ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -3

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 3

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

УДК 622.271:519.876.5

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСКАВАТОРНОЙ ПОГРУЗКИ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ

Умаров Фарходбек Яркулович
Директор Филиала НИТУ «МИСИС» в г. Алмалык.
Заиров Шерзод Шарипович
Профессор кафедры «Горное дело» Филиала НИТУ «МИСИС» в г. Алмалык.
Каримов Шерзод Вафо угли
Начальник сектора научных исследований, инноваций и подготовки научно-педагогических кадров Филиала НИТУ «МИСИС» в г. Алмалык.
E-mail: karimov20-13@mail.ru
Туйчибоев Элдор Илхом угли
Базовый докторант Филиала НИТУ «МИСИС» в г. Алмалык.
E-mail: tei050599@gmail.com

Аннотация. Рассматривается методологический подход к исследованию процесса экскаваторной погрузки взорванной горной массы на основе метода дискретных элементов (DEM). Статья оформлена в соответствии со структурой IMRAD: во введении (Introduction) обосновывается актуальность проблемы; в разделе «Материалы и методы» (Methods) описаны горно-технические условия объекта исследования и методология DEM-моделирования, включая выбор контактной модели, представление частиц неправильной формы, задание кинематики ковша и методику планирования численных экспериментов; в разделе «Результаты» (Results) приводится анализ показателей погрузки, полученных в ходе серии вычислительных экспериментов; в разделе «Обсуждение» (Discussion) рассмотрены ограничения DEM-подхода и пути их преодоления. На примере карьера Кальмакыр (АГМК, Узбекистан) и экскаватора ЭКГ-10 рассмотрена практическая реализация методики. Показана применимость DEM-подхода для количественной оценки влияния гранулометрического состава на показатели наполнения ковша.

Ключевые слова: метод дискретных элементов; DEM-моделирование; экскаваторная погрузка; горная масса; карьер; контактная модель; кинематика ковша; гранулометрический состав; планирование экспериментов.

Abstract. A methodological approach to the study of the shovel loading process of blasted rock mass based on the Discrete Element Method (DEM) is considered. The article is structured in accordance with the IMRAD format: the Introduction

substantiates the relevance of the problem; the Materials and Methods section describes the mining-technical conditions of the object under study and the DEM modelling methodology, including the choice of the contact model, representation of irregularly shaped particles, definition of the bucket kinematics and the procedure for planning numerical experiments; the Results section presents an analysis of the loading indicators obtained from a series of computational experiments; the Discussion section examines the limitations of the DEM approach and ways of overcoming them. The practical implementation of the methodology is considered using the example of the Kalmakyr open-pit mine (AMMC, Uzbekistan) and the EKG-10 shovel. The applicability of the DEM approach for the quantitative assessment of the influence of particle-size distribution on bucket-filling indicators is demonstrated.

Keywords: discrete element method; DEM modelling; shovel loading; rock mass; open-pit mine; contact model; bucket kinematics; particle-size distribution; design of experiments.

Annotatsiya. Diskret elementlar usuli (DEM) asosida portlatilgan tog‘ massasini ekskavatorli yuklash jarayonini tadqiq etishning metodologik yondashuvi ko‘rib chiqilgan. Maqola IMRAD tuzilmasiga muvofiq tuzilgan: kirish (Introduction)da muammoning dolzarbligi asoslangan; «Materiallar va usullar» (Methods) bo‘limida tadqiqot ob’ektining tog‘-texnik sharoitlari va DEM-modellashtirish metodologiyasi tasvirlangan, jumladan kontakt modelini tanlash, noto‘g‘ri shakldagi zarrachalarni ifodalash, cho‘mich kinematikasini berish va sonli tajribalarni rejalashtirish uslubi; «Natijalar» (Results) bo‘limida sonli tajribalar seriyasi davomida olingan yuklash ko‘rsatkichlari tahlili keltirilgan; «Muhokama» (Discussion) bo‘limida DEM yondashuvining cheklovlari va ularni bartaraf etish yo‘llari ko‘rib chiqilgan. Qalmoqir karerini (AMMK, O‘zbekiston) va EKG-10 ekskavatorini misol qilib metodikaning amaliy joriy etilishi ko‘rib chiqilgan. DEM yondashuvining donadorlik tarkibining cho‘michning to‘ldirilish ko‘rsatkichlariga ta’sirini miqdoriy baholashda qo‘llanilishi mumkinligi ko‘rsatilgan.

