

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 004.942; 622.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫПУСКА УГЛЯ ИЗ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ СРЕДСТВАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**В. И. Клишин^{1,2}, А. Н. Стародубов^{1,2}, В. А. Крамаренко¹,
А. Н. Кадочникова¹, А. В. Каплун¹**

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,

E-mail: a.n.starodubov@gmail.com, Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия

²Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия

Рассмотрена новая конструкция механизированной крепи для разработки мощных угольных пластов с выпуском подкровельной толщи угля, предусматривающая его контролируемый выпуск с помощью специального выпускного окна и питателя, совершающего возвратно-поступательное движение. Внедрение подобной технологии нуждается в предварительном тестировании, изучении режимных параметров выпуска секций, при которых обеспечивается максимально допустимое заполнение лавного конвейера без перегрузки и динамических явлений. Для изучения технологии создана имитационная модель в среде Rocky DEM, учитывающая физический эффект разрушения горного массива на основе метода дискретных элементов и позволяющая изменять конструктивные и режимные параметры работы крепей. Проведенные эксперименты позволяют оценить взаимную зависимость средней скорости выпуска угля на конвейер от угла наклона заслона и от частоты колебаний питателя.

Мощные угольные пласты, подземная разработка, имитационная модель, механизированная крепь, питатель, режимы выпуска, скребковый конвейер

DOI: 10.15372/FTPRPI20230405

Исследования, связанные с подземной разработкой мощных пологих угольных пластов, доля которых составляет около 12 % всей мировой добычи, ведутся во многих странах мира: Китае, России, Казахстане, Австралии, Польше, Индии [1 – 6]. Предложенные в Советском Союзе и Франции технологии, получившие широкое распространение, использовали эффект разрушения угля из подкровельной толщи энергией горного давления с последующим выпуском его на забойный или завальный конвейер. Это позволяет снизить удельный объем проведения подго-

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.

товительных выработок и затраты на оборудование очистных забоев. При этом механизированные комплексы получили дополнительные функции, связанные с управлением и выпуском вышележащего угля.

Реализация такой технологии во многом определяется требованиями полноты выпуска и механизации процесса, а также обеспечением безопасности и эффективности работы очистного забоя. Потери угля в обрушенном пространстве выемочного столба приводят к его самовозгоранию. При выпуске происходит перемешивание угля с обрушенными породами кровли и повышение его зольности. Тем не менее развитие этого перспективного направления геотехнологии зависит от правильного обоснования специальных типов механизированных крепей.

В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН развивается новый подход к конструированию механизированных крепей с контролируемым выпуском (рис. 1). В его основе положено использование регулируемых по скорости питателей в секциях крепи, а также специальных выпускных окон, с помощью которых предоставляется возможность изменять интенсивность выпуска угля на лавный скребковый конвейер [7–9]. Для оценки данной технологии необходимо определить рациональные режимы работы питателей секций крепи, обеспечивающие равномерную и максимально допустимую нагрузку очистного конвейера по массе и объему сгружаемого угля. Задача осложняется динамичностью и стохастичностью процесса выпуска угля, что затрудняет использование аналитических моделей. Наиболее подходящим в данном случае представляется применение имитационного моделирования [10–14], при котором не требуется явное аналитическое описание процессов. Данный метод нашел широкое применение в горнодобывающей отрасли [15–17].



Рис. 1. Новая конструктивная модель механизированной крепи с контролируемым выпуском угля

Для решения поставленной задачи разработан ряд имитационных и анимационных моделей роботизированного очистного комплекса для технологии эффективного освоения угольных месторождений с управляемым выпуском подкровельной толщи [18–19]. С точки зрения программной архитектуры такие модели состоят из отдельных модулей — расчетного и анимационного. Первый не учитывает физических характеристик горной массы, а также не содержит в себе математической базы расчета соударений частиц. Для преодоления изложенных недостатков предложена новая модель, построенная в среде имитационного моделирования Rocky DEM. Программное обеспечение позволяет анализировать движения частиц с помощью метода дискретных элементов (DEM). В основе данного метода лежит идея о том, что частицы в некоторой гранулированной среде, обладая определенным положением относительно друг друга в пространстве и начальной скоростью, взаимодействуют за счет контактных сил трения и тя-

готения. С помощью DEM представляется возможным описывать траекторию движения частиц, учитывая при этом физические свойства их материала. Метод подходит для моделирования гравитационного движения предварительно разупрочненной горной массы.

