

УДК 004.942; 622.3

О ПОДХОДЕ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЫЕМКИ УГЛЯ ОЧИСТНЫМ КОМПЛЕКСОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DEM МЕТОДА

Кадочигова А.Н., ¹ведущий инженер, ²студент гр. ИТм-211, II курс,
Каплун А.В., ¹ведущий инженер, ²студент гр. ИТм-211, II курс,
Стародубов А.Н., ¹зав. лабораторией, ²к.т.н., доцент,
¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского
отделения Российской академии наук (ФИЦ УУХ СО РАН)
²Кузбасский государственный технический университет имени
Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Имитационное моделирование, как метод исследования, предполагает изучение реального объекта с помощью создания и анализа его достоверного цифрового аналога. Наиболее широкое применение данный метод получил в сфере промышленного производства, поскольку с его помощью снижаются затраты на разработку проектов по автоматизации и совершенствованию производственных процессов [1].

На данный момент представлен широкий спектр программных продуктов, предоставляющих возможность для создания моделей различной сложности и применимых в различных отраслях промышленности. В данной статье будет уделено внимание моделированию выемки угля очистным комплексом, а именно процессу взаимодействия шнека очистного комбайна с пластом полезного ископаемого [2].

Основными элементами и процессами, которые необходимо учесть в имитационной модели, являются:

- пласт горной породы, а также все физико-химические свойства, относящиеся к углю;
- рабочие механизмы комбайна, непосредственно взаимодействующие с пластом (также с определенными физическими показателями, относящимися к материалам, из которых они изготовлены);
- разрушение горного пласта под воздействием резцов очистного комбайна.

Для реализации имитационной модели было выбрано программное обеспечение Rocky DEM [3]. Данная программа позволяет работать с гранулированной средой благодаря методу дискретных элементов (DEM – Discrete element method). Он предназначен для вычисления движения и взаимодействия большого количества частиц (моделирование динамики частиц).

Основным преимуществом Rocky DEM по сравнению со своими аналогами (PFC3D, EDEM, ELFEN, ThreeParticle/CAE, MUSEN) [4-8] является возможность моделирования разрушения частиц произвольной формы без потери массы и объема под воздействием внешних факторов, что подходит для

описания механики горных пород. Рассматриваемое ПО позволяет задавать точную траекторию движения элементов модели, например, колебания и вращения, или осуществлять свободное перемещение с учетом внешних сил.

В программе представлено несколько подходов к моделированию частиц и моделям их разрушения и распределения фрагментов. От правильного выбора комбинации данных параметров зависит достоверность создаваемой модели.

При моделировании частиц Rocky DEM предоставляет два варианта композиции [9]:

- 1) Целая неделимая единая частица (Single Elements);
- 2) Частица, состоящая из нескольких составляющих фрагментов – тетраэдров одинакового объема, их минимальное количество высчитывается программой, а максимальное – пользователь может задавать самостоятельно (Multiple Elements). Между составными фрагментами есть возможность задавать силы сцепления.

Рассмотрим основные модели разрушения, которые реализованы в Rocky DEM. Основой для выбора определенной модели являются форма и состав частицы. После задания этих параметров будут доступны два вида моделей разрушения: один набор моделей мгновенного разрушения для твердых хрупких частиц (например, как горная порода), состоящих только из одного элемента, и другой набор моделей дискретного разрушения, специфичных для гибких частиц, состоящих из нескольких элементов. Для одноэлементных частиц доступны модели мгновенного разрушения, такие как Ab-T10, Tavares и TBM. Все три модели сохраняют как массу, так и объем. Для многоэлементных (гибких) частиц доступны дискретные модели разрушения, включающие несколько дополнительных параметров (рис. 1).

