ISNN 3030-3907

2026
MAY
ISSUE - 5
VOLUME - 7

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

MAY 2026
Issue - 5, VOLUME – 7

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

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ КАК ФАКТОР ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРОВ

Умаров Фарходбек Яркулович
Директор *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. В статье представлен критический анализ существующих подходов к оценке влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на показатели экскаваторной погрузки. В соответствии со структурой IMRAD последовательно изложены: актуальность проблемы и постановка задачи (Introduction); методы исследования, включая эмпирические, аналитические и численные подходы (Methods); результаты систематизации существующих данных о связи кусковатости с коэффициентом наполнения ковша (Results); обсуждение ограничений рассмотренных методик и перспективных направлений их развития (Discussion). Выявлены ограничения традиционных справочных методик и обоснована необходимость разработки более точных инструментов прогнозирования. Показано, что кусковатость породы является ключевым параметром, определяющим насыпную плотность, коэффициент наполнения ковша и, следовательно, производительность погрузочного оборудования. Особое внимание уделено карьерам, разрабатывающим крепкие диоритовые и гранодиоритовые породы, характерные для медно-порфировых месторождений Центральной Азии.

Ключевые слова: гранулометрический состав; кусковатость; экскаваторная погрузка; коэффициент наполнения ковша; буровзрывные работы; карьер; насыпная плотность; порозность.

Abstract. The article presents a critical analysis of existing approaches to evaluating the influence of the particle-size distribution of blasted rock mass on shovel loading performance. Following the IMRAD structure, the work consistently sets out: the relevance of the problem and the statement of the task (Introduction); research methods, including empirical, analytical and numerical approaches (Methods); the results of systematization of existing data on the relationship between fragmentation and the bucket fill factor (Results); and a

ISSN 3030-3907

discussion of the limitations of the considered methodologies and promising directions for their development (Discussion). Limitations of traditional reference-based methodologies are identified, and the necessity of developing more accurate predictive tools is substantiated. It is shown that rock fragmentation is a key parameter determining the bulk density, the bucket fill factor, and consequently the productivity of loading equipment. Particular attention is paid to open-pit mines that exploit hard diorite and granodiorite rocks, which are typical of the copper-porphyry deposits of Central Asia.

Keywords: particle-size distribution; fragmentation; shovel loading; bucket fill factor; drilling and blasting operations; open-pit mine; bulk density; porosity.

Annotatsiya. Maqolada portlatilgan tog‘ massasining donadorlik tarkibi karer ekskavatorlarining yuklash ko‘rsatkichlariga ta’sirini baholash bo‘yicha mavjud yondashuvlarning tanqidiy tahlili keltirilgan. IMRAD tuzilmasiga muvofiq quyidagilar ketma-ket bayon etilgan: muammoning dolzarbligi va vazifaning qo‘yilishi (Introduction); empirik, analitik va sonli yondashuvlarni o‘z ichiga olgan tadqiqot usullari (Methods); donadorlik bilan cho‘michning to‘ldirilish koeffitsienti orasidagi bog‘liqlikka oid mavjud ma’lumotlarni tizimlashtirish natijalari (Results); ko‘rib chiqilgan uslublarning cheklovlari va ularni rivojlantirishning istiqbolli yo‘nalishlari muhokamasi (Discussion). An’anaviy ma’lumotnoma uslublarining cheklovlari aniqlangan va aniqroq prognozlash vositalarini ishlab chiqish zarurati asoslangan. Tog‘ jinsining donadorligi qatlamning hajm zichligini, cho‘michning to‘ldirilish koeffitsientini va shu orqali yuklash uskunasining unumdorligini belgilovchi asosiy parametr ekanligi ko‘rsatilgan. Markaziy Osiyoning mis-porfir konlariga xos mustahkam diorit va granodiorit jinslarni qazib olayotgan karerlarga alohida e’tibor qaratilgan.

Kalit so‘zlar: donadorlik tarkibi; donadorlik; ekskavatorli yuklash; cho‘michning to‘ldirilish koeffitsienti; burg‘ilash-portlatish ishlari; karer; hajm zichligi; g‘ovaklik.

ВВЕДЕНИЕ

Буровзрывные работы (БВР) являются одним из ключевых технологических процессов открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Их конечный продукт - взорванная горная масса с определённым гранулометрическим составом - непосредственно определяет эффективность всех последующих операций: погрузки, транспортировки и переработки сырья [1, 2]. Несмотря на очевидность данной взаимосвязи, задача количественного прогнозирования влияния кусковатости на показатели экскаваторной погрузки до настоящего времени не имеет общепринятого решения.

