*Оригинальная статья*

УДК 004.942; 622.3 © А.Н. Стародубов✉[1,2], 2025

[1] ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН» (ФИЦ УУХ СО РАН), 650065, г. Кемерово, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

*Original Paper*

UDC 004.942; 622.3 © A.N. Starodubov✉[1,2], 2025

[1] Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 650065, Kemerovo, Russian Federation
[2] T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: a.n.starodubov@gmail.com

# Связь параметров фигуры выпуска с показателями эффективности технологии отработки мощных угольных пластов*

# Relationship between the figures of coal drawing parameters and the efficiency indicators of the technology for mining thick coal seams

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-77-82

*Первая характеристика зон потока в гранулированных материалах была проведена в физических моделях, созданных для изучения конструкции силосов. В основе теории выпуска руды положено представление о том, что при выпуске руды через отдельно взятое выпускное отверстие истечение частиц происходит из объемов, имеющих форму, близкую к форме эллипсоидов вращения. При выпуске образуются эллипсоид разрыхления и воронка выпуска. Эллипсоид вращения определяется большой и малой полуосями. В рассматриваемой технологии с выпуском угля подкровельной толщи с использованием механизированных крепей с контролируемым выпуском угля на забойный конвейер, со стороны завального пространства наблюдается картина, аналогичная теоретической. Однако в продольном сечении в рассматриваемой технологии за счет нескольких этапов передвижки и подпора угля сверху и со стороны завального пространства пустой породой, имеющей больший объемный вес, форма фигуры выпуска угля искажается в направлении подвигания забоя. Для обеспечения полноты выпуска и минимизации потерь угля в завальном пространстве необходимо обеспечить передвижку на расстояние, обеспечивающее геометрическое совпадение линии, ограничивающей фигуру выпуска, с линией разворота угольного массива. Кроме этого, показана связь величины передвижки комплекса с размерами эллипсоида, обеспечение максимального совпадения которых позволит добиться наилучших показателей эффективности технологии.*

***Ключевые слова:*** *метод дискретных элементов, компьютерное моделирование, подземные горные работы, выпуск угля подкровельной толщи, механизированная крепь, фигура выпуска, мощный угольный пласт, очистные работы.*

**СТАРОДУБОВ А.Н.**
*Канд. тех. наук, доцент,*
*заместитель директора Института угля ФГБНУ «Федерального исследовательского центра угля и углехимии СО РАН»,*
*650065, г. Кемерово, Россия,*
*доцент ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,*
*650000, г. Кемерово, Россия,*
*e-mail: a.n.starodubov@gmail.com*

** Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2024-0024 «Разработка эффективных технологий добычи угля роботизированными горнодобывающими комплексами без постоянного присутствия людей в зонах ведения горных работ, систем управления и методов оценки технического состояния и диагностики их ресурса и обоснование обеспечения воспроизводства минерально-сырьевой базы. 2024-2025 гг.» (рег. № 124041100071-9).*

***Для цитирования:*** Стародубов А.Н. Связь параметров фигуры выпуска с показателями эффективности технологии отработки мощных угольных пластов // Уголь. 2025;(12):77-82. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-77-82.

**Abstract**

*The first characterization of flow zones in granular materials was carried out in physical models created to study the design of silos. The theory of ore discharge is based on the idea that when ore is discharged through a single outlet, the outflow of particles occurs from volumes having a shape close to the shape of ellipsoids of revolution. During release, an ellipsoid of loosening and a funnel of release are formed. The ellipsoid of rotation is determined by the major and minor semi-axes. In the considered technology with the release of coal from the under-roof section, using mechanized supports with controlled release of coal onto the bottomhole conveyor, a picture similar to the theoretical one is observed from the side of the blockage. However, in the longitudinal section in the technology under consideration, due to several stages of movement and support of coal from above and from the side of the blockage space by empty rock, which has a larger volume weight, the shape of the figures of coal drawing is distorted in the direction of the face advance. To ensure the completeness of the discharge and minimize the loss of coal in the blockage space, it is necessary to ensure movement by a distance that ensures the geometric coincidence of the line bounding the figures of coal drawing with the turn line of the coal mass. In addition, the relationship between the displacement of the complex and the dimensions of the ellipsoid is shown, ensuring the maximum coincidence of which will allow achieving the best performance indicators of the technology.*