Kalit so‘zlar: diskret elementlar usuli; DEM-modellashtirish; ekskavatorli yuklash; tog‘ massasi; karer; kontakt model; cho‘mich kinematikasi; donadorlik tarkibi; tajribalarni rejalashtirish.

ВВЕДЕНИЕ.

Метод дискретных элементов (Discrete Element Method, DEM) за последние три десятилетия превратился в один из ключевых инструментов вычислительной механики сыпучих сред и нашёл широкое применение в горном деле, химической технологии, промышленности строительных материалов и сельском хозяйстве [1, 2]. Его принципиальное достоинство -

ISSN 3030-3907

возможность явного моделирования каждой частицы ансамбля с учётом её формы, массы и контактных взаимодействий с соседними частицами и поверхностями - открывает уникальные возможности для исследования процессов, не поддающихся непосредственному физическому наблюдению.

Одним из таких процессов является экскаваторная погрузка взорванной горной массы. При черпании ковшом экскаватора возникает сложная картина силовых взаимодействий между сотнями и тысячами кусков породы различных размеров, форм и прочностных характеристик. Именно это многочастичное взаимодействие определяет итоговую плотность укладки горной массы в ковше и, следовательно, массу горной массы за черпак - ключевой показатель производительности погрузочного оборудования [3, 4].

Традиционные методы исследования - физическое масштабное моделирование и промышленные наблюдения - сопряжены со значительными затратами времени и средств и не позволяют систематически варьировать все определяющие параметры в широком диапазоне. DEM-моделирование снимает эти ограничения, обеспечивая полный контроль над параметрами расчётной модели и воспроизводимость результатов [5].

Цель настоящей работы - описание методологии DEM-моделирования процесса экскаваторной погрузки и её практическая апробация на условиях карьера Кальмакыр Алмалыкского горно-металлургического комбината (АГМК, Республика Узбекистан). В задачи исследования входят: (а) построение геометрической модели процесса черпания с учётом конструктивных особенностей экскаватора ЭКГ-10; (б) задание материальных свойств и контактных параметров, соответствующих условиям диоритовых пород; (в) планирование и проведение серии вычислительных экспериментов; (г) анализ полученных показателей наполнения ковша и обсуждение ограничений метода.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.

Объект исследования: карьер Кальмакыр. Карьер Кальмакыр является крупнейшим медно-порфировым месторождением Центральной Азии и одним из ведущих горнодобывающих предприятий Республики Узбекистан. Годовой объём добычи горной массы составляет более 100 млн м³, при этом объём добычи руды превышает 25 млн т в год. Глубина карьера на современном этапе разработки составляет более 350 м, рабочие горизонты ведутся с высотой уступа 12–15 м [6].

ISSN 3030-3907

Разрабатываемые породы представлены диоритами и гранодиоритами. Их физико-механические характеристики, принятые в качестве исходных данных для DEM-моделирования, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства пород карьера Кальмакыр

Параметр	Значение	Единица измерения
Плотность монолита ρs	2 650	кг/м³
Предел прочности на сжатие σсж	120–160	МПа
Модуль сдвига G	$2 \cdot 10^8$	Па
Коэффициент Пуассона ν	0.25	–
Коэффициент крепости f	12–16	–

Горнодобывающее оборудование. Основным погрузочным оборудованием карьера являются карьерные экскаваторы ЭКГ-10 - одноковшовые прямолопатные экскаваторы с объёмом ковша 10 м³. Данный тип оборудования широко распространён на постсоветских карьерах и отличается высокой надёжностью в условиях крепких абразивных пород. Основные технические характеристики ковша: геометрический объём V = 10 м³, линейные размеры 2.0 × 2.3 × 2.3 м, крутящий момент подъёмного механизма до 6 860 000 Н·м [7].