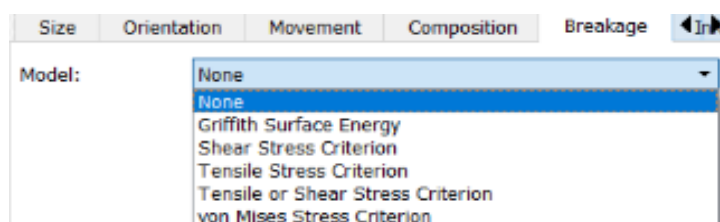


Рисунок 1 – Выбор модели дискретного разрушения многоэлементной частицы в среде моделирования Rocky DEM

Для выбора модели разрушения в Rocky DEM были созданы несколько вариантов имитационных моделей с различными моделями разрушения, в которых массив, обладающий физическими характеристиками угля, разрушался под действием шнека очистного комбайна.

В первом из рассмотренных вариантов была выбрана модель дискретного разрушения, которая учитывает как фактическое напряжение растяжения, так и фактическое напряжение сдвига [10]. При дискретной модели разрушения моделируемый угольный массив был заранее автоматически разбит

на конечное число фрагментов-тетраэдров, соединенных между собой. Разрушение массива отображено на рисунке 2.

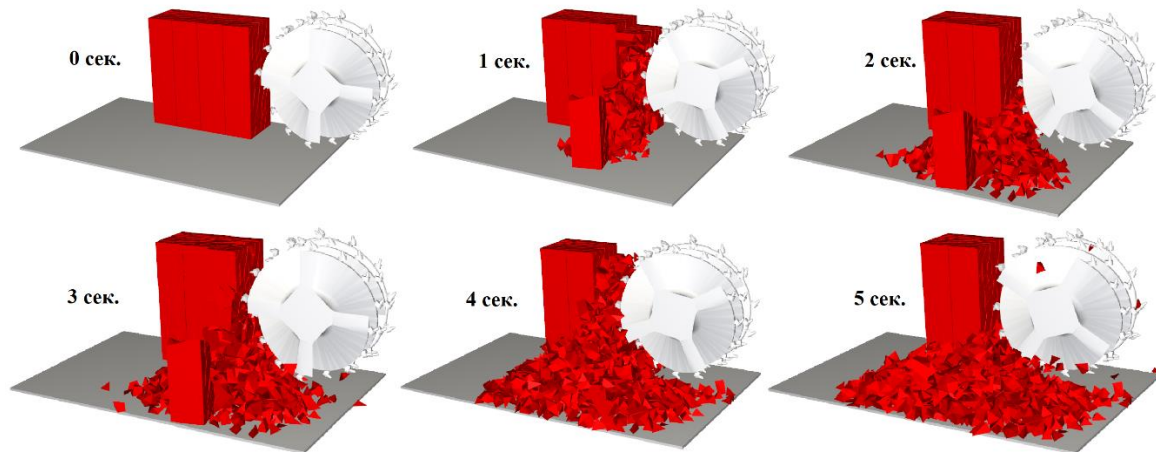


Рисунок 2 – Разрушение массива, состоящего из фрагментов, при использовании дискретной модели разрушения Tensile or Shear Stress Criterion

Данный вариант не подошел из-за единого размера фрагментов, на которые рушится массив, т.е. невозможно задать распределение, по которому бы массив разбился на фрагменты различного размера.

После выявленных недостатков моделей дискретного разрушения, были проведены имитационные эксперименты с мгновенным разрушением. Так в следующем эксперименте к моделируемому угольному массиву была применена модель разрушения Tavares, описывающая прогрессивный рост трещиноподобных повреждений, которые приводят к разрушению частиц при меньших напряжениях, чем при первоначальном разрушении [10], и модель распределения фрагментов Gaudin-Schumann. Визуальный результат разрушения представлен на рисунке 3.

