

ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 004.942; 622.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСАНИЙ ГОРНОЙ МАССЫ ПРИ ВЫПУСКЕ УГЛЯ ИЗ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ МОЩНЫХ ПОЛОГИХ ПЛАСТОВ

А. Н. Стародубов^{1,2}, В. И. Клишин^{1,2}, А. Н. Кадочигова¹, 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

Исследован процесс образования зависаний горной массы при ее выпуске из подкровельной толщи с использованием механизированной крепи. Выявлена прямо пропорциональная зависимость между продолжительностью выпуска горной массы и вероятностью возникновения над выпускным отверстием статических сводообразований, препятствующих выпуску. Разработанный подход позволяет более точно определять зоны и условия образования зависаний в модели с одной секцией крепи. При работе нескольких секций крепи, осуществляющих одновременный выпуск угля, вероятность возникновения зависаний может значительно снизиться за счет создания общей зоны выпуска.

Численное моделирование, подземные горные работы, выпуск угля подкровельной толщи, сводообразование, механизированная крепь, метод дискретных элементов, арки зависания, выпускное окно

DOI: 10.15372/FTPRPI20250110

EDN: WIWUJY

Несмотря на развитие альтернативных источников энергии, угольная отрасль демонстрирует устойчивое положение в мировой энергетике [1]. Россия, обладающая богатыми запасами угля и развитой угольной промышленностью, сохраняет стабильные темпы добычи, в том числе за счет активного использования подземных способов разработки.

Подземная добыча угля по данным за I квартал 2024 г. составляет лишь 22.8 % от общего объема, однако такой способ обладает рядом преимуществ, которые делают его привлекательным для дальнейшего развития [2]. Подземные горные работы отличаются минимальным воздействием на окружающую среду по сравнению с открытыми разработками, а также позволяют

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 № 1 от 22.11.2022 г.

добывать ценные угольные пласты, залегающие на значительной глубине. Эти факторы актуализируют задачи модернизации технологий подземной добычи угля и совершенствование работы систем механизированных комплексов.

В Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН разрабатывается инновационный подход к конструкции механизированной крепи, направленный на оптимизацию процесса добычи [3]. В новой конструкции предусмотрены специальные выпускные окна и регулируемые питатели в секциях крепи, которые позволяют управлять интенсивностью подкровельного выпуска угля и контролировать перегрузку лавного скребкового конвейера и появление динамических явлений.

В рамках этой разработки ведется создание системы имитационного моделирования, которая поможет оценить эффективность предлагаемой технологии с учетом геомеханических характеристик горных пород, параметров оборудования (частоты колебаний питателя, угла наклона заслона выпускного отверстия крепи, скорости работы конвейера) и других факторов. Данная система позволяет моделировать различные варианты взаимодействия секций крепей очистного комплекса с учетом динамики выпуска и транспортировки горной массы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ ИСПОЛЬЗУЮЩИХСЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

При проведении экспериментов по исследованию режимов выпуска угля подкровельной толщи установлено, что при длительном времени выпуска образуется плотное скопление горной массы (ГМ) в виде арок зависания, перекрывающее выпускное окно и приводящее к остановке процесса [4, 5]. Цель данной работы — изучение режимных параметров выпуска, при которых происходят явления зависания горной массы, для их исключения в условиях эксплуатации предлагаемой технологии.

На основе метода дискретных элементов в среде Rocky DEM [4, 5] разработана модель, позволяющая проводить оценку количества и условий возникновения зависаний. Рассмотрен процесс, состоящий из шести последовательных выпусков угля подкровельной толщи на забойный скребковый конвейер. Во всех численных экспериментах исключались из рассмотрения временные интервалы, соответствующие первому выпуску и следующей за ним передвижке. Ввиду требований к вычислительным ресурсам и большого объема экспериментов в каждой серии принято допущение — моделируется работа одной секции крепи. В таком случае имитируется массив с параметрами, соответствующими реальным физическим характеристикам ГМ, которые представлены в таблице. При этом ширина модели составляла 2 м, длина 14.6 м и высота 13 м.

Физические параметры материалов в модели

Параметр	Материал		
	Уголь	Порода	Сталь
Плотность, кг/м ³	1300	2000	7800
Модуль Юнга, ГПа	5.4	15	190
Коэффициент Пуассона	0.16	0.21	0.30
Коэффициент сопротивления качению	0.2	0.2	—

Коэффициенты статического и динамического трения при взаимодействии материалов уголь — уголь, порода — порода, уголь — порода, уголь — сталь в модели равны 0.7; порода — сталь — 0.3. Коэффициент восстановления по всем уровням взаимодействия определен со значением 0.3.