На рис. 2 представлена трехмерная имитационная модель крепи с семью секциями. Она позволяет изменять конструктивные и режимные параметры комплекса и, как следствие, добиться максимально возможной производительности выпуска при равномерном и полном заполнении конвейера.

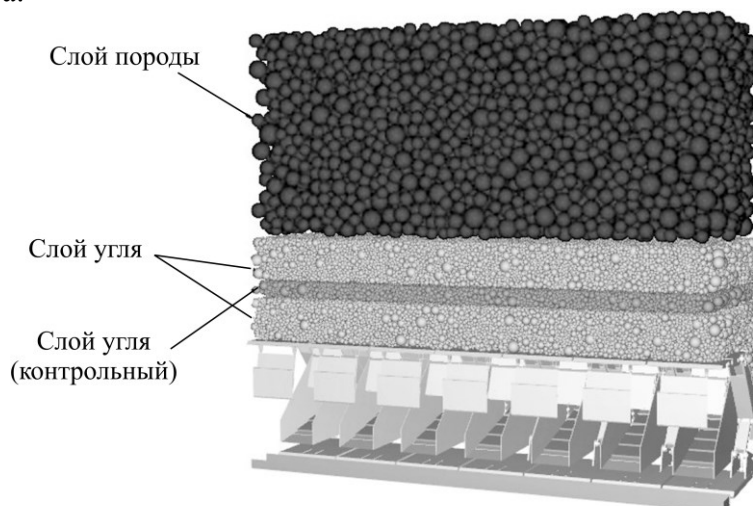


Рис. 2. Трехмерная модель роботизированного комплекса с управляемым выпуском

В табл. 1 представлены основные параметры частиц, изображенных на рис. 2. Верхний слой, обозначенный черным цветом, обладает свойствами породного массива, ниже представлен слой, характеризующийся свойствами угольного пласта. Темно-серым цветом выделен произвольный объем угля, служащий контрольной линией для повышения визуализации движения массива частиц.

ТАБЛИЦА 1. Физические и геометрические параметры частиц модели

Параметр	Уголь	Горный массив
Модуль Юнга (упругости), ГПа	2.40	13.58
Коэффициент Пуассона	0.25	0.35
Плотность, кг/м ³	1300	2000
Диаметр частиц, м	Соотношение, %	
0–0.09	13.83	—
0.09–0.18	46.31	—
0.18–0.27	20.34	—
0.27–0.36	19.52	13.83
0.36–0.45	—	46.31
0.45–0.54	—	20.34
0.54–0.63	—	19.52
Параметры контактов между частицами		
Угол сопротивления качению, град	20	20

Выпуск угля через секцию крепи осуществляется питателем, установленным в перекрытии механизированной крепи. Выполняя возвратно-поступательные движения, он должен равномерно регулировать движение угля через выпускное отверстие. В [20] установлено, что наибольшей производительностью обладает ступенчатый питатель, у которого рабочая поверхность направлена вдоль плоскости движения, ориентированной под углом к горизонту (рис. 3). Параметры данной модели питателя следующие: длина ступени $l_s = 0.7$ м; толщина ступени $h_s = 0.05$ м; угол наклона $\alpha = 12^\circ$; частота возвратно-поступательного движения $\nu = 0.5$ Гц; амплитуда движения $A = 0.15$ м. Ширина одной секции составляет 2 м, ширина окна питателя — 1 м. Параметры скребкового конвейера аналогичны модели “Анжера-30” (ОАО “Анжеромаш”): производительность 1000 т/ч, скорость движения тягового органа 1.0 м/с.

