ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):78-93
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.7 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_78

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЖИДКОСТЬ – ТВЕРДЫЕ ЧАСТИЦЫ ПРИ СОПРЯЖЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ В ROCKY DEM И ANSYS FLUENT

А.С. Опалев[1], А.А. Паливода[1]

[1] Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия,
e-mail: a.opalev@ksc.ru

Аннотация: В настоящее время в горнодобывающей промышленности актуальной проблемой является повышение эффективности измельчения минерального сырья. Для каждого гранулометрического состава измельчаемого материала и измельчающих тел, также ряда других факторов, существует определенная зависимость, которая должна отвечать наибольшей эффективности процесса измельчения. Создание моделей измельчения с использованием современных технологий в дальнейшем помогут совершенствовать работу измельчительного оборудования для снижения энергоемкости процесса и повышения качества получаемых материалов. Движение среды в шаровой мельнице моделируется с помощью численного алгоритма, известного как метод дискретных элементов (DEM). С другой стороны, многие процессы в горнодобывающей промышленности связаны с движением частиц в потоке жидкости, например, процесс мокрого измельчения в мельнице моделируются методом вычислительной гидродинамики (CFD). Цель данной статьи заключается в изучении возможности использования сопряженного подхода DEM-CFD для моделирования систем жидкая среда — частицы с последующим применением полученных результатов для моделирования мокрого измельчения в шаровых мельницах. В результате численного моделирования удалось оценить возможности решения задач исследования процессов сокращения крупности минеральных частиц с использованием методов сопряжения программ Rocky DEM и ANSYS Fluent, получить графическое изображение процесса взаимодействия восходящего потока жидкости с твердыми частицами. Метод сопряжения программ Rocky DEM и ANSYS Fluent позволил дать оценку гидродинамических параметров при следующих вариантах взаимодействий: при взаимодействии жидкости с твердыми сферическими частицами, имеющими различные физические свойства; при взаимодействии различных жидкостей с твердыми сферическими частицами различного размера.

Ключевые слова: сопряженный подход DEM-CFD, система жидкость – твердые частицы, метод вычислительной гидрогазодинамики, метод дискретных элементов, двусторонний обмен данных, графическое изображение, Rocky DEM, ANSYS Fluent.

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

© А.С. Опалев, А.А. Паливода. 2022.

Modeling of the liquid-solid particle systemin the coupling solution of the task in rocky dem and ansys fluent

A.S. Opalev[1], A.A. Palivoda[1]

[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia, e-mail: a.opalev@ksc.ru

Abstract: Currently, to increase the efficiency of grinding mineral raw materials is an urgent problem in the mining industry. Certain dependence is for each granulometric composition of the grinded material and grinding bodies, as well as a number of other factors, that should correspond to the greatest efficiency of the grinding process. The creation of grinding models using modern technologies will further help to improve the operation of grinding equipment to reduce the energy intensity of the process and to improve the quality of the materials obtained. The motion of the medium in a ball mill is modeled using a numerical algorithm known as the discrete element method (DEM). On the other hand, many processes in the mining industry are associated with the movement of particles in the liquid flow, for example, the process of wet grinding in a mill is modeled by the method of computational fluid dynamics (CFD).The purpose of this article is to study the possibility of using the coupling DEM-CFD approach for modeling liquid medium-particle systems, followed by applying the results obtained for modeling wet grinding in ball mills. As a result of numerical modeling, it was possible to evaluate the possibilities of solving the problems of studying the processes of reducing the size of mineral particles using the methods of coupling the Rocky DEM and ANSYS Fluent software, and to obtain a graphical image of the interaction of the upward flow of liquid with solid particles. The method of coupling the Rocky DEM and ANSYS Fluent software made it possible to estimate the hydrodynamic parameters for the following types of interactions: when a liquid interacts with solid spherical particles having different physical properties; when various liquids interact with solid spherical particles of different sizes.

Key words: coupling DEM-CFD approach, liquid-solid particle system, computational fluid dynamics method, discrete element method, two-way data exchange, graphical image, Rocky DEM, ANSYS Fluent.

For citation: Opalev A. S., Palivoda A. A. Modeling of the liquid-solid particle systemin the coupling solution of the task in rocky dem and ansys fluent. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):78-93. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_78.

Введение

Статья посвящена численному моделированию, в процессе которого возможно решить ряд проблем горнодобывающей промышленности [1, 2]. Существует большое количество программных обеспечений для изучения процессов переработки и обогащения минерального сырья [3]. Дробление и измельчение потребляют большую часть энергии при переработке полезных ископаемых. Шаровая мельница — важный вид измельчающего оборудования, используемого для уменьшения размера частиц руды.

Энергопотребление шаровой мельницы — один из наиболее важных параметров, которые необходимо учитывать при проектировании шаровой мельницы, поскольку он определяет ее экономическую эффективность. Метод дискретных

элементов может моделировать движение и взаимодействие материалов частиц [4].

Метод дискретных элементов — это вычислительный метод для моделирования динамики процессов с частицами. Этот метод может применяться для определения влияния лифтеров на поведение частиц [5], для прогнозирования скорости износа геометрии футеровки в шаровых мельницах [6] и для определения кинетических параметров каждого отдельного мелющего тела [7]. Применение метода дискретных элементов позволяет смоделировать процесс измельчения горных пород в щековой дробилке [8] и сравнивать модели движения измельчаемого материала в корпусе центробежной мельницы вертикального типа [9]. Снижение потребления энергии в процессах измельчения является одной из актуальных задач горно-обогатительной промышленности. Для этого необходимо получить адекватные модели отдельных составляющих процесса разрушения частиц при измельчении, в частности модели их напряженного и деформированного состояния при динамическом воздействии.

Применение метода дискретных элементов (Discrete element method, DEM) является одним из современных направлений исследования и моделирования процессов в твердых телах [10]. С другой стороны, многие процессы в обогащении связаны с одновременным потоком жидкостей и частиц, например, процессы мокрого измельчения в мельницах. В конкретном случае важно учитывать поток жидкости, чтобы получить правильное поведение частиц в измельчительном оборудовании. ANSYS Fluent является передовым программным продуктом для моделирования гидродинамических процессов, в основе которого лежит метод вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Сложность моделирования течения жидкости и твердого тела, находящегося в этом потоке, заключается в порядковом различии величин между характерными шкалами, которые существуют в моделируемых задачах.

Во-первых, крупногабаритные масштабы устройства, в котором происходят вышеуказанные процессы, необходимо соблюдать.

Во-вторых, масштабы потока жидкости зафиксированы в CFD-решении с помощью масштабной сетки, которая обычно намного больше частицы, но все же довольно мала по сравнению с масштабом устройства.