В ходе работы одной секции крепи фигура выпуска в поперечном направлении урезается с обеих сторон, сохраняя свою форму в продольном сечении, что важно в условиях данного эксперимента. Оценивалось поведение массива при нескольких передвижках секции, проходящих именно в продольном сечении и вносящих существенные изменения в траектории движения частиц. Для поперечного сечения условия одинаковы по всему объему.

Так как рассматривается работа только одной секции крепи, созданным в модели стенкам, ограничивающим массив частиц, заданы свойства окружающей ГМ для повышения точности модели и исключения их влияния на частицы.

При вычислениях использовались встроенные в программное обеспечение математические модели: для нормальной составляющей контактной силы выбрана модель вязкоупругого взаимодействия на основе закона Герца; для тангенциальных сил — модель Миндлина и Дересевича; модель сил сопротивления качения — Type C: Linear Spring Rolling Limit. В определенной степени это не соответствует строгой математической постановке в традиционных методах, однако такой подход применяется при использовании современных вычислительных комплексов как инструментов для поддержки принятия решений.

Общее число шарообразных частиц составило 56 929 различного диаметра, засыпанных случайным образом: для слоя угля использовались частицы диаметром 0–0.36 м, для породы — 0.27–0.63 м [6] (рис. 1). Такое количество частиц попадает в резервуар, служащий каркасом для массива, и определяется максимально возможным заполнением объема шарообразными частицами с различными диаметрами. Соблюдается условие, что общее количество частиц не превышает пространства резервуара, а общая масса — не больше заданной.

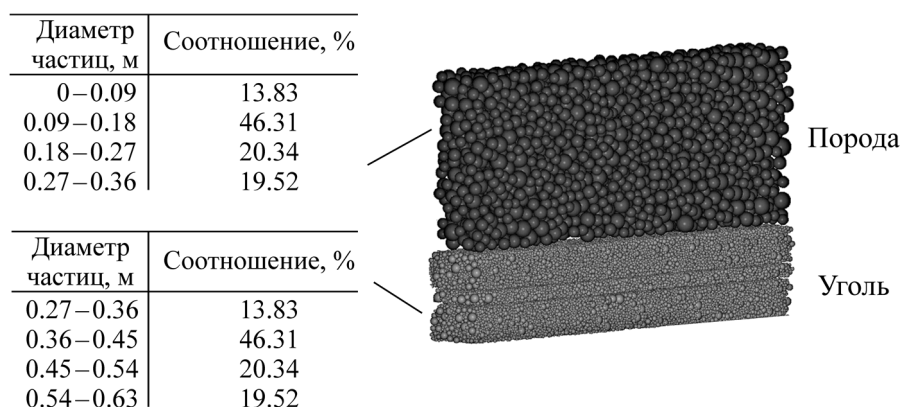


Рис. 1. Фракционный состав и способ засыпки частиц

Упрощение модели путем использования частиц сферической формы приводит к многократному ускорению расчетов (в 13 раз и более), но в некоторой степени изменяет поведение материала. Частицы сферической формы достигают выпускного отверстия по траектории, близкой к прямолинейной. Характер перемещения несферических частиц аналогичен описанным процессам в теории выпуска [7]. Также установлено, что в модели со сферическими частицами скорость истечения выше, а частицы из верхних слоев гораздо раньше достигают выпускного отверстия. Для устранения указанных недостатков при использовании сферических частиц в Rocky DEM предусмотрено использование коэффициента сопротивления качению, применение которого позволяет добиться от сферических частиц поведения, схожего с несферическими фрагментами сыпучей среды.

Проведены эксперименты по подбору коэффициента сопротивления качению через определение угла естественного откоса угля и пустой породы. Сферические частицы размером 0.010 – 0.025 м и общей массой 10 кг ссыпались на горизонтальную ровную поверхность в течение 10 с. В результате образовывалась симметричная насыпь с углом естественного откоса 29° , что соответствует показателям для сухого угля. Выбор такого критерия обусловлен тем, что в исследовании рассматривался выпуск угля подкровельной толщи, не подвергавшегося предварительному гидрорыхлению или гидронасыщению.

Согласно [8], для мощных пологих пластов в Карагандинском, Кузнецком и Челябинском бассейнах, составляющих 75 % от всей подземной добычи, на пласты со слеживающимися породами кровли приходится лишь 11.6 % запасов. В этой связи слеживаемость непосредственной кровли в исследовании не учитывалась.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫПУСКА УГЛЯ ИЗ ПОДКРОВЕЛЬНОЙ ТОЛЩИ

В каждой серии экспериментов исследовался процесс выпуска при равных параметрах (угол наклона заслона и частота возвратно-поступательного движения питателя), но при разной продолжительности единичного выпуска между передвижками крепи — от 14 до 182 с (13 вариантов). Результаты сводились в таблицу, содержащую информацию о моментах образования зависания, его продолжительности, визуальной форме и причинах устранения. Установлено, что доля зависаний, устранившихся по причине самообрушения, составила менее 5 % от общего числа проведенных экспериментов. Исходя из полученных данных, определены зависимости доли длительности общего времени зависания относительно общего времени (рис. 2а) и средней длительности зависаний (рис. 2б) от продолжительности единичного выпуска в модели.