**Keywords**

*Discrete element method, computer simulation, underground mining, under-roof coal outlet, powered roof support, the figures of coal drawing, powerful coal seam, longwall mining operations.*

**Acknowledgements**

The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2024-0024 'Development of efficient technologies of coal mining by robotic mining complexes operating without permanent presence of personnel in mining zones, design of control systems and methods to assess their technical condition and operating life as well as justification of the mineral resource base reproduction. 2024-2025'. (Reg. No. 124041100071-9).

**For citation**

Starodubov A.N. Relationship between the figures of coal drawing parameters and the efficiency indicators of the technology for mining thick coal seams. *Ugol'*. 2025;(12):77-82. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-77-82.

## ВВЕДЕНИЕ

Ранее в работах автора [1, 2, 3] представлена модель технологии с выпуском угля подкровельной толщи с использованием механизированных крепей с контролируемым выпуском угля подкровельной тощи на забойный конвейер за счет введения питателей в секции, построенная в среде численного 3D-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 тяготения [4]. 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.

Первая характеристика зон потока в гранулированных материалах была проведена в физических моделях, созданных для изучения конструкции силосов (например: [5, 6, 7]). В этих исследованиях эллипсоид движения был определен во время гравитационного потока [8]. Геометрия эллипсоида движения зависит от различных параметров гранулированного материала и системы. Существуют аналитические подходы, которые определяют геометрию этого эллипсоида [9, 10], Неддерман и Тюзюн [11] разработали кинематическую модель, изначально применяющую профиль распределения скоростей, в которой верхние частицы движутся к нижним частицам, имеющим наибольший градиент скорости ($\partial v/\partial x$) и постоянную кинетическую энергию, которая коррелирует с диаметром частиц. Модель Бергмарка и Руса [12], разработанная на основе баланса сил между гравитацией и трением частиц, приводит к тому, что ширина непрерывно увеличивается с высотой выемки.

В основе теории выпуска руды (М.И. Агошков, В.Р. Именитов, С.Л. Иофин, Г.М. Малахов, В.В. Куликов и мн. др.) положено представление о том, что при выпуске руды через отдельно взятое выпускное отверстие истечение частиц происходит из объемов, имеющих форму, близкую к форме эллипсоидов вращения. При выпуске образуются эллипсоид разрыхления и воронка выпуска. Эллипсоид вращения определяется большой ($a$) и малой полуосями ($b$) [13, 14, 15, 16].

## ОБЩЕЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О ФИГУРЕ ВЫПУСКА УГЛЯ

В.В. Мельник в своей работе [17] также показывает развитие и процесс опускания к выпускному люку налегающих на уголь обрушенных пород, если крупность кусков пород значительно меньше объема пород, участвующего в движении. Смещение налегающих обрушенных пород (*рис. 1, а*, где для наглядности представлен выпуск угля через одиночный люк) начинает развиваться после того, как вся растущая зона вторичного разрыхления переходит через поверхность контакта *3* между выпускаемым углем и налегающими породами.

По мере выпуска угля поверхность контакта с налегающими породами прогибается, образуя воронку прогиба *4*, дно которой постепенно опускается к выпускному люку, сужаясь и приобретая форму воронки внедрения обрушенных пород в толщу выпускаемого угля. Когда воронка внедрения достигает выпускного люка, выпуск угля происходит уже вместе с породой, если размеры кусков породы позволяют им проникнуть в выпускной люк.