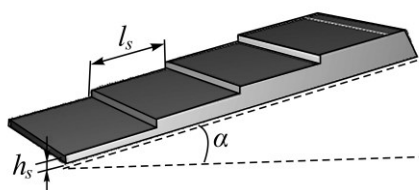


Рис. 3. Ступенчатый питатель

Для оценки загруженности участка конвейера по массе и производительности выпуска секции крепи используются специальные объекты среды моделирования Rocky DEM. Это пользовательские процессы, которые предназначены для сбора статистики по входящим и выходящим за его рамки частицам, а также для оценки фактической заполненности рассматриваемого объекта в реальном времени. На рис. 4 изображен пользовательский процесс типа “куб”, расположенный в месте выгрузки выпускаемого угля на скребковый конвейер. Черным цветом обозначены максимальные границы для данного процесса, установленные разработчиками модели, белым — динамически изменяемая рамка, границы которой пересчитываются в ходе моделирования в зависимости от объема поступающих частиц в пользовательский процесс.

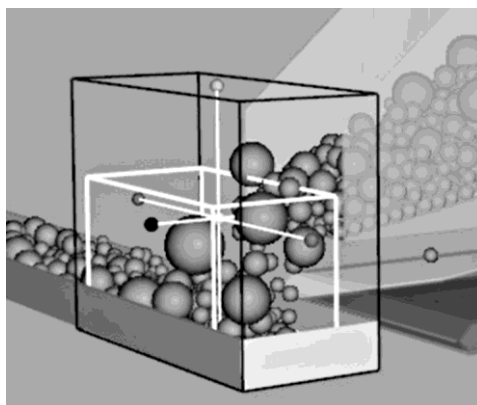


Рис. 4. Пользовательский процесс

Рассмотрены четыре основных режима выпуска: индивидуальный, волновой, групповой и площадной. В индивидуальном режиме питатели включаются поочередно на каждой крепи после того, как на предыдущей секции будет достигнута граница “порода–уголь”. При волновом режиме питатели включаются последовательно на каждой секции с некоторой временной задержкой. С переходом на групповой режим питатели начинают работу поочередно в группах из нескольких секций. Площадной режим предполагает одновременную работу всех питателей с одинаковой скоростью выпуска на всех секциях.

Для изучения динамики выпуска подкровельной толщи проведен ряд имитационных экспериментов по определению зависимости загруженности конвейера от режимов выпуска. На рис. 5 приведены диаграммы динамики загруженности конвейера по массе на участке, соответствующем последней секции крепи, при различных параметрах выпуска.