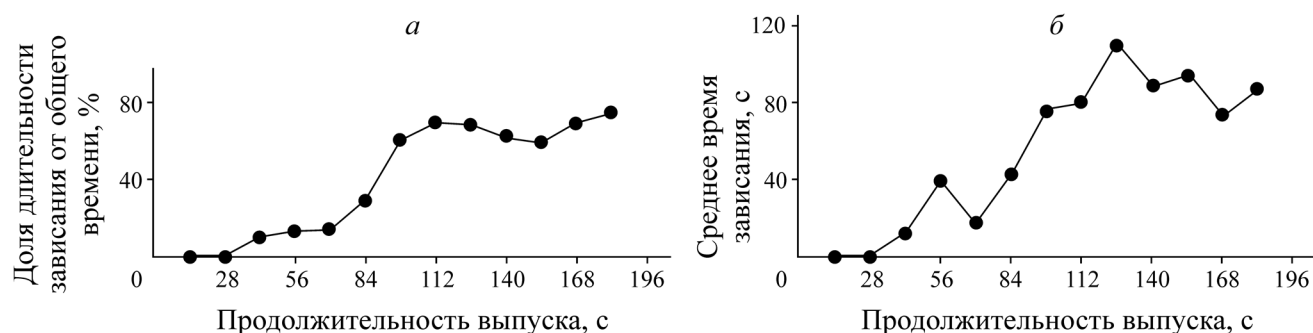


Рис. 2. Зависимости доли длительности общего времени зависания относительно общего времени выпуска (а); средней длительности зависаний (б) от продолжительности единичного выпуска

Полученные результаты свидетельствуют о том, что с увеличением продолжительности времени единичного выпуска растет вероятность образования статических сводообразований, препятствующих выпуску ГМ. При минимальных значениях времени единичного выпуска угля такая вероятность близка к нулю, но при увеличении продолжительности количество зависаний значительно возрастает. Так, при времени единичного выпуска выше 154 с отмечается риск образования числа случайных статических сводообразований (69 % от модельного времени для 168 с и 74 % для 182 с). В разработанных моделях зависания можно устранять посредством принудительной остановки процесса и пересчета модели с момента, предшествующего началу образования зависания. Таким образом обновляются данные параметров контактного взаимодействия частиц, и моделирование можно продолжить в идеальных условиях. В реальных условиях применения предлагаемой технологии для обеспечения полноты выпуска потребуются разработка методов устранения зависаний. Подавляющее большинство зависаний устраняется после передвижки крепи, при этом оценка потерь угля из-за принятых в данном исследовании ограничений не проводилась.

С помощью разработанных моделей рассмотрен массив произвольного объема и сечения, что позволяет определить форму зависания — куполообразный свод. Пример такого сечения для одного зависания в трех плоскостях XYZ и наклонной плоскости, параллельной поверхности поддерживающей части крепи, представлен на рис. 3.

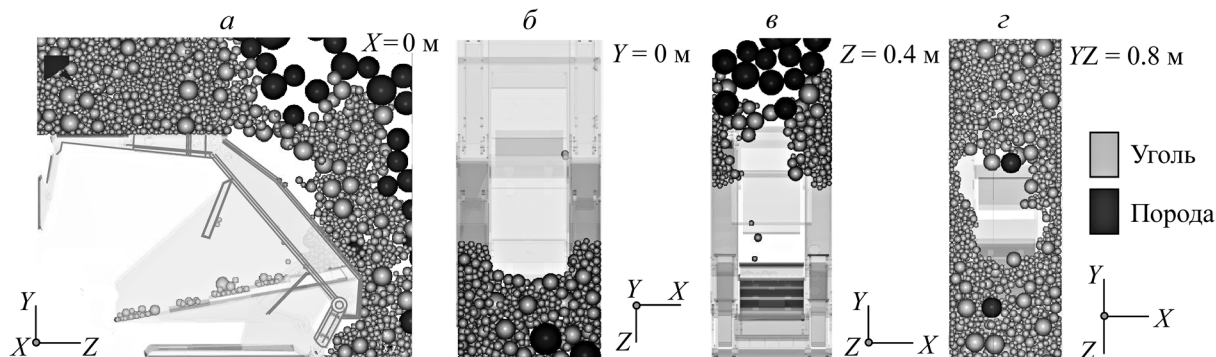


Рис. 3. Послойное сечение зависания в трех плоскостях: a — по оси X ; b — по оси Y ; c — по оси Z ; d — вид под наклоном со стороны выпускного окна YZ

С целью установления связи между размером или массой частиц в зоне зависания для обеспечения возможности выбора подмножества частиц на основе определенных критериев, их анализа, сортировки и обработки информации частицы визуально выделялись в соответствии с их массой и размером. На рис. 4 приведен пример одного из зависаний при различном проникновении частиц, произошедшего после пятой передвижки.

