

Использование метода дискретных элементов для имитационного моделирования выемки угля очистным комбайном

А.Н. Стародубов^{1, 2}✉, А.Н. Кадочигова¹, А.В. Каплун¹

¹ Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

² Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация
✉ a.n.starodubov@gmail.com

Резюме: Имитационное моделирование как метод исследования сложных технологических процессов успешно применяется в горном деле: на цифровых моделях представляется возможным оценить и повысить эффективность технико-организационных решений, применяемых в сложных горно-геологических условиях. В статье описывается разработка имитационной модели выемки угля очистным комбайном и транспортировки его на скребковом лавном конвейере. Смоделировано разрушение мощного пласта угля под действием резцов комбайна. Созданная в среде имитационного моделирования Rocky DEM модель учитывает физико-механические свойства материалов и трехмерную форму конструкций горного оборудования. В качестве математического аппарата для расчета разрушения угольного массива использован метод дискретных элементов, позволяющий проводить расчёт разрушения без потери исходных показателей массы и объема вещества. В ходе валидации имитационной модели была проведена серия тестов на определение угла естественного откоса несферических частиц угля, близких по гранулометрическому составу к массе, образующейся при разрушении угольного массива. По результатам проведенных экспериментов получен массив значений параметров сцепления частиц при различной адгезии угля, позволяющий проводить имитационные исследования для условий действующих и проектируемых угольных шахт.

Ключевые слова: имитационное моделирование, очистной комбайн, метод дискретных элементов, угольный пласт, скребковый конвейер, горное оборудование, адгезия, угол естественного откоса, Rocky DEM

Благодарности: Исследование выполнено в рамках гранта (постановление Правительства Кемеровской области – Кузбасса от 19.09.2022 №632) по прикладному научному исследованию «Разработка программно-методического обеспечения для цифровизации процессов проектирования горнотехнических систем для открытых и подземных горных работ», соглашение от 22.11.2022 г. №1.

Для цитирования: Стародубов А.Н., Кадочигова А.Н., Каплун А.В. Использование метода дискретных элементов для имитационного моделирования выемки угля очистным комбайном. *Горная промышленность*. 2023;(S2):150–154. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-150-154>

Application of the discrete element method for simulation of coal mining by a cutter-loader in a working face

A.N. Starodubov^{1, 2}✉, A.N. Kadochigova¹, A.V. Kaplun¹

¹ Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

² T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation
✉ a.n.starodubov@gmail.com

Abstract: Simulation modeling as a method of studying complex technological processes is successfully used in mining. Due to the creation of digital models, it is possible to estimate and improve the efficiency of technical and organizational solutions used in difficult mining and geological conditions. The article describes the development of a simulation model of coal extraction by a shearer and its transportation to an armored conveyor. Fragmentation of a high coal seam was simulated under the action of the cutting planes of the shearer. The created model in the Rocky DEM simulation environment takes into account the physical and mechanical properties of materials and 3D structures of mining equipment. The method of discrete elements was used as a mathematical tool for computing fragmentation of the coalbed, which helped to perform the computing without loss of the initial mass and volume of the materials. During the validation of the simulation model, a series of tests were carried out to determine the angle of natural slope of non-spherical coal particles close in granulometric composition to the mass formed during the fragmentation of the coalbed. Based on the test results, an array of values of coal particle adhesion parameters was obtained, which allows conducting simulation studies in conditions of existing and projected coal mines.

Keywords: simulation modeling, shearer loader, discrete element method, coalbed, scraper conveyor, mining equipment, adhesion, angle of repose, Rocky DEM

Acknowledgments: The study was carried out under the grant (Resolution of the Government of the Kemerovo region - Kuzbass as of 19.09.2022 № 632) on applied scientific research entitled "Development of software and methodological support for digitalization of design processes for mining systems for surface and underground mining operations", Agreement No.1 as of 22.11.2022.

For citation: Starodubov A.N., Kadochigova A.N., Kaplun A.V. Application of the discrete element method for simulation of coal mining by a cutter-loader in a working face. *Russian Mining Industry*. 2023;(S2):150–154. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S2-150-154>

Введение

Вопреки некоторым тенденциям¹ угольная промышленность в России и в мире продолжает оставаться одной из лидирующих по добыче ископаемого топлива².

