загрузке в ГП КС может происходить разрушение перевозимого материала, в результате чего происходит изменение гранулометрического состава и перевозимого объема [15]. Для того, чтобы оценить значимость этого фактора, необходимо учитывать разрушение в имитационной модели. На данный момент в МДЭ существует несколько способов, учитывающих сложную форму частиц, например полигидронов, это ab-t10 и его развитие Tavares [15].

Функциональные возможности ПО на основе МДЭ

EDEM [<https://altair.com/edem>] – коммерческое ПО, которое было разработано компанией DEM Solutions, а с 2019 года оно входит в платформу Altair. EDEM имеет интерфейсы к различным программным системам платформы HyperWorks. EDEM используется для исследований, связанных с частицами, во многих инженерных дисциплинах,

зайства. Одной из особенностей программного продукта можно отметить модели разрушения без потери массы и объема – Ab-T10.

ThreeParticle [<https://www.becker3d.com/software>] – коммерческий продукт компании BECKER 3D, Австрия. Поддерживает мультифизический МДЭ для моделирования сыпучих материалов сложной

Таблица 1. Особенности эксплуатации грузовых платформ карьерных самосвалов и модули МДЭ

Table 1. Features of operation of cargo platforms of dump trucks and DEM modules

Особенность эксплуатация ГП КС	Модули МДЭ		
	Relative Wear model	Oka Wear	Archard Wear
Износоустойчивость	JKR	EPPA	–
Налипание	JKR	SPH	–
Намерзание	JKR	SPH	–
Распределение нагрузок	Hertz-Mindlin	Hysteretic Spring	Linear Spring
Разрушение частиц	Tavares	Ab-T10	–
Пылеобразование	CFD	–	–

Таблица 2. Функциональные возможности ПО на основе МДЭ

Table 2. Software functionality based on DEM

Программное обеспечение	Модули МДЭ							
	SPH	CFD	MBD	EEPA или JKR	Модель трения качения	Ab-T10 и / или Tavares	Теплопроводность между частицами	Archard или Oka
EDEM	Нет	Да	Да***	Да	Да	Да – Tavares (сферы)	Да	Да
Rocky DEM	Да	Да***	Да***	Да	Да	Да – Ab-T10, Tavares	Да	Да
ThreeParticle	Да*	Да*	Да*	Да	Да	Да - Tavares	Да	Да*
LIGGGHTS	Да	Да**	Да	Да	Да	Нет	Да	Да
Yade	Да	Да**	Да**	Да**	Нет	Нет	Нет	Нет

включая разработку технологических процессов, машиностроение, материаловедение, сельскохозяйственную инженерию и многое другое. EDEM имеет интеграцию с программными пакетами семейства Altair и RecurDyn. Решатель динамики частиц EDEM и решатель динамики нескольких гибких тел RecurDyn (MFBD) выполняют анализ путем обмена данными между решателями, что позволяет исследовать поведения частиц и возникающие нагрузки в динамических системах.

Rocky DEM [<https://www.rocky-dem.ru/>] является коммерческим продуктом ESSS. Компания была основана в Аргентине. Одним из основателей является Александр Потапов, доктор физико-математических наук, выпускник Московского физико-технического института, который долгое время работал на финскую компанию Metso, занимающуюся оборудованием для горнодобывающей промышленности. ANSYS приобрел разработчика Rocky DEM 4 января 2023 года. На данный момент существует две парцельные версии Rocky DEM и Ansys Rocky. Rocky был специально разработан для решения горных инженерных задач. ПО поддерживает моделирование любой формы частиц, включая любые твердые тела, 2D-оболочки, жесткие и гибкие волокна, используемые в различных отраслях промышленности, медицины и сельского хо-

зяйства. Одной из особенностей программного продукта можно отметить модели разрушения без потери массы и объема – Ab-T10. Программный продукт также поддерживает совместное решение процессора и видеокарты. Среди основных преимуществ, которые выделяют разработчики: встроенная динамика нескольких твердых тел (MBD); гидродинамика сглаженных частиц (SPH); встроенный анализ методом конечных элементов; анализ износа с деформацией.