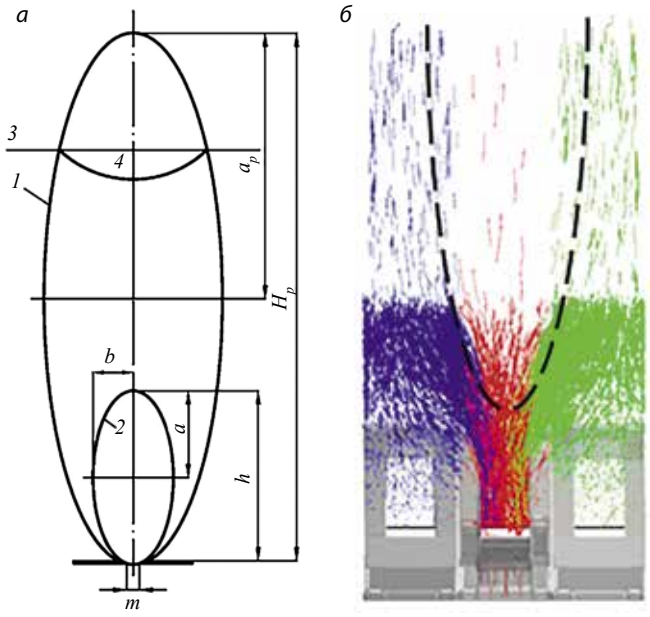



*Рис. 1. Схема развития выпуска сыпучего материала через одиночный выпускной люк по Мельнику В.В. – а и фигура выпуска со стороны завального пространства в технологии с выпуском угля подкровельной толщи – б*

*Fig. 1. A schematic diagram of loose material flow through a single draw hole according to Melnik V.V. – a and the discharge pattern from the goaf side using the method of coal drawing from the roof seam – б*

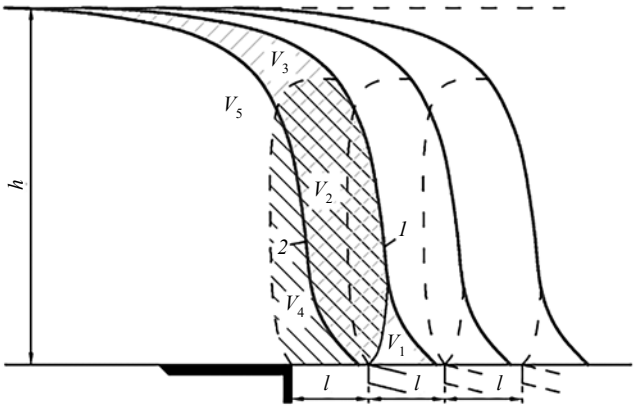



*Рис. 2. Типичная форма поверхности контакта выпускаемой толщи угля с налегающими обрушенными породами при выпуске последовательных полос угля*

*Fig. 2. A typical shape of the contact surface between the drawn coal seam and the overlying caved rock when drawing consecutive coal ribs*

В рассматриваемой технологии с выпуском угля подкровельной толщи, с использованием механизированных крепей с контролируемым выпуском угля подкровельной тощи на забойный конвейер за счет введения питателей в секции [18], со стороны завального пространства наблюдается аналогичная картина *(см. рис. 1, б)*, что также подтверждает адекватность разработанной модели.

Больший интерес для исследования и оценки влияния на показатели геотехнологии представляет форма фигуры выпуска в продольном передвижкам механизированной

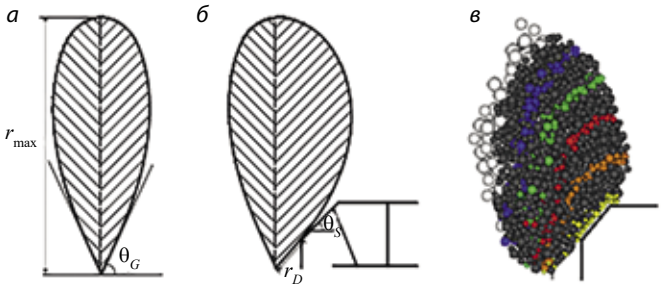



*Рис. 3. Теоретическая и численная форма верхнего угольного обрушения с учетом влияния опоры: а – оригинальная модель B-R; б – модифицированная модель B-R; в – численный результат*