На базе угля, запасы которого значительно превышают запасы нефти и природного газа, вырабатывается около 40% всей электроэнергии в мире. В России основными потребителями угля на внутреннем рынке являются электростанции и коксохимические заводы. Согласно статистике за 2022 г. в Кемеровской области – Кузбассе, являющемся наиболее крупным поставщиком среди угледобывающих регионов страны, было произведено около половины (50,8%) всего добываемого угля в России, а также 57,1% углей коксующихся марок [1]. С точки зрения способа добычи в настоящее время преобладают открытые горные работы – до 77% от общего объема. Однако подземный способ разработки продолжает сохранять стабильные позиции в общем объеме добычи угля на протяжении последних 10 лет. Это обусловлено тем, что наиболее ценные и поставляемые на экспорт марки каменного угля залегают в мощных пластах и добываются преимущественно подземным способом. Исходя из этого факта совершенствование технологии разработки мощных пластов, а также согласование загрузки технологического оборудования комплексно-механизированного забоя в настоящий момент являются актуальными задачами. В силу многофакторности планирования подземных горных работ, а также значительных финансовых и временных затрат на лабораторные испытания наиболее подходящим инструментом для дальнейших исследований является использование имитационного моделирования. Благодаря цифровым моделям представляется возможным изучение различных вариантов технологий разработки угольного пласта с учетом специфических горно-геологических условий [2; 3].

Постановка задачи и описание используемых методов

Данная работа посвящена моделированию процесса выемки угля очистным комбайном, включающего отбойку режущим органом – шнеком угля от пласта и транспортировку отбитой горной массы по скребковому конвейеру из лавы. Для создания цифровой модели необходимо учесть следующие аспекты:

1. Моделирование угольного пласта со всеми физико-механическими свойствами, присущими углю;

2. Построение моделей скребкового конвейера и рабочих механизмов комбайна, непосредственно взаимодействующих с пластом;
3. Механику разрушения угольного пласта под воздействием резцов очистного комбайна.

При выборе программного обеспечения для реализации вышеперечисленных элементов и процессов проанализировано множество программ для проектирования горнотехнических систем. Выявлено, что подобные системы ориентированы в большей степени на блочное моделирование, а для решения поставленных выше задач необходимо использовать среды имитационного моделирования, основанные на методе дискретных элементов (МДЭ) и имеющие пакеты статистического анализа полученных данных. В ходе обзора имитационных сред выбрано программное обеспечение Rocky DEM³, в котором проведено моделирование процессов выемки угля очистным комплексом.

Среда имитационного моделирования Rocky DEM в качестве математического аппарата оперирует методом дискретных элементов, предназначенным для вычисления движения и взаимодействия большого количества частиц (моделирование динамики частиц). Поскольку отбитую горную массу можно рассматривать как гранулированную сыпучую среду, а процесс транспортировки угля – как взаимодействие большого количества частиц, то для описания взаимодействия элементов в модели уместно применить метод дискретных элементов. Данный метод позволяет задавать в качестве входных данных начальные положения и скорости частиц, а также физические законы их взаимодействия. После этого вычисляются силы, действующие на каждую частицу. При этом представляется возможность учитывать разнообразные законы взаимодействия, для описания которых существуют разрешимые уравнения.

Проведение численных экспериментов

Основными компонентами имитационного моделирования, которые взаимодействуют с угольным пластом, являются горные машины, входящие в механизированный очистной комплекс. Для проведения экспериментов созданы 3D-модели скребкового конвейера «Анжера-30», очистного комбайна Eickhoff SL 750 и его шнекового исполнительного органа. Кроме того, разработана и построена вспомогательная конструкция, которая необходима для поддержания блоков угля, составляющих угольный массив в имитационной модели выемки угля (рис. 1).