Экскаваторы работают в сцепке с автосамосвалами БелАЗ-75131 грузоподъёмностью 130 т. Продолжительность рабочего цикла экскаватора составляет, по производственным наблюдениям, 28–45 с в зависимости от условий работы, из которых на процесс черпания приходится 8–15 с [8].

Теоретические основы метода дискретных элементов. Метод дискретных элементов основан на явном интегрировании уравнений движения каждой частицы ансамбля [9]:

$$m_i \cdot \left(\frac{d^2 x_i}{dt^2}\right) = \Sigma F_{ij} + F_i(g), \quad (1)$$

$$I_i \cdot \left(\frac{d\omega_i}{dt}\right) = \Sigma M_{ij}, \quad (2)$$

где m_i, x_i, ω_i - масса, координата центра масс и угловая скорость i-й частицы;

I_i - момент инерции;

F_{ij} - контактная сила от взаимодействия с j-й частицей;

$F_i(g)$ - сила тяжести;

M_{ij} - крутящий момент контактной силы.

Шаг интегрирования выбирается значительно меньше критического шага устойчивости Рэлея, как правило, 20–40% от него [10].

ISSN 3030-3907

Ключевым элементом DEM является контактная модель, описывающая механику взаимодействия двух частиц при их перекрытии. Наиболее распространённой в задачах горного машиноведения является модель Герца–Миндлина (Hertz-Mindlin no-slip), реализующая нелинейную контактную жёсткость в нормальном направлении и тангенциальный демпфирование с кулоновским ограничением силы трения [11]. Параметры данной модели - коэффициент восстановления, статического трения и трения качения - однозначно определяют динамику ансамбля частиц и должны быть откалиброваны на основе физических экспериментов [12].

Программный комплекс Altair EDEM. Численное моделирование выполнено в программном комплексе Altair EDEM 2026 - коммерческой платформе DEM, широко применяемой в промышленных и научных исследованиях. Комплекс обеспечивает GPU-ускорение расчётов, развитые инструменты визуализации и постобработки, а также программный интерфейс для автоматизации серийных расчётов [13].

Функциональные возможности EDEM, наиболее существенные для данного исследования: поддержка concave-частиц (частиц произвольной формы, задаваемых сеткой поверхностей), масштабирование частиц по объёму (Scale By Volume) для задания полидисперсного распределения, контроллер крутящего момента для задания кинематики ковша, инструменты Selection Box для подсчёта массы частиц в заданном объёме [14].

Геометрическая модель. Геометрическая модель процесса черпания включает три основных компонента: CAD-модель ковша экскаватора, поверхность забоя и зону генерации частиц. CAD-модель ковша ЭКГ-10 разработана на основе технической документации предприятия и содержит 18 930 треугольных фасетов. Поверхность забоя представлена плоскостью с характерным наклоном горизонта 5–8° в сторону откоса уступа.

Зона генерации частиц (Particle Factory) расположена над поверхностью забоя и обеспечивает равномерное заполнение рабочего пространства горной массой с заданным гранулометрическим составом. Число генерируемых частиц и их массовые доли задаются в соответствии с распределением Розин–Раммлера для текущего варианта расчёта. Перед началом основной симуляции выполняется предварительный расчёт оседания горной массы под действием силы тяжести до достижения равновесного состояния [15].

Модель частиц. Частицы породы представлены concave-элементами с угловатой формой, характерной для взорванной горной массы диоритовых пород. Базовый элемент содержит 128 вершин и 252 треугольника и имеет

ISSN 3030-3907

сферичность 0.917, что соответствует типичным значениям для взорванной скальной породы по данным [16]. Форма базовой частицы разработана на основе фотограмметрических измерений кусков горной массы на площадке карьера.