В-третьих, появляется третий масштаб, который основан на взаимодействии жидкость — частица и имеет размер наименьших частиц (субчастиц).

Все вышеуказанные трудности может решить сопряженный подход DEM-CFD, который обеспечивает промежуточный уровень между использованием разрешения субчастиц и разрешения сетки как для жидкостей, так и для частиц. Существует два варианта сопряжения CFD и DEM моделей: одностороннее [11, 12] и двустороннее сопряжение [13—17].

Появление на промышленных предприятиях и в научных организациях цифровых вычислительных машин послужило началом внедрения цифровых технологий в горнодобывающей промышленности. Одним из самых активных направлений цифровизации производства — решение для виртуального представления реальных статических и динамических характеристик технологической системы, коротко называемое «цифровой двойник» [18]. Сегодня существуют цифровые двойники, которые моделируют либо физические объекты, используемые в промышленности [19], либо отдельные технологические про-

цессы [20]. Концепция цифровых двойников применяется для имитационного обучения персонала, которая позволяет операторам осваивать оптимизированную процедуру функционирования в чрезвычайных ситуациях при добыче и переработке полезных ископаемых.

Для цифровизации производства используются различные виды моделирования обогатительных процессов: например, математическое [21 — 24] и численное моделирование [25, 26]. Наиболее популярным видом численного моделирования является моделирование с использованием метода дискретных элементов для анализа поведения сыпучих материалов в горной промышленности [27, 28]. Для такого типа моделирования необходимо определить параметры каждого материала, чтобы обеспечить достоверный и надежный результат. Исходя из этого, материалы должны быть протестированы и оценены для его калибровки в соответствии с подходящими параметрами материала DEM [29, 30]. Современные тенденции в проектировании оборудования для горнодобывающей промышленности привели к созданию новой процедуры изучения физико-механических свойств руд [31].

Создание цифровых моделей процессов сокращения крупности с использованием современных вычислительных технологий является составной частью исследований, направленных на совершенствование работы измельчительного оборудования, снижение энергоемкости и повышение качества продуктов обогатительного передела.

Цель данной работы заключается в оценке возможности решения задач исследования процессов сокращения крупности минеральных частиц с использованием методов сопряжения программ Rocky DEM и ANSYS Fluent. Идея данной работы заключается в моделировании системы жидкость — твердые частицы с использованием интеграции программ RockyDEM и ANSYS Fluent. В соответствии с целью исследования в работе поставлены следующие задачи:

- создать модель взаимодействия жидкости с твердыми сферическими частицами, имеющими различные физические свойства;
- создать модель взаимодействия различных жидкостей с твердыми сферическими частицами различного размера.

Объектом исследования в работе является система жидкость — твердые тела. Предметом исследования является взаимодействие между жидкостью и твердыми телами при двустороннем обмене данных между Rocky DEM и ANSYS Fluent.

Методы

В настоящей работе описываются две модели взаимодействия жидкости с твердыми сферическими частицами с использованием двухстороннего сопряженного решения программ Rocky DEM и ANSYS Fluent.

I этап. Первый этап работы заключается в создании модели взаимодействия жидкости с твердыми сферическими частицами, имеющими различные физические свойства. Изучение возможности использования сопряженного решения программ Rocky DEM и ANSYS Fluent происходит с помощью модели, которая представляет собой параллелепипед со сторонами основания 0,10 и 0,04 м, и высотой 0,30 м. Параллелепипед расположен в поле гравитации. На нижнем торце параллелепипеда задается восходящий поток жидкости (в данном случае воды) со скоростью 0,05 м/с. Плотность воды принимается равной 998,2 кг/м^3, вязкость — 0,001003 кг/(м·с). На верхнем торце указано граничное условие оттока со значением весового расхода равным 1.

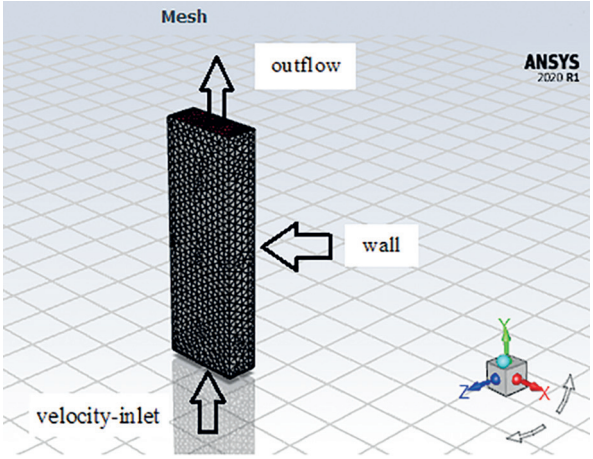

Рис. 1. Условие однозначности в программном комплексе ANSYS Fluent для последующей интеграции продуктов Rocky DEM и ANSYS

Fig. 1. The unambiguity condition in ANSYS Fluent software package for the subsequent integration of Rocky DEM and ANSYS products

На рис. 1 показано условие однозначности моделируемой задачи с созданной сеткой для вычисления. Для моделирования течения жидкой среды выбирается модель Эйлера с двумя фазами: вода и частицы, модель вязкости задается стандартной k-epsilon моделью. Турбулентность многофазной модели определяется как дисперсная. Все данные по частицам задаются на стороне программы Rocky DEM.

В ходе исследований на данном этапе работы моделируются два варианта генерации сферических частиц:

- три частицы с различными физическими свойствами, но одинаковым диаметром 0,03 м;
- набор 100 частиц для каждого типа материала с диаметром 0,01 м, который определяется в вышеупомянутой программе с помощью начальной заданной массы.

Далее в программе Rocky DEM определяются физические свойств частиц для каждого материала. Физические свойства материалов шаров приведены в табл. 1.