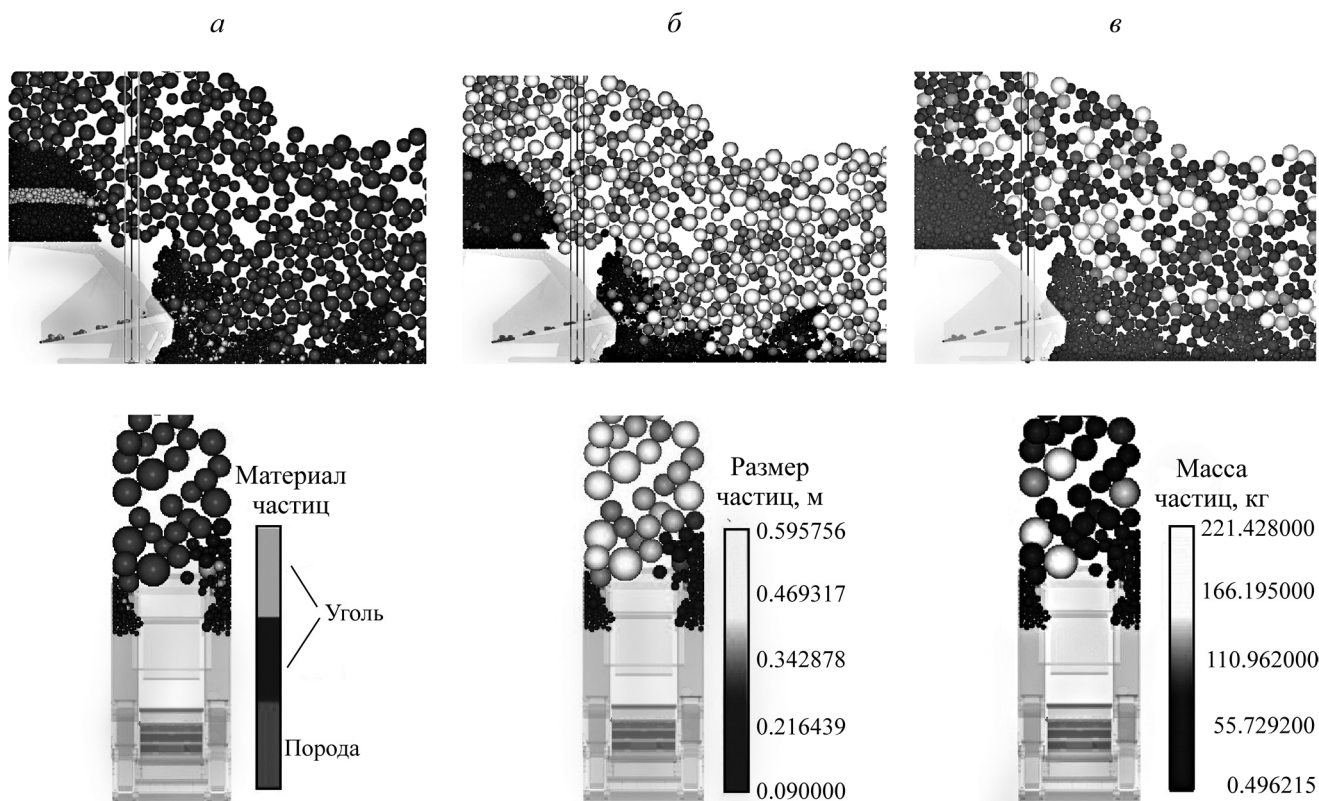


Рис. 4. Зависания при фильтрации частиц по материалам (a), размеру (b) и массе (c): сверху — вид сбоку; внизу — вид со стороны выпускного окна

Вопрос влияния размера и массы частиц на частоту образования зависаний не ставился при выработке рекомендаций по определению времени единичного выпуска, при котором возможно обеспечить стабильность выпуска с меньшей вероятностью образования зависаний. В таком случае весь невыпущенный уголь переходит в разряд потерь, оставшихся в завальной части. Однако установлено, что 25 % зависаний состояли преимущественно из крупных частиц породы (до 0.63 м и до 166 кг), 25 % — включали в себя средние частицы угля и породы до 0.49 м и массой до 90 кг, 25 % — состояли из малых частиц угля размером до 0.35 м и массой до 63 кг, оставшиеся 25 % — смесь больших и малых частиц угля и породы.