*Fig. 3. Theoretical and numerical shape of the upper coal caving with account of the support effect: a – the original B-R model; б – a modified B-R model; в – the numerical result*

крепи направлении. В другой своей работе В.В. Мельник [19] показал динамику изменения фигуры выпуска для конкретного выпускного люка как геометрическое место восстановленных начальных положений тех кусков угля, которые в конечной стадии выпуска последними оказались в плоскости выпускного отверстия. Такая фигура ограничивает контур того объема угля, который выпущен через данный выпускной люк за время опускания поверхности контакта угля с обрушенными породами из некоторого начального положения (*1 на рис. 2*), соответствующего началу выпуска полосы, в конечное положение 2 после выпуска в полосе.

Кроме указанного известна модифицированная модель Бергмарка-Руса (модель B-R) для технологии подземной добычи угля с обрушением [20], используемой в Китае. Теоретическая форма фигуры выпуска представлена на *рис. 3*, где $r_{max}$ представляет собой расстояние от самой дальней начальной точки до начала полярной системы координат, м; $r_D$ представляет собой длину хвостовой балки секции, м; $\theta$ – угол движения (т.е. угол между линией, соединяющей верхние угольные частицы, и началом полярной системы координат и вертикальной линией, положительный для движения по часовой стрелке и отрицательный – против часовой стрелки), °; $\theta_G$ – критический угол движения.

## ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В рассматриваемой в работе технологии за счет нескольких этапов передвижки и подпора угля сверху и со стороны завального пространства пустой породой, имеющей больший объемный вес, форма фигуры выпуска угля искажается в направлении подвигания забоя *(рис. 4)*. Для обеспечения полноты выпуска и минимизации потерь угля в завальном пространстве необходимо обеспечить передвижку на расстояние, обеспечивающее геометрическое совпадение линии, ограничивающей фигуру выпуска, с линией разворота угольного массива. Исходя из принципа равенства объемов искаженного эллипсоида идеальному, удвоенное значение размера малой полуоси есть требуемое значение передвижки крепи. Ввиду того, что шаг передвижки крепи дискретен и кратен ширине захвата выемочного комбайна, обеспечить полное

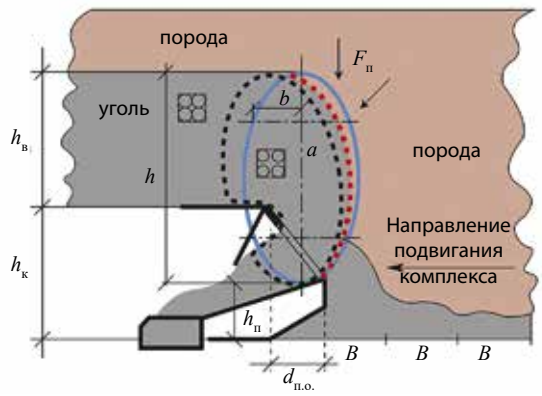



*Рис. 4. Схема развития фигуры выпуска сыпучего материала через окно в поддерживающей части крепи после передвижки: $a$ – большая полуось, $b$ – малая полуось, $h$ – высота эллипсоида выпуска; $h$ – высота питателя; $h_к$ – высота подсечного слоя; $h_в$ – мощность подкровельной толщи; $B$ – шаг передвижки комплекса; $d_{п.о.}$ – ширина выпускного окна (проекция на горизонтальную плоскость); $F_п$ – направление сил воздействия пустой породы на угольный пласт при передвижке*

*Fig. 4. A schematic diagram of the changes in the shape of the drawn loose material through a draw hole in the supporting part of the roof after the support advancement*