ISSN 3030-3907

Производительность одноковшового экскаватора определяется числом рабочих циклов в единицу времени и массой горной массы, извлекаемой за один цикл черпания. Последняя величина, в свою очередь, напрямую зависит от гранулометрического состава развала: при прочих равных условиях горная масса с оптимальным соотношением крупных и мелких фракций обеспечивает более плотную укладку в ковше по сравнению с однородно мелкодроблёной или крупнокусковой породой [3, 4]. Данный эффект объясняется закономерностями упаковки полидисперсных зернистых материалов, хорошо изученными в химической инженерии и физике сыпучих сред, однако мало применявшимися в горной практике.

Для карьеров Узбекистана, в особенности для крупнейшего медно-порфирового месторождения Кальмакыр (АГМК), данная проблема приобретает особую значимость. Разрабатываемые диоритовые и гранодиоритовые породы с пределом прочности на сжатие 120–160 МПа требуют интенсивного применения взрывчатых веществ, а годовые объёмы добычи, превышающие 25 млн тонн, делают даже небольшое повышение эффективности погрузки экономически весомым [5].

Цель настоящей работы - систематизация и критический анализ существующих методов оценки влияния кусковатости взорванной горной массы на показатели экскаваторной погрузки, а также обоснование перспективных направлений разработки комплексных инструментов прогнозирования, учитывающих горно-геологическую специфику конкретного объекта. В задачи исследования входят: (а) анализ физических основ влияния гранулометрического состава на характеристики насыпной горной массы; (б) обзор эмпирических, аналитических и численных методов оценки; (в) выявление ограничений рассмотренных подходов применительно к условиям крепких диоритовых пород.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Методологической основой настоящего обзора является сравнительно-аналитический подход к систематизации опубликованных в научной литературе методов оценки влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на показатели экскаваторной погрузки. В основу анализа положены источники, охватывающие теорию экскаваторной погрузки, теорию упаковки полидисперсных сред и численное моделирование методом дискретных элементов. Рассматриваемые методы классифицированы по трём категориям: эмпирические (нормативные и корреляционные), аналитические (теории упаковки) и численные (DEM-моделирование и гибридные суррогатные подходы).

ISSN 3030-3907

Параметры, определяющие производительность экскаватора. Коэффициент наполнения ковша Кн является одним из основных технологических показателей экскаваторной погрузки и определяется как отношение массы горной массы, фактически загруженной в ковш, к теоретически возможной при условии заполнения его геометрического объёма монолитной породой [6]:

$$Кн = \frac{M}{(V \cdot \rho s)}, \quad (1)$$

где M - масса горной массы в ковше, кг; V - геометрический объём ковша, м³; ρs - плотность монолитной породы, кг/м³.

Значение Кн зависит от многих факторов: типа экскаватора и конструкции ковша, физико-механических свойств породы, параметров буровзрывных работ и гранулометрического состава развала [7]. В нормативной практике применяются справочные значения коэффициента наполнения, дифференцированные по категориям горных пород и типам оборудования. Однако такие таблицы не отражают реальную связь Кн с кусковатостью и могут давать значительные погрешности при работе в специфических условиях [8].

Фундаментальным параметром, определяющим все производные характеристики насыпного состояния горной массы, является её порозность - доля пустот в общем объёме:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{тв}}{V}, \quad (2)$$

где Vтв - объём твёрдой фазы (частиц породы). Из порозности непосредственно следуют насыпная плотность ρн = ρs·(1–ε) и коэффициент разрыхления Кр = ρs/ρн.

Для однородных (монодисперсных) сферических частиц порозность случайной упаковки составляет 0.36–0.44 в зависимости от способа укладки [9]. В реальных горно-технических условиях частицы неправильной формы и широкого диапазона размеров упаковываются иначе: мелкие фракции заполняют пространство между крупными, уменьшая суммарную пористость. Данный эффект описывается теориями смешанной упаковки [10, 11], но применительно к взорванной горной массе неправильной формы требует отдельного исследования.

