



**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОЩАДНОГО ВЫПУСКА СЫПУЧИХ СРЕД ИЗ КАМЕР
МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ЧАСТИЦ**

С. В. Клишин

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: sv.klishin@gmail.com,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

На основе метода дискретных элементов в трехмерной постановке выполнено численное моделирование процесса площадного выпуска угля при подземной разработке мощных пологих угольных пластов с применением технологии самообрушения. Дискретные элементы представлены в виде кластеров, составленных из трех сферических частиц с заданным распределением по радиусам. При расчете касательных сил, действующих между дискретными элементами, учитываются сухое трение и сопротивление качению. Приведены кинематические картины выпуска горной массы в зависимости от количества и расположения выпускных отверстий, определены зоны их взаимного влияния.

Подземная разработка месторождений, площадный выпуск, горная масса, самообрушение, численное моделирование, метод дискретных элементов

**DISCRETE ELEMENT MODELING OF DISCHARGE FLOW OF GRANULAR MEDIA FROM
UNDERGROUND CHAMBER WITH ACCOUNT OF THE NON-SPHERICAL PARTICLE FORM**

S. V. Klishin

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: sv.klishin@gmail.com, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

Based on the Discrete Element Method a 3D numerical simulation of the process of discharge flow of coal mass during the underground mining of thick seams using a self-caving technology has been performed. Discrete elements are clusters composed of three spherical particles with a preset radius distribution. When calculating the tangential forces acting between the discrete elements, dry friction and rolling resistance are taken into account. The kinematic pictures of the rock mass flow depending on the number and location of the outlets are given, with determined zones of their mutual influence.

Underground mining, discharge flow, rock mass, self-caving, numerical modeling, discrete element method

Технологии с самообрушением горной массы всегда вызывали особый интерес при подземной разработке мощных угольных пластов и рудных тел из-за низкой себестоимости добычи и относительной простоты реализации. После отработки запасов месторождений открытым способом создается возможность их эффективной подземной доработки, в том числе технологией с самообрушением. В настоящее время при отработке мощных рудных залежей наиболее эффективной системой является этажное принудительное обрушение с массовым площадным, торцевым и площадно-торцевым выпуском руды под обрушенными породами [1]. Системы разработки мощных угольных пластов с самообрушением характеризуются высокой производительностью, низким удельным объемом проведения подготовительных выработок, а также возможностью управления качеством горной массы [2, 3].

Один из распространенных способов гравитационного выпуска горной массы — площадный выпуск полезного ископаемого под обрушенными породами. При применении данной технологии выпуск осуществляется из выработок (или секций механизированных крепей), расположенных по всей площади в основании очистного блока. Достоинство площадного выпуска под обрушенными породами состоит в возможности регулирования (при правильном выборе режима) оседания контакта “отбитая руда – пустая порода” и управления показателями качества и полноты извлечения запасов. Основными источниками потерь для данной системы считаются потери в выработанном пространстве, оставленные в виде гребней вне зоны влияния выпускных отверстий, а также потери полезного ископаемого, перемешанного с обрушенными породами и оставленного в блоке после прекращения выпуска. Кроме этих видов присутствуют потери в целиках днища из-за наклонных контактов между телом и подстилающими породами. Источниками разубоживания являются обрушенные пустые породы, смешивающиеся с полезным ископаемым при выпуске [4, 5].

Поэтому проведение исследований по изучению зависимостей и закономерностей, определяющих рациональные параметры выпуска горной массы, весьма важны как в практическом, так и фундаментальном плане. Промышленными опытами показано, что большое значение в таких технологиях имеет порядок и очередность выпуска [6, 7]. Данное положение выходит за рамки настоящей работы. В приведенном исследовании рассмотрен выпуск горной массы одновременно по всей площади в основании очистного блока.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ НЕСФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ЧАСТИЦ

