

УДК 622.273:274+539.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПУСКА УГЛЯ
ПРИ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ ОТРАБОТКЕ
МОЩНЫХ КРУТОПАДАЮЩИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

С. В. Клишин¹, В. И. Клишин², Г. Ю. Опрук²

¹ *Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: sv.klishin@google.com,*

Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

² *Институт угля СО РАН, E-mail: klishinvi@icc.kemsc.ru,
Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

Выполнено физическое и аналитическое моделирование процесса выпуска угля при подземной разработке мощных угольных пластов в технологии подэтажного обрушения. Рассмотрен процесс управления гравитационным движением раздробленной горной массы над секциями механизированной крепи при дозированном выпуске угля на забойный конвейер, расположенный между секциями крепи. На основе результатов физического моделирования предложена математическая модель для численного исследования процессов гравитационного движения гранулированных материалов в трехмерной постановке методом дискретных элементов.

Подземная добыча угля, технология, выпуск, механизированная крепь, гравитационное движение, физическая модель, лабораторный эксперимент, численная модель, метод дискретных элементов

В России мощные крутопадающие пласты залегают в Кузнецком угольном бассейне и на Апсатском каменноугольном месторождении в Читинской области на территории Каларского района. В странах ближнего и дальнего зарубежья выделяются месторождения Закавказья (Ткварчельское и Шаорское); Средней Азии (Шаргунское), а также Польши, Китая, Болгарии, Индии, Турции. В Кузбассе промышленные запасы в мощных крутых пластах составляют 1.2 млрд т. Значительный вклад в создание и совершенствование систем разработки с применением механизации очистных работ на крутых пластах внесли коллективы ведущих научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов. Однако все разработки применялись лишь в опытном порядке, поэтому требуется постоянное совершенствование технологий с механизированной отработкой мощных крутых пластов. Применение высокопроизводительных комплексов в Прокопьевско-Киселевском районе Кузбасса исторически сдерживалось сложностью залегания и нарушенностью угольных пластов. Угли района уникальны по своему марочному составу, представлены особо ценными марками и служат главной сырьевой базой для металлургической промышленности России.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-98049).

В настоящее время разработка крутых и крутонаклонных мощных (более 5 м) угольных пластов характеризуется повышенными эксплуатационными потерями угля, эндогенной пожароопасностью, низкими эффективностью и безопасностью ведения горных работ. Одним из направлений решения этих проблем является создание комплекса “крепь – штрек”, перемещаемого по мере подсечки подэтажной толщи подэтажным штреком по простиранию пласта. Варианты таких комплексов разработаны и изготовлены на Киселевском машиностроительном заводе им. И. С. Черных (КПП — комплекс передвижной подэтажный), Сибгормаш (КПО — комплекс подэтажный с обрушением), КузНИУИ (АПВ — агрегат подэтажной выемки) и прошли успешные испытания на угольных шахтах [1–3].

В ИУ СО РАН и ИГД СО РАН продолжаются работы по созданию эффективных безопасных технологий и средств комплексной механизации выемки мощных угольных пластов. Разработаны новые способы безвзрывного разупрочнения угольного массива, которые включают в себя два варианта: направленного виброразрушения на угольный пласт и направленного гидроразрыва [4–8].

В соответствии с предлагаемой технологией отработки крутопадающий угольный пласт рассекается по простиранию на всю длину обрабатываемого блока подэтажными штреками, соединенными между собой печами и конвейерным штреком. Между подэтажными штреками также по простиранию проходят промежуточные компенсационные штреки, из которых проводятся операции по разупрочнению угольного целика, расположенного между подэтажными штреками. Компенсационный штрек может быть соединен с подэтажным штреком вентиляционными сбойками, что позволит обеспечить вентиляцию тупикового забоя [9]. Наиболее сложной операцией при применении этой технологии является безопасный и эффективный выпуск угля из разрушенного целика на подэтажный штрек.

Это позволило вернуться к решению проблемы разработки мощных крутопадающих пластов способом подэтажной выемки и разработать для реализации данной технологии принципиально новый комплекс оборудования, обеспечивающий механизированный управляемый выпуск угля из разрушенного межэтажного целика на подэтажный штрек. Комплекс подэтажного выпуска угля (КПВ) (рис. 1) включает в себя две гидрофицированные секции крепи, перегружатель и штрековый конвейер. Перегружатель устанавливается между секциями крепи, имеющими боковые щитки, с помощью которых осуществляется дозированный выпуск угля. Все операции по управлению комплексом оборудования гидрофицированы, комплекс питается от высоконапорной станции, установленной в нише подэтажного штрека [6, 7].

Для реализации технологии подэтажного штрекового обрушения (ПШО) предложены новые типы механизированных комплексов КПВ-1 и КПВ-2. Комплекс КПВ-1 (рис. 2а) предназначен для разработки крутопадающих пластов угля с углом падения 45–90° мощностью свыше 6 м и включает в себя две секции оградительно-поддерживающего типа, ограждения которых снабжены выпускными окнами с затвором и откидными щитами, а основание — питателями. Между основаниями секций на почве штрека установлен став перегружателя ПСП-26. Секции связаны со ставом перегружателя гидроцилиндром подачи. Комплекс снабжен также двумя гидроцилиндрами с якорными стойками и круглозвенными цепями, с помощью которых в случае необходимости могут быть передвинуты вдоль подэтажного штрека забойные секции и став перегружателя.