Принципиальное значение гранулометрического состава взорванной горной массы заключается в том, что он является управляемым параметром: изменяя схему бурения, параметры зарядов и конструкцию скважин, горный инженер способен целенаправленно регулировать кусковатость в широких пределах [12, 13]. Для описания гранулометрического состава взорванной

ISSN 3030-3907

горной массы наибольшее распространение получило распределение Розин–Раммлера [14]:

$$R(d) = 1 - \exp\left(-0.693 \cdot \left(\frac{d}{X50}\right)^{n}\right), \quad (3)$$

где R(d) - кумулятивная доля по массе частиц мельче размера d; X50 - медианный (средний) размер куска, мм; n - показатель однородности дробления, безразмерный. Данная двухпараметрическая модель достаточно хорошо описывает реальные гранулометрические кривые взорванной горной массы при значениях n в диапазоне 0.6–2.0 [15]. Прогнозирование X50 и n по параметрам буровзрывных работ производится с помощью моделей Куза–Рама [16] и Кушинга–Каммингема [17].

Эмпирические и нормативные методы. Исторически сложившимся инструментом практического горного инженера являются нормативные справочники, содержащие коэффициенты наполнения ковша и разрыхления горной массы в зависимости от категории породы. Единые нормы выработки [18] и справочники по горным машинам [19] приводят значения Кн в диапазоне 0.55–0.90 для различных условий. Данный подход обладает очевидными достоинствами - простотой применения и достаточной точностью для усреднённых условий - однако имеет принципиальный недостаток: отсутствие явной зависимости от гранулометрического состава конкретного развала.

Ряд отечественных и зарубежных работ предпринимали попытки установить полуэмпирические корреляции между параметрами БВР и производительностью экскаватора [20, 21]. Исследования Адебайо и Аканде [22] выявили статистически значимую зависимость между удельным расходом взрывчатых веществ и временем цикла черпания, однако прямая связь между гранулометрическим составом и коэффициентом наполнения в этих работах не рассматривалась. Существенным ограничением эмпирических подходов является их привязанность к условиям конкретных объектов, на которых проводились наблюдения. Перенос полученных зависимостей на другие месторождения с иными физико-механическими свойствами пород и другими типами экскаваторов требует дополнительной верификации и нередко даёт неприемлемые погрешности [23].

Аналитические модели упаковки. Теория упаковки полидисперсных смесей, развитая применительно к задачам химической технологии и материаловедения, может быть использована для описания укладки взорванной горной массы в ковше экскаватора. Модель Ю–Стэндиша [24] описывает зависимость порозности смеси от соотношения размеров

ISSN 3030-3907

компонентов и их объёмных долей для сферических частиц. Модель Андреасена [25] связывает порозность непрерывно-распределённой смеси с параметрами гранулометрической кривой.

Принципиальная проблема применения данных моделей к взорванной горной массе состоит в неправильной, угловатой форме кусков породы, существенно отличающейся от идеализированных сфер. Коэффициент формы (сферичность) реальных кусков составляет, как правило, 0.6–0.9, что приводит к систематическому отклонению фактической порозности от теоретических предсказаний [26]. Кроме того, в процессе черпания ковш не просто заполняется пассивно - активный рабочий орган оказывает уплотняющее воздействие на горную массу, дополнительно изменяя её пористость.

Тем не менее аналитические модели укладки обеспечивают качественно верное описание ключевого явления: при введении более мелких фракций в крупнокусковую породу суммарная порозность снижается до некоторого минимума, после чего, при дальнейшем измельчении, начинает возрастать. Этот нелинейный эффект имеет принципиальное значение для оптимизации параметров дробления при буровзрывных работах.

Метод дискретных элементов (DEM). Метод дискретных элементов (DEM), предложенный Кандаллом и Стрэком [27], является на сегодняшний день наиболее мощным инструментом для моделирования взаимодействия горной массы с рабочими органами горных машин. В отличие от эмпирических и аналитических подходов, DEM позволяет в явном виде учитывать форму частиц, их механические свойства, кинематику рабочего органа и граничные условия, тем самым воспроизводя физику процесса черпания с высокой степенью детализации [28, 29].

Применение DEM в задачах горного машиноведения охватывает широкий круг задач: оптимизацию формы ковша скрепера и экскаватора [30], изучение сопротивления копанию при работе в горной массе различной кусковатости [31], анализ процессов разгрузки и пересыпки [32]. Показано, что DEM обеспечивает приемлемое соответствие с физическими экспериментами при условии корректной калибровки контактных параметров модели [33].

Контактная модель Герца–Миндлина, реализованная в большинстве коммерческих пакетов (EDEM, PFC3D, LIGGGHTS), описывает нормальную и тангенциальную составляющие контактной силы между частицами с учётом упругого восстановления и трения [34]. Параметры модели - коэффициент восстановления, статического и кинематического

ISSN 3030-3907

трения - определяются экспериментально для конкретной пары «материал–материал» методом калибровочных испытаний [35].