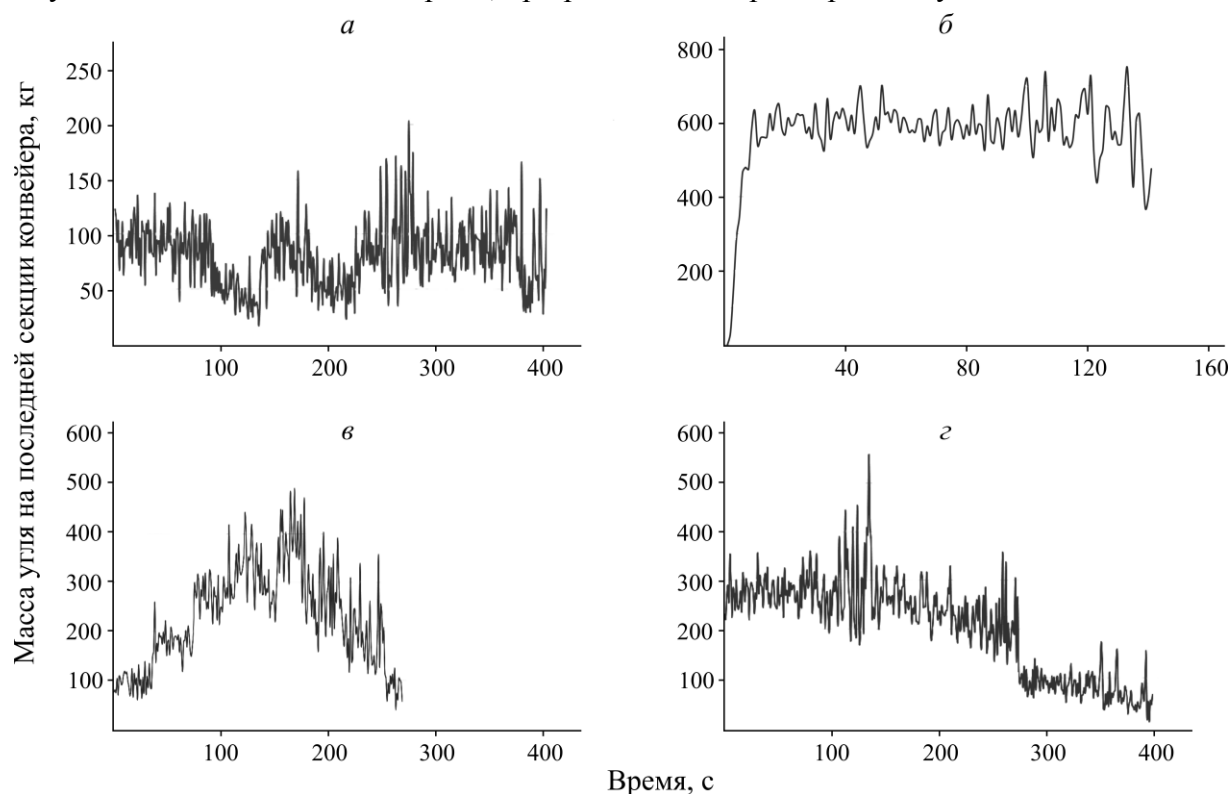


Рис. 5. Индивидуальный (а); площадной (б); волновой (в) и групповой (г) режим выпуска

На графиках при всех вариантах, кроме площадного выпуска, наблюдаются сильные всплески. Они возникают в момент окончания выпуска одной секцией крепи и начала выпуска другой (например, при групповом режиме на 120–150 с). Кроме того, отмечен существенный прирост по массе на конвейере, когда на него начинает поступать порода. В связи с этим актуальным становится определение момента времени прекращения выпуска горной массы, чтобы максимально выпустить участок за крепью, но при этом не допустить разубоживания угля. Данный вопрос тесно связан с процессом выпуска, зависящим от изменения угла наклона заслона и скорости возвратно-поступательного движения питателя. В ходе моделирования различных сочетаний значений этих двух показателей получены данные, представленные в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Средняя скорость выпуска угля при разных углах наклона заслона и частотах работы питателя, кг/с

Угол наклона заслона, град	Частота работы питателя, Гц							
	0.25	0.29	0.33	0.40	0.50	0.67	1.00	2.00
10	36	43	47	56	64	85	130	282
15	43	43	55	63	70	95	146	299
22	50	60	64	74	90	111	165	329
30	84	90	98	108	128	146	205	378
35	111	107	122	130	158	173	231	434
40	144	152	164	167	181	213	281	451
45	189	198	202	209	226	255	301	489

Далее определялись необходимые угол наклона заслона и частота работы питателя для достижения оптимальной скорости выпуска угля (рис. 6). Установлена следующая закономерность — линии тренда почти идентичны друг другу, но расположены с некоторым смещением по скорости. Горизонтальная линия обозначает предел максимальной грузоподъемности конвейера, который для каждого конвейера индивидуальный.