На рис. 2 показано начальное распределение частиц в прямоугольном объеме в программе Rocky DEM: для 3 частиц (рис. 2, *а*), для 300 частиц (рис. 2, *б*). Сохраненные данные местоположения частиц при моделировании в программе Rocky служат входными

Таблица 1

Физические свойства материалов шаров, используемые при моделировании в программе Rocky: пенопласт (1), древесина (2), алюминий (3)
Physical properties of the ball materials used in modeling in Rocky program: foam (1), wood (2), aluminum (3)

	Плотность, кг/м^3	Коэффициент Пуассона	Модуль Юнга, МПа	Масса, кг (100 частиц)
Материал 1	15	0,35	1000	0,000785
Материал 2	390	0,50	12 000	0,020410
Материал 3	2700	0,30	65 000	0,141300

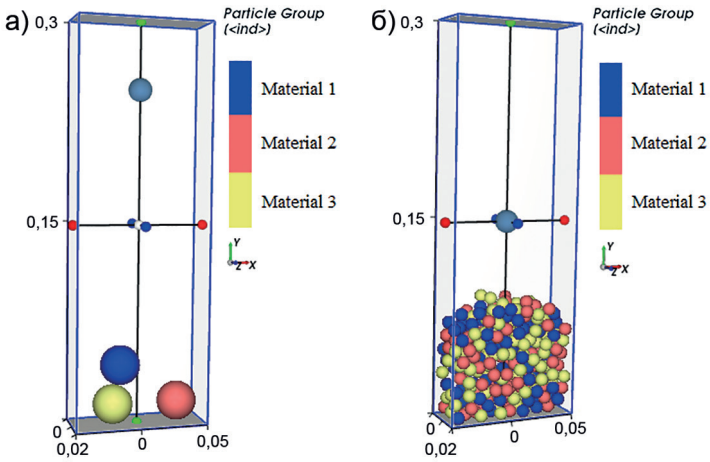

Рис. 2. Начальное распределение частиц в прямоугольном объеме в программе RockyDEM: для 3 частиц (а); для 300 частиц (б)

Fig. 2. Initial distribution of particles in a rectangular volume in Rocky DEM program: for 3 particles (a); for 300 particles (b)

данными для начального момента времени при сопряженном моделировании DEM-CFD.

В приведенных двух вариантах моделирования модель сопротивления качения установлена как Тип А. В этой модели постоянный момент приложен к частицам для того, чтобы создать сопротивление качению. Математическое описание вышеуказанного момента записывается следующим образом [32]:

$$M_r = -\mu_r |r| F_n \frac{\omega}{|\omega|} \qquad (1)$$

где μ_r — коэффициент сопротивления качению; F_n — нормальная сила контакта; ω — вектор угловой скорости частицы; $|r|$ — радиус качения частицы, где r — вектор, соединяющий центр частицы и точку контакта.

В качестве модели нормальных сил в программе Rocky выбрана гистерезисная линейная пружинная модель (Hysteretic linear spring model). Эта модель впервые была предложена Walton и Braun [33]. Эта упругопластическая (отталкивающая и диссипативная) модель нормального контакта позволяет моделировать диссипацию пластической энергии на контакте без введения дополнительных расходов, которые увеличивают время моделирования.

$$F_n^t = \begin{cases} \min\left(K_{nl} s_n^t, F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n\right) \\ \text{если } \Delta s_n \geq 0 \\ \max\left(F_n^{t-\Delta t} + K_{nu}\Delta s_n, \lambda K_{nl} s_n^t\right) \\ \text{если } \Delta s_n < 0 \end{cases}, \qquad (2)$$

$$\Delta s_n = s_n^t - s_n^{t-\Delta t}, \qquad (3)$$

где F_n^t и $F_n^{t-\Delta t}$ являются нормальными упругопластическими контактными силами в текущий момент времени t и в предыдущий момент времени $t - \Delta t$, соответственно, где Δt обозначает временной шаг; Δs_n — изменение нормального перекрытия контакта в течение текущего времени. Предполагается, что это изменение положительно, когда частицы приближаются друг к другу, и отрицательно, когда частицы разделяются; s_n^t и $s_n^{t-\Delta t}$ — нормальные значения перекрытия в текущий и предыдущий момент времени, соответственно; K_{nl} и K_{nu} — значения контактных жесткостей загрузки и разгрузки, соответственно; λ —

Таблица 2

Физические свойства жидкости, используемые в качестве жидкой среды
Physical properties of a liquid used as a liquid medium

	Плотность, кг/м³	**Вязкость, кг/(м·с)**
Вода	998,2	0,001003
Глицерин	1259,9	0,799

безразмерная малая постоянная. Его значение в программе Rocky составляет 0,001. Часть выражения, в которой эта константа активна, гарантирует, что во время разгрузки нормальная сила вернется к нулю, когда перекрытие уменьшится до нуля.

При двухстороннем варианте сопряжения необходимо задать уравнение для расчета сил сопротивления частиц. Стандартная версия корреляции сопротивления задается следующим образом [34]:

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1 + 0{,}15\mathrm{Re}_p^{0{,}687}\right), \qquad (4)$$

Модификация, которая обычно используется для включения инерционного диапазона сопротивления (при Re > 1000), задается следующим выражением [34]:

$$C_D = \max\left[\frac{24}{\mathrm{Re}_p}\left(1 + 0{,}15\mathrm{Re}_p^{0{,}687}\right); 0{,}44\right], \qquad (5)$$

Модификация данного закона сопротивления, которая реализована в двухстороннем соединении DEM-CFD, рекомендуется для использования в моделях со сферическими частицами.

II этап. Второй этап работы заключается в создании модели взаимодействия различных жидкостей с твердыми сферическими частицами различного размера. На данном этапе изучение возможности использования сопряженного решения программ Rocky DEM и ANSYS Fluent происходит с помощью модели вертикальной трубы диаметром 0,2 м и длиной 0,4 м, расположенной в поле гравитации.

На рис. 3 показаны условия однозначности модели в программе ANSYS Fluent. Во входное отверстие вертикально вверх подается восходящий поток жидкости. Скорость потока составляет 1 м/с. Для моделирования течения жидкой среды выбирается модель Эйлера

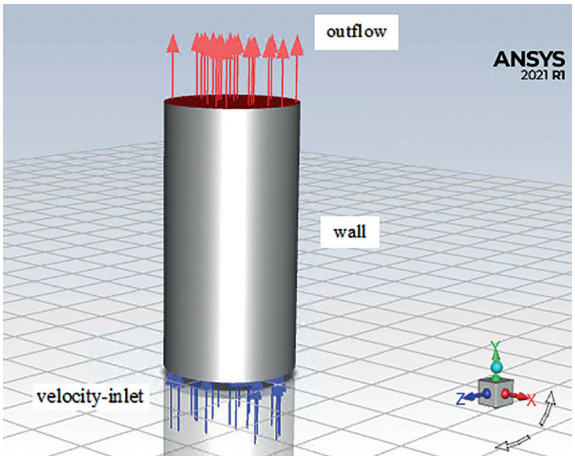

Рис. 3. Условия однозначности в программном комплексе ANSYS Fluent
Fig. 3. Unambiguity conditions in the ANSYS Fluent software package

Таблица 3

Диаметр, масса и количество сферических частиц
Diameter, mass and number of spherical particles

Диаметр шаров, м	Масса шаров, кг	Количество шаров, шт.
0,005	0,051025	300
0,010	0,115657	85
0,015	0,137769	30
0,020	0,163280	15

с двумя фазами: вода или глицерин и частицы, модель вязкости задается стандартной k-epsilon моделью. Турбулентность многофазной модели определяется как дисперсная. В качестве жидкой фазы в задаче использовались вода и глицерин, что обусловлено значительными различиями их плотностей и вязкости. Свойства жидкой среды представлены в табл. 2.