Несмотря на значительные достижения в экспериментальных и натурных исследованиях процесса выпуска сыпучих материалов, актуальным остается выбор наиболее адекватного теоретического описания поведения горной массы при решении прикладных задач в технологии с самообрушением. Для численного исследования кинематики деформирования гранулированных и сыпучих сред наиболее популярны различные варианты имитационных [8] и континуальных [9] моделей течения. Удовлетворительна и наиболее близка по результатам к экспериментам модель метода дискретных элементов (МДЭ) [10, 11]. Здесь исследуемая среда представляется в виде набора отдельных жестких сферических частиц, между которыми вводятся определенные законы взаимодействия. Пример реологической модели контакта двух сферических частиц показан на рис. 1а. В рамках данного метода не возникает трудностей при решении задач с конечными деформациями и поворотами. Этот метод является принципиальной альтернативой классическим методам, основанным на традиционных представлениях механики сплошных сред, и в настоящее время широко используется при исследовании различных режимов течения сыпучих материалов. В работе [12] выполнено численное моделирование площадного выпуска угля при подземной разработке мощных пологих угольных пластов в плоской постановке в предположении, что форма частиц сферическая.

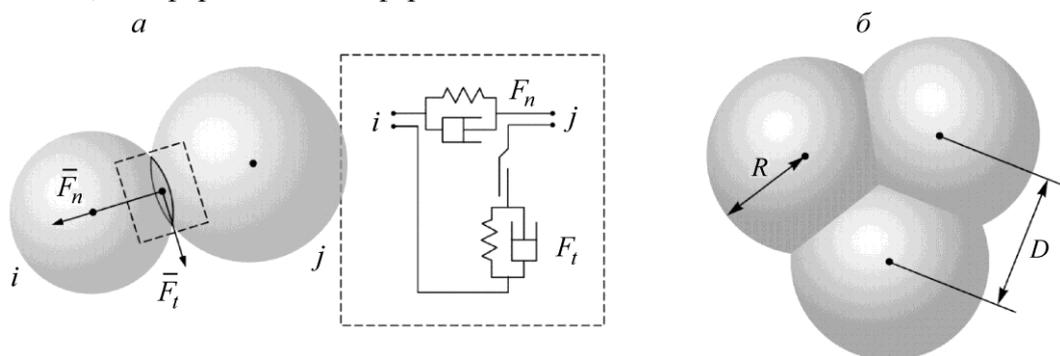


Рис. 1. Схема взаимодействия частиц на основе реологической модели Кельвина – Фойгта (а); представление несферической формы частицы в виде кластера из трех сфер (б)

Особенностью МДЭ является сферическая форма дискретных элементов, которая не изменяется в процессе численного эксперимента. Это накладывает некоторые ограничения на область применения данного метода, так как в реальной ситуации сопротивление качению частиц при их контакте друг с другом или с границей обусловлено их формой и деформациями. Сферические частицы с хорошо известными моделями контактных сил наиболее часто используются в МДЭ из-за их относительной простоты с точки зрения алгоритмической реализации и низких вычислительных затрат. Тем не менее, в реальных приложениях (особенно в геомеханике) частицы материала бывают в основном неправильной формы, и в рамках МДЭ в настоящее время разрабатываются более сложные модели формы частиц. Способы задания формы дискретных элементов можно разделить на два направления. Первое направление — это дополнение контактной модели взаимодействия сферических частиц моделью сопротивления качению, препятствующего относительному движению частиц друг по другу или по границе. Данный подход хорошо известен и дает вполне приемлемые результаты [13–15].

Второе направление заключается в явном представлении формы частиц, составляющих сыпучий материал, либо в виде базовых геометрических форм (плоскость, параллелепипед, сфера, цилиндр, капсула, многогранник и т. п.), либо в виде кластеров, составленных из сфер. В случае явного задания геометрии частиц в настоящее время разработаны итерационные алгоритмы поиска контактов тел различных конфигураций с той или иной степенью аппроксимации [16]. Недостаток таких алгоритмов — высокие требования к вычислительным ресурсам.

