

УДК 004.942; 622.3

СИСТЕМА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЧИСТНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Стародубов А.Н., Зиновьев В.В., Кадочигова А.Н., Каплун А.В. (Кемерово)

Введение

Поскольку 27,2% от общего потребления энергии приходится на уголь [1], который занимает второе место среди полезных ископаемых, а его запасы превышают запасы природного газа и нефти, то к настоящему времени угледобывающая отрасль является достаточно востребованной.

Несмотря на то, что открытые горные работы составляют до 77% от общего объема, добыча подземным способом обладает преимуществами, делающими этот способ предпочтительным относительно других. В отличие от разработки открытым способом, при котором в атмосферу выбрасывается большое количество угольной пыли, подземная добыча уменьшает наносимый вред окружающей среде, так как в таком случае не требуется удаление верхнего слоя почвы, а сама добыча происходит под землей. Также выемку угля можно производить на большой глубине, где находятся мощные пласты с более ценными и качественными марками каменного угля. Поэтому в настоящее время актуальной задачей является усовершенствование технологий добычи угля из мощных пластов и управление загрузкой забойного оборудования.

В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН ведутся исследования в направлении конструирования механизированных крепей с управляемым выпуском подкровельной толщи [2–4], позволяющих минимизировать потери оставляемого в завале угля, обеспечить безопасность и эффективность очистных работ в забое. Для оценки данной технологии, а также для согласованной работы механизированного оборудования очистного забоя, разрабатывается система имитационного моделирования, которая позволит учитывать такие факторы, как скорость подачи комбайна и его размеры, частоту вращения его режущих органов, скорость движения цепи скребкового конвейера, мощность разрабатываемого пласта, геомеханические свойства горной породы и т.д. Такая система позволит отображать различные варианты взаимодействия оборудования механизированного очистного комплекса с учетом динамики разрушения и транспортировки отбитой горной массы.

Используемые методы решения

В основу системы моделирования положен имитационный подход [5–8], что обусловлено необходимостью отображения динамических и стохастических процессов выемки и выпуска угля, которые сложно описать аналитическими методами. Для построения модели выбрано программное обеспечение (ПО) Rocky DEM, базирующееся на методе дискретных элементов (МДЭ), и обладающее встроенными пакетами статистического анализа полученных данных [9].

Указанное ПО позволяет:

- учитывать физико-механические свойства угля при моделировании угольного пласта;
- добавлять 3D-модели очистного забойного оборудования (очистной комбайн, механизированная крепь, скребковый конвейер) и отображать движение их рабочих механизмов в пространстве выработки;
- имитировать механику разрушения моделируемого угольного пласта при контакте со шнековыми рабочими органами комбайна;

– моделировать взаимодействия частиц угля в потоке при транспортировке их скребками лавного конвейера и управляемом выпуске угля подкровельной толщи.

Применяемый в Rocky DEM метод дискретных элементов позволяет вычислять и отображать траектории движения взаимодействующих частиц в потоке отбитой горной массы, которая рассматривается как гранулированная сыпучая среда. Благодаря встроенным моделям мгновенного разрушения в Rocky можно моделировать разрушение частиц под воздействием внешних факторов. В данном случае это влияние резцов шнеков очистного комбайна на угольный пласт. Так, например, модель разрушения Ab-T10 [10], используемая в модели выемки угля, основывается на вероятности поломки, которая зависит от энергии удара, передаваемой частицей, и может привести к ее мгновенному разрушению на отдельные фрагменты, которые также могут быть разрушены.

Разработка имитационных моделей

Имитационные модели, составляющие основу разрабатываемой компьютерной системы, необходимы для получения данных с целью дальнейшего определения оптимальных режимных параметров очистного комплекса. В системе используются две модели, одна из которых моделирует процесс выемки угля из мощного пласта при помощи очистного комбайна и транспортировки угля по скребковому конвейеру из забоя, а другая – процесс управляемого выпуска угля из подкровельной толщи и транспортировку по этому же конвейеру.