LIGGGHTS

[<https://github.com/CFDEMproject/LIGGGHTS-PUBLIC>] – ПО для моделирования частиц МДЭ с открытым исходным кодом, основанный на LAMMPS с дополнительными доработками. LIGGGHTS может быть использован для моделирования дисперсных материалов и предназначен для решения промышленных задач. В настоящее время используется различными исследовательскими институтами и компаниями по всему миру. Это ПО разработано в Университете Йоганна Кеплера в Австрии. ПО распространяется под лицензией GNU General Public License.

Yade [<https://yade-dem.org/doc/>] является программой с открытым исходным кодом для дискретных численных моделей, ориентированный на МДЭ. Проект начинался как SDEC [16] в Университете Гренобля, Франция. В настоящее время разрабатывается в нескольких научно-

исследовательских институтах и имеет активное сообщество пользователей. ПО позволяет реализовывать новые алгоритмы и интерфейсы с другими программными пакетами (например, моделирование потока), процедуры импорта/экспорта данных. На основе Yade также существуют программные продукты, например Woo DEM. Целью разработчиков Yade является обеспечение общей среды для ученых с помощью подключаемых модулей и библиотек. Главным минусом Yade можно назвать сложный графический интерфейс и особенности работы с программой, которые требуют задания и использования команд для создания модели.

Выбор ПО для имитационного моделирования погрузки ковшом горной массы в ГП КС грузоподъемностью 220 т

В Таблице 1 представлены особенности эксплуатации ГП КС и модули (алгоритмы расчетов и контактные модели) МДЭ, с помощью которых можно провести анализ и исследования налипания и намерзания перевозимой горной массы, износостойкость ГП КС, пылеобразование при разгрузке КС, распределение нагрузок в ГП КС и др.

Анализ Таблицы 1 показывает, что особенности эксплуатации ГП КС можно исследовать с помощью ПО на основе МДЭ, применив различные модули.

Для обоснования выбора рассмотрим функциональные возможности ПО на основе МДЭ для имитационного моделирования погрузки ковшом горной массы в ГП КС грузоподъемностью 220 т (Таблица 2).

Анализ Таблицы 2 показывает, что:

- наибольшим функционалом обладает коммерческое ПО, однако многие алгоритмы расчетов и контактные модели являются дополнительными модулями МДЭ;

- рассмотренные ПО дают возможность проводить имитационное моделирование сыпучей среды в ГП КС.

Для оценки производительности вычислений сравним технические возможности ПО на основе МДЭ по расчетам на графических ускорителях (Таблица 3).

Анализ Таблицы 3 показывает, что EDEM из рассмотренных ПО позволяет использовать видеокарты любых производителей, что позволяет более гибко выбирать вычислительное оборудование.

Для предварительного выбора ПО на основе МДЭ для имитационного моделирования погрузки ковшом горной массы в ГП КС грузоподъемностью 220 т проведен анализ исследований количества публикаций в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU по тематике ГРНТИ 52.00.00 – Горное дело и 55.33.00 – Горное машиностроение. Результаты публикационной активности представлены на Рис. 1.

Анализ Рис. 1 показывает, что, несмотря на все достоинства ПО на основе МДЭ с открытым исходным кодом, наибольшее распространение в научной среде получило коммерческое ПО. ПО Rocky DEM и EDEM больше используют для исследований, чем другие программные продукты.