¹ ООН призвала страны всего мира отказаться от угля. Национальная ассоциация нефтегазового сервиса. Режим доступа: <https://nangs.org/news/renewables/oon-prizvala-strany-vsego-mira-otkazatsya-ot-uglya>

² Ископаемое топливо не сдает позиции в мировой энергетике. Нефтянка. И нефть, и газ, и мирный атом. ВИЭ, экология, энергопереход. Режим доступа: <http://neftianka.ru/iskopaemoe-toplivo-ne-sdaet-pozicii-v-mirovoj-energetike/>

³ О продукте. Функциональность. Rocky DEM. Режим доступа: <https://www.rocky-dem.ru/software/features/>

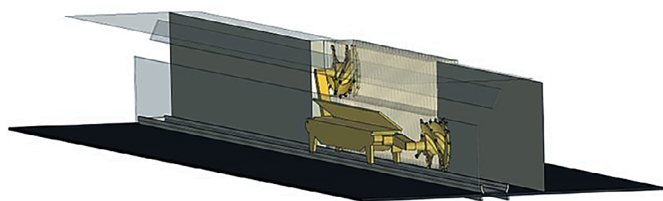


Рис. 1
Конечный вид 3D-модели очистной выработки с горным оборудованием

Fig. 1
The final view of the 3D model of the production working with mining equipment inside

В процессе настройки параметров имитационной модели выявлены параметры, имеющие справочные значения, такие как плотность материалов, технологические параметры оборудования, и программные параметры, не имеющие физических эквивалентов, например, адгезия – сцепление между раздробленными частицами угля. Поскольку при очистных работах используются системы пылеподавления, имитационная модель должна правильно отражать процессы отбивки угля и ссыпания его на скребковый конвейер. Для определения параметров сцепления была проведена калибровка, состоящая из серии тестов на угол естественного откоса (УЕО). Угол естественного откоса зависит в основном от силы сцепления и силы трения, определяющихся шероховатостью частиц, степенью их увлажнения, формой и гранулометрическим составом [4].

В табл. 1 представлен фрагмент результатов калибровочных тестов с использованием линейной адгезии. Известно, что для сухого каменного угля значение УЕО составляет от 30 до 45 град., а для влажного угля это значение будет выше⁴. Для обеспечения достоверности моделирования

Таблица 1
Результаты калибровочных тестов с линейной адгезией (фрагмент)

Table 1
Results of calibration tests with linear adhesion (fragment)

Линейная адгезия						
№	Адгезионное расстояние, м	Доля жесткости	Коэффициент статического/динамического трения	Сопротивление качению	Угол естественного откоса, град.	Результат
1	0,00001	0,01	0,7	0,2	45,99	
2	0,000001	0,05	0,7	0,2	39,02	
3	0,00001	0,015	0,7	0,2	48,65	

⁴ Наибольшие углы наклона ленточных конвейеров при транспортировании сыпучих грузов на подъем. Pozhproekt.ru. О пожарной безопасности. Режим доступа: https://pzhproekt.ru/nsis/Snip/Pril/2-05-07-91_06pr.htm

условий реальной шахты необходимо провести эмпирические исследования УЕО и на основе полученных данных выбрать соответствующие параметры для моделирования.

Результаты численного моделирования выемки угля очистным комбайном

При проведении имитационного моделирования процесса выемки угля использовались физические параметры и технические характеристики оборудования⁵ [5], приведенные в табл. 2.

Для проверки адекватности модели рассчитаем производительность очистного комбайна и сравним ее с производительностью, полученной при моделировании. Производительность комбайна, т/мин, можно рассчитать по следующей формуле [6]:

$$q = m \cdot \gamma \cdot r \cdot K_r \cdot V_n, \tag{1}$$

где m – мощность пласта, м; γ – плотность угля в пласте вместе с породой, т/м³; r – ширина захвата, м; K_r – коэффициент использования ширины захвата, м; V_n – скорость подачи комбайна, м/мин.

Рассчитанная производительность очистного комбайна равна 49,92 т/мин. За 35 с моделирования очистной комбайн отбил 29,37 т угля, 22,4 т из которых попали на конвейер. В результате проведенного имитационного моделирования средняя производительность очистного комбайна составила 50,35 т/мин, что на 0,86% больше, чем полученное по формуле (1) значение производительности, что подтверждает достоверность разработанной имитационной модели.

На рис. 2 отображен смоделированный процесс выемки угля на 35-й секунде. Выведенная цветовая шкала позволяет оценить распределение частиц и получившихся фрагментов угля по размеру, определенному при помощи виртуальной сетки, через квадратные отверстия которой проходят частицы, и не зависящему от формы частиц.