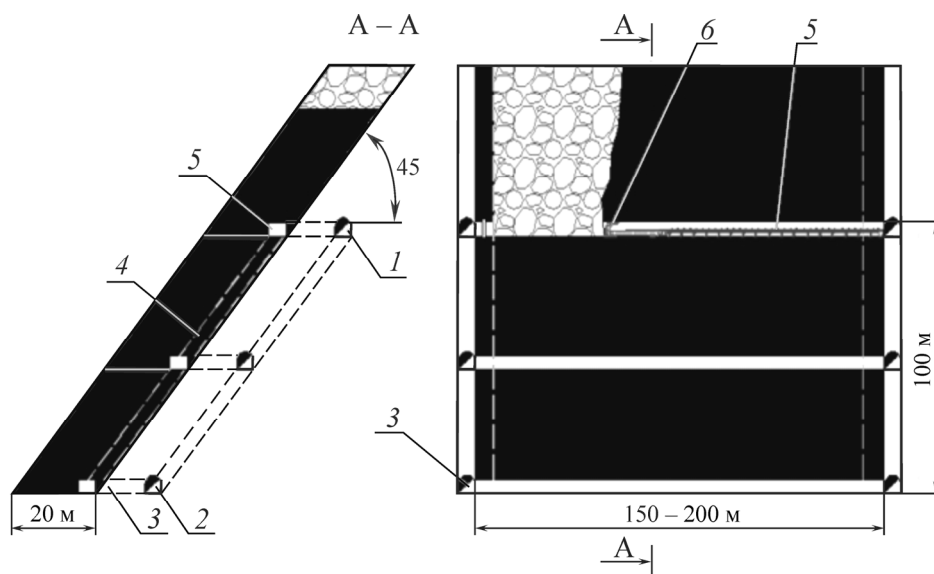


Рис. 1. Технологическая схема подэтажной выемки угля: 1 — полевой вентиляционный штрек; 2 — полевой откаточный штрек; 3 — промежуточный квершлаг; 4 — углеспускная печь; 5 — выемочный штрек; 6 — очистной забой

Одним из существенных достоинств этого комплекса является выпуск угля из потолочины с возможностью регулирования ширины потока путем последовательного открывания выпускных окон в ограждениях секций, что позволяет регулировать перемещение потока выпускаемого угля по ширине подэтажной толщи, обеспечивая тем самым полноту выпуска обрабатываемого пласта.

В последние годы подобная технология реализована польской фирмой GEOTECH на шахте “Казимеж Юлиуш” (Республика Польша) и получила название “подбирковой” технологии. Эксплуатационными выработками в данной системе являются штреки, пройденные по почве пласта в нижней части каждой эксплуатационной панели. В конце штрека установлено забойное оборудование, созданное в Словакии на машиностроительном заводе BME Nováky, включающее две секции крепи, которые обеспечивают крепление штрека и защиту “подбиркового” скребкового конвейера для транспортировки угля, установленного между основаниями секций крепи (рис. 2б).

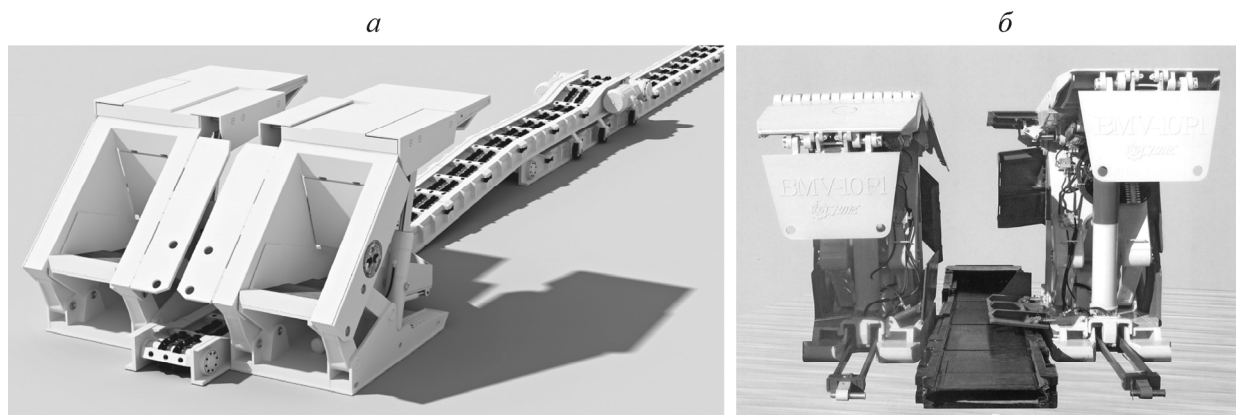


Рис. 2. Механизированный комплекс для обработки мощных крутых угольных пластов по системе ПШО: а — крепь КПВ-1 (Россия); б — крепь BMV-10 машиностроительного завода BME Nováky (Словакия)