Таблица 3. Сравнение технических возможностей ПО на основе МДЭ
Table 3. Comparison of technical capabilities of software based on DEM

Программное обеспечение	Наличие графического интерфейса	Поддержка вычислений на видеокарте с CUDA (NVIDIA)	Поддержка вычислений на видеокарте OpenCL (AMD и NVIDIA)
EDEM	Да	Да	Да
Rocky DEM	Да	Да	Нет
ThreeParticle	Да	Да	Нет
LIGGGHTS	Да	Да*	Нет
Yade	Нет	Да	Нет

*Ограничено и находится в разработке

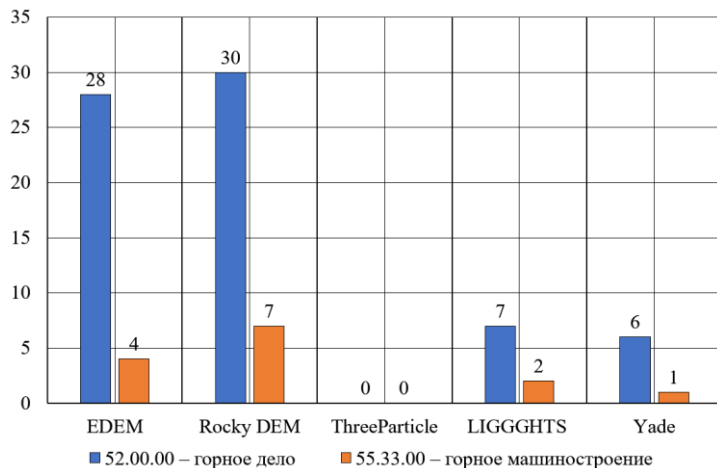
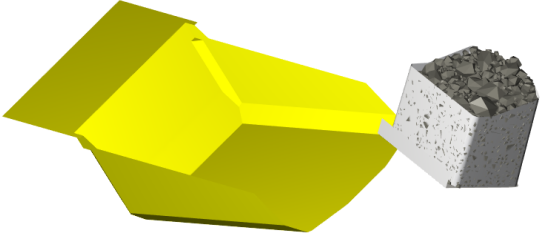
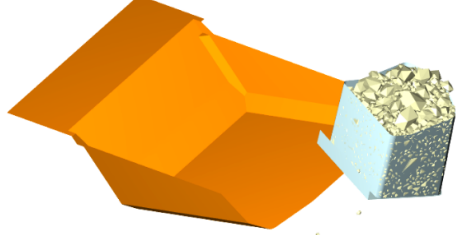
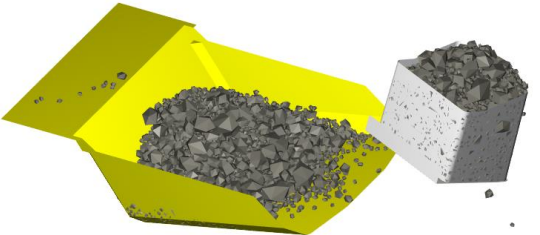
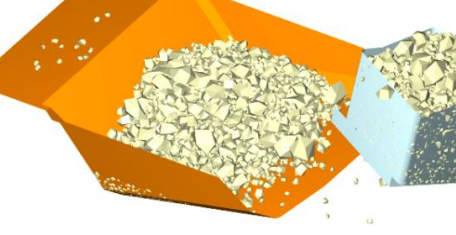
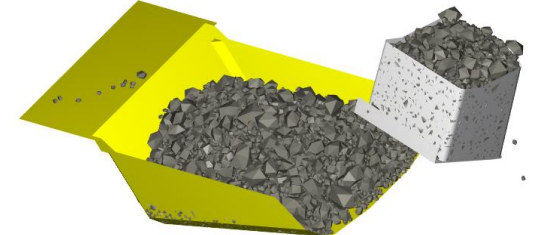
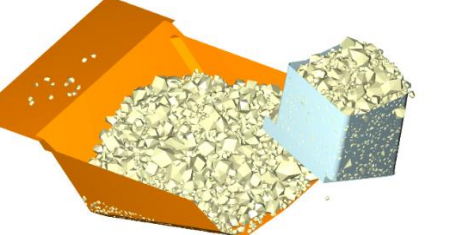
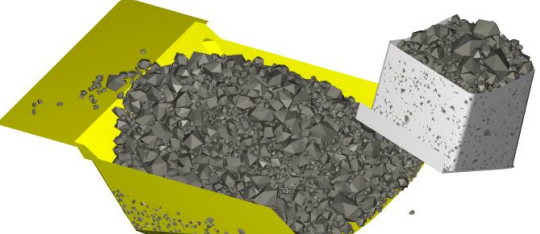
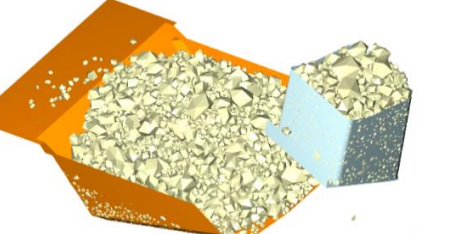
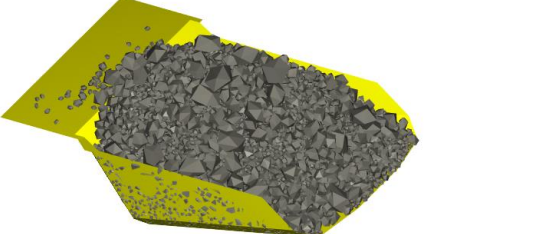
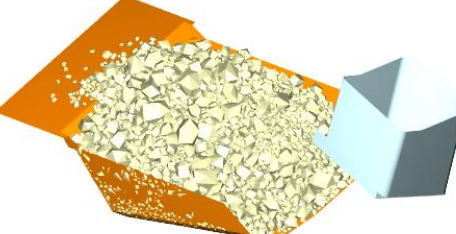