Имитационная модель очистной выемки [11] состоит из импортированных 3D-моделей комбайна и его шнековых исполнительных органов, скребкового конвейера, ячеистой конструкции для поддержания блоков, составляющих угольный массив, а также вспомогательных конструкций, имитирующих ограждения. Частицы в данной модели представляют собой прямоугольные параллелепипеды, которые помещаются в данную конструкцию при помощи загружаемого файла, содержащего координаты каждой частицы. Данная имитационная модель позволяет изменять не только скорость подачи комбайна, частоту вращения его шнеков и скорость движения скребков конвейера, но и физико-механические свойства угольного массива такие, как плотность, модуль Юнга, коэффициент Пуассона, а также учитывать сцепление между раздробленными фрагментами угля – адгезию.

Общее 3D-представление модели очистной выработки представлено на рис. 1.

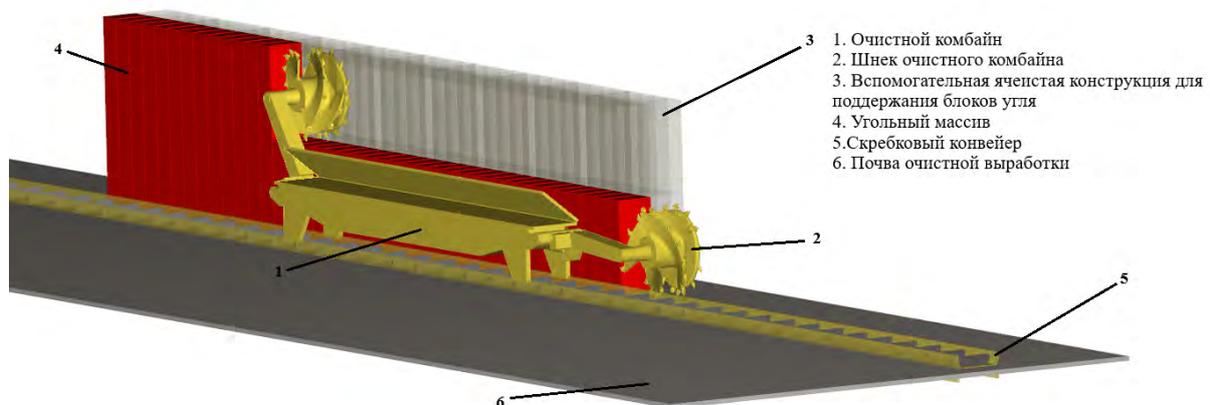


Рис. 1. 3D-модель очистной выработки с перечислением основных элементов

Имитационная модель выпуска угля подкровельной толщи [12] включает в себя импортированную 3D-модель самой крепи с выпускным окном, ее ступенчатого

питателя, скребкового конвейера и вспомогательных конструкций, для поддержания частиц угля подкровельной толщи (рис. 2).

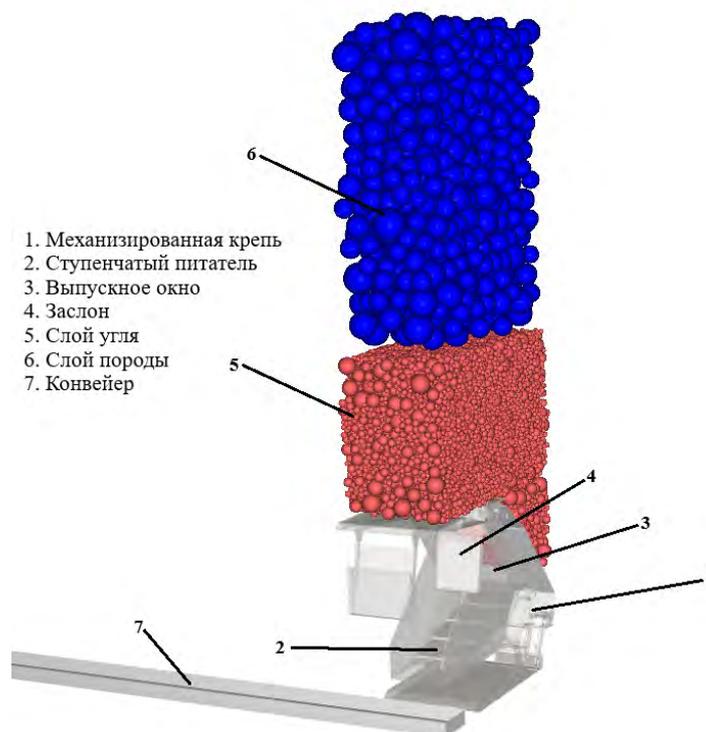


Рис. 2. 3D-модель выпуска угля подкровельной толщи с перечислением основных элементов

Такая модель позволяет изменять частоту возвратно-поступательного движения питателя, скорость движения скребков конвейера и свойства частиц, имитирующих уголь и породу. Данная модель позволяет определить массовый расход угля при изменении частоты работы питателя и угла наклона заслона. Также модель позволяет проводить исследования режимных параметров выпуска комплексом крепей [13].