Гранулометрический состав горной массы задаётся путём масштабирования базового элемента (Scale By Volume) по шести классам крупности. Масштабные коэффициенты выбраны таким образом, чтобы обеспечить разумный компромисс между детальностью представления гранулометрического распределения и вычислительными затратами: 0.01, 0.05, 0.30, 0.50, 0.70, 1.00 (рис.1).

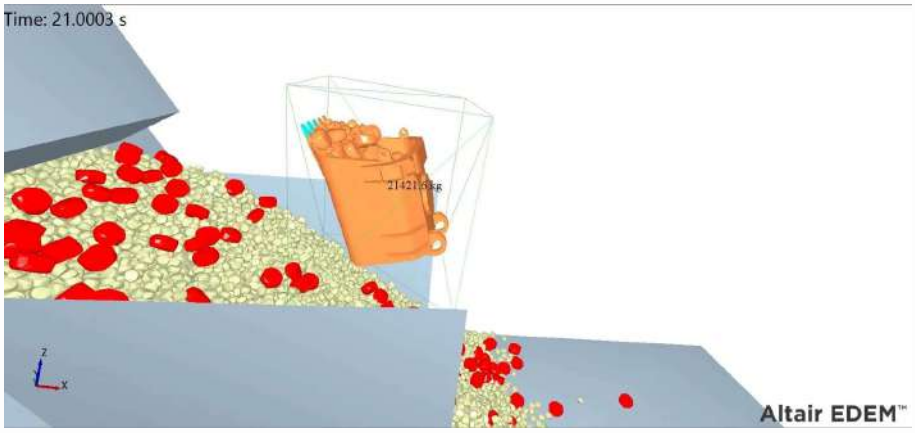


Рис 1. DEM процесс погрузки ковшом на программе Altair EDEM

Контактные параметры. Параметры контактной модели Герца–Миндлина определены на основе калибровочных испытаний и литературных данных для диоритовых пород и стали. В табл. 2 приведены принятые значения.

Таблица 2

Параметры контактной модели DEM

Параметр	Порода–порода	Порода–сталь
Коэффициент восстановления e	0.30	0.40
Коэффициент стат. трения μs	0.65	0.40
Коэффициент трения качения μr	0.05	0.02

Верификация контактных параметров выполнялась путём сопоставления расчётного угла естественного откоса горной массы с результатами натурных измерений. Расхождение составило менее 3°, что признаётся удовлетворительным для данного класса задач [12, 17].

Кинематика ковша. Кинематика ковша задаётся в EDEM через контроллер крутящего момента (Torque Controller), имитирующий работу подъёмного механизма экскаватора. Параметры контроллера:

ISSN 3030-3907

максимальный момент M = 6 860 000 Н·м, угловая скорость подъёма ω = 0.141 рад/с, максимальный угол подъёма φ = 1.05 рад (60.2°). Указанные значения соответствуют паспортным характеристикам экскаватора ЭКГ-10 [7].

Процесс черпания моделируется следующим образом: ковш начинает движение из нижнего положения у основания забоя, совершает зачерпывающее движение, проходя через насыпь горной массы, и завершает цикл в верхнем положении. Общая продолжительность моделируемого процесса составляет 20 с модельного времени, что обеспечивает полное завершение процесса наполнения и стабилизацию положения горной массы в ковше.

Планирование вычислительных экспериментов. Систематическое исследование влияния параметров гранулометрического состава на показатели погрузки требует проведения серии расчётов при различных комбинациях входных параметров. Для эффективного охвата двумерного параметрического пространства (X50, n) применён метод планирования Latin Hypercube Sampling (LHS) [18].

LHS обеспечивает равномерное распределение расчётных точек по всему диапазону каждого параметра при меньшем числе экспериментов по сравнению с полным факторным планом. При наличии двух параметров и плане из N точек LHS делит каждую ось на N равных интервалов, выбирая ровно одну точку в каждом горизонтальном и вертикальном «слое» пространства. Это свойство стратифицированного отбора обеспечивает хорошее покрытие пространства параметров без кластеризации точек [19].