Рис. 1. Количество публикаций в научной электронной библиотеке eLIBRARY.RU
Fig. 1. The number of publications in the scientific electronic library eLIBRARY.RU

Таблица 4. Кинограмма имитационного моделирования погрузки ковшем горной массы в грузовую платформу карьерного самосвала

Table 4. Kilograms of simulation of loading a bucket of rock mass into the cargo platform (body) of a quarry dump truck

Время (t, с)	Rocky DEM	EDEM
6		
26		
46		
66		
86		

ThreeParticle не получил широкого распространения в связи с отсутствием компаний-дистрибьютеров и взаимодействия с академической средой в РФ. Публикаций, посвященных исследованиям в 52.00.00 – Горное дело, в 5,07 раз больше, чем в 55.33.00 – Горное машиностроение.

Имитационное моделирование погрузки ковшем горной массы в ГП КС грузоподъемностью 220 т в ПО Rocky DEM и EDEM

Для имитационного моделирования процесса погрузки вскрышной породы в ГП КС в ПО Rocky DEM и EDEM в одних и тех же условиях разработаны [17-21]:

- модели ковшей экскаваторов ЭКГ-35;
- модель в ГП КС грузоподъемностью 220 т без надставных бортов;
- параметры модели вскрышной породы.

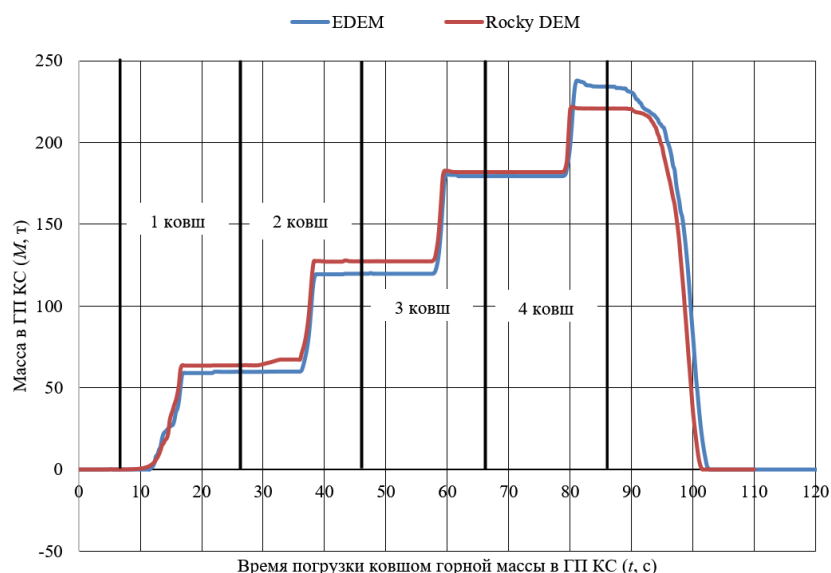


Рис. 2. Изменение массы в процессе погрузки ковшем горной массы в грузовую платформу карьерного самосвала