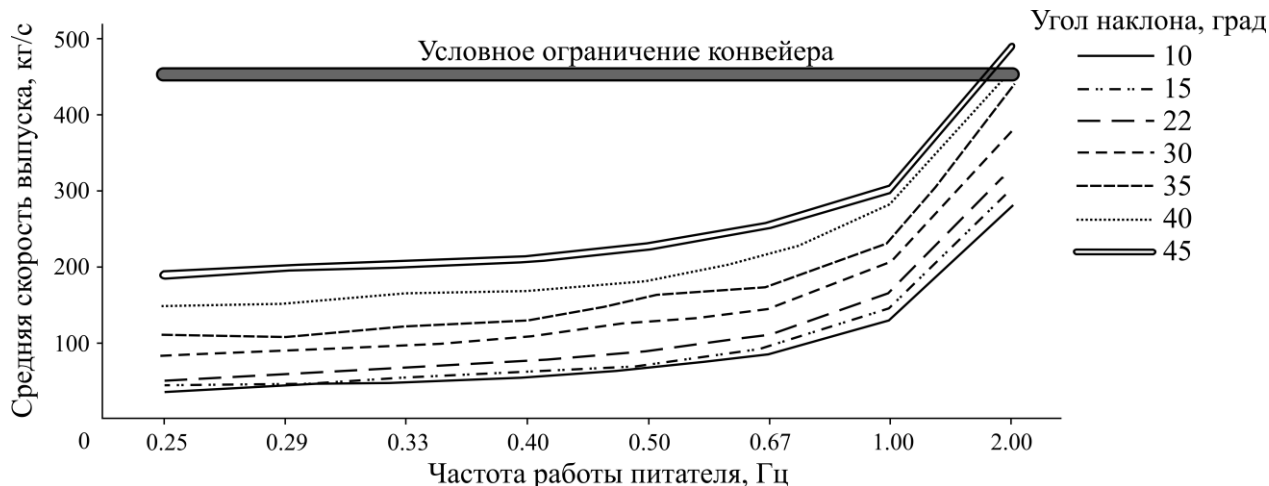


Рис. 6. Средняя скорость выпуска угля при разных сочетаниях угла наклона заслона и частоты работы питателя

С целью автоматизации определения требуемого угла наклона заслона и скорости работы питателя с помощью программы Excel построены линии тренда и определены их аппроксимирующие функции (рис. 7). В дальнейшем планируется использовать эти функции в имитационной и численной моделях для определения нужного угла наклона заслона и частоты питателя.

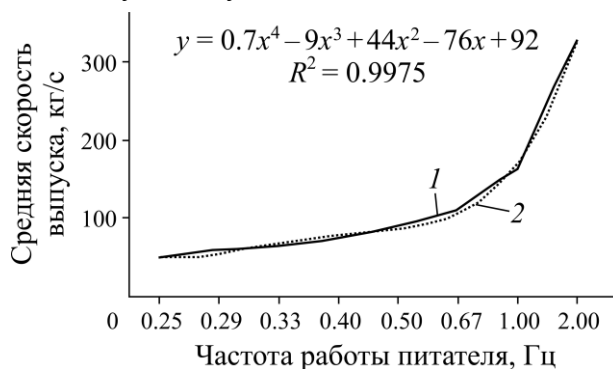


Рис. 7. Зависимости средней скорости выпуска от частоты работы питателя при угле наклона 22°:
1 — имитационная; 2 — полиномиальная аппроксимация

ВЫВОДЫ

На основе метода дискретных элементов разработана имитационная модель функционирования механизированной крепи и проведены эксперименты по исследованию режимов выпуска угля. Установлено, что более стабильное, равномерное и полное заполнение конвейера по сравнению с другими режимами обеспечивает волновой режим выпуска угля. При определенных вариантах возможно обеспечить большую производительность выпуска на локальных участках, но это приведет к появлению динамических нагрузок на приводную систему скребкового конвейера ввиду появления значительного переполнения (либо недогруза) в моменты переключения работы секций между секциями.