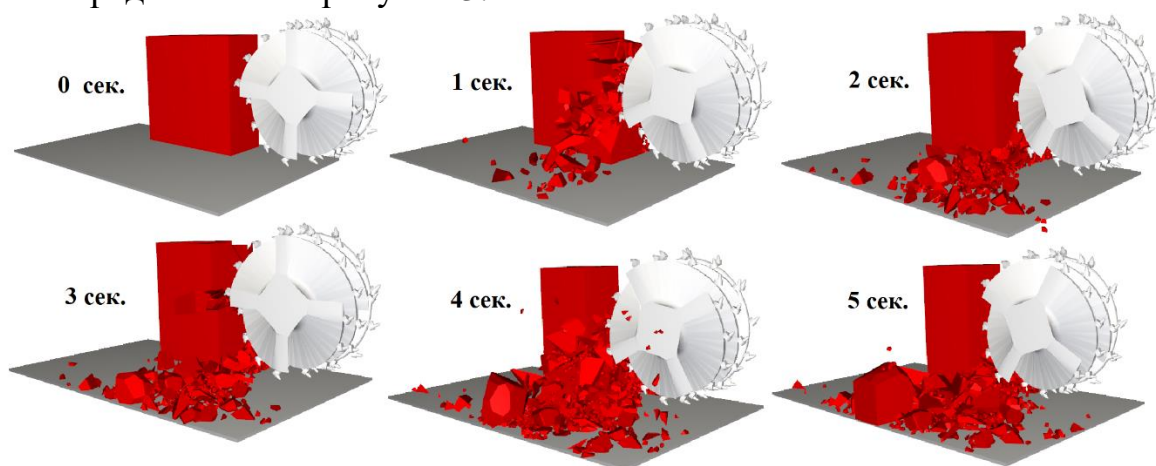


Рисунок 3 – Разрушение массива при использовании мгновенной модели разрушения Tavares и модели распределения фрагментов Gaudin-Schumann

В другом варианте эксперимента к модели разрушения Tavares применялась модель распределения фрагментов Incomplete Beta. За счет появления

дополнительной таблицы, позволяющей установить полученные экспериментальным путем параметры распределения размеров фрагментов, разрушение частиц происходит более контролируемо, чем при использовании распределения Gaudin-Schumann, что можно наблюдать на рисунке 4.

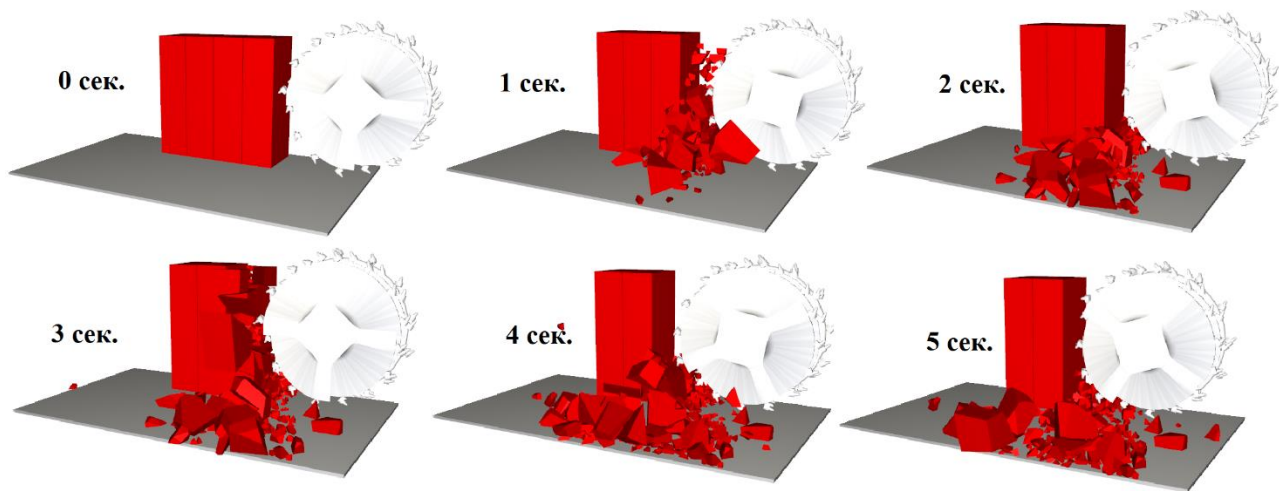


Рисунок 4 – Разрушение массива при использовании мгновенной модели разрушения Tavares и модели распределения фрагментов Incomplete Beta

Использование данной модели разрушения осложняется тем, что в ней присутствует как минимум 5 параметров, которые должны быть установлены экспериментально, т.е. подогнаны под экспериментальные данные. Для нахождения значений этих параметров, которые бы достоверно производили поломку для определенного материала, нужны хорошие вычислительные мощности, т.к. расчет разрушения достаточно сложный и времязатратный процесс.