Fig. 2. Weight change during the loading of rock mass by a bucket into the cargo platform (body) of a quarry dump truck

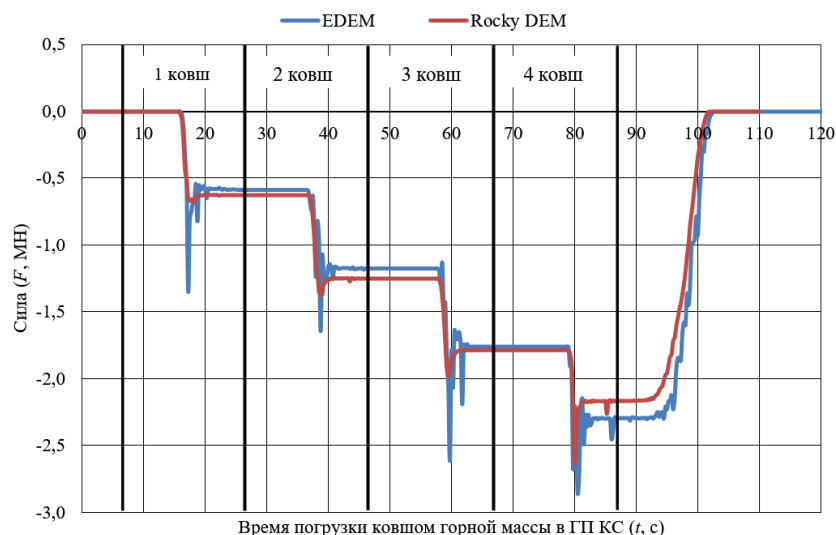


Рис. 3. Изменение нагрузок по оси Z в процессе погрузки ковшем горной массы в грузовую платформу карьерного самосвала

Fig. 3. The change of loads along the Z axis during the loading of rock mass by a bucket into the cargo platform (body) of a quarry dump truck

По результатам имитационного моделирования МДЭ процесса погрузки сыпучего материала в ГП получены кинограммы. Кинограмма с анимацией моделирования при погрузке экскаватором ЭКГ-35 в ГП КС грузоподъемностью 220 т представлена в Таблице 4.

По результатам моделирования получены значения массы груза как единичным ковшем, так и в целом в ГП КС. На основании массива экспериментальных данных построены графики:

- изменения массы груза в ГП КС (M , т) в зависимости от количества ковшей и времени погрузки ковшем горной массы в ГП КС (t , с); представлен на Рис. 2;

- изменения нагрузок (сил) (F , МН) по оси Z в зависимости от количества ковшей и времени по-

грузки ковшем горной массы в ГП КС (t , с); представлен на Рис. 3.

Анализ графиков (Рис. 2 и Рис. 3) показывает, что значения, изменения массы груза и нагрузок по оси Z в процессе погрузки ковшем вскрышной породы в ГП КС, полученные в результате моделирования в EDEM и Rocky DEM, имеют расхождение. Расхождение значений вызвано случайным распределением кусков вскрышной породы в ковше и в ГП КС при имитационном моделировании.

Выводы

ПО на основе открытого кода является альтернативой и практически не уступает по функциональным возможностям коммерческим продуктам, так как позволяет решать специализированные задачи за счет внедрения собственных моделей. Пол-

ноценное использование такого ПО требует высокого навыка программирования.