Детальный анализ гранулометрического состава (ГС) в зоне зависаний проведен на основе 13 численных моделей с разной продолжительностью выпуска ГМ. В моделях диапазон размера частиц задан от 0.09 до 0.63 м (частицы угля и породы соответственно). Полученные данные размеров частиц в зоне зависаний распределены по пяти фракциям в соответствии с заданными в моделях минимальным и максимальным размерами, а затем произведено усреднение значений. Результаты приведены в виде гистограммы распределения размеров частиц в зонах зависаний (рис. 5).

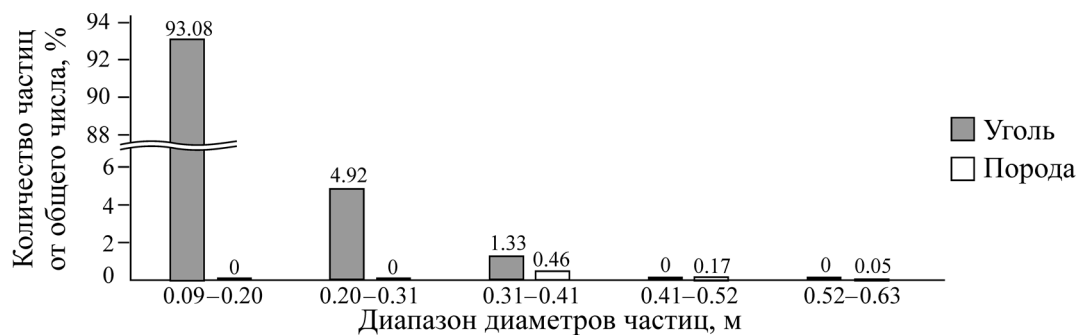


Рис. 5. Распределение размеров частиц горной массы в области зависаний

На рис. 6 рассмотрен процесс образования зависаний. В области арки зависания выбраны и промаркированы 8 частиц, формирующих свод. Затем модель возвращена к начальному моменту для отслеживания траектории перемещения и первоначального положения помеченных частиц.

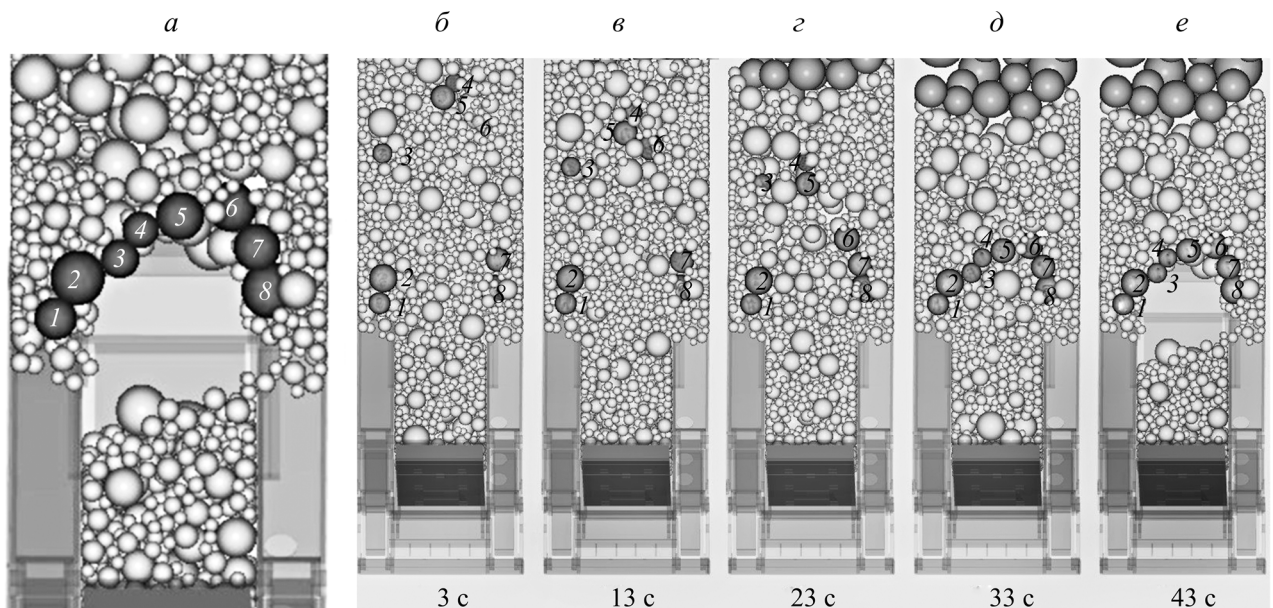


Рис. 6. Маркирование частиц, образующих арку зависания (а), и их перемещение в модели во время выпуска: б — 3 с; в — 13 с; г — 23 с; д — 33 с; е — 43 с

В начальном положении частицы образуют фигуру, близкую к перевернутой параболе. Чем ближе частицы к выпускному окну, тем парабола становится более сжатой по вертикали. Данный пример является “идеальным”, так как частицы, формирующие дугу зависания, относительно крупные и располагаются примерно в одной плоскости (слое). Ввиду недостаточности экспериментальных данных нельзя с уверенностью сказать, что все зависания формируются подобным образом, но полученный результат подтверждается физическим опытом [9].