Такая система разработки успешно применяется в условиях шахты на пласте мощностью 20 м с углом падения 45° [10]. Опыт эксплуатации этой системы в шахтных условиях еще раз подтвердил эффективность поэтажной выемки угля при разработке мощных крутопадающих пластов. Однако применение данной технологии в условиях Прокопьевско-Киселевского месторождения сдерживается отсутствием невзрывных методов разупрочнения надштрекового угольного целика и большими потерями угольной массы при ее неуправляемом выпуске.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Методика лабораторных исследований по выпуску сыпучих материалов в достаточной мере освещена в литературе. Результаты опытов на моделях [11, 12] позволили описать важные физические закономерности, определяющие кинематику и динамику перемещения раздробленной горной массы при ее гравитационном движении. В работах [6, 7] приведены результаты лабораторных экспериментов по выпуску угля на завальный и забойный конвейеры, исследовано влияние параметров питателя механизированной крепи на принудительный выпуск самообрушающегося угля из подкровельной толщи.

В настоящей работе представлены лабораторные исследования процесса выпуска угля на конвейер, расположенный между секциями крепи (вариант ВМЕ Nováky, Словакия) и управляемого площадного выпуска на конвейер и через окна механизированной крепи (вариант механизированного комплекса по системе ПШО на базе крепи КПВ-1, Россия). Данный объемный стенд разработан в ИУ СО РАН, масштаб его по отношению к натуральным размерам механизированного комплекса составляет 1:30 (рис. 3).

Выпускалась угольная фракция, размеры частиц которой выбирались в пределах 25–30 мм, покрывающими породами служила щебенка с размером частиц 50–70 мм. Угол наклона стенда к горизонтальной плоскости оставался постоянным и составлял 80° . Внутри стенда сделана отсечка из оргстекла для моделирования вариантов мощности пласта. Заслон, закрывающий выпускное окно, выполнен в виде элементов, соединенных цепями, обеспечивающими открытие выпускного окна на все сечение.

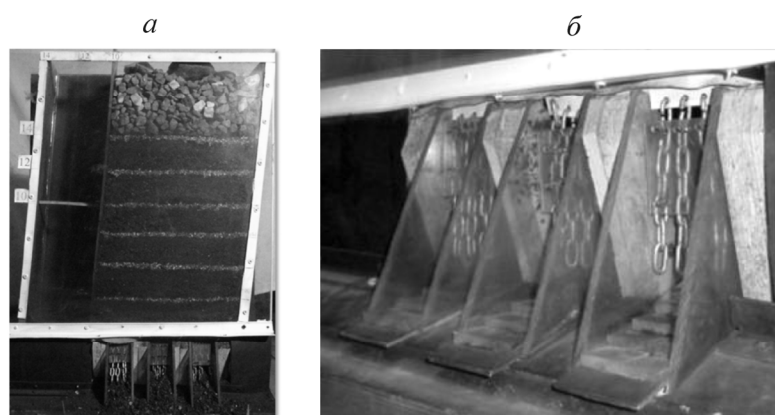


Рис. 3. Лабораторный стенд для исследования процесса выпуска: *а* — общий вид стенда; *б* — увеличенное изображение секций механизированных крепей

Для визуального наблюдения формирования конфигурации выпуска передняя стенка сделана из органического стекла толщиной 6 мм, задняя — из фанеры. В качестве основного метода изучения закономерностей выпуска использовался метод, основанный на наблюдении и фиксации положения отдельных частиц и прослоек сыпучего материала на контакте с прозрачной стенкой модели.

Методика исследований состояла в следующем. Стенд по всему горизонтальному сечению на высоту подэтажа, а по вертикальному сечению — на мощность пласта загружался углем. Для удобства наблюдений за процессом движения и фиксации выпуска горизонтальные слои угля на определенных уровнях насыпались окрашенными прослойками магнетита. В качестве горной массы, имитирующей давление покрывающих пород, использовался щебень. Наблюдение велось за формированием зоны потока угля при разных режимах выпуска на всех прослойках, характерные стадии выпуска фотографировались.

На рис. 4 приведены стадии лабораторного эксперимента по выпуску раздробленной угольной массы на конвейер, расположенный между ограничениями секций механизированных крепей (аналоги подэтажной выемки, проводимой на шахте “Казимеж-Юлеуш”). Видно, что при поочередном выпуске угля на конвейер между секциями крепи происходит проникновение пустых пород по границе зоны потока выпускаемого угля вследствие того, что плотность породы более чем в 2 раза превышает плотность угля, что приводит к значительным потерям и разубоживанию угля.