Диаметр сферических частиц варьировался в пределах 5 — 20 мм. В табл. 3 указаны диаметры сферических частиц с их количеством. Выбор такого распределения частиц обуславливается различным взаимодействием частиц различного размера с жидкой средой. Плотность шаров равна 2600 кг/м^3. Установлена модель сопротивления качения как Тип А. В качестве модели нормальных сил в программе RockyDEM выбрана гистерезисная линейная пружинная модель.

На рис. 4 показано начальное распределение частиц в модели вертикальной трубы в программном комплексе RockyDEM.

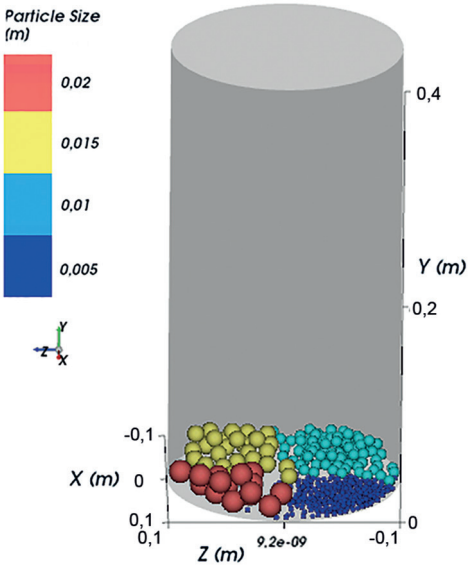

Рис. 4. Начальное распределение частиц в модели вертикальной трубы в программном комплексе RockyDEM
Fig. 4. The initial distribution of particles in the vertical pipe model in the Rocky DEM software package

Результаты

На рис. 5 и 6 показаны скорости частиц относительно оси OY и их траектории для каждого варианта моделирования взаимодействия жидкости с твердыми сферическими частицами, имеющими различные физические свойства. Данные изображения показывают, что метод сопряжения программ Rocky DEM и ANSY SFluent позволяет определить скорость и координаты отдельной частицы для каждого момент времени.

На рис. 7 и 8 показано распределение частиц по группам относительно плотности шаров, где синему цвету соответствует группа шаров с плотностью 15 кг/м^3, красному — 390 кг/м^3, зеленому — 2700 кг/м^3. Из рис. 7 и 8 можно делать вывод, что при взаимодействии системы жидкость — твердые частицы учитываются физические свойства частиц и жидкости.

На рис. 9 и 10 показаны скорости сгенерированных частиц в момент времени

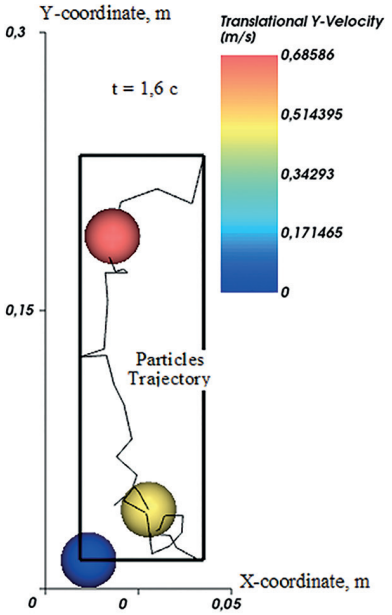

Рис. 5. Траектории частиц при t от 0 до 2 с, скорость сгенерированных частиц относительно оси OY при t = 1,6 с

Fig. 5. Particle trajectories at t from 0 to 2 s, velocity of generated particles relative to OY axis at t = 1.6 s

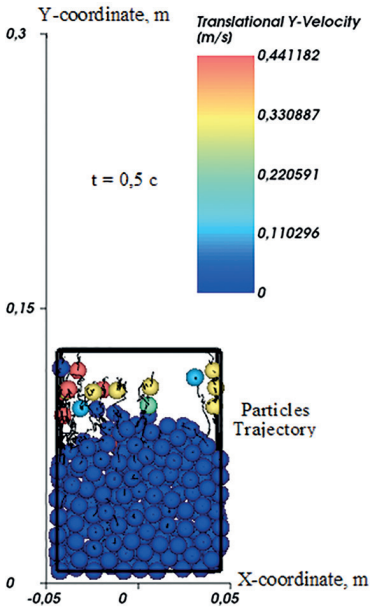

Рис. 6. Траектории частиц при t от 0 до 0,5 с, скорость сгенерированных частиц относительно оси OY при t = 0,5 с

Fig. 6. Particle trajectories at t from 0 to 0.5 s, velocity of generated particles relative to OY axis at t = 0.5 s