На движение потока влияют динамические и статические сводообразования [10]. Динамические сводообразования представляют собой непродолжительные зависания, которые замедляют процесс истечения и устраняются сами собой. Статические зависания полностью прекращают процесс истечения и их устранение может потребовать дополнительных действий. В ходе численных экспериментов наблюдались оба вида зависания. Их влияние на выпуск ГМ можно увидеть на рис. 7а.

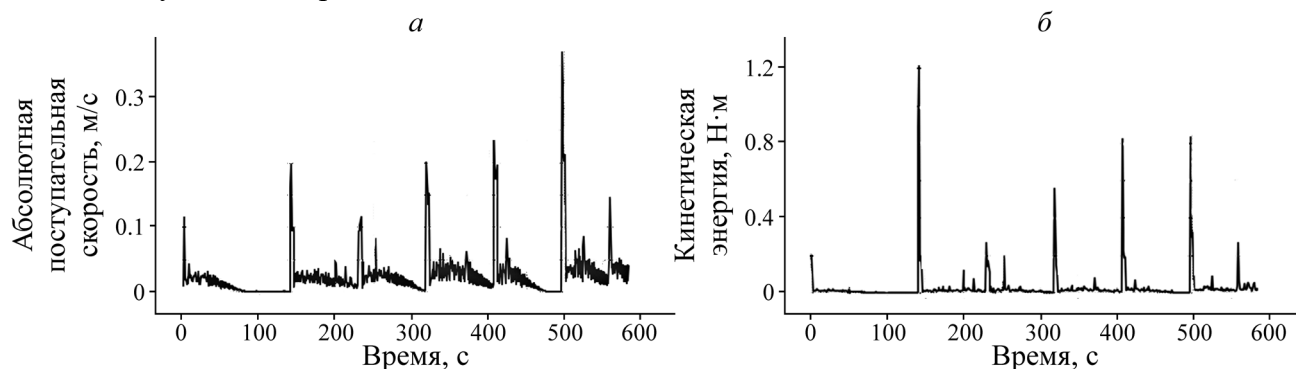


Рис. 7. Абсолютная поступательная скорость (а) и изменение кинетической энергии (б) частиц во время выпуска

Каждый всплеск абсолютной поступательной скорости частиц на графике характеризуется новым выпуском ГМ, который происходит после завершения передвижки крепи. К концу каждого выпуска скорость потока уменьшается либо прекращается совсем, что является следствием возникновения сводообразования. Аналогичный вывод можно сделать исходя из графика кинетической энергии потока (рис. 7б).

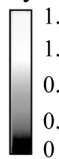
Визуализация движения потока ГМ с отображением кинетической энергии частиц представлена на рис. 8. В основном повышение кинетической энергии частиц потока наблюдается вблизи выпускного окна. Чем дальше частицы от него, тем их кинетическая энергия меньше. В момент обрушения или самообрушения кинетическая энергия достигает пиковых значений.

В подобных исследованиях зависаний с некоторой частотой над выпускным окном в момент движения потока ГМ отмечалось образование арки (дуги), именуемой *free fall arch* [11–13]. Частицы над аркой подвергаются контактному напряжению, которое за счет сил трения не дает им перемещаться. Под аркой образуется область свободного падения, в которой частицы ведут себя как рыхлый материал и перемещаются только под действием силы тяжести. На поверхности арки напряжение в направлении потока исчезает [12].

Полученные в настоящем исследовании результаты согласуются с наблюдениями по образованию в сужающейся зоне потока сыпучего материала свода, препятствующего движению кусков руды в технологиях с выпуском либо зерна в силосах [14–15]. При движении частиц в определенные моменты времени возникают динамические горизонтальные распоры. В [16–19] установлены режимные и конструктивные параметры, при которых обеспечиваются единый поток и стабильные, безаварийные выпуски материалов за счет рассредоточения выпускных отверстий, расположения их на расстоянии, не большем, чем размер зоны потока над

каждым из них. При использовании технологии с выпуском угля подкровельной толщи в полной мере обеспечить указанные режимы нельзя. Это обусловлено тем, что секции крепи невозможно расположить иначе, чем в линию. Производительность выпуска ограничена возможностью забойного скребкового конвейера, на который идет площадной выпуск, причем в таких режимах, при которых будет обеспечено стабильное и полное его заполнение [5]. В этой связи установление режимных параметров предлагаемой технологии, обеспечивающих наибольшую производительность комплекса при минимальных потерях, разубоживании и сводообразовании, — перспективное направление дальнейших исследований.