Для исследования задач гравитационного движения горной массы, состоящей из частиц произвольной формы, весьма эффективны алгоритмы, в которых отдельные элементы группируются из сферических частиц. Этот подход, с одной стороны, обеспечивает высокую вычислительную эффективность, а с другой — позволяет описать произвольную геометрию дискретных элементов [17, 18].

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОЩАДНОГО ВЫПУСКА ГОРНОЙ МАССЫ

В данной работе используются частицы, составленные из трех сфер одинакового радиуса R , расположенные в одной плоскости (рис. 1б). Расстояние между центрами дискретных элементов $D = 4/3R$.

Рассмотрена следующая трехмерная постановка задачи. Пусть в пространстве $Oxyz$ задана область, длина которой вдоль оси Ox равна 30 м, а ширина вдоль оси Oy — 1 м. Ось Oz направлена вертикально вверх. Горная масса представлена угольным пластом мощностью 5.6 м и вышележащей обрушенной пустой породой мощностью 6 м в направлении оси Oz . Заполнение области дискретными элементами осуществляется с использованием динамического алгоритма. Начальное распределение не контактирующих друг с другом частиц, имеющих заданный размер, движется под действием силы тяжести в заданной ограниченной области, после чего находится их равновесное состояние с учетом контактного взаимодействия друг с другом и границей.

Уголь и пустая порода имеют следующие физические характеристики: модуль упругости $E_1 = 5.4 \cdot 10^3$ МПа, $E_2 = 1.5 \cdot 10^4$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu_1 = 0.16$, $\nu_2 = 0.21$; плотность $\rho_1 = 1350$ кг/м³, $\rho_2 = 2500$ кг/м³. Индекс 1 обозначает параметры частиц угля, индекс 2 — параметры пустой породы. Диаметры сфер, составляющих дискретные элементы, выбираются из равномерного распределения на отрезке от 0.04 до 0.06 м. При описании сил, действующих на контактах, угол внешнего сухого трения между частицами, а также между частицами и границами фиксирован и составляет 45°; угол сопротивления качению — 10°. Коэффициент восстановления скорости принят равным 0.5.

Выпускные отверстия шириной 1 м расположены равномерно вдоль нижней границы $z = 0$ таким образом, что расстояние между крайними окнами составило 16 м. При этом расстояние от крайних отверстий до боковых границ равняется 7 м. Данное положение исключает влияние боковых границ $x = 0$ и $x = 30$ на формирование зон потока. По окончании создания равновесной упаковки горная масса представлена совокупностью из около 200 000 дискретных элементов общей массой частиц угля 65 000 кг, породы — 130 000 кг. Для визуализации кинематических картин выпуска дискретные элементы раскрашены. В процессе выпуска частицы, координата центра тяжести которых удовлетворяла условию $z < -0.3$ м, удалялись. Тем самым рассчитывался массовый расход угля и пустой породы — производительность системы с выпуском.

Деформированное состояние исследуемой среды в фиксированные моменты времени при одновременно открытых двух, трех, четырех и пяти выпускных отверстиях приведено на рис. 2. Видно, что при наличии двух и трех выпускных окон (рис. 2а–г), зоны потока индивидуальны и не пересекаются. С увеличением количества отверстий зоны потока пересекаются и в системе реализуется площадный одновременный выпуск (рис. 2д–з).