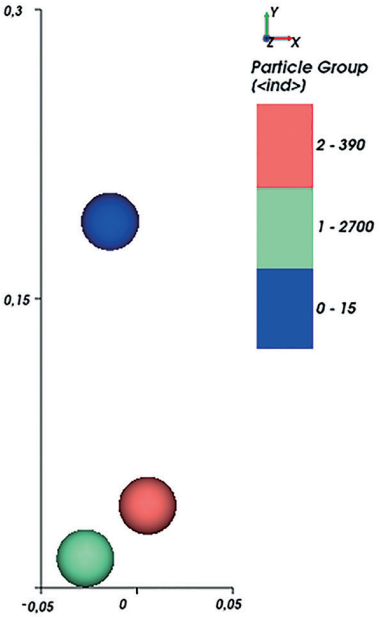

Рис. 7. Распределение частиц по группам (относительно плотности) при t = 1,6 с

Fig. 7. Distribution of particles by groups (relative to density) at t = 1.6 s

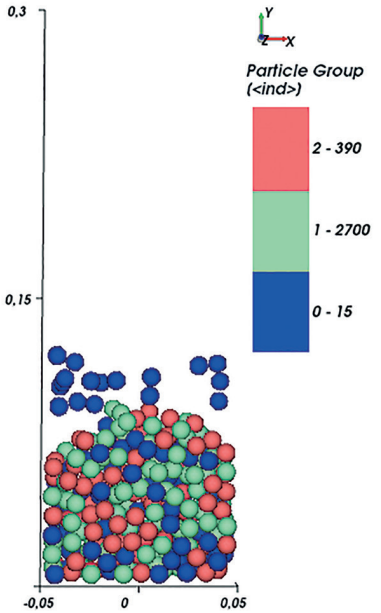

Рис. 8. Распределение частиц по группам (относительно плотности) при t = 0,5 с

Fig. 8. Distribution of particles by groups (relative to density) at t = 0.5 s

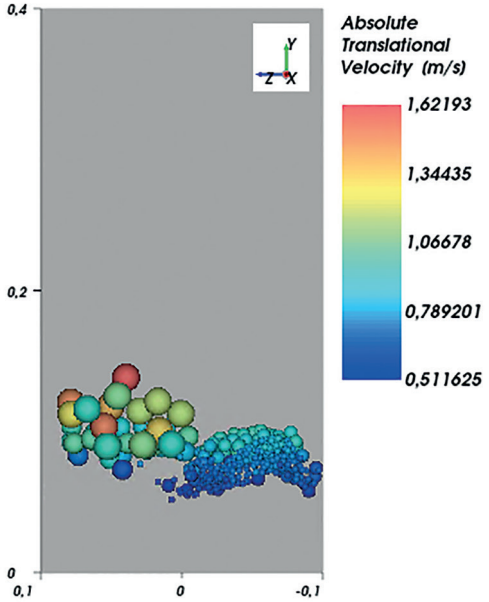

Рис. 9. Скорость сферических частиц в воде при t = 0,1 с

Fig. 9. Velocity of spherical particles in water at t = 0.1 s

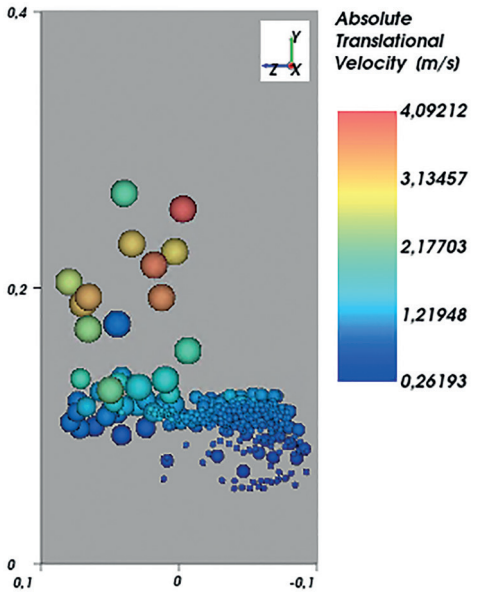

Рис. 10. Скорость сферических частиц в глицерине при t = 0,1 с

Fig. 10. Velocity of spherical particles in glycerol at t = 0.1 s

0,1 с для каждого варианта моделирования взаимодействия различных жидкостей с твердыми сферическими частицами различного размера. Значение скорости частиц диаметра 20 мм в глицерине больше чем значение скорости частиц того же диаметра в воде. Расстояние, пройденное частицами диаметра 20 мм в глицерине, больше чем у частиц того же диаметра в воде. Частицы в

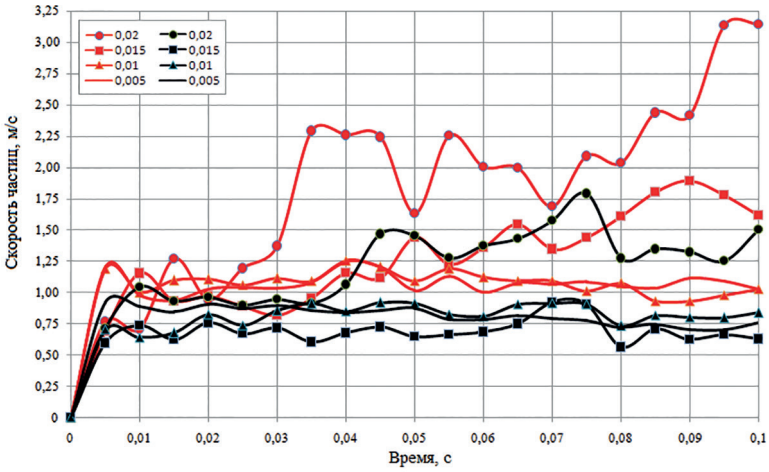

Рис. 11. График зависимости скорости отдельных частиц разного диаметра от времени: глицерин — красный, вода — черный

Fig. 11. Graph of the dependence of velocity of individual particles of different diameters on time: glycerin-red, water-black

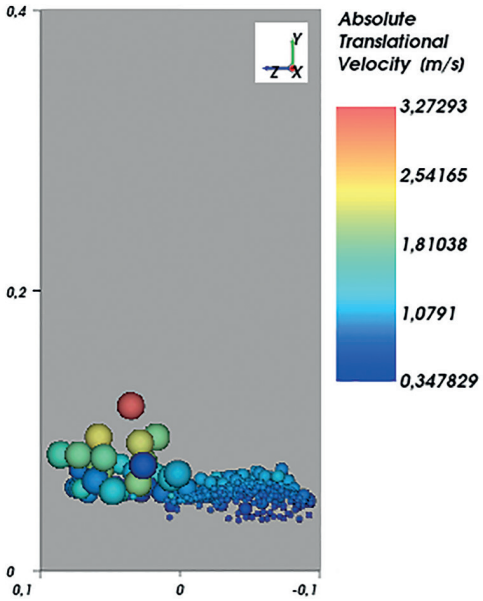

Рис. 12. Скорость сгенерированных частиц в глицерине при t = 0,05 с в программе Rocky DEM.

Fig. 12. Velocity of the generated particles in glycerin at t = 0.05 s in Rocky DEM program

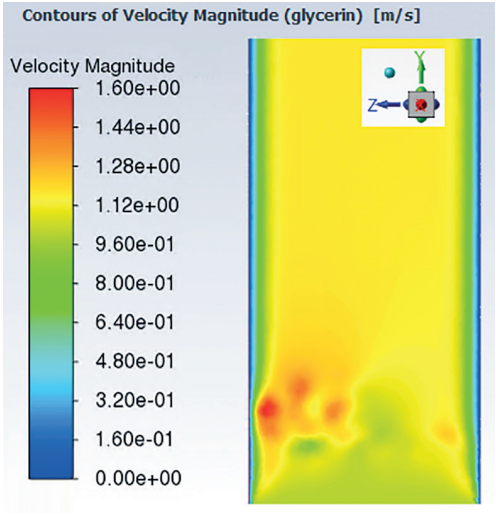

Рис. 13. Скорость восходящего потока глицерина при t = 0,05 с в программном комплексе ANSYS Fluent

Fig. 13. Velocity of the upward flow of glycerin at t = 0.05 s in the ANSYS Fluent software package

глицерине имеют более широкое распределение относительно оси *OY*. Максимальное значение по скорости соответствует частицам, имеющим наибольший диаметр.