Таким образом, наилучшим выбором для решения задач, связанных с имитационным моделированием взаимодействия сыпучей среды с ГП КС, является RockyDEM благодаря расширенной модели разрушения частиц и встроенной модели SPH, а также публикационной активности по тематике научных исследований горных машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ялышев А. В. Необходимость создания грузовой платформы для аккумуляторного карьерного самосвала // Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте : Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции, Кемерово, 30 ноября – 01 2022 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева; 2022. С. 706–710.
2. Исмаилова Ш. Я. Математическая модель и проведение имитационного моделирования породной грузовой платформы карьерного самосвала // Россия молодая : Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 18–21 апреля 2023 года. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. С. 423051–423055.
3. Dubinkin D. Design development of autonomous mining dump trucks // E3S Web of Conferences : International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023, Novosibirsk, Russia, May 16-19, 2023. Vol. 402. Novosibirsk, Russia : EDP Sciences, 2023. P. 10022. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210022.
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. Johnson Evan F., İlker Tari, Derek Baker. Modeling heat exchangers with an open source DEM-based code for granular flows // Solar Energy. 2021. Vol. 228. Pp. 374–386. DOI: 10.1016/j.solener.2021.09.067.
6. Демишев А. Ю. Зависимость силы адгезии от температуры, реализация подогрева поверхности контакта // Тезисы доклада на студенческой конференции «День науки». ДонНТУ, 2010.
7. Morrissey J. P. Discrete Element Modelling of Iron Ore Pellets to Include the Effects of Moisture and Fines // PhD thesis, Edinburgh, Scotland : University of Edinburgh 2013.
8. Oka Y. I., Okamura, K., Yoshida, T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation // Wear. 2005. 259(1–6) Pp. 95–101. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.039.
9. Archard J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces // Journal of Applied Physics, 1953. Vol.24(8): P981-988. DOI: 10.1063/1.1721448.
10. Norouzi H. [et al.] Coupled CFD-DEM modelling, formulation, implementation and application to multiphase flows (1st). Chapter6. John Wiley & Sons, Inc. 2016. DOI: 10.1002/9781119005315.
11. Ali D., Frimpong S. (2018). Impulse force reductions and their effects on WBV exposures in high impact shovel loading operations // International Journal of Mining Science and Technology. 2018. № 28(3). Pp. 423–435. doi:10.1016/j.ijmst.2018.03.00.
12. Zhang K., Yu W., Li D., Zou D., Zhang, S. Measurement and simulation validation of numerical model parameters of fresh concrete. Science and Engineering of Composite Materials. 2021. № 28(1). Pp. 437–452. DOI: 10.1515/secm-2021-0042.
13. Santamarina J. C., Cho G. C. Soil Behaviour: The role of particle shape // Adv. Geotech. Eng. Skempton Conf. Proc. 2004. Pp. 604–617.
14. Pena A. A.; Garcia-Revo R., Herrmann H. J. Influence of particle shape on shared dance // Granular Media. Granular Matter. 2007. Vol. 9. Pp. 279–291. DOI: 10.48550/arXiv.cond-mat/0603358.
15. Самусев П. А. Исследование влияния технологических процессов добычи угля на его грансостав // Вестник КузГТУ. 1999. № 2. С. 50–51.
16. Donz'e F., Magnier S.A. Formulation of a three-dimensional numerical model of brittle behavior, Geophys. J. Int. 1995. 122. 790–802.
17. Tavares, L. M., & das Chagas, A. S. A stochastic particle replacement strategy for simulating breakage in DEM. Powder Technology. 2020, Vol.377, P222-232 DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.
18. Дубинкин Д. М., Исмаилова Ш. Я., Ялышев А. В. Определение параметров модели вскрышной породы для имитационного моделирования погрузки и разгрузки породной грузовой платформы карьерного самосвала // Техника и технология горного дела. 2023. № 4(23). С. 76–90. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-76-90.
19. Дубинкин Д. М., Исмаилова Ш. Я. Определение параметров модели суглинка и глины для имитационного моделирования погрузки и разгрузки грузовой платформы карьерного самосвала // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2023. № 6(160). С. 94–104. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-94-104.
20. Дубинкин Д. М., Исмаилова Ш. Я., Ялышев А. В. Влияние последовательности погрузки вскрышной породы на коэффициент использования грузоподъемности карьерного самосвала БЕЛАЗ-75310 (240 т) // Техника и технология горного дела. 2023. № 4(23). С. 103–118. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-103-118.
21. 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(1175). С. 11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Дубинкин Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; ORCID 0000-0002-8193-9794, Scopus ID 57197717432; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Ялышев Алексей Витальевич, аспирант, младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии», г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; Scopus ID 58034289400; e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