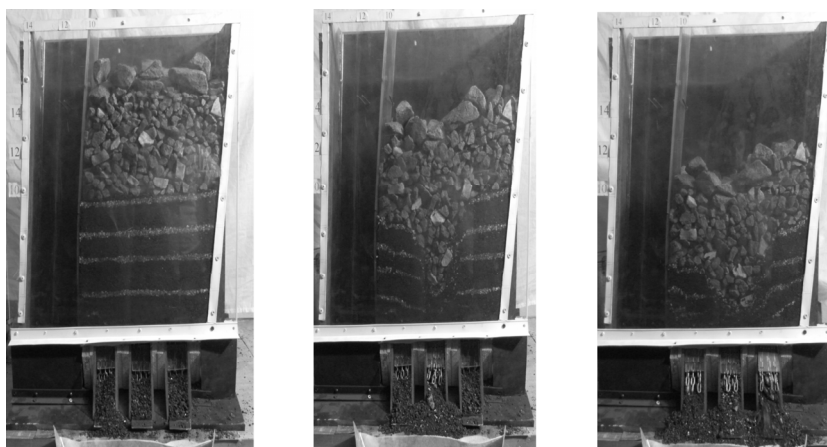


Рис. 4. Физическая модель поочередного выпуска угля на основе оборудования ВМV-10 (Словакия)

С другой стороны, при одновременном выпуске угля на конвейер между секциями крепи и через питатели в окна крепи контактная граница “уголь – порода” опускается параллельно почве пласта, т. е. обеспечивается регулируемый площадный выпуск угля (рис. 5).

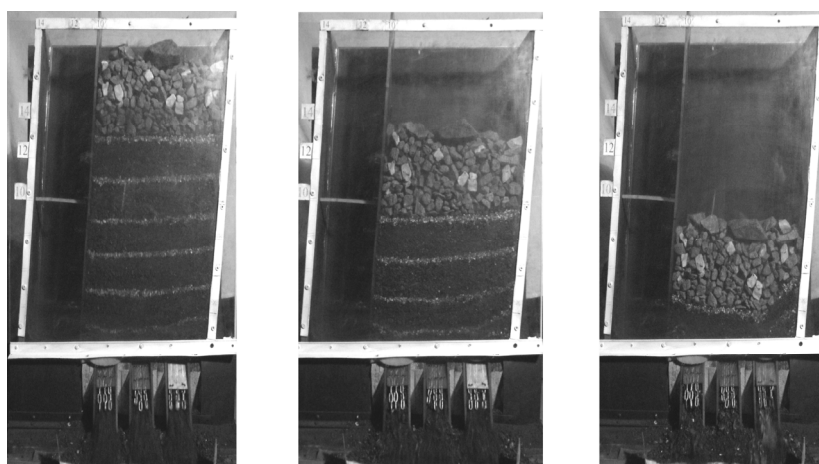


Рис. 5. Физическая модель площадного управляемого выпуска угля с применением механизированных крепей КПВ-1 (Россия)

Показано, что установкой регулируемых по производительности питателей в ограждении секции крепи механизированного комплекса достигается управление процессом одновременного площадного выпуска угля на конвейер, расположенный между секциями крепи. При этом контактная граница “уголь – порода” опускается вертикально и параллельно почве пласта, что позволяет снизить потери и разубоживание. Установлено, что потери угля прямо пропорциональны мощности пласта и обратно пропорциональны высоте подэтажа и в условиях новой технологии составляют в среднем 5 – 15 %.

Таким образом, эксперименты продемонстрировали существенное достоинство комплекса отработки мощных крутых угольных пластов по системе ПШО на базе крепи КПВ-1 — выпуск угля из потолочины с возможностью регулирования ширины потока с помощью последовательного открывания выпускных окон в ограждениях секций. Это позволяет регулировать перемещение потока выпускаемого угля по ширине подэтажной толщи, обеспечивая тем самым полноту выпуска обрабатываемого пласта.

Предлагаемые технологии отработки мощных крутопадающих пластов требуют изучения процесса выпуска и более точного его описания для обоснования параметров технических решений. На основе выполненных лабораторных исследований процесса управляемого выпуска угля проведены численное исследование динамических режимов гравитационного движения и оценка напряженно-деформированного состояния предварительно разрушенного угольного массива при применении технологии с выпуском.

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В настоящее время при исследовании напряженно-деформированного состояния горных пород и сыпучих сред большую популярность приобрел метод дискретных элементов (МДЭ). Данный метод позволяет решать задачи, опираясь непосредственно на представления о дискретном строении реальных твердых тел, причем временная эволюция системы взаимодействующих частиц, составляющих горную породу, отслеживается путем интегрирования их уравнений движения [13 – 15]. Это позволяет в рамках единого подхода исследовать как малые, так и конечные деформации, проследить зарождение и развитие дефектов структуры, детально воспроизвести процессы разрушения и т. д. В основе МДЭ лежит представление материала как конечной области двух- или трехмерного пространства, заполненной отдельными сферическими частицами — дискретными элементами. Данная система частиц состоит из конечного числа N элементов с заданным распределением радиусов r_i ($i = 1, \dots, N$) и набором физических свойств (плотность ρ_i , упругие и вязкие модули, трение, сцепление и т. д.). Напряженно-деформированное состояние такой системы в каждый момент времени зависит от положения каждой частицы, от сил, возникающих на контактах между частицами, а также от приложенных к системе внешних сил.

В реальной ситуации взаимодействие между упругими частицами приводит к их деформации и искажению формы. В модели дискретных элементов форма частиц на протяжении всего времени контакта остается неизменной, а степень их деформации представляется величиной перекрытия между контактирующими элементами. При этом предполагается, что размер такого перекрытия намного меньше размеров самих частиц.