На рис. 11 изображен график зависимости скорости отдельных частиц разного диаметра от времени, где красный цвет соответствует скорости частиц в глицерине, черный — в воде. Наибольшее значение скорости имеют частицы с диаметром 20 мм независимо от физических свойств среды.

На рис. 12 показаны скорости сгенерированных частиц и скорость восходящего потока глицерина при t = 0,05 с в программе Rocky DEM.

На рис. 13 показано поле скоростей восходящего потока глицерина при t = = 0,05 с в программе ANSYS Fluent. Скорость потока остается постоянной по всему объему. Исключение составляет область вблизи частиц, имеющих наибольшую скорость.

Заключение

В результате сопряженного решения задачи в программах Rocky DEM и ANSYS Fluent получено графическое изображение процесса взаимодействия восходящего потока жидкости с твердыми сферическими частицами.

В работе представлены результаты исследований по использованию сопряженного решения задачи в Rocky DEM и ANSYS Fluent при моделировании систем жидкость — твердые частицы в рабочих объемах аппаратов для сокращения крупности минеральных частиц (мельницах).

Метод сопряжения программ Rocky DEM и ANSYS Fluent позволяет дать оценку гидродинамических параметров при следующих вариантах взаимодействий:

- при взаимодействии жидкости с твердыми сферическими частицами, имеющими различные физические свойства;

• при взаимодействии различных жидкостей с твердыми сферическими частицами различного размера.

В результате вычислительных экспериментов реализовано сопряженное решение задачи программами Rocky DEM и ANSYS Fluent и получены компоненты скорости и координаты каждой частицы относительно пространственных осей, а также установлены траектории частиц в течение времени моделирования.

Все рисунки, представленные в данной статье, являются оригинальными. Они получены автором при численном моделировании задачи с использованием лицензионных программ Rocky DEM и Ansys Fluent.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бойков А. В.*, *Савельев Р. В.*, *Пайор В. А.* Применение численного моделирования в горно-металлургической области / Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ «Нацразвитие». — СПб., 2019. — С. 31—34.

2. *Феоктистов А. Ю.*, *Каменецкий А. А.*, *Блехман Л. И.*, *Васильков В. Б.*, *Скрябин И. Н.*, *Иванов К. С.* Применение метода дискретных элементов для моделирования процессов в горно-металлургической промышленности // Записки Горного института. — 2011. — Т. 192. — С. 145.

3. *Читалов Л. С.*, *Львов В. В.* Обзор компьютерных программ для моделирования процессов рудоподготовки и обогащения / Сборник избранных статей по материалам научных конференций «Нацразвитие». — СПб., 2020. — С. 1517—1523.

4. *Rosenkranz S., Breitung-Faes S., Kwade A.* Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills // Powder Technology. 2011, vol. 212, no. 1, pp. 224—230. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.05.021.

5. *Bian X., Wang G., Wang H., Wang S., Lv W.* Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation // Minerals Engineering. 2017, vol. 105, pp. 22—35. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.12.014.

6. *Powell M. S.*, *Weerasekara N. S.*, *Cole S., Laroche R. D., Favier J.* DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills // Minerals Engineering. 2011, vol. 24, no. 3-4, pp. 341—351. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.12.012.

7. *Khakhalev P. A.*, *Bogdanov V. S.*, *Kovshechenko V. M.* Kinetic parameters of grinding media in ball mills with various liner design and mill speed based on DEM modeling // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 327, no. 4, article 042049. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042049.

8. *Юсупов Г. А.* Моделирование щековой дробилки методом дискретных элементов // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. — 2017. — Т. 1. — С. 188—191.

9. *Минасян Д. Г.*, *Елоева А. С.*, *Назаров С. Г.*, *Скворцов П. А.* Сравнение моделей движении измельчаемого материала в корпусе центробежной мельницы вертикального типа // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — Т. 13. — № 1. — С. 119—124. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-119-124.

10. *Белоглазов И. И. Иконников Д. А.* Применение метода дискретных элементов для моделирования процесса измельчения горных пород в щековой дробилке // Известия вузов. Приборостроение. — 2016. — Т. 59. — № 9. — С. 780—786. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-9-780-786.

11. *Nagata Yu, Tsunazawa Yuki, Tsukada Kouji, Yaguchi Yuichi, Ebisu Yosuke, Mitsuhashi Kohei, Tokoro Chiharu* Effect of the roll stud diameter on the capacity of a high-pressure grinding roll using the discrete element method // Minerals Engineering. 2020, vol. 154, article 106412. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106412.

12. *Li Yaoyu, Bao Jie, Yu Aibing, Yang Runyua* ANN prediction of particle flow characteristics in a drum based on synthetic acoustic signals from DEM simulations // Chemical Engineering Science. 2021, vol. 246, article 117012. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117012.

13. *El-Emam M. A., Han C. A, Dong S. W., Zhou L.* Rocky DEM-CFD simulation for realistic granular flowin an aerodynamic separating device / 2019 ASABE Annual International Meeting. Boston, 2019. DOI: 10.13031/aim.201900387.

14. *El-Emam M. A., Shi W., Zhou L.* CFD-DEM simulation and optimization of gas-cyclone performance with realistic macroscopic particulate matter // Advanced Powder Technology. 2019, vol. 30, no. 11, pp. 2686—2702. DOI: 10.1016/j.apt.2019.08.015.

15. *Chu K. W., Wang B., Xu D. L., Chen Y. X., Yu A. B.* CFD-DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator // Chemical Engineering Science. 2011, vol. 66, no. 5, pp. 834—847. DOI: 10.1016/j.ces.2010.11.026.

16. *Bna S., Ponzini R., Cestari M., Cavazzoni C., Cottini C., Benassi A.* Investigation of particle dynamics and classification mechanism in a spiral jet mill through computational fluid dynamics and discrete element methods // Powder Technology. 2020, vol. 364, pp. 746—773. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.029.

17. *Beloglazov I. I.*, *Kuskova Y. V.* Simulation of roasting metallurgical concentrates in fluidized bed using CFD-DEM // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017, vol. 221, no. 1, article 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012017.

18. *Курганова Н. В.*, *Филин М. А.*, *Черняев Д. С.*, *Шаклеин А. Г.*, *Намиот Д. Е.* Внедрение цифровых двойников как одно из ключевых направлений цифровизации производства // International Journal of Open Information Technologies. — 2019. — Т. 7. — № 5. — С. 105.