*Таблица 1*

**ГМ в разрезе после второго выпуска**

Granulated materials in cross-section after the second drawing

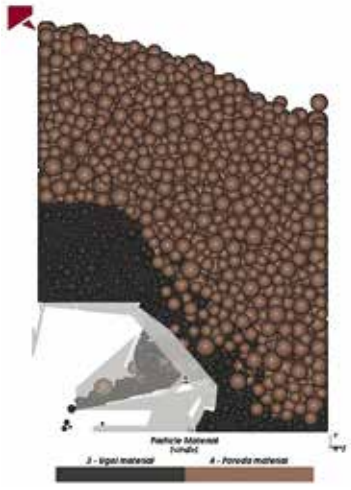
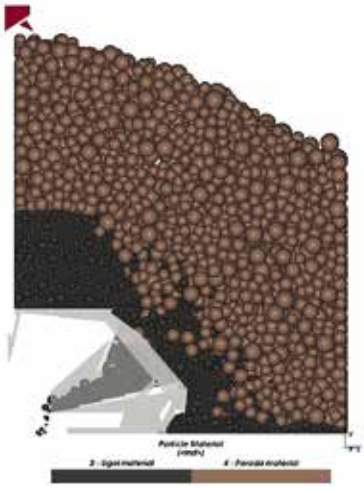
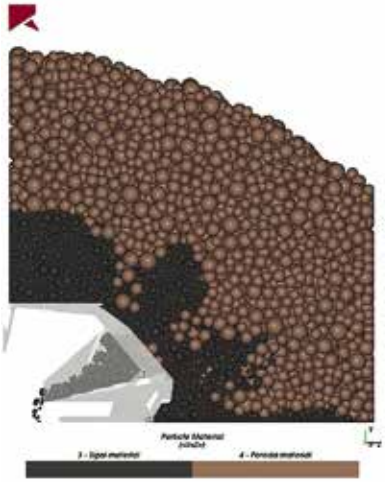
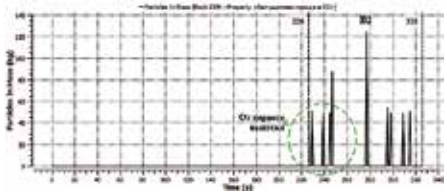
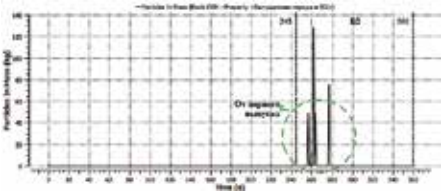
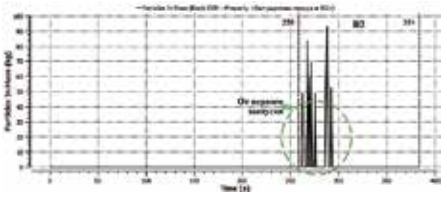
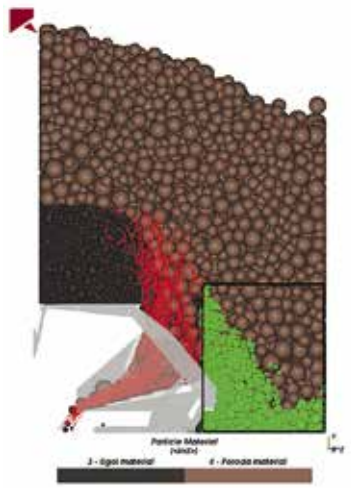
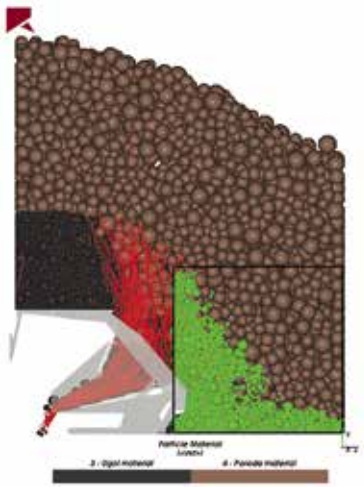
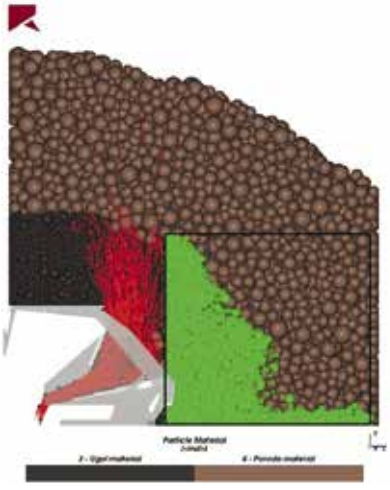
| 2 передвижки (100 с выпуска) | 3 передвижки (115 с выпуска) | 4 передвижки (125 с выпуска) |
|---|---|---|
|  |  |  |
| **График выхода породы** | | |
|  |  |  |
| **Уголь за крепью (Потери $B_0$ + потери $B_1$ + невыпущенный уголь при $B_2$)** | | |
|  |  |  |
| **7,46 т** | **10,76 т** | **18,12 т** |