К ограничениям DEM применительно к задачам экскаваторной погрузки следует отнести значительные вычислительные затраты при моделировании реалистичной горной массы с широким диапазоном размеров кусков. Прямое масштабирование частиц (без укрупнения) для ковша объёмом 10 м³ с медианным куском 100–200 мм потребовало бы сотен тысяч частиц и нескольких суток расчётного времени даже на современных GPU-кластерах. На практике применяются различные методы ускорения: укрупнение частиц с сохранением гранулометрической кривой, коррекция контактных параметров и упрощённые геометрические модели частиц [36].

Суррогатные и гибридные подходы. Значительные вычислительные затраты DEM-моделирования стимулировали развитие суррогатных подходов, при которых дорогостоящие численные расчёты заменяются быстрыми аппроксимирующими моделями. Методы планирования экспериментов, в частности метод Латинского гиперкуба [37], позволяют минимальным числом расчётов охватить многомерное параметрическое пространство.

Для аппроксимации результатов численных экспериментов используются различные методы машинного обучения: регрессия на основе гауссовских процессов [38], радиальные базисные функции, полиномиальный хаос и нейронные сети. Гауссовские процессы особенно привлекательны для инженерных приложений, поскольку наряду с точечной оценкой обеспечивают количественную меру неопределённости прогноза - дисперсию предсказания [39]. Это позволяет идентифицировать области параметрического пространства, требующие дополнительных вычислительных экспериментов.

Гибридный подход «DEM + суррогатная модель» обеспечивает лучшее из двух миров: физически обоснованную базу данных, полученную численным методом, и оперативность предсказания, пригодную для использования в производственных условиях в режиме реального времени [40].

РЕЗУЛЬТАТЫ.

Результатом проведённого анализа является систематизация существующих знаний о влиянии гранулометрического состава взорванной горной массы на показатели экскаваторной погрузки, представленная в настоящем разделе в виде трёх обобщающих блоков: физические закономерности влияния кусковатости на порозность; практические

ISSN 3030-3907

рекомендации по оптимизации буровзрывных работ; специфические особенности медно-порфировых месторождений.

Влияние кусковатости на порозность горной массы. Физические закономерности влияния гранулометрического состава на порозность горной массы качественно хорошо известны. При переходе от монодисперсной крупнокусковой к хорошо сортированной горной массе с широким диапазоном размеров фракций порозность последовательно снижается: мелкие куски заполняют пространство между крупными, увеличивая плотность укладки. Однако при чрезмерном измельчении породы - когда доля мелких фракций становится преобладающей - порозность вновь возрастает в результате сводообразования и арочных эффектов [10].

Данный нелинейный характер зависимости порозности от параметров гранулометрического распределения предполагает существование оптимального гранулометрического состава, при котором порозность минимальна, а масса горной массы в ковше - максимальна. Однако конкретные количественные значения оптимальных параметров существенно зависят от формы кусков породы, геометрии ковша и динамики процесса черпания, что делает необходимым проведение исследований для каждого конкретного объекта и типа оборудования.

Обобщённые рекомендации по оптимизации буровзрывных работ. Принципиальный вывод из анализа опубликованных работ состоит в следующем: традиционная практика максимального измельчения горной массы с целью снижения усилий черпания не является оптимальной с точки зрения массы горной массы за черпак и суммарной производительности экскаватора. Чрезмерное дробление порождает высокопористую массу мелких кусков с низкой насыпной плотностью, что снижает загрузку ковша по массе при его полном заполнении по объёму [21, 22].

Вместе с тем чрезмерно крупное дробление создаёт свои проблемы: увеличивается сопротивление копанию, возрастает вероятность застревания крупных кусков в ковше, увеличивается время цикла и повышается износ режущих кромок [8, 31]. Баланс этих противоположных тенденций определяет рациональный диапазон параметров кусковатости, достижимый средствами управления буровзрывными работами.

Количественная оценка данного баланса требует либо дорогостоящих промышленных экспериментов, либо применения верифицированных расчётных моделей, учитывающих как физику укладки горной массы, так и динамику процесса черпания. Разработка таких моделей является актуальной научной и практической задачей.