Силовое взаимодействие в точке контакта между сферическими частицами с номерами i и j выражается в векторной форме следующим образом:

$$\mathbf{F}_{ij} = F_{n,ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} + F_{t,ij} \cdot \mathbf{t}_{ij}, \quad (1)$$

где $F_{n,ij}$ и $F_{t,ij}$ — вязкоупругие нормальная и касательная компоненты контактной силы соответственно; \mathbf{n}_{ij} — единичный вектор, определяющий плоскость контакта между двумя сферами; \mathbf{t}_{ij} — единичный вектор, принадлежащий плоскости контакта. Выражение (1) может быть записано в виде

$$\mathbf{F}_{ij} = (k_{n,ij}\delta_{n,ij} - \gamma_{n,ij}v_{n,ij}) \cdot \mathbf{n}_{ij} + (k_{t,ij}\delta_{t,ij} - \gamma_{t,ij}v_{t,ij}) \cdot \mathbf{t}_{ij}. \quad (2)$$

Здесь $v_{n,ij}$ и $v_{t,ij}$ — проекции относительной скорости точки соударения частиц на оси \mathbf{n}_{ij} и \mathbf{t}_{ij} ; $\delta_{n,ij}$ и $\delta_{t,ij}$ — перекрытия в нормальном и касательном направлениях. Перекрытие по нормали $\delta_{n,ij}$ находится по формуле

$$\delta_{n,ij} = (r_i + r_j) - l_{ij} > 0, \quad (3)$$

где l_{ij} — расстояние между центрами частиц.

Касательная составляющая $\delta_{t,ij}$ определяется в терминах приращений. Когда контакт впервые сформирован, $\delta_{t,ij}$ устанавливается равной нулю. Каждое последующее приращение сдвига в плоскости контакта вычисляется как

$$\Delta\delta_{t,ij} = (\Delta\mathbf{u}_i - \Delta\mathbf{u}_j) \cdot \mathbf{t}_{ij},$$

где вектор \mathbf{t}_{ij} направлен вдоль вектора относительного смещения частиц в плоскости контакта; $\Delta\mathbf{u}_i$ и $\Delta\mathbf{u}_j$ — приращения смещений частиц. Таким образом, полное значение касательного перекрытия в момент времени t вычисляется в виде

$$\delta_{t,ij} = \int_{t_0}^t v_{t,ij}(\tau) d\tau, \quad (4)$$

где t_0 — время установления контакта.

Для определения величин, представленных в (2), выберем вязкоупругое взаимодействие частиц. Тогда компоненты контактной силы будут рассчитываться следующим образом:

$$k_{n,ij} = E_{ij}r_{ij}, \quad \gamma_{n,ij} = \sqrt{m_{ij}k_{n,ij}/[1 + (\pi/\ln e_{ij})^2]}, \quad (5)$$

$$k_{t,ij} = k^*k_{n,ij}, \quad \gamma_{t,ij} = \gamma_{n,ij},$$

где

$$E_{ij} = \frac{E_i E_j}{E_i + E_j}, \quad r_{ij} = \frac{r_i r_j}{r_i + r_j}, \quad m_{ij} = \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}. \quad (6)$$

Здесь m_i , m_j — массы; E_i и E_j — модули упругости; e_{ij} — коэффициент восстановления скорости после соударения i -й и j -й частиц соответственно ($0 \leq e_{ij} \leq 1$); $k^* = \text{const}$ — коэффициент пропорциональности.

Касательная составляющая контактной силы вычисляется следующим образом. На каждом шаге интегрирования определяются значения $F_{n,ij}$ и проверяется выполнение неравенства $|F_{t,ij}| > \text{tg}\varphi_{ij}|F_{n,ij}|$, где φ_{ij} — заранее заданный угол внешнего трения скольжения между частицами. Если это неравенство не выполняется, то значение $F_{t,ij}$ остается определенным в соот-

ветствии с (2) и (4, 5). Если неравенство выполнено, то частицы начинают проскальзывать друг по другу и на текущем шаге нагружения касательная составляющая силы отталкивания вычисляется по закону

$$F_{t,ij} = \operatorname{tg} \varphi_{ij} F_{n,ij}. \quad (7)$$

После определения значений нормальной и касательной компоненты силы, действующих на каждом контакте, происходит переход к следующему шагу нагружения, и данная схема повторяется для существующих и вновь образовавшихся контактов. Если в какой-то момент нагружения для нормальной составляющей перекрытия выполняется условие $\delta_{n,ij} \leq 0$, то такой контакт считается исчерпанным и в дальнейшем не рассматривается.