Варьируемые параметры: X50 - медианный размер куска, диапазон 50–1000 мм; n - показатель однородности дробления по Розин–Раммлеру, диапазон 0.6–1.6. Указанные диапазоны перекрывают практически весь спектр значений, реализуемых при промышленных буровзрывных работах на карьерах в крепких скальных породах [20].

Методика обработки результатов. Целевые показатели погрузки извлекаются из результатов DEM-расчёта на последнем шаге симуляции (t = 20 с) с помощью инструмента Selection Box программы EDEM Analyst. Selection Box представляет собой прямоугольный контрольный объём, соответствующий внутреннему пространству ковша. Частицы, чьи центры масс находятся внутри данного объёма, считаются «загруженными» в ковш.

Суммарная масса в ковше $M = \Sigma m_i$ вычисляется путём суммирования масс mi всех частиц, попавших в контрольный объём.
Масса отдельной частицы:

ISSN 3030-3907

$$m_i = m_0 \cdot {s_i}^3, \quad (3)$$

где m_0 - масса базовой частицы при единичном масштабе,
s_i - масштабный коэффициент данной частицы.

Из полученной массы вычисляются производные показатели: насыпная плотность, коэффициент наполнения и порозность горной массы.

Вычислительные ресурсы. Продолжительность одного DEM-расчёта составляет 18–24 мин при использовании GPU-ускорения. Такое время обусловлено необходимостью моделировать несколько тысяч частиц с временным шагом порядка 10^{-5}–10^{-4} с, что требует выполнения нескольких миллионов временных итераций. Шаг интегрирования принят равным 30% от критического шага Рэлея, что обеспечивает устойчивость расчёта при сохранении приемлемой производительности.

Параллельный расчёт серии из нескольких сотен вариантов на кластере из 10 рабочих станций с GPU-ускорением обеспечивает получение полного массива результатов в течение приемлемого времени - порядка нескольких суток. Автоматизация запуска расчётов и сбора результатов реализована посредством Python-скриптов, взаимодействующих с API программного комплекса EDEM.

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Диапазон получаемых результатов. Серия вычислительных экспериментов позволяет установить диапазон изменения основных показателей погрузки при варьировании параметров гранулометрического состава в рассматриваемых пределах. Наблюдается значительный разброс значений: масса горной массы в ковше может меняться в широких пределах в зависимости от сочетания X50 и n.

Данный диапазон существенно превышает точность нормативных справочных значений и свидетельствует о высокой чувствительности показателей погрузки к параметрам гранулометрического состава. Следовательно, при проектировании буровзрывных работ целесообразно учитывать данный фактор наряду с традиционно рассматриваемыми требованиями по транспорту и переработке.

Качественный анализ зависимостей. Качественный анализ результатов показывает, что зависимость показателей наполнения ковша от медианного размера куска X50 носит нелинейный характер. При малых значениях X50 (мелкодроблёная порода) насыпная плотность относительно невысока вследствие преобладания мелких фракций и связанного с этим сводообразования. При увеличении X50 наблюдается рост коэффициента наполнения, достигающий максимума в некотором оптимальном диапазоне.

ISSN 3030-3907

При дальнейшем увеличении X50 насыпная плотность начинает снижаться: крупные куски хуже вписываются в геометрию ковша, а пространство между ними остаётся незаполненным. Подобный нелинейный характер зависимости хорошо согласуется с теоретическими представлениями о смешанной упаковке полидисперсных зернистых материалов [21, 22].

Влияние показателя однородности n оказывается менее выраженным по сравнению с влиянием медианного размера куска. Это объясняется тем, что параметр n характеризует ширину гранулометрического распределения, тогда как параметр X50 определяет абсолютный масштаб крупности, который сильнее влияет на геометрические условия укладки в ковше конкретного объёма.

Сопоставление с нормативными данными. Сопоставление результатов DEM-моделирования с нормативными справочными значениями коэффициента наполнения ковша показывает удовлетворительное согласование для среднестатистических условий. Однако при отклонении параметров гранулометрического состава от «нормативных» значений (мелко- или крупнодроблёная порода) реальный коэффициент наполнения может существенно - на 15–30% - отличаться от нормативного [6, 7].