*Таблица 2*

**Массовый расход угля при разном количестве передвижек**

Mass flow of coal at different numbers of advances

| Показатели | Модель с двумя передвижками | Модель с тремя передвижками | Модель с четырьмя передвижками |
|---|---|---|---|
| $B_0$ | 72 кг/с | 73 кг/с | 70 кг/с |
| $B_1$ | 71 кг/с | 69 кг/с | 73 кг/с |
| $B_2$ | 74 кг/с | 74 кг/с | 71 кг/с |

*Таблица 3*

**Сводная информация по результатам моделирования**

Summary of the simulation results

| 1,6 м | 2,4 м | 3,2 м |
|---|---|---|
| **Время, затраченное на 1 выпуск, с** | | |
| 100 | 115 | 125 |
| **Время, затраченное на 1 передвижку, с** | | |
| 1,6 * (5 / 2,4) = 3,33 ≈ 3 | 5 | 3,2 * (5 / 2,4) = 6,67 ≈ 7 |
| **Скорость подвигания забоя без учета времени выемки угля комбайном, м/с** | | |
| 1,6 * 2 / (3 + 100 + 3 + 100) = 0,016 | 2,4 * 2 / (5 + 115 + 5 + 115) = 0,02 | 3,2 * 2 / (7 + 125 + 7 + 125) = 0,024 |
| **Приведенные к 1 погонному метру потери, т** | | |
| 2,35/1,6 = 1,47 | 3,27/2,4 = 1,36 | 6,31/3,2 = 1,97 |

указанное соответствие не представляется возможным. Этим объясняются потери угля, вышедшего за пределы теоретического эллипсоида выпуска (зона между черной и красной пунктирными линиями *(см. рис. 4),* и минимальное значение разубоживания кусками породы, находящимися внутри него (зона между красной пунктирной и синей линиями на *рис. 4*), без учета проникновения более тяжелых частиц породы ввиду их бóльших скоростей движения.

По Малахову [21], большая (a) и малая (b) полуоси могут быть определены через конкретные эмпирические коэффициенты: $a = 0{,}512h,\ b = 0{,}07h + 0{,}5d$, где $d$ – ширина выпускного отверстия, м; $H$ – высота эллипсоида, м.

Так, например, для отработки угольного пласта мощностью 6,8 м, 2,8 м из которых подлежат выпуску, расчеты показывают следующее: $a = 2{,}65$ м, $b = 1{,}35$ м. Таким образом, удвоенное значение малой полуоси составляет 2,7 м, что при ширине захвата выемочного комбайна 0,8 м, составляет чуть более длины 3 передвижек.

Проведена серия экспериментов на численных моделях по определению количества передвижек, показывающих наилучшие показатели эффективности. Так, продолжительность выпусков $B_1$ и $B_2$ для модели с передвижкой 1,6 м составила 100 с, для 2,4 м – 115 с, а для 3,2 м – 125 с. Графическое представление результатов экспериментов в *табл.1*

Массовый расход в данных моделях во время $B_0$, $B_1$, $B_2$ выпусков при параметрах работы крепей 0,5 Гц и 22° практически одинаков *(табл. 2)*.