Исмаилова Шахназ Ямиловна, аспирант, младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии», г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева; Scopus ID 58668791100; e-mail: ismailovashja@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:

Дубинкин Дмитрий Михайлович – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, концептуализация исследования, выводы, написание текста.

Ялышев Алексей Витальевич – концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Исмаилова Шахназ Ямиловна – концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-42-51

Dmitry M. Dubinkin *, **Alexey V. Yalyshev**, **Shakhnaz Y. Ismailova**

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

*E-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

ON THE CHOICE OF SOFTWARE FOR SIMULATION MODELING OF LOADING ROCK MASS INTO QUARRY DUMP TRUCKS



Article info

Received:

31 October 2024

Accepted for publication:

15 November 2024

Accepted:

22 November 2024

Published:

11 December 2024

Keywords: mining, open-pit mining, dump truck, cargo platform (body), DEM, Rocky DEM, overburden.

Abstract.

The article discusses software based on the discrete element method for simulating the interaction of a bulk medium with mining equipment. The advantages, disadvantages and technical capabilities of various software products are analyzed, including EDEM, Rocky DEM, ThreeParticle, LIGGGHTS and Yade. The functional capabilities, computing performance, as well as publication activity devoted to research on the interaction of bulk materials with a metal structure or a mining machine node, corresponding to the state rubricators of scientific and technical information 52.00.00 - mining and 55.33.00 – mining engineering, for the software products under consideration, are evaluated. Rocky DEM and EDEM software have built-in calculation algorithms and contact models for particle (Ab-T10, Tavares) and smoothed particle destruction (SPH). The results of simulation modeling, using the method of discrete elements, of the interaction of rock mass with the cargo platform (body) of a quarry dump truck with a load capacity of 220 tons in the Rocky DEM and EDEM software are presented. A comparative analysis of software products based on the discrete element method has shown that Rocky DEM is the optimal software for solving problems related to the simulation of the interaction of the bulk medium with the cargo platform (body) of a dump truck, and topics of scientific research in the field of mining machines.

For citation: Dubinkin D.M., Yalyshev A.V., Ismailova Sh.Ya. On the choice of software for simulation modeling of loading rock mass into quarry dump trucks. *Mining Equipment and Electromechanics*, 2024; 5(175):42-51 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2024-5-42-51, EDN: EUDHOE