Данный результат подтверждает ограниченность нормативного подхода и обосновывает необходимость применения более детальных расчётных методов при оценке производительности экскаваторной погрузки в конкретных горно-технических условиях.

ОБСУЖДЕНИЕ.

Полученные в ходе вычислительных экспериментов результаты подтверждают работоспособность предложенной методологии DEM-моделирования и её применимость для количественной оценки показателей экскаваторной погрузки. Вместе с тем практическое использование метода связано с рядом ограничений, которые необходимо учитывать при интерпретации результатов и проектировании дальнейших исследований.

Вычислительные затраты. Основным практическим ограничением DEM-моделирования для задач экскаваторной погрузки являются значительные вычислительные затраты. При реалистичном числе частиц (десятки тысяч для ковша 10 м³ при X50 = 100 мм) один расчёт требует нескольких часов на современном GPU. Это ограничивает возможности проведения масштабных параметрических исследований.

Для преодоления данного ограничения применяются: укрупнение частиц с сохранением статистики распределения; представление мелких

ISSN 3030-3907

фракций как эффективной сплошной среды; использование суррогатных моделей, обученных на ограниченном наборе DEM-расчётов [23]. Последний подход наиболее перспективен для задач оперативного принятия решений в производственных условиях.

Калибровка контактных параметров. Достоверность DEM-расчётов критически зависит от точности калибровки контактных параметров. Для каждой новой пары «материал–поверхность» требуется специальная серия калибровочных экспериментов: измерение угла естественного откоса, времени оседания частиц, коэффициента восстановления при соударении [12, 24]. Погрешности в контактных параметрах могут приводить к систематическим ошибкам в предсказании порозности.

Методика калибровки для диоритовых пород разработана на основе анализа серии стандартных испытаний: угол естественного откоса, время погашения колебаний при соударении куска породы с металлической плитой, поверхностный коэффициент трения при сдвиге. Показана чувствительность результатов к точности определения коэффициента трения, который должен быть определён с погрешностью не более ±5%.

Форма частиц. Реальные куски взорванной породы имеют сложную неправильную форму, точное воспроизведение которой в DEM требует использования многогранников с большим числом вершин, что существенно увеличивает вычислительные затраты [25]. На практике применяется компромиссное представление: concave-частицы с числом вершин 50–200, обеспечивающее разумное соотношение между реалистичностью модели и производительностью расчётов.

Статистическое распределение формы кусков породы характеризуется коэффициентом сферичности. Для взорванных диоритовых пород данный коэффициент составляет, по результатам измерений, 0.85–0.95. Отклонение формы частиц от данного диапазона существенно влияет на порозность упаковки, что необходимо учитывать при обобщении результатов на другие типы пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В статье представлена методология DEM-моделирования процесса экскаваторной погрузки взорванной горной массы применительно к условиям карьера Кальмакыр. Описаны принципы построения расчётной модели, включая выбор контактной модели Герца–Миндлина, представление частиц с помощью concave-элементов, задание кинематики ковша через контроллер крутящего момента и методику оценки массы горной массы в ковше.

ISSN 3030-3907

Показано, что метод Латинского гиперкуба обеспечивает эффективное покрытие двумерного параметрического пространства (X50, n) при разумном числе вычислительных экспериментов. Программный комплекс Altair EDEM 2026 с GPU-ускорением обеспечивает приемлемое время расчёта одного варианта - 18–24 мин, что делает возможным проведение серийных параметрических исследований.

Качественный анализ результатов подтверждает нелинейный характер влияния кусковатости на показатели наполнения ковша, хорошо согласующийся с теоретическими закономерностями смешанной упаковки полидисперсных зернистых материалов. Данные результаты свидетельствуют о потенциале оптимизации параметров буровзрывных работ по критерию максимальной массы горной массы за черпак.