В *табл. 3* приведена сводная информация по обработке результатов моделирования технологии с выпуском угля подкровельной толщи для разного числа передвижек механизированного комплекса.

При двух передвижках величины подвигания недостаточно для полноценного разворота угольного массива, а при четырех – наблюдается явление вклинивания потока пустой породы и выдавливания угля в завальное пространство во время выпуска *(рис. 5)*.

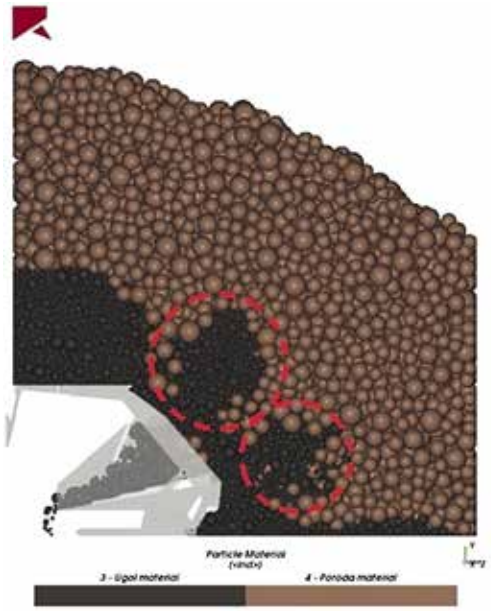



*Рис. 5. Явление вклинивания пустой породы и выдавливания угля при четырех передвижках*

*Fig. 5. The phenomenon of wedging of the waste rock and coal extrusion in four support advancements*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что применение технологии отработки мощных угольных пластов с выпуском угля подкровельной и межслоевой толщи на забойный конвейер с применением механизированной крепи позволяет обеспечить высокую производительность и полноту выемки за счет формирования разворота потока угля. Использование

разработанных моделей позволило установить диапазон параметров геотехнологии, при которых происходит это явление, а также уточнить их значение, оказывающее наилучшее влияние на показатели эффективности.

Таким образом, аналитически и численным моделированием установлено, что для рассматриваемых условий высокую производительность и полноту выемки за счет формирования разворота потока угля можно обеспечить при трехкратной передвижке крепи, а в общем случае – при длине передвижки, близкой к удвоенному значению малой полуоси идеального эллипсоида выпуска.