19. *Шибанов Д. А.*, *Иванов С. Л.*, *Иванов А. А.* Цифровые двойники в горном машиностроении, как инструмент повышения эффективности эксплуатации горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — СВ 3. — 16 с.

20. *Бутко А. О.*, *Кузнецов П. М.*, *Хорошко Л. Л.* Организация цифрового двойника процессов восстановления дробильно-измельчительного оборудования // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 8. — С. 130—144. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144.

21. *Матвеев И. А.*, *Яковлев Б. В.*, *Еремеева Н. Г.* Моделирование движения частиц в рабочей зоне крутонаклонного концентратора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 7. — С. 146—153. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_146.

22. *Крылатова С. Р.*, *Матвеев А. И.*, *Лебедев И. Ф.*, *Яковлев Б. В.* Моделирование движения частицы в винтовом пневмосепараторе статистическими методами // Математические заметки СВФУ. — 2018. — Т. 25. — № 1. — С. 90—97.

23. *le Roux J. D., Steinboeck A., Kugi A., Craig I. K.* Steady-state and dynamic simulation of a grinding mill using grind curves // Minerals Engineering. 2020, vol. 152, no. 11, article 106208. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106208.

24. *Moraga C., Kracht W., Ortiz J. M.* Process simulation to determine blending and residence time distribution in mineral processing plants // Minerals Engineering. 2022, vol. 187, no. 12, article 107807. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107807.

25. *Харламов С. Н.*, *Джанхорбани М.* Численный прогноз движения смеси вязкой капельной жидкости с твердыми частицами во входной области эксцентричных кольцевых труб и их очистки от шлама // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 6. — С. 18—41. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3615.

26. *Zhang Chengwei, Zou Yudong, Gou Dazhao, Yu Aibing, Yang Runyu* Experimental and numerical investigation of particle size and particle strength reduction in high pressure grinding rolls // Powder Technology. 2022, vol. 410, article 117892. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117892.

27. *Белоглазов И. И.*, *Сабинин Д. С.*, *Николаев М. Ю.* Моделирование процесса дезинтеграции в шаровых мельницах барабанного типа с использованием метода дискретных

элементов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 268—282. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.

28. *Nagata Yu, Minagawa Masayaa, Hisatomi Shosei, Tsunazawa Yuki, Okuyama Kyoko, Iwamoto Motonori, Sekine Yasuyoshi, Tokoro Chiharu* Investigation of optimum design for nanoparticle dispersion in centrifugal bead mill using DEM-CFD simulation // Advanced Powder Technology. 2019, vol. 30, no. 5, pp. 1034—1042. DOI: 10.1016/j.apt.2019.02.018.

29. *Boikov A., Savelev R., Payor V., Potapov A.* Universal approach for dem parameters calibration of bulk materials // Symmetry. 2021, vol. 13, no. 6, article 1088. DOI: 10.3390/sym13061088.

30. *Westbrink F., Elbel A., Schwung A., Ding S. X.* Optimization of DEM parameters using multi-objective reinforcement learning // Powder Technology. 2021, vol. 379, pp. 602—616. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.067.

31. *Львов В. В.*, *Читалов Л. С.* Современные тенденции подходов к расчету рудоподготовительных процессов и аппаратов для переработки руд цветных металлов // Цветные металлы. — 2020. — № 10. — С. 20—26. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03.

32. *Ai J., Chen J. F., Rotter J. M., Ooi J. Y.* Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations // Powder Technology. 2011, vol. 206, no. 3. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.09.030.

33. *Walton O. R., Braun R. L.* Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks // Journal of Rheology. 1986, vol. 30, no. 5. DOI: 10.1122/1.549893.

34. *Crowe C. T., Schwarzkopf J. D., Sommerfeld M., Tsuji Y.* Multiphase flows with droplets and particles / Multiphase Flows with Droplets and Particles. 2011. DOI: 10.1201/b11103. ГИАБ

REFERENCES

1. Boykov A. V., Savel'ev R. V., Payor V. A. Computer simulation in mining industry. *Sbornik izbrannykh statey po materialam nauchnykh konferentsiy GNII «Natsrazvitie»* [Collection of selected articles based on the materials of scientific conferences of the National Research Institute «National Development»], Saint-Petersburg, 2019, pp. 31—34. [In Russ].

2. Feoktistov A. Yu., Kamenetskiy A. A., Blekhman L. I., Vasil'kov V. B., Skryabin I. N., Ivanov K. S. Application of the discrete element method for modeling processes in the mining and metallurgical industry. *Journal of Mining Institute*. 2011, vol. 192, pp. 145. [In Russ].

3. Chitalov L. S., Lvov V. V. Comminution and mineral processing modeling software review. *Sbornik izbrannykh statey po materialam nauchnykh konferentsiy GNII «Natsrazvitie»* [Collection of selected articles based on the materials of scientific conferences of the National Research Institute «National Development»], Saint-Petersburg, 2020, pp. 1517—1523. [In Russ].

4. Rosenkranz S., Breitung-Faes S., Kwade A. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills. *Powder Technology*. 2011, vol. 212, no. 1, pp. 224—230. DOI: 10.1016/j.powtec.2011.05.021.

5. Bian X., Wang G., Wang H., Wang S., Lv W. Effect of lifters and mill speed on particle behaviour, torque, and power consumption of a tumbling ball mill: Experimental study and DEM simulation. *Minerals Engineering*. 2017, vol. 105, pp. 22—35. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.12.014.

6. Powell M. S., Weerasekara N. S., Cole S., Laroche R. D., Favier J. DEM modelling of liner evolution and its influence on grinding rate in ball mills. *Minerals Engineering*. 2011, vol. 24, no. 3-4, pp. 341—351. DOI: 10.1016/j.mineng.2010.12.012.

7. Khakhalev P. A., Bogdanov V. S., Kovshechenko V. M. Kinetic parameters of grinding media in ball mills with various liner design and mill speed based on DEM modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 327, no. 4, article 042049. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042049.

8. Yusupov G. A. Modeling of a jaw crusher by the method of discrete elements. *Aktual'nye problemy povysheniya effektivnosti i bezopasnosti ekspluatatsii gornoshakhtnogo i neftepromyslovogo oborudovaniya*. 2017, vol. 1, pp. 188—191. [In Russ].

9. Minasyan D. G., Eloeva A. S., Nazarov S. G., Skvortsov P. A. Comparison of the crushed material movement model in the body of a vertical centrifugal mill. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 1, pp. 119—124. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-119-124.

10. Beloglazov I. I., Ikonnikov D. A. Application of the discrete element method for modeling of rocks crushing in a jaw crusher. *Journal of Instrument Engineering*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 780—786. [In Russ]. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-9-780-786.