В следующем варианте к моделируемому горному массиву применялась модель разрушения ТВМ, учитывающая удельную энергию удара для определения события поломки частиц [10]. В ходе моделирования массив начал крошиться в мелкую крошку в месте соприкосновения с зубьями шнека, из-за чего время моделирования было существенно увеличено в отличие от предыдущих моделей. При этом в ходе разрушения от массива откалываются достаточно большие куски, что вместе с мелкой крошкой приводит к неравномерности полученной отбитой массы (рис. 5).

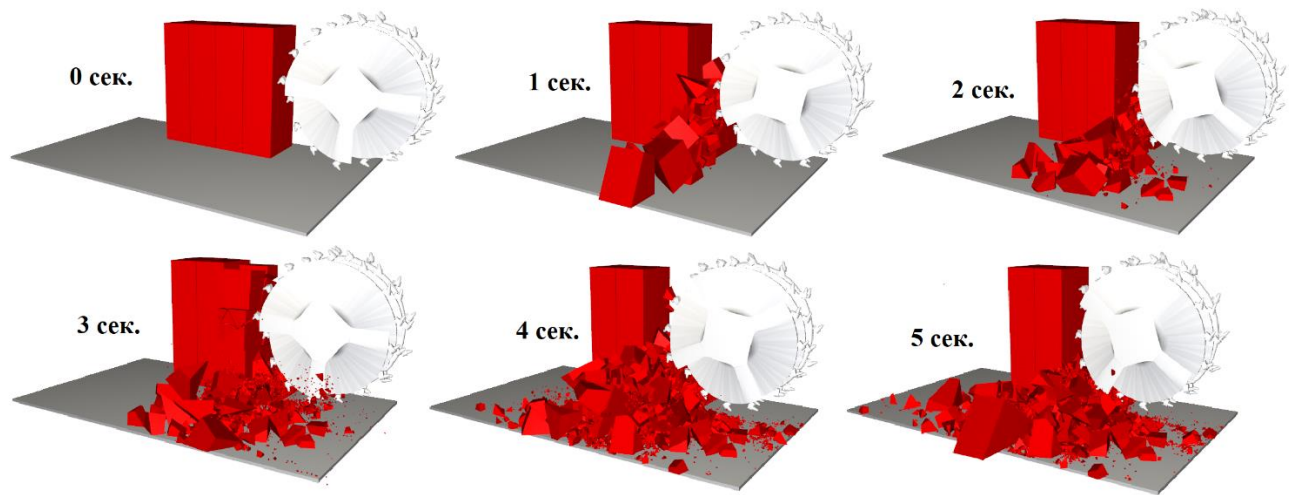


Рисунок 5 – Разрушение массива при использовании мгновенной модели разрушения ТВМ

В последнем эксперименте была выбрана модель мгновенного разрушения Ab-T10, рассматривающая каждую частицу, как единое целое, которое можно мгновенно раздробить на фрагменты в зависимости от значений силы разрушения и/или энергии [10]. Результат моделирования показан на рисунке 6.