Ранее в работе [16] были представлены результаты численного моделирования выпуска угольной массы на основе МДЭ в двумерном случае. В настоящей работе для исследования прикладных задач на основе сформулированных выше принципов разработаны математическая модель, алгоритмы и программное обеспечение LS-GTS-3D (Large Scale Granular Transfer Simulation — 3Ddimensional case) для численного исследования задач деформирования и движения сыпучих сред при различных режимах нагружения в случае трех измерений. Данная постановка позволяет учесть дилатансию — фундаментальное свойство горных пород и сыпучих материалов, при которой, в отличие от [16], исключается “зависание” материала в районе выпускных отверстий или их закупоривание.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Рассмотрим вначале задачу о выпуске предварительно разупрочненной горной породы через одно выпускное отверстие. Пусть исследуемая область имеет форму параллелепипеда со следующими размерами: ширина $l = 30.0$ м, высота $h = 20.0$ м, глубина $d = 5.0$ м и заполнена гранулированным материалом – совокупностью сферических частиц с радиусами, равномерно распределенными в интервале $0.05 - 0.10$ м (рис. 6). Общее их количество $N = 200000$. Выпускное отверстие представляет собой щель шириной $l_1 = 1.0$ м, проходящую от передней до задней стенки бункера. Нижний слой частиц (высотой 8 м) — угольная масса (далее обозначается индексом c), верхний – горная порода (индекс r). Частицы раскрашены для визуализации кинематики процесса движения материала.

Основные физические параметры материалов приведены ниже (значение коэффициента восстановления скорости, характеризующего диссипацию энергии при столкновении частиц, принято меньше единицы):

	Уголь	Порода
Модуль упругости E_i , МПа	$5 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$
Плотность ρ_i , кг/м ³	1 400	2 500
Коэффициент восстановления скорости e_{ij}	0.9	0.9
Коэффициент внешнего трения между частицами $\mu_{ij} = \operatorname{tg} \varphi_{ij}$	0.4	0.4

На рис. 6а представлена конфигурация области деформирования в начальный момент времени, на рис. 6б, в — в момент развитого движения. Хорошо виден процесс формирования эллипсоида течения над выпускным отверстием (рис. 6б) и прорыв породы в отверстие (рис. 6в).

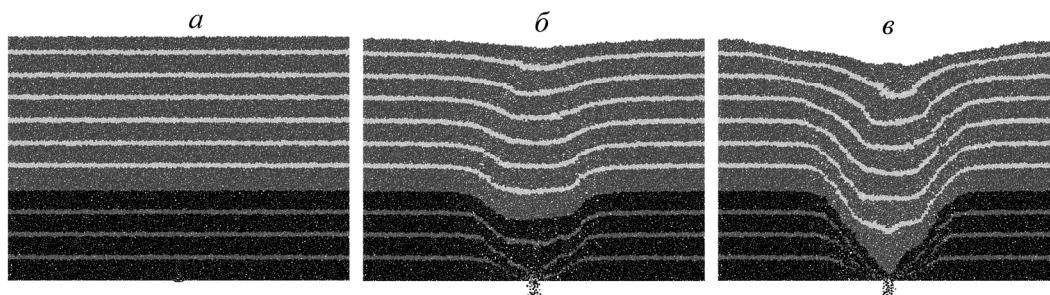


Рис. 6. Кинематическая картина выпуска горной породы: *a* — начальный момент времени; *б, в* — развитое течение

Рассмотрим теперь задачу площадного выпуска угольной массы из мощного крутопадающего пласта. Пусть мощность угольного пласта 8 м, высота отрабатываемого подэтажа 12 м, угол падения пласта $\alpha = 80^\circ$ (рис. 7). Границы исследуемой области представляют собой упругие отрезки с модулем упругости, равным $2 \cdot 10^4$ МПа. Выпускные отверстия имеют ширину $l_S = 2$ м и $l_C = 1$ м, где индексом *S* обозначены выпускные отверстия в секциях механизированных крепей, а индексом *C* — между ними.

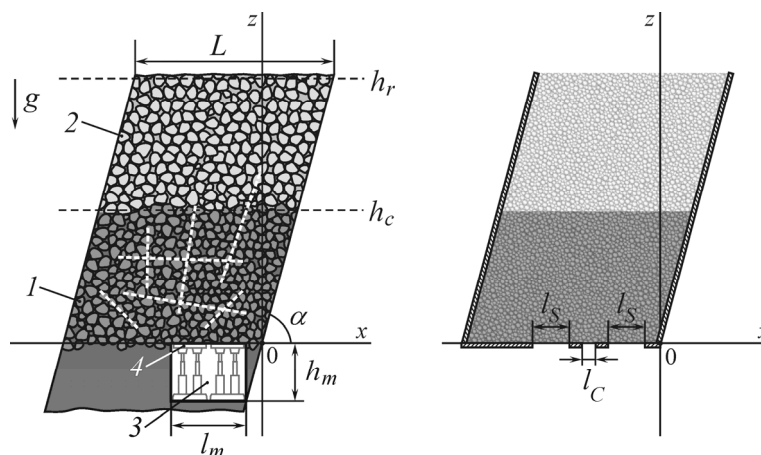


Рис. 7. Схема численного эксперимента площадного выпуска из мощного крутопадающего пласта: 1 — уголь; 2 — горная порода; 3 — подэтажный штрек; 4 — секции механизированных крепей

Для создания начального напряженного состояния материал усаживался некоторое время, принимая равновесное состояние, характерное для начального нагруженного массива горных пород. Затем для моделирования гравитационного потока части границы, закрывающие выпускные отверстия, удалялись, и материал начинал движение.