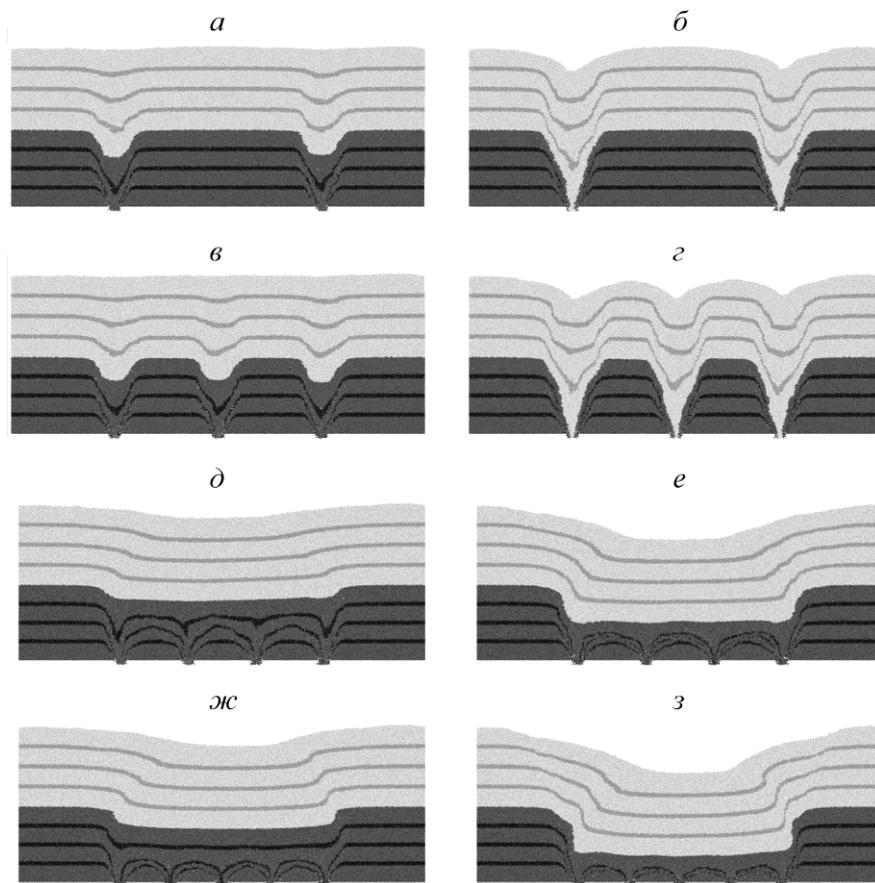


Рис. 2. Деформированное состояние среды при одновременном выпуске под обрушенными породами для случая двух (а, б), трех (в, г), четырех (д, е) и пяти (ж, з) выпускных отверстий в моменты времени $t = 3.5$ с (слева) и $t = 7.0$ с (справа)

Эффект формирования зон потока хорошо проявляется при рассмотрении угловых скоростей вращения дискретных элементов. На рис. 3 показано распределение абсолютных величин векторов угловых скоростей каждой частицы в фиксированный момент времени: светлым цветом показаны частицы с малой скоростью вращения (около нуля), темным — порядка 15 град/с. Видно, что в случае двух и трех окон в сыпучей среде образуются характерные эллипсоиды выпуска, а в случае четырех и пяти выпускных отверстий — ярко выраженные блоки в форме трапеций.