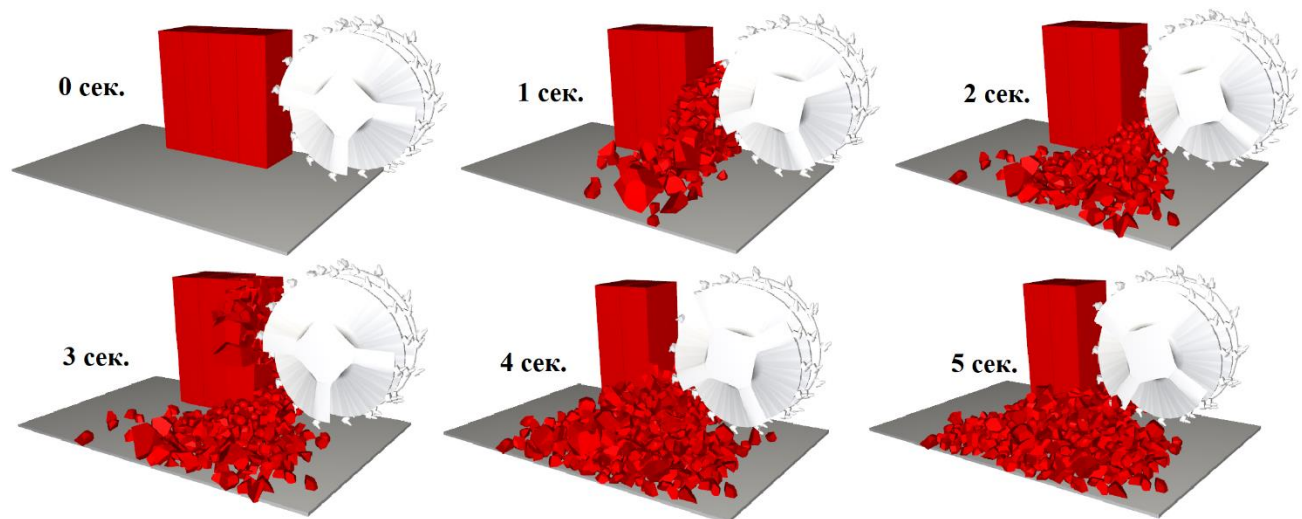


Рисунок 6 – Разрушение массива при использовании мгновенной модели разрушения Ab-T10

Результат, получившийся в последнем эксперименте с использованием модели разрушения Ab-T10, сильнее приближен к разрушению горного массива и является наиболее оптимальным способом моделирования выемки угля очистным комбайном, но все еще не идеален. Необходима точная калибровка вводимых параметров разрушения угля и сил трения, а также добавление сил адгезии для приближения модели к реальному объекту.

Исследование выполнено в рамках государственной программы Кемеровской области – Кузбасса «Наука и университеты Кузбасса» на 2022 –

2026 годы, утвержденной постановлением Правительства Кемеровской области – Кузбасса от 30.09.2021 № 585 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.

Список литературы

1. Крышень Евгений Валерьевич, Лаврусь Ольга Евгеньевна Моделирование производственных процессов // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. №4-1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-proizvodstvennyh-protsessov>. (Дата обращения: 07.11.2022).
2. Общие представления о технологии добычи угля на шахте: [Электронный ресурс] // РосУголь. URL: <http://www.roscoal.ru/content/press-centr/informaciya-dlya-vas/obschie-predstavleniya-o-tehnologii-dobychi-uglya-na-shahte/>. (Дата обращения: 07.11.2022).
3. О продукте. Функциональность: [Электронный ресурс] // Rocky DEM. URL: <https://www.rocky-dem.ru/software/features/>. (Дата обращения: 07.11.2022).
4. PFC. Version 7.0: [Электронный ресурс] // ITASCA, Consulting Group. URL: <https://www.itascacg.com/software/pfc/>. (Дата обращения: 07.11.2022).
5. EDEM (DEM Solutions Ltd.): [Электронный ресурс] // Altair Engineering Inc. URL: <https://www.altair.com/edem/>. (Дата обращения: 07.11.2022).
6. Software: [Электронный ресурс] // Rockfield Global. URL: <https://www.rockfieldglobal.com/software/>. (Дата обращения: 07.11.2022).
7. Becker 3D. Simulation Software: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.becker3d.com/>. (Дата обращения: 07.11.2022).
8. MUSEN - Open-Source DEM Simulation System: [Электронный ресурс] // MSolids Integrated MultiscaleSimulation Platform. URL: <https://msolids.net/musen/>. (Дата обращения: 07.11.2022).
9. ESSS Rocky, Release 4.5.2, User Manual, ESSS Rocky DEM, S.R.L., (2021).
10. ESSS Rocky, Release 4.5.2, DEM Technical Manual, ESSS Rocky DEM, S.R.L., (2021).