ISSN 3030-3907

Специфика медно-порфировых месторождений. Медно-порфировые месторождения, к числу которых относится карьер Кальмакыр, характеризуются рядом особенностей, существенных для рассматриваемой проблемы. Разрабатываемые диоритовые и гранодиоритовые породы отличаются высокой прочностью (σсж = 100–180 МПа) и крепостью (f по шкале Протодьяконова 12–16), что обусловливает высокое сопротивление дроблению и повышенный удельный расход взрывчатых веществ [5, 12].

Крупные размеры добычных блоков (более 15×15×15 м) и значительные объёмы единовременных взрывов (до 1–2 млн м³ горной массы) создают предпосылки для высокой неоднородности гранулометрического состава развала: его верхняя часть, как правило, содержит более крупные куски, чем нижняя, а периферийные зоны существенно отличаются от центральных [13, 16].

Применяемые на карьере экскаваторы ЭКГ-10 с объёмом ковша 10 м³ работают в паре с самосвалами БелАЗ-75131 грузоподъёмностью 130 т. При суммарной производительности карьера более 25 млн т/год даже незначительное увеличение коэффициента наполнения ковша приводит к весомому экономическому эффекту, что определяет высокую практическую ценность задачи оптимизации гранулометрического состава.

ОБСУЖДЕНИЕ.

Систематизация рассмотренных методов позволяет критически оценить их относительные достоинства и ограничения, а также наметить перспективные направления развития исследований. Эмпирический и нормативный подход, будучи наиболее простым в применении, не обеспечивает учёта специфики конкретного гранулометрического состава и даёт значительные погрешности при нестандартных условиях работы. Аналитические модели упаковки, напротив, описывают физически правильные закономерности, но их прямое применение к взорванной горной массе осложнено неправильной формой кусков и активной динамикой процесса черпания. Метод дискретных элементов выделяется среди рассмотренных подходов способностью одновременно учитывать и гранулометрический состав, и форму частиц, и кинематику рабочего органа, однако его практическое использование ограничивается значительными вычислительными затратами.

Проведённый анализ состояния изученности проблемы позволяет выделить четыре перспективных направления дальнейших исследований.

Первое направление - разработка верифицированных DEM-моделей процесса черпания применительно к конкретным типам горнодобывающего оборудования и реальным горно-геологическим условиям. Такие модели

ISSN 3030-3907

должны учитывать неправильную форму кусков породы, широкий диапазон размеров, реальную кинематику ковша и контактные свойства материалов.

Второе направление - установление количественных зависимостей между параметрами гранулометрического распределения (X50, n) и показателями погрузки (порозность, коэффициент наполнения, масса в ковше) на основе систематических вычислительных экспериментов. Такие зависимости должны охватывать широкий диапазон параметров кусковатости и отражать нелинейный характер влияния крупности на порозность.

Третье направление - создание суррогатных предсказательных моделей, позволяющих оперативно прогнозировать показатели погрузки при изменении параметров буровзрывных работ. Интеграция таких моделей в систему управления горным предприятием создаст основу для оперативной оптимизации режимов дробления с учётом текущих горно-геологических условий.

Четвёртое направление - обобщение результатов на ковши различного объёма и различные типы пород, что позволит расширить область применимости получаемых закономерностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Проведённый анализ показывает, что задача количественного прогнозирования влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на показатели экскаваторной погрузки является актуальной и не имеет удовлетворительного решения в рамках существующих нормативных и эмпирических подходов. Традиционные справочные методики не позволяют учесть конкретный гранулометрический состав развала и его влияние на насыпную плотность и коэффициент наполнения ковша.

Метод дискретных элементов представляет собой перспективный инструмент для решения данной задачи, однако его практическое применение осложняется значительными вычислительными затратами. Сочетание DEM с методами планирования вычислительных экспериментов и суррогатными моделями машинного обучения открывает путь к созданию эффективных инструментов оперативного прогнозирования.

Показано, что кусковатость взорванной горной массы является управляемым параметром, оптимизация которого способна существенно повысить производительность погрузочного оборудования. Разработка соответствующего методического обеспечения представляет значимую практическую ценность для карьеров, эксплуатирующих крепкие породы, в том числе для медно-порфировых месторождений Центральной Азии.