### *Список литературы • References*


1. Исследование технологии добычи угля в сложных горно-геологических условиях с использованием математического моделирования / А.Н. Стародубов, В.И. Клишин, А.Н. Кадочигова и др. // Горная промышленность. 2023. № S5. С. 47-52. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-47-52.
   Starodubov A.N., Klishin V.I., Kadochigova A.N., Kaplun A.V. Research of coal mining technology in complex ground conditions using mathematical modeling. *Gornaya promyshlennost'.* 2023;(S5):47-52. (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2023-5S-47-52.
2. Исследование потока горной массы на питателе секции крепи при выпуске угля из подкровельной толщи мощных пологих пластов средствами имитационного моделирования / А.Н. Стародубов, В.И. Клишин, А.Н. Кадочигова и др. // Уголь. 2024. № 9. С. 53-60. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-9-53-60.
   Starodubov A.N., Klishin V.I., Kadochigova A.N., Kaplun A.V. Research of the mined rock flow on the feeder of the powered roof support during underroof coal output of gently sloping thick coal seams by means of simulation modeling. *Ugol'.* 2024;(9):53-60. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024- 9-53-60.
3. Применение имитационного моделирования для исследования режимов выпуска угля подкровельной толщи / А.Н. Стародубов, В.В. Зиновьев, В.И. Клишин и др. / Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2019). Труды конференции, 16-18 октября 2019 г., Екатеринбург: Урал. гос. пед. ун-т., 2019. С. 540-547.
4. Cundall P.A., Strack D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique.* 1979;29(1):47-65. DOI: https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47.
5. Sperl M. Experiments on corn pressure in silo cells-translation and comment of Janssen's paper from 1895. *Granular Matter.* 2006;8(2):59-65.
6. Jenike A.W., Johanson J.R., Carson J.W. Bin Loads-Part 4: Funnel-Flow Bins. *J. Eng. Ind.* 1973;(2)13-16.
7. Walker D.M., Blanchard M.H. Pressures in experimental coal hoppers. *Chem. Eng. Sci*. 1967;22(12):1713-1745. DOI: 10.1016/0009-2509(67)80206-9.
8. Kvapil R. Gravity flow of granular materials in hoppers and bins – Part I. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 1965;2(1):35-41. DOI: 10.1016/0148-9062(65)90020-3.
9. Nedderman R.M. The use of the kinematic model to predict the development of the stagnant zone boundary in the batch discharge of a bunker. *Chem. Eng. Sci.* 1995;50(6):959-965. DOI: 10.1016/0009-2509(94)00464-3.
10. Melo F., Vivanco F., Fuentes C., Apablaza V. Kinematic model for quasi static granular displacements in block caving: Dilatancy effects on drawbody shapes. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2008;45(2):248-259. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2007.07.005.
11. Nedderman R.M., Tüzün U. A kinematic model for the flow of granular materials. *Powder Technol*. 1979;22(2):243-253. DOI: 10.1016/0032-5910(79)80030-3.
12. Melo F., Vivanco F., Fuentes C., Apablaza V. On drawbody shapes: From Bergmark Roos to kinematic models. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2007;44(1):77-86. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.04.010.
13. Куликов В.В. Выпуск руды. М.: Недра, 1980. 303 с.
14. Малахов Г.М., Безух В.Р., Петренко П.Д. Теория и практика выпуска обрушенной руды, 2 изд., М., 1968.
15. Кунин И.К. Выпуск и доставка руды при подземной добыче. М.: Недра, 1964.
16. Дубынин Н.Г. Выпуск руды при подземной разработке. М.: Недра, 1965.
17. Мельник В.В., Мурин К.М., Буханик А.И. Изучение фигур выпуска при выемке угля с выпуском подкровельной толщи // Горный информационно аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2019. № 5 (специальный выпуск 13). С. 3-11. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-5-13-3-11.
   Melnik V.V., Murin K.M., Bukhanik A.I. Study of Release Figures during Coal Extraction with Release of the Roof Thickness. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'.* 2019;5(Special issue 13 ). (In Russ.).
18. Клишин В.И. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля. Новосибирск: Наука, 2007. 135 с.
19. Разработка вариантов гидромеханизированной технологии отработки запасов мощных крутых угольных пластов / В.В. Мельник, Н.И. Абрамкин, С.Г. Фомичев и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 3(1).
   Melnik V.V., Abramkin N.I., Fomichev S.G., Sergeyev S.V. Development of options for hydromechanized method of mining thick steep coal seams. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'.* 2013;3(1). (In Russ.).
20. Wang J.C., Wei W.J., Zhang J.W. Theoretical description of drawing body shape in an inclined seam with longwall top coal caving mining. *Int J Coal Sci Technol.* 2020;7(1):182–195.
21. Малахов Г.М., Безух В.Р., Петренко П.Д. Теория и практика выпуска руды. М.: Недра, 1968. 312 с.



**Authors Information**
**Starodubov A.N.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Deputy Director of the Institute of Coal, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kemerovo, 650065, Russian Federation, Associate Professor, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: a.n.starodubov@gmail.com



**Информация о статье**
*Поступила в редакцию: 3.10.2025*
*Поступила после рецензирования: 15.11.2025*
*Принята к публикации: 28.11.2025*

**Paper info**
*Received October 3, 2025*
*Reviewed November 15, 2025*
*Accepted November 28, 2025*