На рис. 8 изображены стадии течения в различные моменты времени в случае, когда выпускные отверстия открыты одновременно в начальный момент времени. Видно, что кинематическая картина качественно повторяет картину схожих экспериментов, проведенных в лабораторных условиях на эквивалентных материалах.

В представленной численной реализации МДЭ частицы при соударении не разрушаются, а разрушаются связи между ними. Как показали численные эксперименты, выпуск разрушенного угля при одном открытом отверстии сопровождается циклами разрыхления и уплотнения в зоне течения и величина плотности потока изменяется скачкообразно в течение всего процесса выпуска. Такой эффект вызван тем, что сцепленные частицы при движении периодически закупоривают выпускные отверстия, вызывая “зависание” всего материала, а затем совокупность

вышележащих частиц под действием силы тяжести разрушает образовавшийся затор и движение продолжается с образованием полостей внутри области деформирования. С другой стороны, показано, что при открытых одновременно трех отверстиях материал движется без зависания в зоне выпуска.

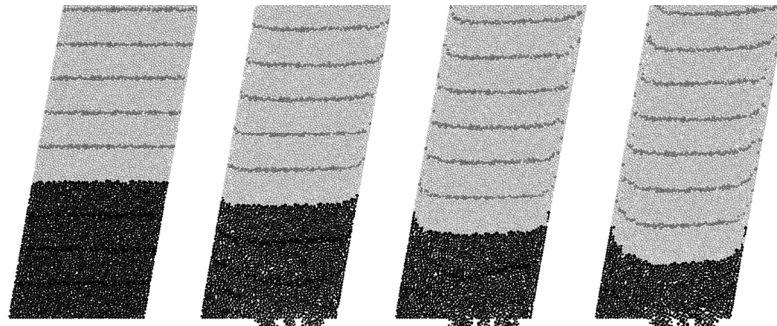


Рис. 8. Этапы площадного выпуска из мощного крутопадающего пласта

Это явление иллюстрирует рис. 9, где показана скорость прохождения потока через выпускные отверстия. В данном случае она определяется как количество частиц N_t , прошедших через выпускное отверстие за единицу времени.

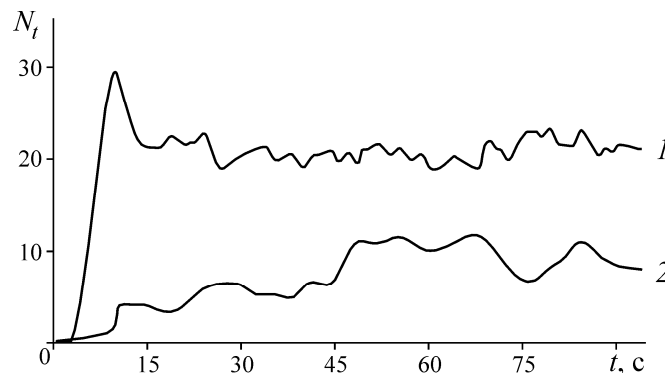


Рис. 9. Скорость прохождения потока сыпучего материала через выпускные отверстия: три открытых отверстия (1); одно открытое отверстие (2)

Напряженно-деформированное состояние горного массива над выработанным пространством и в зоне выпуска демонстрирует рис. 10. Здесь светлым участкам соответствуют слабые напряжения, а темным — высокие напряжения (по модулю).

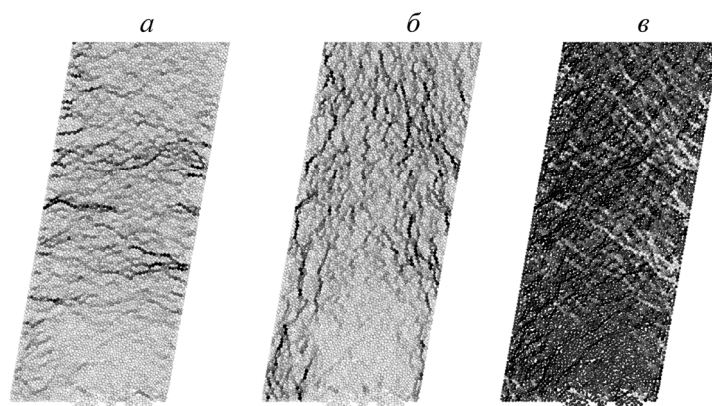


Рис. 10. Напряжения в массиве при выпуске угля на забойный конвейер: а — σ_{xx} ; б — σ_{zz} ; в — τ_{xz}

ВЫВОДЫ

Предложен способ управления процессом перемещения предварительно разрушенной горной породы за счет принудительно-управляемого выпуска на забойный конвейер в технологии подземной отработки мощных крутых угольных пластов с выпуском подкровельной толщи. Представлена конструкция секций механизированной крепи, в основу которой положено использование питателей, обеспечивающих управляемый площадной выпуск. Такое решение выемки мощных пологих и крутых угольных пластов с регулируемым выпуском угля на забойный конвейер открывает новые технологические возможности и обеспечивает следующие преимущества: для самообрушения угля подкровельной толщи используются силы горного давления, что снижает энергозатраты на добычу угля; пласт вынимается на всю мощность, что способствует высокой концентрации горных работ, снижению эксплуатационных потерь по мощности пласта и опасности возникновения эндогенных пожаров; в 1.5–2.0 раза уменьшается объем подготовительных выработок и затраты на их проведение и поддержание; сокращаются расходы на оборудование очистных забоев и средства транспортирования угля в пределах выемочного поля; снижается себестоимость добываемого угля в связи с тем, что при сравнительно небольшом повышении численности рабочих по выпуску угля в забое резко возрастает нагрузка на лаву.