Разработанная методология применима для других типов одноковшовых экскаваторов и пород аналогичного петрографического типа. Перспективным направлением развития является построение суррогатных предсказательных моделей на основе обученных DEM-массивов для оперативного прогнозирования показателей погрузки в производственных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // Géotechnique. 1979. Vol. 29(1). P. 47–65.
2. Coetzee C.J. Review: Calibration of the discrete element method // Powder Technology. 2017. Vol. 310. P. 104–142.
3. Hustrulid W.A., Kuchta M., Martin R.K. Open Pit Mine Planning and Design. CRC Press, 2013. 1288 p.
4. Подэрни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ. М.: МГГУ, 2013. 412 с.
5. Cleary P.W. Large scale industrial DEM modelling // Engineering Computations. 2004. Vol. 21(2/3/4). P. 169–204.
7. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. 1. М.: Недра, 1985. 509 с.
8. Единые нормы выработки на открытые горные работы. М.: НИИтруда, 2001.
9. Анистратов Ю.И. Технология открытых горных работ. М.: Недра, 2008. 420 с.
10. Tsuji Y. et al. Lagrangian numerical simulation of plug flow // Powder Technology. 1992. Vol. 71(3). P. 239–250.
11. Obermayr M. et al. A bonded-particle model for cemented sand // Computers and Geotechnics. 2013. Vol. 49. P. 299–313.

ISSN 3030-3907

12. Tsuji Y., Tanaka T., Ishida T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles // Powder Technology. 1992. Vol. 71. P. 239–250.
13. Grima A.P., Wypych P.W. Calibration methods for discrete element modelling // Granular Matter. 2011. Vol. 13(2). P. 127–132.
14. Altair EDEM 2026 Documentation. Altair Engineering Inc., 2026.
15. Cleary P.W. DEM modelling of particulate flow in a screw feeder // Progress in Computational Fluid Dynamics. 2007. Vol. 7(2–4). P. 128–138.
16. Nezami E.G. et al. Simulation of front end loader bucket-soil interaction // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2007. Vol. 31(9). P. 1147–1162.
17. Sanchidrián J.A., Ouchterlony F. Distribution-free description of fragmentation // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50(4). P. 781–806.
18. Coetzee C.J., Els D.N.J. Discrete element parameter calibration and dragline bucket filling // Journal of Terramechanics. 2010. Vol. 47(1). P. 33–44.
19. McKay M.D. et al. Selecting values of input variables // Technometrics. 1979. Vol. 21(2). P. 239–245.
20. Forrester A.I.J., Keane A.J. Recent advances in surrogate-based optimization // Progress in Aerospace Sciences. 2009. Vol. 45(1–3). P. 50–79.
21. Cunningham C.V.B. The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on // Brighton Conference Proceedings. 2005. P. 201–210.
22. Yu A.B., Standish N. Porosity calculations of multi-component mixtures // Powder Technology. 1991. Vol. 65(1–3). P. 241–251.
23. Desmond K.W., Weeks E.R. Random close packing of disks and spheres // Physical Review E. 2009. Vol. 80(5). 051305.
24. Yondo R. et al. A review on design of experiments and surrogate models // Progress in Aerospace Sciences. 2018. Vol. 96. P. 23–61.
25. Onate E., Rojek J. Combination of discrete element and finite element methods // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 2004. Vol. 193(27–29). P. 3087–3128.
26. Gan J., Zhou Z., Yu A. DEM simulation on the packing of fine ellipsoids // Chemical Engineering Science. 2016. Vol. 156. P. 64–76.
27. Curry D. et al. DEM simulation of transfer chute performance // Powder Technology. 2023. Vol. 415. 118094.
28. Jang H., Topal E. Optimizing oversize blast fragmentation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 128. 104248.
29. Jethro M.A., Onyemaobi O.O. Optimizing fragmentation for efficient loading // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Vol. 32(4). P. 717–728.

ISSN 3030-3907

30. Rosin P., Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal // Journal of the Institute of Fuel. 1933. Vol. 7. P. 29–36.
31. Wills B.A., Finch J.A. Wills' Mineral Processing Technology. Butterworth-Heinemann, 2016. 512 p.

ISSN 3030-3907