Реализация клиентского приложения

В среде разработки Microsoft Visual Studio на языке C# разрабатывается пользовательский интерфейс, позволяющий запускать имитационные модели, изменять их параметры и проводить численные эксперименты по определению оптимальных режимных параметров очистного комплекса. Данное приложение необходимо для удобства взаимодействия конечного пользователя, не знакомого с интерфейсом Rocky DEM, с разработанными имитационными моделями.

Разработанный прототип приложения содержит три окна, каждое из которых отвечает за свой этап работы. Первое окно (рис. 3) отвечает за ввод конструктивных и режимных параметров очистного комплекса, а также за горно-геологические условия, которые учитываются в моделях. Реализована возможность ввода параметров крепи, конвейера и физических характеристик углепородного массива.

Ввод входных параметров

Параметры крепи

Количество секций: 7
 Режим выпуска: групповой
 Максимальная скорость питателя (Гц): 2,00

Секция 1: Группа 1
 Секция 2: Группа 1
 Секция 3: Группа 1
 Секция 4: Группа 2
 Секция 5: Группа 2
 Секция 6: Группа 3
 Секция 7: Группа 3

Параметры конвейера

Ширина (м): 1,40
 Скорость (м/с): 1,00

Горно-геологические условия

Мощность пласта (м): 7,80
 Плотность угля (кг/м³): 1300
 Модуль Юнга угля (ГПа): 2,40
 Коэффициент Пуассона угля: 0,25
 Процентное содержание породы в угле, при котором остановить выпуск (%): 5,00

Плотность породы (кг/м³): 2000
 Модуль Юнга породы (ГПа): 13,58
 Коэффициент Пуассона породы: 0,35

Сохранить параметры в файл Загрузить параметры из файла Далее

Рис. 3. Окно пользовательского приложения для ввода входных параметров модели

Второе окно (рис. 4) предназначено для задания диапазонов угла наклона заслона и частоты работы питателя. После нажатия кнопки «Создать модели Rocky» данные передаются из интерфейса приложения в Rocky DEM с помощью скриптов, написанных на языке Python. Такие скрипты содержат команды для создания моделей, ввода в них необходимых данных и их запуска на расчет. Когда все модели будут рассчитаны, необходимо вывести результаты моделирования в таблицу любым из трех способов: автоматически из проектов Rocky, из файла Excel или вручную.

Получение массового расхода угля для разных скоростей питателя и угла заслона

Изменять угол от: 10 до 45 шаг: 5
 Изменять скорость от: 0,25 до 1,00 шаг: 0,25

Создать модели Rocky Получить значения из моделей Rocky Получить значения из файла Excel

	0,25 Гц	0,50 Гц	0,75 Гц	1,00 Гц
10°	29	59	90	121
15°	32	66	95	126
20°	36	69	101	134
25°	47	78	115	151
30°	54	84	122	161
35°	59	103	141	178
40°	87	123	160	198
45°	137	174	207	239

Назад Далее

Рис. 4. Окно пользовательского приложения для вывода массового расхода угля при разных сочетаниях угла наклона заслона и частоты работы питателя

В третьем окне приложения производится ввод данных в таблицу, что необходимо для определения рационального массового расхода угля при выпуске (рис. 5). В полученной таблице первая строка содержит данные о текущем массовом расходе угля для каждой секции крепи, а вторая – текущие количество угля на участках конвейера перед крепями, отображаемое также на гистограмме под таблицей.