ISSN 3030-3907

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hustrulid W.A., Kuchta M., Martin R.K. Open Pit Mine Planning and Design. CRC Press, 2013. 1288 p.
2. Darling P. SME Mining Engineering Handbook. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2011. 1840 p.
3. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. 1. М.: Недра, 1985. 509 с.
4. Подэрни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ. М.: МГГУ, 2013. 412 с.
5. Анистратов Ю.И. Технология открытых горных работ. М.: Недра, 2008. 420 с.
6. Единые нормы выработки на открытые горные работы. М.: НИИтруда, 2001.
7. Справочник по буровзрывным работам / Под ред. М.Ф. Друкованого. М.: Недра, 1976. 631 с.
8. Jethro M.A., Onyemaobi O.O., Xiao Z. Optimizing fragmentation for efficient loading // International Journal of Mining Science and Technology. 2022. Vol. 32(4). P. 717–728.
9. Desmond K.W., Weeks E.R. Random close packing of disks and spheres // Physical Review E. 2009. Vol. 80(5). 051305.
11. Yu A.B., Standish N. Porosity calculations of multi-component mixtures // Powder Technology. 1991. Vol. 65(1-3). P. 241–251.
12. Dias R.P. et al. Particulate binary mixtures: packing porosity // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2004. Vol. 43(24). P. 7912–7919.
13. Wills B.A., Finch J.A. Wills' Mineral Processing Technology. Butterworth-Heinemann, 2016. 512 p.
14. Sanchidrián J.A., Ouchterlony F. Distribution-free description of fragmentation // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017. Vol. 50(4). P. 781–806.
15. Rosin P., Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal // Journal of the Institute of Fuel. 1933. Vol. 7. P. 29–36.
16. Cunningham C.V.B. The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on // Brighton Conference Proceedings. 2005. P. 201–210.
17. Lilly P.A. An empirical method of assessing rock mass blastability // Proceedings of the Large Open Pit Mining Conference. 1986. P. 89–92.
18. Jang H., Topal E. Optimizing oversize blast fragmentation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2020. Vol. 128. 104248.
19. Единые нормы выработки на открытые горные работы для экскаваторов. М.: НИИтруда, 2001.

ISSN 3030-3907

20. Подэрни Р.Ю. Горные машины и комплексы для открытых работ. Т. 1. М.: МГГУ, 2013.
21. Adebayo B., Akande J.M. Effect of rock fragmentation on productivity // Journal of Mining World Express. 2015. Vol. 4(1). P. 1–8.
22. Singh S.P., Abdul H. Investigation of blast design parameters // Proceedings of the 12th ISRM Congress. 2012. P. 1–7.
23. Adebayo B. Statistical analysis of blast fragmentation and shovel productivity // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118(2). P. 145–152.
24. Oraee K., Sari M. Fragmentation measurements using image analysis // Mining Technology. 2005. Vol. 114(1). P. 1–9.
25. Yu A.B., Standish N. Analytical-parametric theory of random packing // Powder Technology. 1988. Vol. 55(3). P. 171–186.
26. Andreasen A.H.M. Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum // Kolloid-Zeitschrift. 1930. Vol. 50(3). P. 217–228.
27. Gan J., Zhou Z., Yu A. DEM simulation on the packing of fine ellipsoids // Chemical Engineering Science. 2016. Vol. 156. P. 64–76.
28. Cundall P.A., Strack O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies // Géotechnique. 1979. Vol. 29(1). P. 47–65.
29. Cleary P.W. Large scale industrial DEM modelling // Engineering Computations. 2004. Vol. 21(2/3/4). P. 169–204.
30. Coetzee C.J. Review: Calibration of the discrete element method // Powder Technology. 2017. Vol. 310. P. 104–142.
31. 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.
32. 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.
33. Curry D. et al. DEM simulation of transfer chute performance // Powder Technology. 2023. Vol. 415. 118094.
34. Grima A.P., Wypych P.W. Calibration methods for discrete element modelling // Granular Matter. 2011. Vol. 13(2). P. 127–132.
35. Tsuji Y. et al. Lagrangian numerical simulation of plug flow // Powder Technology. 1992. Vol. 71(3). P. 239–250.
36. Obermayr M. et al. A bonded-particle model for cemented sand // Computers and Geotechnics. 2013. Vol. 49. P. 299–313.
37. 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.

ISSN 3030-3907

38. McKay M.D. et al. Selecting values of input variables // Technometrics. 1979. Vol. 21(2). P. 239–245.
39. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. Gaussian Processes for Machine Learning. MIT Press, 2006. 248 p.
40. 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.
41. Yondo R. et al. A review on design of experiments and surrogate models // Progress in Aerospace Sciences. 2018. Vol. 96. P. 23–61.

ISSN 3030-3907