11. Nagata Yu, Tsunazawa Yuki, Tsukada Kouji, Yaguchi Yuichi, Ebisu Yosuke, Mitsuhashi Kohei, Tokoro Chiharu Effect of the roll stud diameter on the capacity of a high-pressure grinding roll using the discrete element method. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 154, article 106412. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106412.

12. Li Yaoyu, Bao Jie, Yu Aibing, Yang Runyua ANN prediction of particle flow characteristics in a drum based on synthetic acoustic signals from DEM simulations. *Chemical Engineering Science*. 2021, vol. 246, article 117012. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117012.

13. El-Emam M. A., Han C. A, Dong S. W., Zhou L. Rocky DEM-CFD simulation for realistic granular flowin an aerodynamic separating device. *2019 ASABE Annual International Meeting*. Boston, 2019. DOI: 10.13031/aim.201900387.

14. El-Emam M. A., Shi W., Zhou L. CFD-DEM simulation and optimization of gas-cyclone performance with realistic macroscopic particulate matter. *Advanced Powder Technology*. 2019, vol. 30, no. 11, pp. 2686—2702. DOI: 10.1016/j.apt.2019.08.015.

15. Chu K. W., Wang B., Xu D. L., Chen Y. X., Yu A. B. CFD-DEM simulation of the gas–solid flow in a cyclone separator. *Chemical Engineering Science*. 2011, vol. 66, no. 5, pp. 834—847. DOI: 10.1016/j.ces.2010.11.026.

16. Bna S., Ponzini R., Cestari M., Cavazzoni C., Cottini C., Benassi A. Investigation of particle dynamics and classification mechanism in a spiral jet mill through computational fluid dynamics and discrete element methods. *Powder Technology*. 2020, vol. 364, pp. 746—773. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.02.029.

17. Beloglazov I. I., Kuskova Y. V. Simulation of roasting metallurgical concentrates in fluidized bed using CFD-DEM. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 221, no. 1, article 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/221/1/012017.

18. Kurganova N. V., Filin M. A., Chernyaev D. S., Shaklein A. G., Namiot D. E. Digital twins' introduction as one of the major directions of industrial digitalization. *International Journal of Open Information Technologies*. 2019, vol. 7, no. 5, pp. 105. [In Russ].

19. Shibanov D. A., Ivanov S. L., Ivanov A. A. Digital doubles in mining engineering as a tool to improve the efficiency of mining machinery operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, special edition 3, 16 p.

20. Butko A. O., Kuznetsov P. M., Khoroshko L. L. Creating a digital twin of crushing and milling equipment reconditioning process. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 8, pp. 130—144. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-130-144.

21. Matveev I. A., Yakovlev B. V., Eremeeva N. G. Modeling particle flow in active zone of large-angle concentrator. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 7, pp. 146—153. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_7_0_146.

22. Krylatova S. R., Matveev A. I., Lebedev I. F., Yakovlev B. V. Modeling of particle motion in spiral pheumoseparator by statistical methods. *Mathematical notes of NEFU*. 2018, vol. 25, no. 1, pp. 90—97. [In Russ].

23. le Roux J. D., Steinboeck A., Kugi A., Craig I. K. Steady-state and dynamic simulation of a grinding mill using grind curves. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 152, no. 11, article 106208. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106208.

24. Moraga C., Kracht W., Ortiz J. M. Process simulation to determine blending and residence time distribution in mineral processing plants. *Minerals Engineering*. 2022, vol. 187, no. 12, article 107807. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107807.

25. Kharlamov S. N., Dzhankhorbani M. Numerical prediction of flow of viscous drip liquid mixture with solid particles in inlet field of eccentric annular tube sand cleaning them from sludge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2022, vol. 333, no. 6, pp. 18—41. [In Russ]. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3615.

26. Zhang Chengwei, Zou Yudong, Gou Dazhao, Yu Aibing, Yang Runyu Experimental and numerical investigation of particle size and particle strength reduction in high pressure grinding rolls. *Powder Technology*. 2022, vol. 410, article 117892. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117892.

27. Beloglazov I. I., Sabinin D. S., Nikolaev M.Yu. Modeling the disintegration process for ball mills using dem. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 268—282. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_268.

28. Nagata Yu, Minagawa Masayaa, Hisatomi Shosei, Tsunazawa Yuki, Okuyama Kyoko, Iwamoto Motonori, Sekine Yasuyoshi, Tokoro Chiharu Investigation of optimum design for nanoparticle dispersion in centrifugal bead mill using DEM-CFD simulation. *Advanced Powder Technology*. 2019, vol. 30, no. 5, pp. 1034—1042. DOI: 10.1016/j.apt.2019.02.018.

29. Boikov A., Savelev R., Payor V., Potapov A. Universal approach for dem parameters calibration of bulk materials. *Symmetry*. 2021, vol. 13, no. 6, article 1088. DOI: 10.3390/sym13061088.

30. Westbrink F., Elbel A., Schwung A., Ding S. X. Optimization of DEM parameters using multi-objective reinforcement learning. *Powder Technology*. 2021, vol. 379, pp. 602—616. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.067.

31. Lvov V. V. Chitalov L. S. Modern trends in the design of comminution processes and equipment for non-ferrous metals ores. *Tsvetnye Metally*. 2020, no. 10, pp. 20—26. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2020.10.03.

32. Ai J., Chen J. F., Rotter J. M., Ooi J. Y. Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. *Powder Technology*. 2011, vol. 206, no. 3. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.09.030.

33. Walton O. R., Braun R. L. Viscosity, granular-temperature, and stress calculations for shearing assemblies of inelastic, frictional disks. *Journal of Rheology*. 1986, vol. 30, no. 5. DOI: 10.1122/1.549893.

34. Crowe C. T., Schwarzkopf J. D., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. 2011. DOI: 10.1201/b11103.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Опалев Александр Сергеевич[1] — канд. техн. наук,
ведущий научный сотрудник, e-mail: a.opalev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5120-7595,
Паливода Анита Александровна[1] — инженер,
e-mail: 89533072508@mail.ru,
[1] Горный институт Кольского научного центра РАН.
Для контактов: Опалев А.С., e-mail: a.opalev@ksc.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.S. Opalev[1], Cand. Sci. (Eng.),
Leading Researcher, e-mail: a.opalev@ksc.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5120-7595,
A.A. Palivoda[1], Engineer, e-mail: 89533072508@mail.ru,
[1] Mining Institute, Kola Scientific Centre
of Russian Academy of Sciences, 184209, Apatity, Russia.
Corresponding author: A.S. Opalev, e-mail: a.opalev@ksc.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 24.08.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 24.08.2022; accepted for printing 10.11.2022.