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. Yalyshev A.V. The need to create a cargo platform for a battery mining dump truck. *Innovations in information technology, mechanical engineering and motor transport : Collection of materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. Kemerovo, November 30 – 01 2022. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev; 2022. Pp. 706–710.
2. Ismailova Sh.Ya. Mathematical model and simulation of a rock cargo platform of a dump truck. *Young Russia : Collection of materials of the XV All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation*. Kemerovo, April 18-21, 2023. Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev; 2023. Pp. 423051–423055.
3. Dubinkin D. Design development of autonomous mining dump trucks. *E3S Web of Conferences : International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia 2023*. Novosibirsk, Russia, May 16-19, 2023. Vol. 402. Novosibirsk, Russia: EDP Sciences; 2023. P. 10022. DOI: 10.1051/e3sconf/202340210022.
4. Dubinkin D.M. Methodology for determining the loads acting during loading and unloading of the cargo platform (body) of a quarry dump truck. *Mining equipment and electromechanics*. 2022; 3(161):31–49. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-3-31-49.
5. Johnson Evan F., İlker Tari, Derek Baker. Modeling heat exchangers with an open source DEM-based code for granular flows. *Solar Energy*. 2021; 228: 374–386. DOI: 10.1016/j.solener.2021.09.067.
6. Demishev A.Y. Dependence of adhesion strength on temperature, implementation of heating of the contact surface. Abstracts of the report at the student conference "Science Day". DonNTU, 2010.
7. Morrissey J. P. Discrete Element Modelling of Iron Ore Pellets to Include the Effects of Moisture and Fines. PhD thesis, Edinburgh, Scotland: University of Edinburgh; 2013.
8. Oka Y.I., Okamura K., Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*. 2005; 259(1–6):95–101. DOI: 10.1016/j.wear.2005.01.039.
9. Archard J.F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953; 24(8):981–988. DOI: 10.1063/1.1721448.
10. Norouzi H. [et al.] Coupled CFD-DEM modelling, formulation, implementation and application to multiphase flows (1st). Chapter 6. John Wiley & Sons, Inc. 2016. DOI: 10.1002/9781119005315.
11. Ali D., Frimpong, S. Impulse force reductions and their effects on WBV exposures in high impact shovel loading operations. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018; 28(3):423–435. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.03.00.
12. Zhang K., Yu W., Li D., Zou D., Zhang S. Measurement and simulation validation of numerical model parameters of fresh concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*. 2021; 28(1), 437–452. DOI: 10.1515/secm-2021-0042.
13. Santamarina J. C., Cho G. C. Soil Behaviour: The role of particle shape. *Adv. Geotech. Eng. Skempton Conf. Proc.* 2004. Pp. 604–617.
14. Pena A. A., Garcia-Revo R., Herrmann H. J. Influence of particle shape on shared dance. *Granular Media. Granular Matter*. 2007; 9:279–291. DOI: 10.48550/arXiv.cond-mat/0603358.
15. Samusev P.A. Investigation of the influence of technological processes of coal mining on its granulation. *Vestnik KuzGTU*. 1999; 2:50–51.
16. Donz'e F., Magnier S.A. Formulation of a three-dimensional numerical model of brittle behavior. *Geophys. J. Int.* 1995; 122:790–802.
17. Tavares L.M., das Chagas A.S. A stochastic particle replacement strategy for simulating breakage in DEM. *Powder Technology*. 2020; 377:222–232. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.08.
18. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya., Yalyshev A.V. Determination of parameters of the overburden model for simulation modeling of loading and unloading of a rock cargo platform of a dump truck. *Mining engineering and technology*. 2023; 4(23):76–90. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-76-90.
19. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya. Determination of loam and clay model parameters for simulation of loading and unloading of a dump truck cargo platform. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. – 2023; 6(160):94–104. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-94-104.

20. Dubinkin D.M., Ismailova Sh.Ya., Yalyshev A.V. The effect of the sequence of overburden loading on the utilization factor of the BELAZ-75310 (240 t) dump truck. *Mining engineering and technology*. 2023; 4(23):103–118. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-4-103-118.

21. Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. The influence of the process of loading coal into a cargo platform on the utilization factor of the BelAZ-7530 (220 t) dump truck. *Coal*. 2023; S12(1175):11–19. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.

© 2024 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, PhD (Engineering), Associate Professor, Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; ORCID 0000-0002-8193-9794, Scopus ID 57197717432; e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Alexey V. Yalyshev, postgraduate student, junior researcher at the scientific center "Digital Technologies", Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; Scopus ID 58034289400; e-mail: yalyshevav@kuzstu.ru

Shakhnaz Y. Ismailova, postgraduate student, junior researcher at the scientific center "Digital Technologies", Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; Scopus ID 58668791100; e-mail: ismailovashja@kuzstu.ru

Contribution of the authors:

Dmitry M. Dubinkin – research problem statement; scientific management, conceptualization of research, writing a text.
Alexey V. Yalyshev – conceptualizing research, collecting and analyzing data, reviewing relevant literature, conclusions, writing a text.

Shahnaz Y. Ismailova – conceptualizing research, collecting and analyzing data, reviewing relevant literature, conclusions, writing a text.

Authors have read and approved the final manuscript.