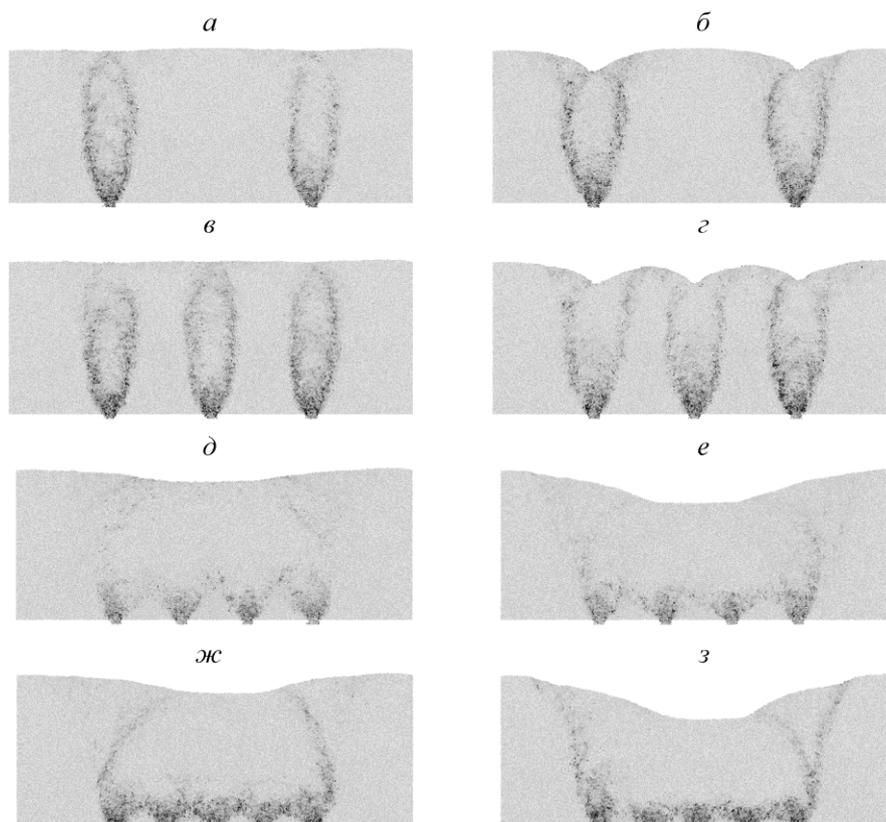


Рис. 3. Распределение угловых скоростей в частицах в фиксированный момент времени $t = 3.5$ с и $t = 7.0$ с при двух (а, б), трех (в, г), четырех (д, е) и пяти (ж, з) выпускных отверстий

ВЫВОДЫ

Представлена пространственная модель одновременного площадного выпуска угля под обрушенными налегающими породами с учетом несферической формы частиц, составляющих горную массу. Продемонстрировано возникновение зон потока, а также локализованных режимов деформирования выпускаемой горной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/ REFERENCES

1. **Kuzmin E. V. and Uzbekova A. R.** Ore self-caving at underground mining, Moscow, MSMU publ. house, 2006 (in Russian) [Кузьмин Е. В., Узбекова А. Р. Самообрушение руды при подземной добыче. — М.: Изд. МГГУ, 2006. — 283 с.]
2. **Klishin V. I., Anferov B. A., and Kuznetsova L. V.** Directions for improving the mining of thick coal seams with the coal discharge technology. Innovations in the fuel and energy sectors and mechanical engineering, Proceedings of the international scientifically-practical conference, 2017, pp. 57–63 (in Russian) [Клишин В. И., Анферов Б. А., Кузнецова Л. В. Направления совершенствования разработки мощных пластов с выпуском угля подкровельной толщи // Инновации в топливно-энергетическом комплексе и машиностроении (ТЭК-2017): сб. трудов Междунар. научн.-практ. конф. — 2017. — С. 57–63.]
3. **Klishin V. I.** Justification of thick and steep coal seams mining technology with coal discharge, Mining Informational and Analytical Bulletin, 2013, vol. 6, pp. 36–47 (in Russian) [Клишин В. И. Обоснование технологий разработки мощных пологих и крутых угольных пластов с выпуском угля // ГИАБ. — 2013. — № 6. — С. 36–47.]
4. **Lebedeva E. V.** Prediction of mineral extraction indices during mining of disseminated ores by level caving technology with area-end discharge. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2008, vol. 5, pp. 270–274 (in Russian) [Лебедева Е. В. Прогнозирование показателей извлечения полезного ископаемого при отработке вкрапленных руд системой этажного принудительного обрушения с торцевым выпуском // ГИАБ. — 2008. — № 5. — С. 270–274.]