⁵ Eickhoff Бергбаутехник. Опыту нет альтернативы. Режим доступа: https://www.eickhoff-bochum.de/sites/default/files/field/upload/eickhoff_mining_technology_1.pdf

Таблица 2
Параметры, используемые при моделировании

Table 2
Parameters used in modeling

Название	Значение	
Общая физика модели		
Модель адгезии	Линейная	
Модель сопротивления качению	Type C: Linear Spring Rolling Limit	
Параметры комбайна		
Скорость подачи, м/мин	12	
Скорость вращения шнеков, об/мин	56	
Вынимаемая мощность пласта, м	4	
Ширина захвата, м	0,8	
Параметры конвейера		
Скорость цепи, м/с	1	
Параметры материалов		
	Уголь	Сталь
Плотность, кг/м ³	1300	7800
Модуль Юнга, МПа	5400	190000
Коэффициент Пуассона	0,16	0,3
Параметры взаимодействия материалов		
	Уголь-Уголь	Уголь-Сталь
Коэффициент восстановления	0,15	0,15
Параметры частиц угля		
Коэффициент сопротивления качению	0,2	
Модель разрушения	Ab-T10	
Эталонный размер, м	0,1	
Эталонная минимальная удельная энергия, Дж/кг	2,1	
Коэффициент функции выбора, кг/Дж	0,25	
Максимальное значение t10, %	4,9	



Рис. 2
Распределение частиц и фрагментов угля в модели по размеру

Fig. 2
Distribution of coal particles and fragments in the model by size

Из рис. 2 видно, что основная доля раздробленных фрагментов обозначена темно-синим и синим цветами, соответствующими распределению размеров в пределах от 5 до 40 м.

Для определения загруженности скребкового конвейера на нем был выбран участок размером 1x1 м и высотой

1,3 м, на котором производился сбор статистики. Допустимое значение массы угля на единице длины конвейера было получено из формулы часовой производительности конвейера, т/ч [7]:

$$Q = \frac{3600 \cdot q' \cdot v}{1000}, \quad (2)$$

где q' – средняя масса угля на единице длины конвейера, кг/м; v – скорость движения цепи конвейера, м/с.

При производительности конвейера 960 т/ч и скорости движения его цепи 1 м/с масса угля на единице длины конвейера составляет 267 кг/м.

На рис. 3 отображена зависимость массы угля, находящегося на участке конвейера, от времени, полученная по результатам моделирования. Эксперименты показали, что для выбранных параметров комбайна и конвейера средняя масса угля на участке конвейера в установившемся режиме составила 406 кг с периодическим увеличением и снижением на 96 кг. Таким образом, проведение экспериментов с использованием разработанной модели показало, что при выбранных условиях на участке конвейера будет значительное превышение рассчитанной грузоподъемности.



Рис. 3
График зависимости массы угля, находящегося на участке конвейера 1x1 м, от времени

Fig. 3
A cross-plot of the dependence of the mass of coal located within the conveyor section of 1 by 1 meter on time

С использованием модели можно определить производительность погрузки угля на конвейер шнековыми исполнительными органами комбайна, которая в данном случае составила 38,4 т/мин (график зависимости массы попавшего на конвейер отбитого шнеками угля от времени представлен на рис. 4). Также установлено, что в про-

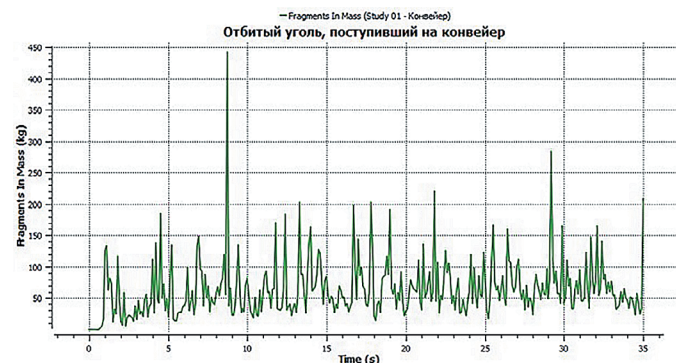


Рис. 4
График зависимости массы попавшего на конвейер угля от времени

Fig. 4
A cross-plot of the mass of coal that was delivered to the conveyor on time

цессе выемки угля шнековыми исполнительными органами очистного комбайна на конвейер было погружено 76,27% отбитого угля.