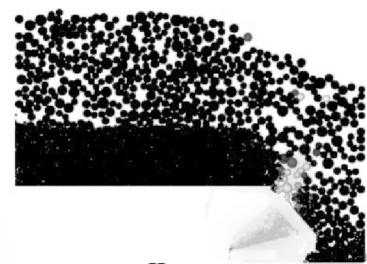
Энергия кинетическая,
поступательная, Н·м



I выпуск
25 с моделирования



I выпуск
124 с моделирования, зависание



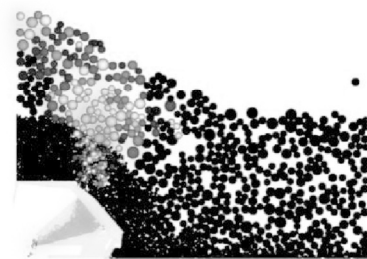
II выпуск
201 с моделирования



IV выпуск
337 с моделирования



IV выпуск
372 с моделирования, обрушение



V выпуск
526 с моделирования, обрушение

Рис. 8. Движение потока горной массы во время моделирования выпусков I–V

Выявлено, что опоры свода, опирающиеся на перекладины выпускного окна, формируются из частиц угля мелкой фракции. Это хорошо видно при изучении плотности расположения частиц (количества частиц) (рис. 9).

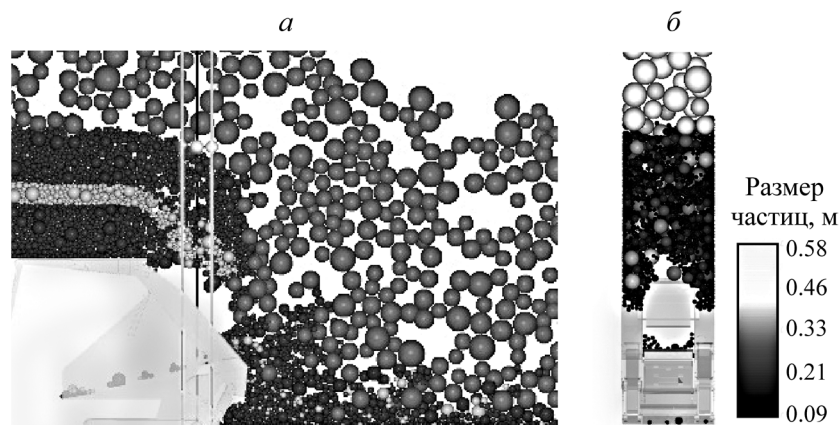


Рис. 9. Формируемое зависание: а — вид сбоку; б — вид со стороны выпускного окна

При зависании большая концентрация частиц отмечается на элементах поддерживающей части крепи вокруг выпускного окна, т. е. в данной области находится большое количество мало-размерных частиц и образуется застойная зона. Такое явление обусловлено тем, что, попадая в эту зону, частицы уже не могут ее покинуть, так как на их пути встречается преграда в виде конструктивных элементов крепи.

В некоторых редких случаях наблюдается явление одновременного образования нескольких сводов (рис. 10). Условия их возникновения и возможные последствия для рассматриваемой технологии в рамках данной работы не изучены. Сводообразование — это хаотичный процесс, не поддающийся контролю в реальных условиях. Его можно только ликвидировать уже по факту его наличия, либо пытаться избежать, работая на определенных режимах, не допускающих образование зависаний, или с помощью дополнительных технических средств, создающих вибрацию в слоях горной массы.

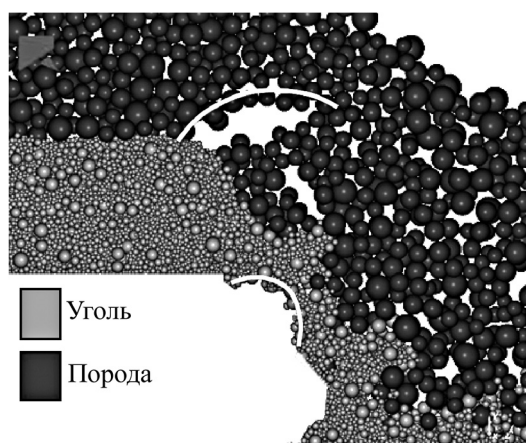


Рис. 10. Одновременное образование двух арок зависания

ВЫВОДЫ

Установлено, что с увеличением продолжительности времени единичного выпуска происходит рост вероятности образования статических сводообразований, препятствующих выпуску горной массы. При минимальных значениях времени единичного выпуска угля вероятность их возникновения близка к нулю, но при увеличении продолжительности количество зависаний значительно возрастает. Так, при времени единичного выпуска больше 154 с повышается вероятность образования числа случайных статических сводообразований (69 % от модельного времени для 168 с и 74 % для 182 с соответственно). При этом доля зависаний, устранившихся по причине самообрушения, составила менее 5 % от общего числа проведенных экспериментов.