Разработан лабораторный стенд для исследования параметров выпуска угля разными способами в системе подэтажного обрушения. Рассмотрено влияние конструкции питателя механизированной крепи на процесс выпуска угля на конвейер, расположенный между секциями механизированных крепей. Проведенные эксперименты показали влияние мощности пласта, высоты подэтажа и порядка выпуска на показатели полноты и качества извлечения.

На основе МДЭ разработана математическая модель для численного исследования процессов гравитационного движения раздробленных горных пород. Построен численный алгоритм, разработано программное обеспечение, исследована задача о выпуске угля в трехмерной постановке. Установлено, что при регулируемом площадном выпуске достигается относительная стабилизация скорости прохождения потока через выпускные отверстия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Томашевский Л. П., Левочкин В. П., Боровиков П. А., Блинов Ю. С., Кузин Г. С., Калугин О. Ф. Разработка и научное обоснование технологии подэтажной выемки угля и параметров выпускного механизированного комплекса “крепь – штрек” / Сб. науч. тр. № 25: Совершенствование технологии разработки крутых пластов Кузбасса. — Прокопьевск: КузНИУИ, 1974.
2. Томашевский Л. П. Технология разработки мощных крутых нарушенных пластов Кузбасса и направления ее совершенствования: обзор ЦНИЭИуголь. — М., 1978.
3. Дмитриев С. Н., Запreeв С. И., Сенько Л. С., Крылов В. Ф., Томашевский Л. П. Основы технологии разработки угля с применением гибких перекрытий. — М.: Недра, 1967.
4. Пат. РФ № 2399762. Способ отработки угольных пластов / В. И. Клишин, Д. И. Кокоулин, Б. Кубанычбек, С. В. Клишин // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 26.
5. Пат. РФ № 2394991. Способ разупрочнения прочных углей / В. И. Клишин, Ю. М. Леконцев, П. В. Сажин // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 20.
6. Клишин В. И., Фокин Ю. С., Кокоулин Д. И., Кубанычбек Б. Разработка мощных пластов механизированными крепями с регулируемым выпуском угля. — Новосибирск: Наука, 2007.

7. **Клишин В. И., Власов В. Н., Кубанычбек уулу Бакыт.** Механизированная крепь с принудительным выпуском угля из подкровельной толщи // ГИАБ. — 2003. — № 11.
8. **Клишин В. И., Фокин Ю. С., Кокоулин Д. И.** Разработка мощных метанонасыщенных угольных пластов при совместной добыче угля и газа / Научно-техническое обеспечение горного производства: материалы Междунар. науч.-практ. конф. “Горные науки Республики Казахстан — итоги и перспективы”. Ч. 1. Т. 68. — Алматы, 2004.
9. **Клишин В. И., Опрук Г. Ю.** Расчет газовыделения в очистном забое в системах разработки подэтажными штреками “крепь – штрек” // Вестн. КузГТУ. — 2012. — № 6.
10. **Stanislaw Gajos, Tadeusz Lamot and Marek Urbas.** Experience and practical aspects of utilizing a shrinkage method of extraction at “Kazimierz-Juliusz” coal mine in Sosnowiec, Proceedings of the 5th International Mining Forum, New technologies in underground mining, Safety in mines, Cracow – Szczyrk – Wieliczka, Poland, 24-29 February 2004.
11. **Дубынин Н. Г.** Механика выпуска сыпучих тел / Совершенствование технологий разработки рудных месторождений подземным способом: сб. тр. ИГД СО АН СССР / под ред. чл.-кор. АН СССР Н. А. Чинакала. — М.: Недра, 1965.
12. **Стажевский С. Б.** Об особенностях течения раздробленных горных пород при добыче руд с подэтажным обрушением // ФТПРПИ. — 1996. — № 5.
13. **Хан Г. Н.** О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физ. мезомеханика. — 2008. — Т. 11. — № 1.
14. **Барях А. А., Русин Е. П., Стажевский С. Б., Федосеев А. К., Хан Г. Н.** К вопросу о напряженно-деформированном состоянии областей, подверженных карстогенезу // ФТПРПИ. — 2009. — № 6.
15. **Hirshfeld D., Rapaport D. C.** Granular flow from a silo: Discrete-particle simulations in three dimensions, The European Physical Journal E, 2001, Vol. 4, Issue 2.
16. **Клишин С. В., Клишин В. И.** Исследование процессов выпуска угля при отработке мощных пологих и крутых угольных пластов // ФТПРПИ. — 2010. — № 2.

Поступила в редакцию 6/ХІ 2013