Выводы

Описанная в работе модель выемки угля очистным комбайном является одним из элементов разрабатываемой системы моделирования технологий добычи угля в сложных горно-геологических условиях и предназначается для проведения имитационных экспериментов с различными параметрами очистного оборудования. Модель визуализирует процесс выемки угля комбайном, вывода покадрово

3D-отображение на экран, что позволяет оценить работу технологии. Также функция вывода результатов, полученных в ходе моделирования, в виде графиков зависимостей, гистограмм и набора данных дает возможность определить пути для повышения эффективности технологии добычи угля.

Результаты, полученные в ходе имитационных экспериментов по определению параметров сцепления, обобщены в массив входных параметров модели, которые позволят проводить исследования для условий действующих и проектируемых угольных шахт.

Список литературы

1. Петренко И.Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь-декабрь 2022 года. *Уголь*. 2023;(3):21–23. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-3-21-33>
2. Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Береснев М.В., Майоров А.Е. Система имитационного моделирования горнопроходческих работ. *Уголь*. 2016;(2):20–24. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2016-2-20-24>
3. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2019;(1):162–174.
4. Землянский В.Н., Загер И.Ю., Яшинкина А.А. *Инженерная геология. Определение угла естественного откоса песчаных грунтов*. Ухта: УГТУ; 2011. 6 с.
5. Potapov A., Donahue T. *Computer simulation of coal breakage in conveyor transfer chutes with Rocky discrete element method package*. *Technical report*. Rocky DEM; 2012. 27 p.
6. Пучков Л.А., Жежелевский Ю.А. *Подземная разработка месторождений полезных ископаемых*. М.: Горная книга; 2013. Т. 2. 720 с.
7. Спиваковский А.О., Дьячков В.К. *Транспортные машины*. М.: Машиностроение; 1983. 487 с.

References

1. Petrenko I.E. Russia's coal industry performance for January – December, 2022. *Ugol'*. 2023;(3):21–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2023-3-21-33>
2. Starodubov A.N., Sinoviev V.V., Beresnev M.V., Mayorov A.E. The system of mining operations simulation. *Ugol'*. 2016;(2):20–24. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2016-2-20-24>
3. Klishin V.I., Klishin S.V. Current state and direction of development of thick coal seams excavation technology by powered roof supports with controlled coal discharge. *Izvestija Tulsckogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2019;(1):162–174. (In Russ.)
4. Zemlyansky V.N., Zager I.Yu., Yashinkina A.A. *Engineering geology. Determination of the angle of natural slope of sandy soils*. Ukhta: Ukhta State Technical University; 2011. 6 p. (In Russ.)
5. Potapov A., Donahue T. *Computer simulation of coal breakage in conveyor transfer chutes with Rocky discrete element method package*. *Technical report*. Rocky DEM; 2012. 27 p.
6. Puchkov L.A., Zhezhelevskiy Y.A. *Underground mining of mineral deposits*. Moscow: Gornaya Kniga; 2013. Vol. 2. 720 p. (In Russ.)
7. Spivakovskiy A.O., Dyachkov V.K. *Transport Machines*. Moscow: Mashinostroenie; 1983. 487 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Стародубов Алексей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7577-9210>; e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Кадочигова Арина Николаевна – ведущий инженер, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: arina.kadochigova@mail.ru

Каплун Анастасия Вячеславовна – ведущий инженер, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: nastiakaplun@yandex.ru

Information about the authors

Aleksey N. Starodubov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of Laboratory of the Institute of Coal, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7577-9210>; e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

Arina N. Kadochigova – Senior Engineer of the Institute of Coal, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: arina.kadochigova@mail.ru

Anastasia V. Kaplun – Senior Engineer of the Institute of Coal, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: nastiakaplun@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.07.2023

Поступила после рецензирования: 17.08.2023

Принята к публикации: 23.08.2023

Article info

Received: 30.07.2023

Revised: 17.08.2023

Accepted: 23.08.2023