5. **Freidin A. M. and Neverov S. A.** Modeling of area-end ore drawing under caved rocks, *Journal of Mining Science*, 2005, vol. 41, issue 5, pp. 436–446 [**Фрейдин А. М., Неверов С. А.** Моделирование площадно-торцевой технологии выпуска руды под обрушенными породами // ФТПРПИ. — 2005. — № 5. — С. 50–61.]
6. **Klishin V. I., Fokin Yu. S., Kokoulin D. I., and Kubanychbek B.** Powered roof supports and the controlled coal extraction in thick beds, *Novosibirsk, Nauka*, 2007, 135 pp. (in Russian) [**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.]
7. **Vlasov V. N. and Klishin V. I.** Methods for the extraction of mineral deposits by caving and simultaneous dosed vibration discharge of ore under covering rocks, *Mining informational and analytical bulletin*, 2004, vol. 7, pp. 248–254 (in Russian) [**Власов В. Н., Клишин В. И.** Способы разработки месторождений с обрушением и одновременным дозированным выбросом руды под покрывающими породами // ГИАБ. — 2004. — № 7. — С. 248–254.]
8. **Lavrikov S. V. and Revuzhenko A. Ph.** Stochastic models in problems of the local deformation of flowing media in radial channels, *Journal of mining science*, 2000, vol. 36, issue 1, pp. 8–16 [**Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф.** Стохастические модели в задачах локализованного деформирования сыпучих сред в радиальных каналах // ФТПРПИ. — 2000. — № 1. — С. 12–20.]
9. **Lavrikov S. V.** Simulation of geomaterial flow in convergent channels with consideration for internal friction and dilatancy, *Journal of mining science*, 2010, vol. 46, issue 5, pp 485–494 [**Лавриков С. В.** К расчету течения геоматериалов в сходящихся каналах с учетом внутреннего трения и дилатансии // ФТПРПИ. — 2010. — № 5. — С. 17–27.]
10. **Klishin V. I. and Klishin S. V.** Current state and development of thick coal seams excavation technology by powered roof supports with controlled coal discharge, *Proceedings of the Tula States University, Earth Sciences*, 2019, vol. 1, pp. 162–173 (in Russian) [**Клишин В. И., Клишин С. В.** Состояние и направление развития технологии разработки мощных угольных пластов механизированными крепями с выпуском // Изв. ТГУ. Науки о Земле. — 2019. — Вып. 1. — С. 162–173.]
11. **Klishin V. I., Nikolaev A. N., and Klishin S. V.** The study of the two-stage coal discharge by the powered roof support having ledge form. *High technology development and use of mineral resources*, 2019, vol. 5, pp. 232–237 (in Russian) [**Клишин В. И., Николаев А. Н., Клишин С. В.** Исследование двухстадийного выпуска угля в крепи уступной формы // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2019. — № 5. — С. 232–237.]
12. **Klishin S. V. and Lavrikov S. V.** Numerical simulation of rock mass area discharge in self-caving technology. *High technology development and use of mineral resources*, 2019, vol. 5, pp. 264–268 (in Russian) [**Клишин С. В., Лавриков С. В.** Численное моделирование площадного выпуска горной массы в технологии с самообрушением // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2019. — № 5. — С. 264–268.]
13. **Ai J., Chen J.-F., Rotter J. M., and Ooi J. Y.** Assessment of rolling resistance models in discrete element simulations. *Powder Technology*, 2011, vol. 206, issue 3, pp. 269–282.
14. **Fukumoto Y., Sakaguchi H., and Murakami A.** The role of rolling friction in granular packing. *Granular Matter*, 2013, vol. 15, issue 2, pp. 175–182.
15. **Klishin S. V. and Revuzhenko A. F.** A class of vortex flows in granular medium, *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, issue 6, pp. 1070–1076 [**Клишин С. В., Ревуженко А. Ф.** Об одном классе вихревых течений сыпучей среды // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 11–18.]
16. **Podlozhnyuk A. Pirker S., and Kloss C.** Efficient implementation of superquadric particles in Discrete Element Method within an open-source framework. *Computational Particle Mechanics*, 2017, vol. 4, issue 1, pp 101–118.
17. **Salot C., Gotteland P., and Villard P.** Influence of relative density on granular materials behavior: DEM simulations of triaxial tests. *Granular Matter*, 2009, vol. 11, issue 4, pp 221–236.
18. **Mollanouri Shamsi M. M., and Mirghasemi A. A.** Numerical simulation of 3D semi-real-shaped granular particle assembly *Powder Technology*, 2012, vol. 221, pp. 431–446.