Показано почти равномерное распределение числа зависаний по фракционному составу частиц, его образующих. При этом большая концентрация мелких частиц находится на элементах поддерживающей части крепи вокруг выпускного окна. В начальном положении частицы образуют фигуру, близкую к перевернутой параболе. Чем ближе частицы к выпускному окну, тем парабола становится более сжатой по вертикали.

Наличие стоящих рядом нескольких работающих секций крепи, производящих одновременный площадной выпуск, при котором образуется общая зона (пересекающиеся зоны) выпуска будет приводить к снижению количества зависаний. Проведенные исследования позволят сократить число исследуемых вариантов и значительно уменьшить временные затраты на дальнейшие эксперименты на моделях с пяти-шестикратным увеличением числа моделируемых частиц. Полученные данные будут учтены при обосновании технологии с выпуском угля подкровельной толщи для увеличения производительности и полноты выпуска, заполнения лавного конвейера при минимизации потерь угля за крепью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угольная энергетика в 2023 году, вопреки прогнозам, продолжила рост [Электронный ресурс] // Ведомости [сайт]. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2024/01/25/1016636-ugolnaya-energetika-vopreki-prognozam-prodolzhila-rost> (дата обращения: 01.07.2024).
2. Петренко И. Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь–март 2024 года // Уголь. — 2024. — № 6. — С. 5–13.
3. 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: ТулГУ, 2019. — Вып. 1. — С. 162–173.
4. Стародубов А. Н., Зиновьев В. В. Система имитационного моделирования очистных горных работ // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2023): Сб. тр. XI Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. — Казань: АН РТ, 2023. — С. 509–515.
5. Клишин В. И., Стародубов А. Н., Крамаренко В. А., Кадочигова А. Н., Каплун А. В. Исследование параметров выпуска угля из подкровельной толщи средствами имитационного моделирования // ФТПРПИ. — 2023. — № 4. — С. 44–51.
6. Huo Y., Zhu D., Wang Z., and Song X. Numerical investigation of top coal drawing evolution in longwall top coal caving by the coupled-finite difference method-discrete element method, *Energies*, 2021, Vol. 14. — P. 219.
7. Крамаджян А. А., Стажевский С. Б., Хан Г. Н. Моделирование выпуска сыпучих материалов из емкостей // ФТПРПИ. — 1999. — № 4. — С. 66–74.
8. Методические указания по определению параметров управления горным давлением в типовых горногеологических условиях разработки мощных пологих пластов. — Л., 1981. — 63 с.
9. Tang J. and Behringer R. P. How granular materials jam in a hopper, *Chaos*, 2011, Vol. 21 (4). — 041107.
10. Минько Р. Н. Проблема сводообразования в емкостях бункерного типа в условиях длительного хранения // Ярославский педагогический вестник. — 2013. — № 1. — С. 61–65.
11. Brown R. C. and Richards J. C. *Nature* (London), 1961, Vol. 191. — P. 458.
12. Rubio-Largo S. M., Janda A., Maza D., Zuriguel I., and Hidalgo R. C. Disentangling the free-fall arch paradox in silo discharge. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, Vol. 114(23). — 238002.
13. Ge Sun, Quan Chen, Li R., Zheng Z., Xin Y. J., and Yang H. A parabola-shaped free-fall arch in silos with centric and eccentric outlets, *Powder Tech.*, 2022, Vol. 409. — 117770.
14. Клишин С. В., Микенина О. А. О коэффициенте бокового распора случайных упаковок дискретных элементов // ФТПРПИ. — 2013. — № 6. — С. 45–52.

15. **Ревуженко А. Ф.** Механика сыпучей среды: некоторые фундаментальные проблемы и приложения // ФТПРПИ. — 2014. — № 5. — С. 19–32.
16. **Клишин В. И., Филатов А. П.** Подземная разработка алмазоносных месторождений Якутии. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. — 333 с.
17. **Власов В. Н.** Оптимизация выпуска руды из очистных блоков // Горн. журн. — 2005. — № 2. — С. 32–34.
18. **Власов В. Н., Клишин В. И., Крамаджан А. А.** Способы разработки месторождений с обрушением и одновременным дозированным вибровыпуском руды под покрывающими породами — решение проблемы качественного извлечения полезного ископаемого из недр // Научные технологии добычи и переработки полезных ископаемых: Сб. тр. III Междунар. конф. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2003. — С. 68–76.
19. **Пат. RU 2098626 C1.** Способ разработки месторождений с обрушением и выпуском руды под покрывающими породами / В. Н. Власов, С. Б. Стажевский, И. Н. Власов, М. В. Власова // Оpubл. в БИПМ. — 1997. — № 34.

Поступила в редакцию 26/VII 2024

После доработки 27/XI 2024

Принята к публикации 23/I 2025