Для разработки системы управления процессом выпуска угля определены взаимные сочетания значений угла наклона заслона и скорости возвратно-поступательного движения питателя во время выпуска угля подкровельной тощи на забойный конвейер, позволяющие в дальнейшем автоматизировать процесс выбора параметров технологии для обеспечения управляемости выпуска и полноты заполнения скребкового конвейера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Jabinpoura A., Bafghib A. Y., and Gholamnejad J.** Application of vibration in longwall top coal caving method, *Int. Academic J. Sci. Eng.*, 2016, Vol. 3., No. 2. — P. 102–109.
2. **Kumar R., Singh A. K., Mishra A. K., and Singh R.** Underground mining of thick coal seams, *Int. J. Min. Sci. Tech.*, 2015, Vol. 25, Issue 6. — P. 885–896.
3. **Hebblewhite B. K.** Status and prospects of underground thick coal seam mining methods, 19th Int. Min. Congress and Fair of Turkey, IMCET 2005, Izmir, 2005. — P. 169–178.
4. **Guo J., Ma L., Wang Ye, and Wang F.** Hanging wall pressure relief mechanism of horizontal section top-coal caving face and its application — A case study of the Urumqi Coalfield, China, *Energies*, 2017, Vol. 10 (9). — P. 1371.
5. **Unver B. and Yasitli N. E.** Modelling of strata movement with a special reference to caving mechanism in thick seam coal mining, *Int. J. Coal Geology*, 2006, Vol. 66, Issue 4. — P. 227–252.
6. **Шундулиди И. А., Марков А. С., Калинин С. И., Егоров П. В.** Выбор параметров технологии отработки мощных угольных пластов с выпуском межслоевых и подкровельных пачек угля. — Кемерово, 1999. — 258 с.
7. **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.
8. **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.
9. **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, 2019. — Вып. 1. — С. 162–173.
10. **Кельтон В., Лоу А.** Имитационное моделирование. — СПб.: Питер; Киев: Изд. группа BHV, 2004. — 847 с.
11. **Конюх В. Л., Зиновьев В. В.** Дискретно-событийное моделирование подземных горных работ. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2011. — 243 с.
12. **Aalst W. and Stahl C.** Modeling business processes: a petri net-oriented approach, MIT Press, 2011 — 400 p.
13. **Девятков В. В.** Методология и технология имитационных исследований сложных систем: современное состояние и перспективы развития. — М.: ИНФРА-М, 2013. — 448 с.
14. **Павлова Л. Д.** Моделирование геомеханических процессов в разрушаемом углепородном массиве. — Новокузнецк: СибГИУ, 2005. — 239 с.
15. **Фрянов В. Н., Павлова Л. Д., Темлянцев М. В.** Теоретические подходы к проектированию роботизированных угольных шахт на основе современных технологий моделирования // *Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов* — Новокузнецк, 2017. — № 3. — С. 15–21.
16. **Оганесян А. С., Агафонов В. В.** Алгоритм модульного синтеза технологических схем угольных шахт // *ГИАБ*. — 2013. — № 12. — С. 18–27.

- 17. Мустафин М. Г.** Моделирование разрушения массива горных пород в процессе подвигания очистного забоя с разной скоростью // Зап. Горн. ин-та. — 2007. — Т. 171. — С. 130–133.
- 18. Starodubov A. N., Sinoviev V. V., and Klishin V. I.** Research of draw mining method modes using simulation model, IOP Conference Series: Earth and Env. Sci., 2019. — Vol. 377.
- 19. Стародубов А. Н., Зиновьев В. В., Клишин В. И., Крамаренко В. А.** Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи // Тр. IX Всерос. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности “Имитационное моделирование. Теория и практика”. — Екатеринбург, 2019. — С. 540–547.
- 20. Клишин В. И., Худынцев Е. А.** Создание механизированных комплексов с выпуском для подземной разработки мощных угольных пластов // Вестн. КузГТУ. — 2022. — № 6. — С. 96–106.

Поступила в редакцию 22/VI 2023

После доработки 28/VI 2023

Принята к публикации 30/VI 2023