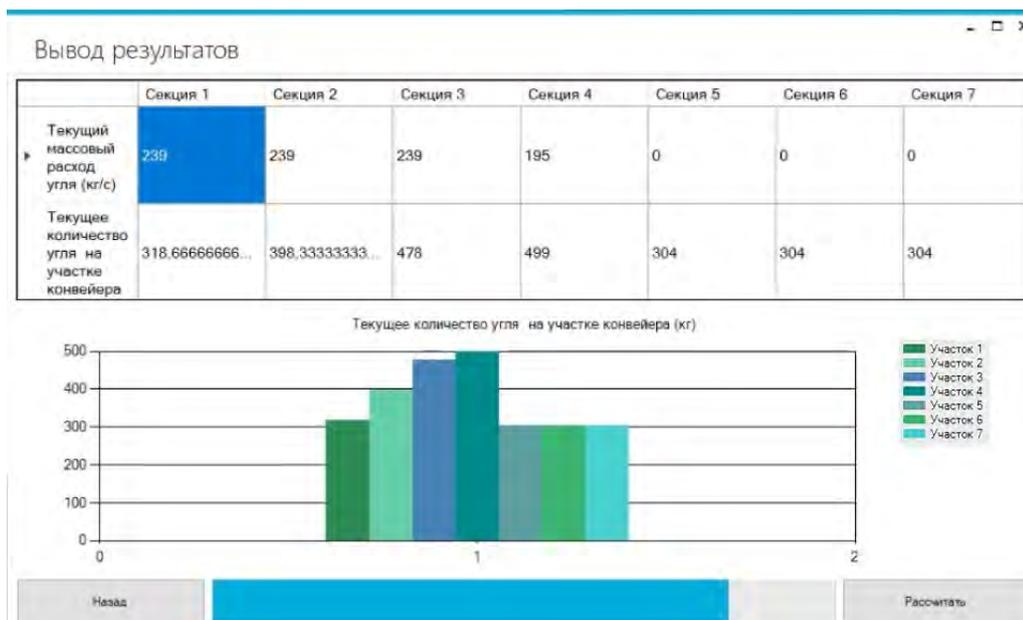


Рис. 5. Окно пользовательского приложения для вывода рационального массового расхода угля

Разрабатываемая система имитационного моделирования даёт возможность проводить исследования технологии. Так пользователь может получить график зависимости массы угля на участке конвейера от времени для любого режима выпуска, позволяющий определить оптимальный режим с выбранными параметрами работы механизированной крепи. На рис. 6 представлен график зависимости для волнового режима выпуска.

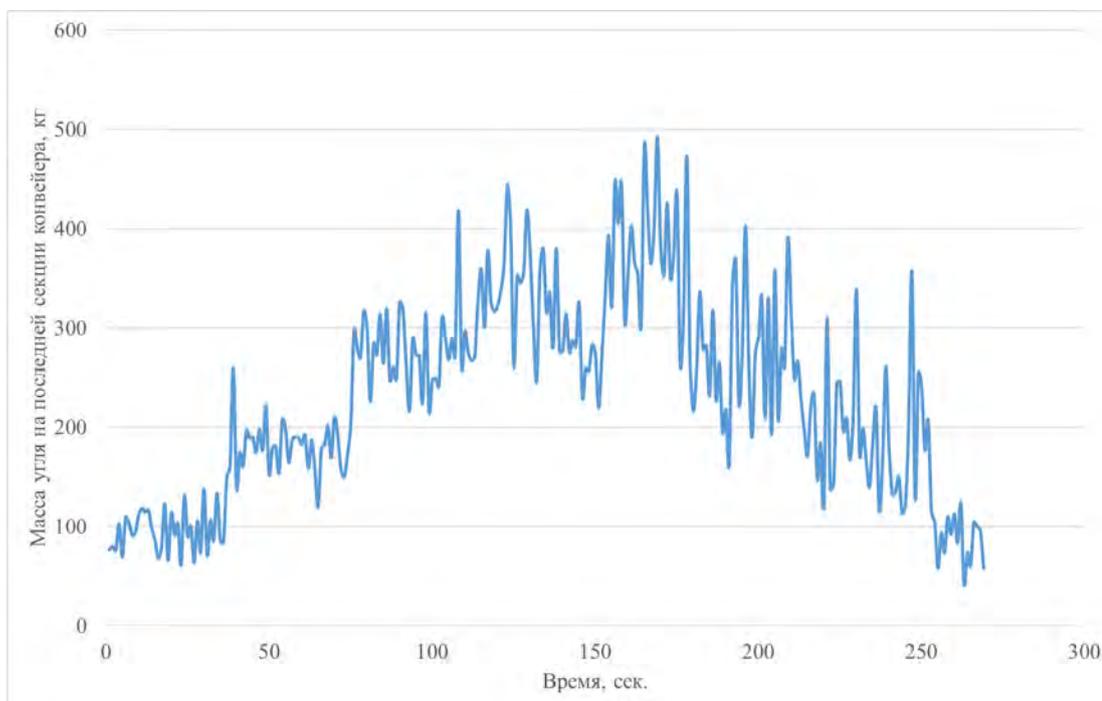


Рис. 6. График зависимости массы угля на участке конвейера от времени для волнового режима выпуска

Данный прототип клиентского приложения требует дальнейшей доработки алгоритмов для улучшения функционала, который позволил бы с учетом полученных

данных определять необходимый угол наклона заслона и частоту работы питателя для определенного массового расхода угля. В конечном варианте планируется, что приложение будет генерировать схему поэтапного запуска питателей каждой крепи.

Заключение

Описанные данной статьей имитационные модели очистной выемки угля и выпуска угля из подкровельной толщи, основанные на МДЭ, являются частями, составляющими разрабатываемую систему моделирования процессов добычи угля в сложных горно-геологических условиях. Связующим звеном этих моделей является описанное приложение, разрабатываемое для удобства работы конечного пользователя с моделями и дальнейшего анализа результатов, полученных с помощью имитационного моделирования. Такая система позволит проводить имитационные эксперименты с различными параметрами очистного забойного оборудования, что в свою очередь повысит эффективность технологии добычи угля.

Примечание: 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.

Литература

1. Ископаемое топливо не сдает позиции в мировой энергетике [Электронный ресурс] // Нефтянка. И нефть, и газ, и мирный атом. ВИЭ, экология, энергопереход. URL: <http://neftianka.ru/iskopaemoe-toplivo-ne-sdaet-pozicii-v-mirovoj-energetike/> (дата обращения: 14.09.2023).
2. Клишин В.И., Фокин Ю.С., Кокоулин Д.И., Кубанычбек Б. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля. Новосибирск: Наука, 2007. 135 с.
3. Клишин В.И., Шундулиди И.А., Ермаков А.Ю., Соловьев А.С. Технология разработки запасов мощных пологих пластов с выпуском угля. Новосибирск: Наука, 2013. 248 с.
4. Клишин В.И., Клишин С.В. Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском // Изв. ТулГУ. Науки о Земле. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. Вып. 1. С. 162–173.
5. Кельтон В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. 3-е изд. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. 847 с.
6. Конюх В.Л. Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ / В.Л. Конюх, В.В. Зиновьев. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. 243 с.
7. Павлова Л.Д. Моделирование геомеханических процессов в разрушаемом углепородном массиве: монография // Сиб. гос. ун-т. Новокузнецк: СибГИУ, 2005. 239 с.
8. Starodubov A.N., Sinoviev V.V., Klishin V.I. The development of simulating system of robotized technologies for thick and acute coal seams // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Т. 1749, №. 1. С. 012040. DOI 10.1088/1742-6596/1749/1/012040
9. О продукте. Функциональность // Rocky DEM. URL: <https://www.rocky-dem.ru/software/features/> (дата обращения: 14.09.2023).
10. Potapov A., Donahue T. Computer simulation of coal breakage in conveyor transfer chutes with Rocky discrete element method package. Technical report, Rocky DEM, 2012. Inc: 27.

11. Клишин В.И., Стародубов А.Н., Кадочигова А.Н., Каплун А.В. Разработка имитационной модели выемки угля очистным комбайном // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2023. № 9. С. 18–24.

12. Клишин В.И., Стародубов А.Н., Крамаренко В.А. Исследование параметров выпуска угля из подкровельной толщи средствами имитационного моделирования / В.И. Клишин, А.Н. Стародубов, В.А. Крамаренко и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2023. № 4. С. 44–51. DOI 10.15372/FTPRPI20230405.

13. Крамаренко В.А. Исследование режимных параметров роботизированного очистного комплекса с управляемым выпуском подкровельной толщи на имитационной модели // Образование, наука, инновации. Молодежный вклад в развитие научно-образовательного центра «Кузбасс»: материалы Инновационного конвента. Кемерово, 13 декабря 2019 года. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2019. С. 47–53.